

Diagnostic de pile à combustible par magnéto-tomographie : modélisation et optimisation

Antony PLAÏT¹, Frédéric DUBAS², Christophe TURPIN¹

¹LAPLACE, Toulouse INP, CNRS, UT, Toulouse, France

²Université Marie et Louis Pasteur, UTBM, CNRS, Institut FEMTO-ST, F-90010 Belfort, France

RESUME – Le diagnostic des piles à combustible (PàC) permet de suivre leur état de santé. Pour ce faire, la magnéto-tomographie de PàC, qui repose sur la mesure du champ magnétique à proximité de celles-ci et sur la reconstruction des densités de courant, est une méthode prometteuse. De nouvelles PàC ont été acquises par le laboratoire LAPLACE, mais leur géométrie complexe rend le diagnostic plus difficile. Une comparaison entre un modèle utilisant les éléments finis et un modèle analytique basé sur la méthode de Biot & Savart a été réalisée. Le modèle analytique a été validé, car la différence entre les deux modèles est inférieure à 2 %. Le modèle inverse, utilisé pour la reconstruction des densités de courant à partir des mesures magnétiques, présente une erreur moyenne inférieure à 3 %. Enfin, l'étude porte également sur la possibilité de réduire le nombre de capteurs, en évaluant la pertinence d'une mesure du champ magnétique le long d'un unique chemin rectiligne.

Mots-clés—Magnéto-tomographie, diagnostic, modèle inverse, optimisation, sondes à effets Hall.

1. INTRODUCTION

Les systèmes pile à combustible (PàC) représentent une solution prometteuse pour répondre à la demande croissante de systèmes énergétiques plus respectueux de l'environnement [1]. Le développement de ces systèmes nécessitera une amélioration de leur durée de vie et une meilleure maîtrise et compréhension des phénomènes de vieillissement des PàC [2]. Pour cela, un diagnostic peut être réalisé et s'avère utile pour le suivi du comportement des PàC. Ce diagnostic peut être effectué par l'analyse de la distribution du courant au sein des différentes cellules constituant un stack. Il existe des méthodes intrusives et non intrusives pour ce type d'analyse. La méthode non intrusive utilisée repose sur la mesure du champ magnétique généré par la PàC, associée à un modèle inverse. Le diagnostic des PàC par mesure de champ magnétique est une approche relativement bien documentée dans la littérature [3]-[14]. Néanmoins, les travaux antérieurs se sont majoritairement concentrés sur des PàC de forme carrée [5]-[14], ou rectangulaire avec un faible rapport longueur/hauteur [3]-[4], et sur des surfaces actives modestes (jusqu'à 100 cm^2) [4]-[14]. Dans cette étude, une technologie différente est explorée, caractérisée par une géométrie rectangulaire spécifique (« allongée ») et avec une surface active plus importante ($w \times l = 56 \times 5 = 280 \text{ cm}^2$).

L'objectif est d'évaluer la possibilité de mesurer le champ magnétique uniquement le long d'un chemin rectiligne adjacent à la PàC, afin de réduire le nombre de capteurs nécessaires. Une telle approche permettrait la conception d'un système de

diagnostic universel, indépendant de la géométrie de la PàC, capable de fournir une cartographie précise des densités de courant, tout en maintenant un coût de mesure et d'acquisition raisonnable.

Dans la première partie de cet article, la PàC étudiée sera présentée, ainsi que la modélisation mise en place pour analyser sa signature magnétique. Un modèle analytique, basé sur la méthode de Biot & Savart, sera comparé à un modèle numérique utilisant les éléments finis, afin d'en valider sa précision. Enfin, un modèle inverse sera utilisé pour démontrer la capacité à reconstruire la distribution interne des densités de courant à partir des mesures de champ magnétique.

2. DESCRIPTION DE LA PILE A COMBUSTIBLE

La PàC étudiée est un stack acheté à la société SINOSYNERGY [15] (voir Fig. 1). Ce modèle 9SSL se distingue par un refroidissement liquide, une durée de vie supérieure à 20 000 h et une réponse dynamique rapide. Ces stacks sont intégrés dans des véhicules, notamment des bus urbains à hydrogène, démontrant leur efficacité et leur fiabilité dans des applications de transport.



Fig. 1. Stack 9SSL SINOSYNERGY [15].

Comme mentionné dans l'introduction, cette PàC possède une forme allongée et une surface active de taille intermédiaire (280 cm^2). Sa puissance est ajustable en fonction du nombre de cellules, allant de 5 à 37 kW. Dans cette étude, le stack est composé de 25 cellules pour une puissance de 5kW. L'ensemble des paramètres utiles à la modélisation sont répertoriés dans le Tableau 1.

Il s'agira donc de modéliser une cellule de cette PàC en identifiant concrètement la surface active et le positionnement des sondes à effet Hall autour de la PàC.

Tableau 1. Paramètres du Stack 9SSL SINOSYNERGY.

Paramètre	Valeur
Nombre de cellules	25
Poids	6,7 kg
Hauteur	60 mm
Longueur	760 mm
Profondeur	103 mm
Puissance	5 kW
Densité de courant	$\leq 1,5 \text{ A/cm}^2$
Durée de vie	$> 20\,000 \text{ h}$

Une plaque bipolaire de ce stack peut être observée en Fig. 2. La surface active y est mise en évidence par un encadré rouge. Sur les côtés, on distingue les connexions fluidiques assurant la distribution de l'hydrogène, de l'air et du liquide de refroidissement. On remarque également la présence d'encoches destinées au positionnement des joints, assurant le maintien mécanique et l'étanchéité tout autour de la surface active.

Comme précisé dans l'introduction et dans la présentation du principe général, la mesure de champ magnétique doit être réalisée en périphérie du stack. Il est cohérent de positionner les sondes à effet Hall au plus proche de la surface active, sans toutefois entrer en contact avec le composant. Le chemin de mesure du champ magnétique est indiqué en Fig. 2, celui-ci est situé à 5 mm du composant et les mesures sont effectuées à intervalles réguliers le long de ce chemin. Dans une démarche d'optimisation du nombre de capteurs, il semble pertinent et rigoureux de limiter les mesures à une seule direction longitudinale, d'autant plus que la hauteur de la surface active de la PàC est très inférieure à sa longueur (rapport de 1/11).

Cette approche ne doit cependant pas compromettre la qualité des mesures, ni altérer la reconstruction des densités de courant, celle-ci étant fortement dépendante de la précision des mesures magnétiques.

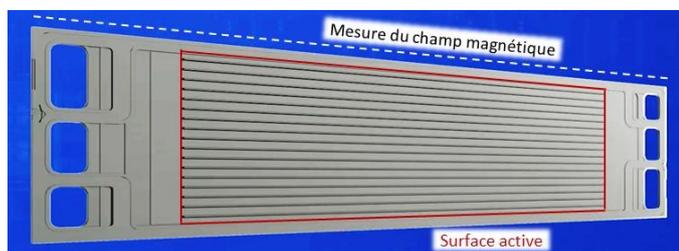


Fig. 2. Plaque bipolaire d'un stack 9SSL SINOSYNERGY [15].

3. MODÉLISATION MAGNÉTOSTATIQUE

En connaissant la distribution de la densité de courant au sein de la PàC, il est possible d'estimer avec précision la distribution du champ magnétique généré autour de celle-ci. Inversement, en résolvant un problème inverse, on peut également déduire la distribution des densités de courant à partir du champ magnétique mesuré.

Plusieurs approches sont possibles et peuvent donc être envisagées. Un modèle numérique permet de simuler le champ magnétique généré en fonction de la distribution des densités de courant. Cependant, un modèle analytique s'avère indispensable pour résoudre le problème inverse et obtenir la distribution des densités de courant à partir du champ magnétique mesuré.

3.1. Modélisation numérique – Logiciel FEMM©

Ce modèle a été réalisé à l'aide du logiciel FEMM©. Les principaux composants de la PàC sont représentés, et son comportement magnétique est analysé en détail. La Fig. 3 met en évidence les éléments caractéristiques, notamment la zone active de la PàC, subdivisée en 90 éléments (discrétisation de 3×30). Les lignes équipotentielles du champ magnétique sont également représentées. Celles-ci ont été obtenues pour une distribution homogène des densités de courant, fixée à $1,5 \text{ A/cm}^2$ (correspondant à 420 A).

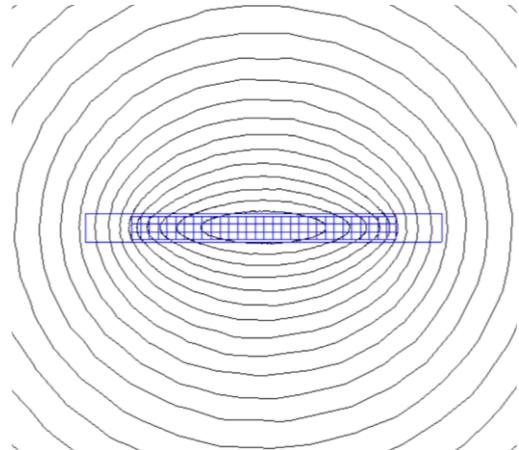


Fig. 3. Plaque bipolaire modélisée sous le logiciel FEMM© avec une observation des lignes équipotentielles du champ magnétique (sans défaut).

Les lignes équipotentielles mettent en exergue qu'il est pertinent de privilégier la mesure du champ magnétique généré, sur la longueur de la PàC, où la signature magnétique est plus significative, contrairement à la faible hauteur de la cellule (5 cm). Dans le cas d'une distribution homogène du courant, on observe une symétrie autour de la PàC modélisée, traduite par une évolution concentrique des lignes de champ magnétique.

Il peut maintenant être utile de comparer cette configuration à celle obtenue en présence d'un défaut localisé, introduit ici au centre de la surface active. Une zone sans courant, représentant 13 % de la surface totale, a été simulée. Pour maintenir un courant total constant de 420 A, la densité de courant sur le reste de la pile (87 % de la surface) est portée à $1,73 \text{ A/cm}^2$. Bien que cet exemple constitue un cas extrême, il illustre de manière claire la déformation des lignes équipotentielles, mettant en évidence l'impact significatif qu'un défaut local peut avoir sur la signature magnétique globale.

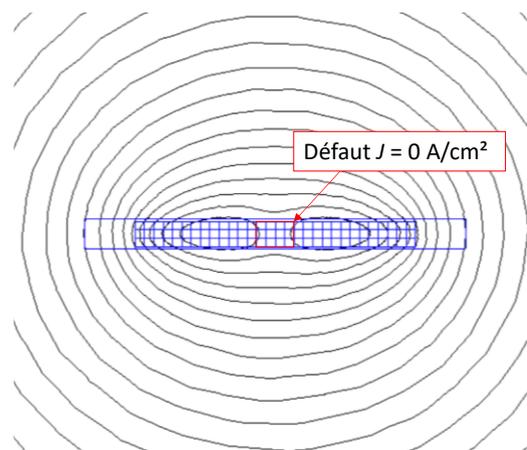


Fig. 4. Plaque bipolaire modélisée sous le logiciel FEMM© avec une observation des lignes équipotentielles du champ magnétique (avec défaut).

3.2. Modélisation analytique – Méthode de Biot & Savart

La distribution du champ magnétique autour d'une cellule de la PàC a été étudiée à l'aide d'un modèle basé sur la méthode de Biot & Savart, résolue dans un système de coordonnées cartésiennes.

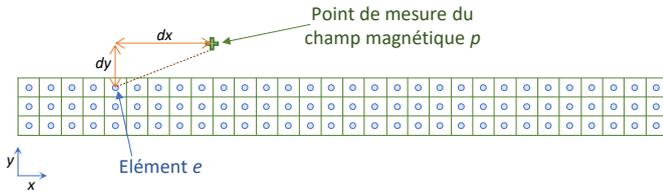


Fig. 5. Discrétisation et schématisation de la cellule de PàC pour la méthode de Biot & Savart.

Dans le cas de courants volumétriques répartis de manière non concentrée comme c'est typiquement le cas dans une PàC réelle, le champ magnétique généré en périphérie de la cellule peut être déterminé par la superposition des champs magnétiques produits par un ensemble de courants discrets. La Fig. 5 illustre une discrétisation de la surface active de la cellule en 90 segments distincts. Il est supposé que chaque segment soit parcouru par un courant inconnu, modélisé comme étant localisé au centre géométrique du segment. La somme de ces 90 courants représente le courant total de la cellule. L'objectif est alors de reconstruire les intensités individuelles de ces 90 courants uniquement à partir des mesures du champ magnétique externe.

$$H_{x,p}^e = \frac{I_e}{2\pi\sqrt{dx^2 + dy^2}} \sin\left(\text{atan}\frac{dy_{e,p}}{dx_{e,p}}\right) \quad (1)$$

$$H_{y,p}^e = \frac{I_e}{2\pi\sqrt{dx^2 + dy^2}} \cos\left(\text{atan}\frac{dy_{e,p}}{dx_{e,p}}\right) \quad (2)$$

$$H_{x,p} = \sum_e H_{x,p}^e \quad (3)$$

$$H_{y,p} = \sum_e H_{y,p}^e \quad (4)$$

où H représente le champ magnétique [A/m], I représente le courant électrique [A], dx et dy représentent la distance entre le point central du courant électrique et l'emplacement de la mesure du champ magnétique [m], respectivement en x et en y . Concernant les indices, e désigne l'indice des 90 éléments discrétisés de distribution de courant, tandis que p correspond à l'indice des points de mesure.

Les équations (1) et (2) décrivent la relation du champ magnétique H_x et H_y au point de mesure p , avec les courants discrétisés I_e .

On suppose ici que chaque capteur utilisé permet de mesurer l'intensité des 2 composantes du champ magnétique en chaque point de mesure. Les relations entre le champ magnétique et les courants peuvent être exprimés sous forme matricielle, comme indiqué en équation (5). Dans cette équation, il est considéré que les n valeurs du champ magnétique correspondent à la composante tangentielle H_x , mesurées en n positions distinctes autour de la PàC.

$$\begin{pmatrix} H_{x,1} \\ \vdots \\ H_{x,n} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \cdots & C_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n,1} & \cdots & C_{n,m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

3.3. Comparaison numérique et analytique

La comparaison des résultats du champ magnétique est réalisée pour les deux modèles, et pour les deux distributions de densités de courant illustrées sur la Fig. 6. Une première situation correspond à une PàC saine, la distribution des densités de courant est alors homogène, uniformément répartie sur toute la surface active (avec $J = 1,5$ A/cm² puisque le courant total est fixé à 420 A). La seconde situation représente un cas défectueux, dans la zone indiquée par un hachurage rouge, la densité de courant est réduite à 0,5 A/cm². En conséquence, pour maintenir le courant total constant, la densité de courant sur le reste de la surface active augmente et atteint 1,68 A/cm².

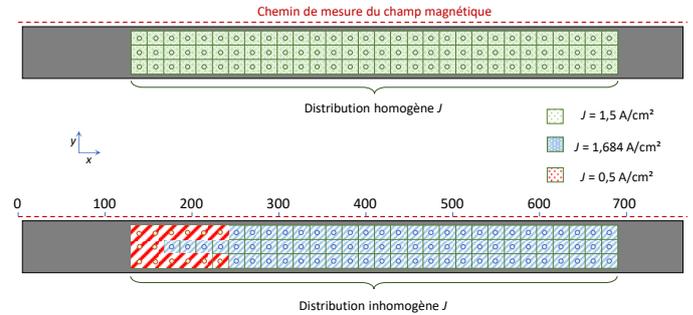


Fig. 6. Discrétisation de la plaque bipolaire sans défaut (haut) et avec défaut (bas).

Les résultats du champ magnétique ont été évalués le long du même chemin de mesure illustré en Fig. 2 et Fig. 6. Les deux composantes du champ magnétique (normale H_y et tangentielle H_x) sont représentées conjointement sur les figures afin de faciliter l'analyse comparative. La Fig. 7 expose les résultats du champ magnétique dans le cas d'une distribution de courant homogène.

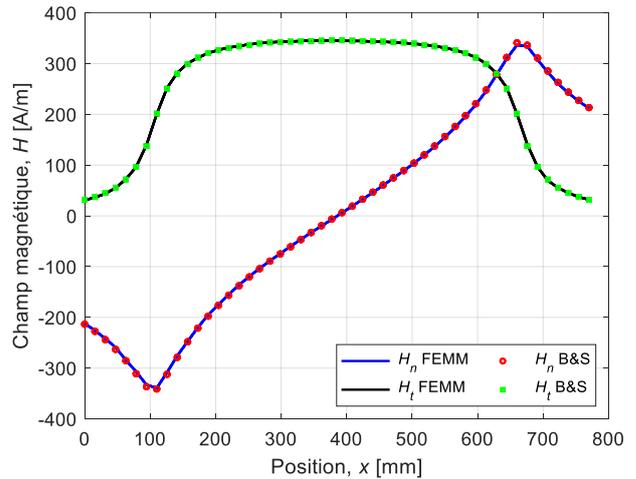


Fig. 7. Comparaison du champ magnétique dans le cas d'une cellule saine ($H_y = H_n$ et $H_x = H_t$).

En fonction de la position du point de mesure, une évolution cohérente du champ magnétique est observée. La composante tangentielle au chemin de mesure (H_x) augmente à l'approche du centre de la cellule, atteignant une amplitude quasi constante sur une grande portion de la longueur, avant de décroître pour revenir à sa valeur initiale. Dans une situation « normale », on observe une symétrie des deux composantes du champ magnétique par rapport au point milieu, une symétrie directe pour (H_x) et une symétrie inversée pour (H_y).

Les résultats du champ magnétique pour une distribution inhomogène des densités de courant, simulant une cellule défaillante, sont présentés en Fig. 8. La distribution des densités de courant considérées dans ce cas correspond à celle décrite précédemment (cf. Fig. 6), où une zone localisée présente une densité réduite, tandis que le reste de la surface active compense cette réduction afin de maintenir un courant total constant.

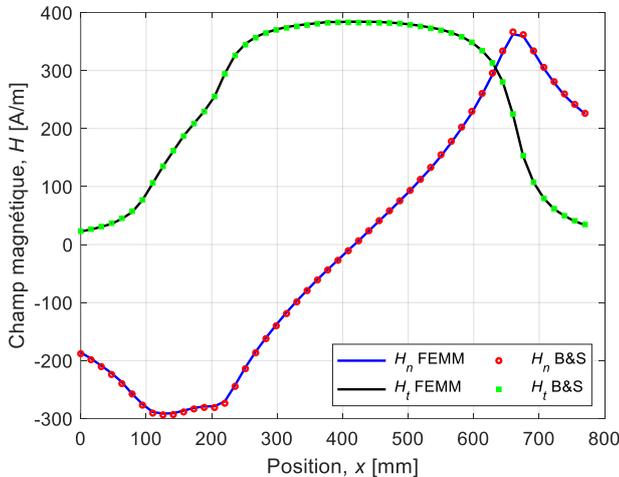


Fig. 8. Comparaison du champ magnétique dans le cas d'une cellule défaillante ($H_y = H_n$ et $H_x = H_t$).

La déformation du champ magnétique est observable sur les deux composantes, ce qui se traduit par une dissymétrie des courbes. Une diminution locale du champ magnétique est observée au niveau des points de mesure situés à proximité du défaut ($80 \text{ mm} < x < 300 \text{ mm}$), tandis que l'amplitude globale du champ magnétique tend à augmenter en raison du maintien constant du courant total.

Chaque distribution des densités de courant génère une signature magnétique caractéristique, permettant d'évaluer l'état de santé d'une cellule de la PàC. Pour les deux cas étudiés, une excellente concordance du champ magnétique est observée, avec une erreur relative inférieure à 2 %. Le modèle analytique, permettant de prédire l'évolution du champ magnétique à partir d'une distribution des densités de courant, est ainsi validé. Il permettra de réaliser une reconstruction des densités de courant précise, compte tenu de la fiabilité des résultats.

4. MODELE INVERSE

L'intérêt de la magnéto-tomographie dans le cadre du diagnostic de PàC réside dans sa capacité à estimer la distribution des densités de courant à partir des mesures du

champ magnétique réalisées à la périphérie de la cellule. Pour ce faire, un modèle inverse est indispensable car il permet de remonter aux densités de courant, à partir de la relation les liant au champ magnétique.

L'inversion de l'équation permet d'obtenir les e courants inconnus I_e à partir de la distribution du champ magnétique mesurée H . Cependant, la nature du problème conduit à une matrice C dite mal conditionnée. Une inversion directe de cette matrice en l'absence de traitement spécifique, conduit à des erreurs importantes sur les courants estimés dès lors que les données de mesure sont entachées d'erreurs, comme c'est inévitablement le cas dans un contexte expérimental.

Dans ce type de problème inverse, la moindre perturbation des données peut entraîner des résultats instables et non exploitables. Il est donc indispensable d'introduire une régularisation pour stabiliser la solution. Une régularisation de Tikhonov est utilisée ici afin d'extraire des informations fiables sur les courants à partir du système d'équations. Cette approche permet de compenser l'instabilité du problème, au prix d'un compromis : la distribution exacte de la densité de courant ne peut pas être reconstituée, mais une estimation réaliste et exploitable peut être obtenue.

4.1. Cas d'étude

Plusieurs estimations ont été réalisées en considérant des distributions aléatoires mais réalistes du champ magnétique afin d'évaluer les performances du modèle inverse.

Dans un premier cas d'étude, il est pertinent d'examiner la cohérence du modèle dans des conditions de fonctionnement normales. En considérant une PàC en début de vie, il peut être raisonnablement supposé que la distribution des densités de courant est homogène. Le champ magnétique correspondant a été généré à l'aide du modèle direct, auquel une erreur a été artificiellement introduite afin de simuler les incertitudes associées aux mesures expérimentales, notamment celles liées aux capteurs. Dans cette étude, les caractéristiques des capteurs SS94A1F de la marque Honeywell [16] ont été prises en compte.

La Fig. 9 expose la distribution de courant attendue en (a) et la distribution reconstruite en fonction du champ magnétique perturbé en (b). Comme prévu, une distribution homogène des densités de courant est attendue. Toutefois, les erreurs générées entraînent de légères déviations dans la reconstruction. La régularisation appliquée aux données permet néanmoins d'obtenir une estimation cohérente de la distribution des densités de courant. L'erreur relative a été calculée pour chaque élément discrétisé, l'erreur maximale atteint environ 3 %, tandis que l'erreur moyenne reste faible, à seulement 0,75 %.

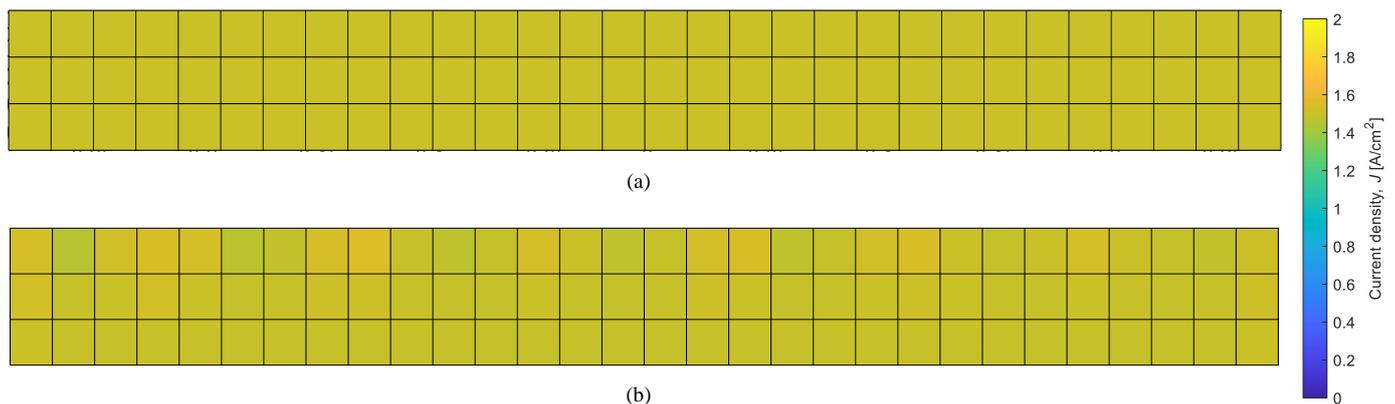


Fig. 9. Comparaison de la distribution homogène des densités de courant dans le cas d'une cellule dite « saine ».

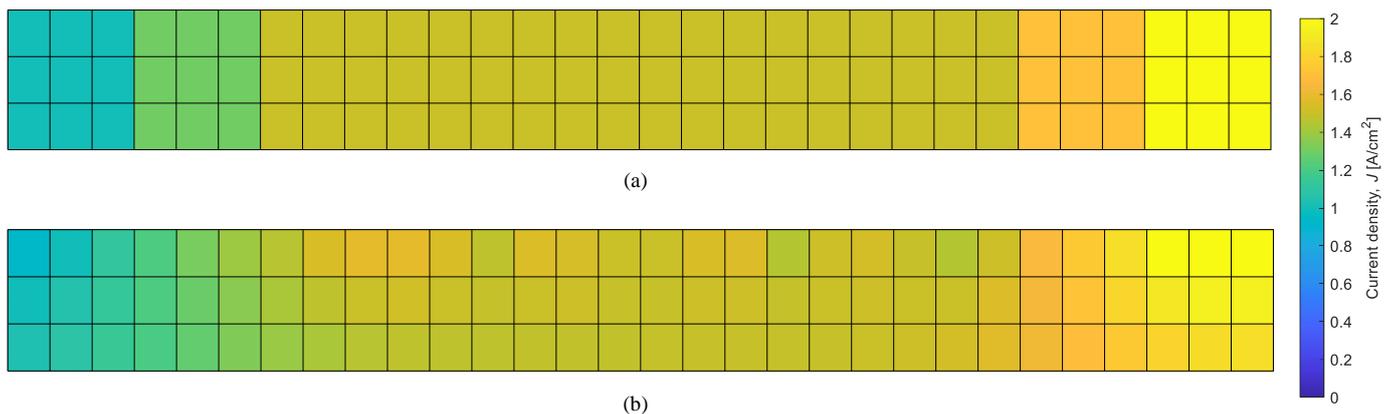


Fig. 10. Comparaison de la distribution inhomogène des densités de courant dans le cas d'une cellule dite « défective ».

Dans un second cas d'étude, une distribution inhomogène des densités de courant dans la PàC est considérée. L'objectif est d'évaluer la cohérence du modèle lorsque la PàC fonctionne dans des conditions dites anormales. En considérant une cellule présentant une défectivité, une distribution inhomogène des densités de courant est introduite, avec des variations significatives sur la longueur de la PàC. Le champ magnétique correspondant a été généré à partir du modèle direct, avec l'ajout d'erreurs artificielles simulant les incertitudes de mesure rencontrées expérimentalement.

La Fig. 10(a) présente la distribution des densités de courant imposée, spatialement inhomogène mais cohérente avec une distribution réaliste des gaz. Sur le côté gauche de la PàC, la densité de courant est inférieure à celle observée au centre de la cellule, tandis qu'elle augmente à l'extrémité droite afin de maintenir le courant total constant. Plus précisément :

- 10 % de la surface active présentent une densité de courant de 1 A/cm²,
- 10 % avec 1,25 A/cm²,
- 60 % (partie centrale) conserve une densité uniforme de 1,5 A/cm²,
- 10 % atteignent 1,75 A/cm²,
- 10 % restants montent à 2 A/cm².

La Fig. 10(b) expose la distribution reconstruite des densités de courant à partir des données magnétiques. On observe clairement une augmentation progressive de la densité de courant de la gauche vers la droite, en accord avec la dynamique des gaz et la géométrie de la PàC. L'écart entre la distribution réelle et reconstruite reste globalement faible, confirmant la bonne performance du modèle inverse. L'erreur maximale, localisée principalement aux zones de transition rapide, est d'environ 10 %, tandis que l'erreur moyenne est de 3 %. La cartographie reconstruite restitue correctement le gradient longitudinal des densités de courant, avec peu de variations verticales. Ces résultats valident la capacité du modèle à fournir une estimation fiable de la distribution des densités de courant dans des conditions non nominales, démontrant ainsi sa robustesse pour des applications de diagnostic indirect.

4.2. Analyses et discussions

Pour une PàC présentant des dimensions géométriques spécifiques, il est nécessaire d'adapter la stratégie de mesure afin de répondre aux exigences de la magnéto-tomographie. Plutôt que de mesurer le champ magnétique sur l'ensemble de la périphérie, comme souvent proposé dans la littérature, il peut être judicieux de limiter les mesures uniquement à la longueur de la PàC. Cette approche présente à la fois des avantages et des limitations.

Dans le cas d'une PàC dite « allongée », comme celle étudiée (dont la longueur est onze fois supérieure à la hauteur, avec une surface active de $w \times l = 56 \times 5 = 280 \text{ cm}^2$), cette configuration permet de simplifier considérablement l'architecture du système de mesure. L'un des principaux bénéfices réside dans la réduction du nombre total de capteurs nécessaires, ce qui diminue le coût global du système de mesure. Cela concerne non seulement les capteurs, souvent coûteux lorsqu'ils doivent être sensibles à plusieurs composantes du champ magnétique, mais aussi l'électronique associée (acquisition, amplification, synchronisation). Cette simplification matérielle facilite le déploiement de campagnes expérimentales à plus grande échelle, ou leur adaptation à des environnements contraints, comme des bancs de test dynamiques ou des systèmes embarqués.

Cependant, cette approche présente des limitations en termes de reconstruction des densités de courant. Bien que deux composantes du champ magnétique soient mesurées, leur acquisition limitée à un chemin unique, situé le long de la longueur de la PàC, rend le problème inverse partiellement mal posé. En effet, plusieurs configurations de courant peuvent conduire à des signatures magnétiques similaires, rendant l'inversion non unique et potentiellement instable. Pour pallier cela, des hypothèses supplémentaires sur la distribution des courants (symétries, planéité, bornes physiques, etc.) peuvent être introduites pour stabiliser le processus de reconstruction.

L'analyse des cas d'étude précédents montre qu'il est possible d'identifier de manière fiable des tendances longitudinales de variation de la densité de courant. Toutefois, la problématique de cette configuration géométrique implique une information magnétique bien moins consistante sur la hauteur que pour les PàC carrées ou légèrement rectangulaires. Ainsi, des inhomogénéités verticales, telles que des défauts de contact latéraux ou des zones partiellement inactives, risquent de ne pas être détectées, ou d'apparaître de manière ambiguë dans les résultats inversés. Pour remédier à cela, il serait

possible d'ajouter des mesures supplémentaires, améliorant la reconstruction des courants dans les deux dimensions.

Enfin, il serait bénéfique de coupler les mesures magnétiques avec d'autres données expérimentales (température, pression, humidité...) ou encore avec des simulations numériques. Une telle approche multi-physique permettrait une interprétation plus robuste des résultats et une localisation plus précise des anomalies, renforçant l'efficacité du diagnostic.

5. CONCLUSIONS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des PàC et du suivi de leur état de santé, avec pour objectif de mieux caractériser leur vieillissement. La géométrie particulière de la PàC étudiée, de forme allongée, se distingue des configurations conventionnelles plus compactes (carrées ou légèrement rectangulaires) rendant le processus de diagnostic plus complexe. Une attention particulière a été portée à l'impact de la réduction du nombre de capteurs en limitant la mesure du champ magnétique à un seul chemin situé le long de la PàC.

Dans un premier temps, un modèle analytique, basé sur la méthode de Biot & Savart, a été développé et validé par comparaison avec les résultats obtenus via un modèle par éléments finis. Les deux approches présentent une très bonne concordance, avec une erreur relative inférieure à 2 %, confirmant la robustesse du modèle analytique pour la prédiction du champ magnétique à partir d'une distribution de densité de courant donnée.

Dans un second temps, un modèle inverse a été mis en œuvre afin d'estimer la distribution des densités de courant à partir des mesures de champ magnétique. Les performances du modèle inverse sont également satisfaisantes : l'erreur moyenne d'estimation est inférieure à 3 % pour les cas d'étude analysés, démontrant ainsi la pertinence de la méthode de reconstruction, même dans un contexte de mesures bruitées.

La stratégie de mesure adoptée, basée sur un chemin rectiligne unique offre plusieurs avantages dans le cas d'une PàC allongée : réduction du nombre de capteurs, simplification de l'électronique associée, et possibilité de déploiement plus aisé sur des systèmes en fonctionnement réel. Néanmoins, cette simplification impose une régularisation plus contraignante du problème inverse et limite la capacité à détecter certaines inhomogénéités verticales ou latérales. Malgré cela, l'outil développé permet une évaluation rapide et fiable de la distribution longitudinale des courants, utile notamment pour détecter des défauts locaux de compression ou des déséquilibres dans l'alimentation en gaz.

Dans la continuité de ces travaux, il serait pertinent de valider expérimentalement cette approche à l'échelle d'un stack. L'outil proposé pourrait ainsi être utilisé pour le suivi des performances, l'évaluation de l'état de santé, et la détection précoce de signes de vieillissement. Cet outil peut permettre de comprendre et de mieux gérer les phénomènes réversibles des PàC.

6. REFERENCES

- [1] D. Hissel, M. Cassir, C. Lamy, G. Taillades, Systèmes de piles à combustible - Applications stationnaires et mobilités terrestres, *Techniques de l'ingénieur*, Réf : D3343 v1, 2024.
- [2] C. Lorenzo, D. Bouquain, S. Hibon and D. Hissel, "Synthesis of degradation mechanisms and of their impacts on degradation rates on proton-exchange membrane fuel cells and lithium-ion nickel-manganese-cobalt batteries in hybrid transport applications". *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2021, 212:107369.
- [3] K.H. Hauer, R. Potthast, T. Wüster and D. Stolten, "Magneto-tomography-a new method for analysing fuel cell performance and quality," *Journal of Power Source*, 2005, vol. 143, no. 1, pp. 67-74.
- [4] Y. Akimoto, K. Okajima, and Y. Uchiyama, "Evaluation of Current Distribution in a PEMFC using a Magnetic Sensor Probe," *Energy Procedia*, 2015, vol. 75, pp. 2015-2020.
- [5] M. Le Ny, O. Chadebec, G. Cauffet, Y. Bultel, S. Rosini, Y. Fourneron, and P. Kuo-Peng, "Current distribution identification in fuel cell stacks from external magnetic field measurements.," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 1925-1928.
- [6] M. Le Ny, O. Chadebec, G. Cauffet, S. Rosini, Y. Bultel, "PEMFC stack diagnosis based on external magnetic field measurements," *J. Appl. Electrochem*, 2015, vol. 45, pp. 667-677.
- [7] T. Nara, M. Koike, S. Ando, Y. Gotoh, and M. Izumi, "Estimation of localized current anomalies in polymer electrolyte fuel cells from magnetic flux density measurements," *AIP Adv.*, 2016, vol. 6, 056603.
- [8] L. Ifrek, O. Chadebec, S. Rosini, G. Cauffet, Y. Bultel and B. Bannwarth, "Fault Identification on a Fuel Cell by 3-D Current Density Reconstruction From External Magnetic Field Measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, Art no. 6200705.
- [9] A. Plait, S. Giurgea, D. Hissel, and C. Espanet, "New magnetic field analyzer device dedicated for polymer electrolyte fuel cells noninvasive diagnostic," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, no. 27, pp. 14071-14082.
- [10] A. Plait and F. Dubas, "A 2D Multi-Layer Model to Study the External Magnetic Field Generated by a Polymer Exchange Membrane Fuel Cell," *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 3883.
- [11] A. Bawab, S. Giurgea, D. Depernet, M. Gantzer, F. Harel, and D. Hissel, "Proton Exchange Membrane Fuel Cells non-invasive data-based diagnosis through a new external magnetic field measurement methodology," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol.67, pp. 91-100.
- [12] L. Freisem, O. Chadebec, G. Cauffet, Y. Bultel and S. Rosini, "Fuel Cell Stack Magnetic Tomography with Adjoint Method," *IEEE 21st Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Jeju, Republic of Korea, 2024, pp. 1-2.
- [13] E. Atsumi, E. Choi, S. Yamaguchi and Y. Okamoto, "Development of MR-Sensor-Based Measurement System for Weak Magnetic Field Derived From Fuel Cell and its Application to Inverse Estimation of Current Density Distribution," *IEEE 21st Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Jeju, Republic of Korea, 2024, pp. 1-2.
- [14] K. Kawada, R. Takasugi, Y. Gotoh, M. Izumi and T. Nara, "Estimation of power generation current distribution in Polymer electrolyte fuel cell using multiple magnetic field sensors," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Glasgow, United Kingdom, 2024, pp. 1-6.
- [15] SINOSYNERGY, <https://www.sinosynergypower.com/index.html>, visited on January 2025.
- [16] Honeywell, Solid State Sensors SS94A Series, Analog Position Sensors, SS94A1F sensor.