

# Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe : vers la détermination de défauts locaux

Lyes Ifrek

### ► To cite this version:

Lyes Ifrek. Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe : vers la détermination de défauts locaux. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAT076 . tel-01744201

## HAL Id: tel-01744201 https://theses.hal.science/tel-01744201

Submitted on  $27~\mathrm{Mar}~2018$ 

**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.

## Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

# THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Génie électrique

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

## Lyes IFREK

Thèse dirigée par **M. Gilles CAUFFET** et Codirigée par **M. Olivier CHADEBEC** et **M. Yann BULTEL** 

Préparée au sein du LEPMI et du G2Elab Dans l'École Doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications

# Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe. « Vers la détermination de défauts locaux »

Thèse soutenue publiquement le **20 novembre 2017**, Devant le jury composé de :

M. Daniel HISSEL Professeur des Universités, Belfort, Président M. Noël BURAIS Professeur des Universités, Lyon, Rapporteur **M. Lionel PICHON** Directeur de recherche CNRS, Paris, Rapporteur M. Gilles CAUFFET Maître de Conférences, Grenoble, Examinateur M. Yann BULTEL Professeur des Universités, Grenoble, Examinateur **M. Sébastien ROSINI** Ingénieur CEA, Grenoble, Examinateur M. Olivier CHADEBEC Directeur de recherche CNRS, Grenoble, Invité M. Luc ROUVEYRE Ingénieur SymbioFCell, Le Bourget-du-Lac, Invité



#### Remerciements

Ce travail est sans doute l'expérience la plus enrichissante scientifiquement est humainement pour moi car il a m'a permis de rencontrer plein de personnes d'horizons et de disciplines différentes qui m'ont marqué chacun à sa manière par leur sympathie, leur serviabilité et leur bonne humeur.

De ce fait, le boulot qui a été fourni est mené à bien grâce à toutes les personnes que j'ai côtoyé de près ou de loin/ au travail et en dehors du travail, pendant cette période de trois ans.

Pour commencer je tiens à remercier M. Daniel Hissel et M. Abdollah Mirzaian deux de mes professeurs pendant mon master pour m'avoir recommandé pour faire une thèse à Grenoble. J'ai beaucoup appris de vous que ce soit en cours ou bien en stage de fin d'études.

Je remercie également les membres de mon encadrement avec lesquels j'ai passé la plupart de mon temps pendant ces trois ans que ce soit en réunion, en manip ou bien au bureau.

Je commence par M. Gilles Cauffet, mon directeur de thèse et enseignant chercheur au G2Elab. Je n'oublierais pas ta disponibilité pour parler d'instrumentation, de bruit de mesure et des différents scénarios qu'on a imaginé pour valider les modèles. Outre cette aspect scientifiques, tu as été disponible pour me remonter le moral quand les résultats ne sont pas au RDV et toujours avec la bonne humeur.

Je remercie également M. Sébastien Rosini, ingénieur/docteur au CEA/Liten. Tu as toujours la pertinence qu'il faut dans les réunions pour faire avancer le travail dans le bon sens électrochimique. Je m'excuse quand même pour le nombre impressionnant de mosaïques que tu as vu au fil des réunions qu'on a faite à cause des boucles de courant. Sans oublier ta disponibilité pour

Je remercie M. Yann Bultel, professeur au LEPMI. Tout d'abord de m'avoir fait confiance suite à notre entretien de thèse. Merci pour toute tes explications sur le fonctionnement de la pile et ta réactivité dans la correction du manuscrit.

Enfin, je remercie M. Olivier Chadebec, directeur de recherche CNRS. Merci pour toutes les idées que tu nous as proposé pour faire avancer le travail notamment sur les bases de courant. Merci pour le nombre de fois qu'on a parlé du divJ = 0 sans pour autant avoir l'air de se répéter. Tu as aussi su donner le souffle qu'il faut quand la fatigue et la difficulté sont là. De toute façon comme tu le dit « Tout ce qui ne nous tue pas nous rend plus fort ».

Je passe maintenant aux membres du jury, qui ont suent lire, s'interroger et apprécier ce mémoire.

M. Daniel Hissel professeur des universités à l'université de Franche Comté, encore une fois pour avoir présider ce jury et avoir situé la démarche dans son contexte industriel.

M. Noël Burais professeurs à l'université à l'université de Lyon et M. Lionel Pichon, directeur de recherche CNRS pour avoir lu et rapporté ce mémoire, en apportant toutes les interrogations et les précisions possible pour le rendre pertinent et original.

M. Luc Rouveyre ingénieur/docteur symbio fuel cell, malgré ton abscence, merci pour avoir soutenu ce projet.

Je tiens à remercier toute l'équipe ERT CMF pour l'aide technique que j'ai reçu pour l'installation de la fausse pile et la caractérisation du bruit. Merci Mme. Laure-Line Rouve et Merci M. Olivier Pinaud.

Quelques mots pour le personnel administratif du G2elab qui ont été d'un professionnalisme sans égal dans la gestion des contrats, des problèmes informatiques et la sympathie que vous dégager.

Merci à mes amis du G2Elab et en dehors pour les moments qu'on a passés ensemble et toute l'aide que j'ai reçu de vous, je vous suis reconnaissant. Donc merci Vincent, Merci Savana, Merci Jonhatan, Merci Lucas, Merci Guilherme, Merci Vinicius, Merci Thiago, Merci Mateus, Merci Olivier, Merci Menad, Merci Oualid, Merci Juliana, Merci Poliana, Merci Limin, Merci Tamiris, Merci Thomas, Merci Ahmed, Merci Hakim.

Je remercie particulièrement M. Bertrand Bannwarth ingénieur au G2Elab pour le temps précieux que tu as passé pour débugué MIPSE et toute l'aide pour mettre en place des méthodes nécessaire à ma problématique.

Et puis merci à mes amis d'enfance, Madjid Yahia, Chaouche Farid, Ali Tebib et Rabah Laoufi pour les moments qu'on passe ensemble pendant les vacances pour décompresser.

Je fini par remercier les gens qu'ont toujours été là à partir de ma naissance, mes chères parents Ali et Ouardia, pour tous les sacrifices qu'ils ont fait pour nous afin de nous apporter la meilleure des éducations et nous pousser à réussir. Je remercie également mes frères et sœurs pour leurs soutiens.

> A la mémoire de mes grand-mères Dahbia et Fatima et mon grand-père Moh el aali.

## Table des matières

	I. Introduction générale14
	II. Chapitre I : Introduction et motivations
A.	L'hydrogène une solution pour l'avenir ?18
В.	La pile à combustible19
	1. Description d'une cellule élémentaire PEMFC 22
	a) La membrane
	b) Les couches actives
	c) Les couches de diffusion
	d) Plaques bipolaires
	e) Principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire 25
	(1) Thermodynamique
	(2) Mécanismes de transport des ions et des électrons 28
	f) Courbe de polarisation (Point de fonctionnement) 29
	g) Paramètres de fonctionnement
	(1) Température et pression
	(2) Humidité relative
	(3) Stæchiométrie
	2. Empilement de cellules (stack)
	3. Dégradations
	a) Dégradations réversibles
	(1) Noyage des cellules
	(2) Assèchement de la membrane
	b) Dégradations irréversibles
	(1) Appauvrissement en gaz
	(2) La corrosion du carbone

(3) Dégradation du catalyseur platine
(4) Dégradation de la membrane
(5) Dégradation des GDL
<ul> <li>c) Dégradation et lien avec la distribution locale du couran</li> <li>37</li> </ul>
4. Moyens de diagnostic
a) Invasifs
b) Non-invasifs
(1) Mesure de la pression de fonctionnement
(2) Analyse harmonique
(3) L'échelon et l'interruption du courant
(4) La mesure de la tension de cellule
5. Diagnostic par la mesure du champ magnétique externe 4
a) Principe
b) Avantages
c) Etat de l'art du diagnostic des pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe
C. Conclusion
III. Chapitre II : Modèle direct électrocinétique et calcul du champ magnétique externe
A. Introduction48
B. Modèle électrocinétique en volumes finis48
1. Equation de conduction
2. Ajout d'un terme source à l'équation de conduction 51
C. Modèle électrocinétique en éléments finis52
1. Potentiel électrique scalaire et fonctions de forme nodales 52
2. Potentiel vecteur électrique et fonctions de forme d'arêtes 53

3. Densité de courant et fonctions de forme de facettes 53
a) Discrétisation55
b) Approche circuit électrique équivalent
c) Résolution 56
D. Calcul de la distribution de courant dans une pile saine avec les deux modéles
elEctrocinetiques
E. Décomposition du courant en modes59
1. Remarque préliminaire 59
2. Mode défaut : Pile avec défaut 59
3. Mode commun : Pile saine 60
4. Mode différentiel : Boucle de courant
5. Conclusion sur la décomposition du courant en modes 61
F. Modèle magnétostatique62
1. Positions et orientations des capteurs magnétiques 64
a) Orientation des capteurs magnétiques et choix des composantes à mesurer
b) Positions des plans de capteurs le long de la pile 66
<ol> <li>Signature magnétique d'une pile fonctionnant de manière idéale.</li> </ol>
3. Simulation du champ magnétique dans le cas d'un défaut s'étendant à l'ensemble de la pile et dans le cas d'un défaut localisé sur quelques cellules
a) Défaut 2D : Global 69
b) Défaut 3D : Local
4. Conclusion sur les défauts
G. Comparaison entre des mesures numériques et des mesures réelles72
1. Description du dispositif expérimental de mesure du champ magnétique 72
a) Plan de capteurs

	b) Baie de conditionnement	73
	c) Système d'acquisition	74
	2. Bruits et erreurs de mesure	74
	3. Simulateur de pile en bloc de graphite	75
	a) Répétabilité de la mesure du mode commun	77
	b) Mesure du mode différentiel	78
Н.	Conclusion sur le modele direct	79
	IV. Chapitre III : Modèle Inverse	82
A.	Introduction	84
В.	Généralités sur les problemes inverses	84
	1. Le caractère mal-posé des problèmes inverses :	85
	2. Quelques applications des problèmes inverses	85
	a) Diffusion des polluants	85
	b) Sciences de la terre	85
	c) Tomographie	85
	d) L'identification d'aimantation	86
	3. Paramétrisation	86
	4. Spécificités de notre problème inverse :	87
	a) Le caractère stationnaire	87
	b) Le caractère discret	87
	c) Le caractère linéaire	87
	5. Résolution des problèmes inverses linéaires	87
	a) Les moindres carrés	88
	b) Les résolutions directes	88
	(1) La décomposition LU	88
	(2) La décomposition en valeurs singulières	89

	6.	Existence et unicité de la solution9	)1
	7.	Régularisation d'un problème inverse linéaire9	<b>)</b> 1
	a)	) Troncature du spectre	)1
	b)	) Régularisation de Tikhonov	<b>)</b> 2
	8.	Exemple : Reconstruction d'images	)3
C. Modè	le inv	erse en magnétostatique	96
	1.	Rappel sur l'identification de défaut 2D9	96
3D	2.	Base des courants 3D pour l'identification de défaut 2D 99	et
	a)	) Définition de défauts tests en courant 10	)0
	b)	) Erreur relative d'identification 10	)2
	c)	) Les bases de courant développées 10	)3
		(1) Base 2D dupliquée 10	)3
sur	les a	(2) Boucles locales : Potentiel vecteur électrique impos arêtes internes du maillage	sé )7
		(3) Base harmoniques de courant 3D 11	2
		(4) Base des conductivités 11	6
		(5) Conclusion sur les bases de courant 11	9
	3.	Base des champs magnétiques 12	20
	a)	) Projections du champ de défaut sur la base des champs 12	23
	b)	) Base 2D dupliquée 12	24
les ar	c) êtes	) Boucles locales : Potentiel vecteur électrique imposé su internes	ur 25
	<b>d</b> )	) Base harmoniques de courant 3D 12	26
	e)	) Base des conductivités 12	27
	f)	Bilan sur les bases de champ12	28
optimal	4.	Sensibilité au bruit magnétique et paramètre de troncatur 129	re

D. Conclusion
V. Chapitre IV : Validation Expérimentale
A. Validation sur le simulateur de pile à combustible135
1. Protocole de mesure et paramètre de troncature du spectre 135
2. Résultats de la reconstruction de la distribution du courant électrique dans le cas de trois défauts
a) Défaut 2D 138
b) Défaut 3D – a 140
a) Défaut 3D – b 141
3. Conclusion sur les résultats du simulateur de pile 143
B. Validation sur une pile genepac de 100 cellules143
1. Protocoles de mesure
2. Identification de défauts 2D 148
a) Défaut de stœchiométrie d'air
b) Défaut d'humidité relative : Assèchement 150
c) Conclusion sur l'identification des défauts 2D 152
<ul> <li>3. Identification d'un défaut local au sein d'une pile (défaut</li> <li>3D) 153</li> </ul>
a) Défaut 3D sur cinq cellules
a) Défauts combinés : 2D et 3D 156
<ul> <li>b) Identification du Défaut 2D à partir du défauts combinés :</li> <li>2D et 3D 157</li> </ul>
c) Conclusion sur l'indentification des défauts 3D 158
C. Conclusion
VI. Conclusion générale 161
A. Bilan sur le travail effectué161
B. Perspectives pour ameliorer la methode163

	VII. Annexes	166
A.	Annexe A	166
В.	Annexe B	167
C.	Annexe C	168
D.	Annexe D	171
E.	Annexe E	174
	VIII. Bibliographie	177
	IX. Bibliographie personnelle	
A.	Article de journal	
B.	Articles de conférences	

# I. Introduction générale

L'hydrogène est en passe de devenir un vecteur d'énergie incontestable dans la transition énergétique à venir. La place privilégiée qu'occupe l'hydrogène est justifié par son abondance et sa forte densité énergétique par rapport aux sources fossiles conventionnelles. Par ailleurs, l'hydrogène présente un atout plus intéressant encore d'un point de vue environnemental. En effet, les réactions électrochimiques impliquant l'hydrogène ne produisent pas de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, l'application la plus aboutie technologiquement est la pile à combustible sous ses différentes formes. La pile à combustible à membrane à échangeuse de protons (PEM) présente des performances intéressantes pour une application embarquée. Cependant la technologie « pile à combustible » reste impopulaire à cause de son prix très élevé. Les principaux obstacles à un déploiement à grande échelle sont les défaillances souvent prématurées de la pile à combustible. Ces défaillances sont de plusieurs natures (réversibles et irréversibles) et nécessitent des moyens de rétroaction différents.

Dans le but de diagnostiquer ces défauts, plusieurs travaux de recherche sont lancés dans les laboratoires du domaine. Des techniques diverses sont développées et classées selon leurs capacités à ne pas perturber le fonctionnement du système « pile à combustible ». Les appellations « méthode invasive » et « méthode non-invasive » sont donc adoptées. Le laboratoire G2Elab en collaboration avec le LEPMI – CEA Liten – SymbioFCell a choisi à travers ce travail et d'autres déjà aboutis de développer une méthode non-invasive qui repose sur le diagnostic par la mesure du champ magnétique externe. Profitant d'un financement de la Région Auvergne-Rhône-Alpes (Programme ARC Energies), ces travaux ont été entamés.

La méthode qui sera développée dans ce manuscrit vise à reconstruire la distribution de la densité de courant à partir de la mesure externe du champ magnétique en certain points de l'espace. Le champ magnétique différentiel sera exploité. Le terme différentiel défini la variation du champ magnétique dans le cas d'un défaut par rapport à un cas de référence de la pile à combustible. La cartographie du courant ainsi reconstruite donne une information locale sur l'état de la pile car celle-ci est liée à un défaut quelconque. Les travaux antérieurs de M. LeNy [1] ont permis de retrouver des défauts globaux affectant toutes les cellules. La nouveauté de la méthode détaillée dans ce document est sa capacité à détecter des variations localisées de la distribution du courant dans le cas d'un défaut sur quelques cellules d'une pile à combustible industrielle.

Ce travail se divise en trois grandes parties : Une première partie consacrée à l'état de l'art; une partie plus numérique où les modèles sont détaillés ; et une dernière partie expérimentale où la méthode est validée. Autour de ces trois parties, quatre chapitres seront présentés.

Dans le premier chapitre nous présenterons le contexte général du travail. Nous rappellerons les différentes applications des piles à combustible et le principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire. Nous présenterons les défauts majeurs pouvant affecter le cœur de la pile. La dépendance de la distribution de la densité de courant aux défauts est ensuite soulignée. Nous faisons un état de l'art sur les différentes méthodes de diagnostic en classant celles-ci en deux familles « invasives » et « non-invasives ». Enfin, dans ce chapitre une attention particulière est réservée à la méthode de diagnostic par la mesure de champ magnétique externe ainsi que tous les travaux déjà réalisés sur le sujet.

Dans le second chapitre, nous développerons les modèles directs qui permettent de calculer les effets en partant des causes. Dans un premier temps, nous allons présenter les modèles directs électrocinétiques qui ont permis de déterminer la distribution de la densité de courant (effets) dans la pile à combustible. Les entrées (causes) du modèle sont les conductivités électriques des éléments de la pile et les conditions aux limites. Deux types de défauts de conductivité ont ensuite été simulés : Des défauts dus à une variation d'un paramètre de fonctionnement de la pile qui induisent un comportement similaire sur toutes les cellules (on parlera de défaut 2D) et des défauts plus localisés sur quelques cellules (on parlera de défauts 3D). Dans un deuxième temps, l'impact d'une distribution de densité de courant quelconque sur la signature magnétique de la pile à combustible est évalué par un modèle direct magnétique permettra de positionner les capteurs autour de la pile afin de détecter les variations de champ magnétique dues aux défauts. Enfin, nous validerons cette chaine de modélisation en comparant des mesures de champ magnétique simulées à des mesures réelles.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le cœur du travail qui est le modèle inverse. Il permet d'une manière générale d'obtenir les causes (la densité de courant) à partir des effets (le champ magnétique). Des généralités sur les applications et la résolution des problèmes inverses sont rappelées. Ensuite, le chapitre est décomposé en deux grandes parties :

- La paramétrisation de la densité de courant : Le problème étant linéaire, la densité de courant globale sera une combinaison linéaire de vecteurs de densités de courant élémentaires. Plusieurs approches sont testées et comparées.
- La paramétrisation du champ magnétique : A chaque vecteur de la base des densités de courant sera associé un vecteur en champ magnétique. Ces vecteurs dépendront évidemment des vecteurs des densités de courant mais aussi de la position et de l'orientation des capteurs de champ magnétique.

Les différentes approches associées aux différentes bases seront comparées pour trois défauts simulés. Une seule approche retiendra tout particulièrement notre attention et par conséquent utilisée par la suite.

Dans le dernier chapitre, nous allons montrer les différents résultats expérimentaux obtenus par la méthode de diagnostic par la mesure du champ magnétique externe. Les mesures sont effectuées dans deux environnements de laboratoire différents et sur deux types de dispositif. Dans un premier temps, il s'agira d'un simulateur de pile à combustible et dans un deuxième temps, d'une pile GENEPAC comportant 100 cellules. La première campagne de mesures a été effectuée au G2ELab et la deuxième au CEA-Liten.

# II. Chapitre I : Introduction et motivations

Nous commencerons dans la première partie de ce chapitre par situer la place de la filière hydrogène et son application principale dans le contexte énergétique actuel. La solution « pile à combustible » est présentée d'un point de vue général (applications, marché et types de pile à combustible). Le fonctionnement d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible de type PEM est ensuite détaillé en rappelant quelques notions d'électrochimie. Les conditions opératoires de fonctionnement de la pile sont décrites.

Dans la seconde partie, nous énumérerons les différents verrous technologiques qui freinent le développement des piles à combustible. Nous décrirons les dégradations réversibles et irréversibles affectant les différentes parties de la pile PEM. L'impact de ces dégradations sur la distribution du courant dans la pile est souligné en s'appuyant sur la littérature.

En troisième partie, nous présenterons les différentes méthodes de diagnostic des piles à combustible (invasives et non-invasives). Enfin, une attention particulière au diagnostic par la mesure du champ magnétique externe sera portée et son principe sera présenté.

#### A. L'HYDROGENE UNE SOLUTION POUR L'AVENIR ?

Dans la perspective de développer le secteur des énergies renouvelables et de réduire l'impact de la consommation des énergies fossiles sur l'environnement, l'hydrogène se présente comme un candidat sérieux pour relever ce défi. Bien que sa consommation reste faible en moyenne (Figure II.1), environ 60 millions de tonnes par an depuis 2009 [2] soit 1,3% de la production mondiale d'énergie [3], les spécialistes restent convaincus que l'hydrogène est la solution naturelle pour une transition énergétique réussie. L'hydrogène est un vecteur énergétique inépuisable vu la quantité dont nous disposons sur terre, mais il se trouve toujours combiné à d'autres éléments tel que l'eau et les hydrocarbures ce qui nous amène à l'extraire et à le stocker. La nécessité de produire de l'hydrogène à partir d'énergies vertes est primordiale pour conserver une chaine énergétique respectant l'environnement. En plus d'être un combustible propre, l'hydrogène permet de produire environ trois fois plus d'énergie qu'une source fossile pour une même masse.

La production d'énergie en utilisant l'hydrogène comme combustible se décline en deux processus : soit en combustion interne dans un moteur thermique entrainant des actionneurs mécaniques ou via une pile à combustible pour alimenter des charges électriques.



Figure II.1 Production mondiale de l'hydrogène [2] [3]

L'utilisation de l'hydrogène pour alimenter un moteur thermique semble être une solution intéressante du fait qu'elle utilise une technologie maitrisée. Néanmoins, cette solution soulève quelques inconvénients sur le point économique et environnemental. En effet, le déploiement de cette technologie nécessite une injection de l'hydrogène à haute pression ce qui entraine un coût de développement supplémentaire. Des mesures de pollution effectuées sur ces systèmes révèlent également la présence de NOx (NO et NO<sub>2</sub>) qui sont des gaz polluants et toxiques, ce qui constitue un danger pour l'environnement. En plus des inconvénients cités, l'avancement des recherches dans le domaine des piles à combustible utilisant l'hydrogène et l'amélioration de leurs performances ont poussé les constructeurs à abandonner les moteurs thermiques à hydrogène.

Une multitude d'applications sont possibles pour bénéficier des avantages des piles à combustible, allant du transport aux bâtiments [4]. Ces applications peuvent se décliner sous plusieurs formes (Figure II.2), stationnaires pour alimenter des habitations, embarquées dans différents véhicules ou portables pour prolonger l'autonomie des objets connectés.



Figure II.2 La chaine d'hydrogène [4]

### **B.LA PILE A COMBUSTIBLE**

Dans le paragraphe précèdent, quelques atouts majeurs qui ont permis aujourd'hui à la filière hydrogène de se développer ont été rappelés. L'amélioration de la durée de vie des systèmes piles à combustible a eu un impact positif sur leurs coûts. L'augmentation du marché mondiale des piles à combustible (Figure II.3) montre la confiance des industriels vis-àvis de cette technologie et la place importante qu'elle occupera dans le « mix » énergétique à venir. L'application la plus mature de nos jours est la pile à combustible qui représente plus de 70% des applications et dont le marché ne fait qu'augmenter ces dernières années, ce qui démontre la volonté des pays et des gouvernements à promouvoir cette technologie [5]. Le principe de fonctionnement de la pile est essentiellement basé sur une réaction électrochimique spontanée de dihydrogène et de dioxygène dans certaines conditions de pression et de température. Ce processus produit simultanément de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.



Figure II.3 Marché mondial des piles à combustible [5]

La pile à combustible s'est déployée dans plusieurs secteurs différents (Figure II.4) avec une forte présence dans le secteur du stationnaire [5] [6] pour une utilisation dans l'industrie et les bâtiments aves des puissances allant de 200kW à quelques MW. Le secteur du transport parait très en retard par rapport aux deux autres secteurs en nombre d'unités déployées comme le montre la Figure II.4, mais d'un point de vue « puissance électrique déployée », ce secteur dépasse largement le secteur du portable qui a une gamme de puissance plus faible allant du mW à quelques W.



Figure II.4 Le nombre de systèmes déployés à travers le monde selon le secteur [5]

Selon les secteurs, nous trouverons différentes technologies de pile utilisées pour satisfaire le besoin en énergie. Ces technologies sont généralement classées selon leur température de fonctionnement car c'est ce paramètre qui conditionne le choix des différents matériaux composant le cœur de la pile. Citons ainsi trois grandes classes de piles à combustible :

- Basse température : 60°C à 130°C
  - AFC (Pile à combustible alcaline) :

C'est une des premières piles développées et elle a notamment été utilisée durant les expéditions lunaires comme la mission Apollo. L'électrolyte utilisé dans cette technologie est liquide. Il se compose d'une solution alcaline aqueuse prise entre deux électrodes. Sa température de fonctionnement est de  $25^{\circ}$ C à  $75^{\circ}$ C et elle peut atteindre un rendement électrique de 70%.

• PEMFC (Pile à combustible à échangeuse de protons) :

C'est une technologie fonctionnant à des températures variant de 60°C à 80°C, ce qui la rend particulièrement intéressante pour des applications portables et embarquées. Elle comporte un électrolyte polymère basé sur des structures PFSA (Nafion<sup>®</sup>, Flemion<sup>®</sup>, Aquivion<sup>®</sup> ...). Le rendement électrique de cette pile peut atteindre 60% et 90% en cogénération.

• DMFC (Pile à combustible méthanol direct) :

Dans la catégorie basse température les deux technologies citées auparavant ont pour combustible l'hydrogène, alors que la réaction dans une DMFC est basée sur l'oxydation du méthanol. Elle fonctionne dans une plage de température allant de 90°C à 130°C pour un rendement électrique maximal avoisinant les 30%.

- Moyenne température : 160°C à 220°C
  - PAFC (Pile à combustible à acide phosphorique) :

L'acide phosphorique dans ce cas joue le rôle d'électrolyte et elle fonctionne sous une température de 180°C à 200°C. Son rendement électrique peut atteindre les 40% en prenant en compte les pertes du système.

- Haute température : 620°C à 1000°C
  - MCFC (Pile à combustible à carbonate fondu) :

Ces piles utilisent les carbonates de métaux alcalins comme électrolytes pour le transport des ions, et elles fonctionnent à des températures élevées de l'ordre de 600°C. Leur design permet d'utiliser différents combustibles, du dihydrogène au gaz naturel en passant par le méthanol, des gaz de synthèse ou encore des biogaz. Leur rendement électrique peut atteindre 60%.

• SOFC (Pile à combustible à oxyde solide) :

C'est une technologie de pile techniquement mature et commercialisable uniquement dans le secteur du stationnaire car elle fonctionne à de très hautes températures (450°C à 1000°C). Elles ont un avantage significatif par rapport aux PEMFC par le fait qu'elles n'utilisent pas de catalyseur en métaux nobles comme le platine (rare et cher) pour activer les réactions électrochimiques. Par contre la montée en température nécessite une source extérieure de chaleur. En plus de générer de l'électricité, le gaz évacué pendant leurs fonctionnements peut être utilisé pour alimenter des turbines à gaz et ainsi améliorer leurs rendements électriques pour atteindre les 70%.

#### 1. Description d'une cellule élémentaire PEMFC

Cette partie est dédiée à la plus petite partie exploitable d'un point de vue électrique d'une pile à combustible PEM qui est la cellule. Dans le but de comprendre le fonctionnement d'un système « pile à combustible industriel », il est nécessaire d'expliquer plus en profondeur les principaux mécanismes régissant le fonctionnement d'une cellule élémentaire.

Dans un premier temps un rappel de la structure macroscopique d'une cellule élémentaire est représenté par la Figure II.5 avec les différentes parties qui la composent. La structure physique de base d'une cellule de pile à combustible PEMFC se compose d'une membrane polymère électrolyte en contact avec une anode et une cathode de chaque côté. Une représentation schématique d'une cellule unitaire avec les gaz réactifs/produits et les sens d'écoulement et de conduction d'ions dans la cellule est montrée dans la Figure II.5. L'oxydation d'hydrogène et la réduction de l'oxygène se produisent à l'interface électrode/électrolyte. Les migrations de protons et d'électrons se produisent respectivement dans l'électrolyte et le circuit externe.



Figure II.5 Schéma représentatif d'une cellule élémentaire PEMFC avec du dihydrogène comme combustible [7]

#### a) La membrane

Les premiers systèmes piles à combustible utilisaient des électrolytes liquides. Plus tard, des piles à combustible à membranes échangeuse cationique ont été développées. L'effort initial a par la suite mené au développement de polymère acide perfluorosulfoné (comme le Nafion<sup>®</sup>), développé vers la fin des années 60 par DuPont de Nemours. Il a été employé dans une PEMFC. Pour le bon fonctionnement de la pile, cette partie doit avoir des propriétés irréprochables d'un point de vue électrique, chimique et mécanique. La membrane d'échange ionique (électrolyte) doit présenter plusieurs fonctions importantes : (i) fournir une conduction ionique entre les 2 électrodes, (ii) séparer électroniquement les électrodes pour empêcher les courts-circuits électroniques et (iii) séparer les gaz réactifs pour empêcher leur recombinaison.

Comme indiqué auparavant dans le cas des PEMFC, la membrane utilisée est le Nafion<sup>®</sup> qui est un polymère qui a des propriétés physicochimiques très intéressantes. Un problème majeur concernant le fonctionnement des PEMFC est la gestion de l'eau dans la membrane ; la cellule doit fonctionner dans des conditions où l'eau ne s'évapore pas plus rapidement qu'elle n'est produite dans la mesure où les membranes disponibles de nos jours doivent être hydratées pour fonctionner. Cependant le Nafion<sup>®</sup> a tendance à gonfler en présence d'eau ce qui ne pose pas de problème dans le cas stationnaire. Par contre, pour les applications où les arrêts et démarrage sont fréquents, le stress mécanique sur la membrane peut engendrer des dégradations locales à cause du gonflement/dégonflement de celle-ci [8].

#### b) Les couches actives

La membrane est prise entre deux électrodes qui constituent les couches actives, siège des demi-réactions d'oxydoréduction. Dans les PEMFC, des électro-catalyseurs à base de platine sont utilisés sous forme de nanoparticules soutenus par des structures carbonées (graphite, aerogel, xerogel, nanotubes, ...). Pour la réduction de l'oxygène à la cathode, on peut aussi employer des alliages de platine. Une part non négligeable du prix total de la pile est liée à la présence du platine. Des éléments de réponse par rapport à la réduction de la quantité du platine dans la constitution des électrodes sont proposés dans [9]. Les deux couches actives associées à la membrane constituent l'Assemblage Membrane Electrodes (AME).

#### c) Les couches de diffusion

L'AME, qui est le cœur de la PEMFC, est serré entre deux couches de diffusion de gaz (GDL pour Gas Diffusion Layer). La couche de diffusion assure plusieurs fonctions :(i) serve à l'apport des réactifs (H<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub>/air à l'anode et à la cathode respectivement), (ii) assure la conduction électrique entre les plaques bipolaires et les zones actives, (iii) évacue la chaleur produite dans les électrodes (résultant des réactions et des pertes ohmiques), (iv) évacue l'eau produite à la cathode vers le canal loin des électrodes, afin d'empêcher leur noyage et (v) fournit le support mécanique pour l'AME. La couche de diffusion de gaz est typiquement faite de carbone poreux, tel que des tissus, fibres serrées non-tissées ou des papiers de carbone. Le carbone est choisi pour plusieurs avantages : (i) son prix réduit, (ii) des possibilités de traitements multiples, (iii) une bonne conductivité électrique et thermique, (iv) ainsi qu'une bonne résistance mécanique et chimique dans l'environnement d'un cœur de PEMFC.

#### d) Plaques bipolaires

Les circuits fluidiques externes sont reliés à la pile au niveau des plaques terminales et les gaz réactifs sont distribués aux AME à la surface des plaques bipolaires via des canaux gravés sur celles-ci. Plusieurs designs et brevets de plaques sont proposés. Chaque design présente des performances différentes vis-à-vis de la distribution des gaz. Les canaux du côté de l'anode (alimentation en dihydrogène) et du côté de la cathode (alimentation en air) sont différents du fait du rapport des quantités des deux gaz dans la réaction électrochimique (Figure II.6). Néanmoins, la plaque bipolaire est un composant multifonctionnel des PEMFC. Son rôle est d'assurer l'apport des gaz réactifs aux électrodes et de fournir le raccordement électrique entre les cellules adjacentes dans la pile tout en évacuant l'eau et la chaleur.



Figure II.6 Exemple de canaux de diffusion [10] : (a) Coté anode, (b) Coté cathode

#### e) Principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire

Les deux réactions électrochimiques régissant le fonctionnement d'une pile à combustible se produisent à l'interface membrane/électrode.

Du coté anodique, se produit l'oxydation du dihydrogène :

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
 Eq II-1

Et du coté cathodique, la réduction du dioxygène :

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$
 Eq II-2

Le bilan des deux équations nous amène à l'équation d'oxydoréduction :

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$
 Eq II-3

#### (1) Thermodynamique

La formation de l'eau à partir du dihydrogène et du dioxygène (Eq I-3) fournit une énergie appelée enthalpie de la réaction qui peut être calculée en utilisant la loi de Hess [11] dans des conditions standards de pression et de température (1Bar et 298K soit 25°C) :

$$\Delta_r H = \sum_i \nu_i \Delta H_i$$
 Eq II-4

où  $v_i$ , est le coefficient stœchiométrique des espèces mis en jeu dans la réaction, Il est négatif dans le cas des réactifs et positifs pour les produits.  $\Delta H_i$  est l'enthalpie standard de formation de chaque élément participant à la réaction [12].

Dans le cas de la formation de l'eau :

$$\Delta_r H = -\Delta H_{\mathrm{H}_{2(\mathrm{gaz})}} - \frac{1}{2} \Delta H_{\mathrm{O}_{2(\mathrm{gaz})}} + \Delta H_{\mathrm{H}_{2}\mathrm{O}(\mathrm{liquide})}$$
Eq II-5

L'enthalpie standard de formation des corps purs simples comme le dioxygène et le dihydrogène étant de 0, et celle de l'eau à l'état liquide de -285.83 kJ.mol<sup>-1</sup>, l'enthalpie de la réaction (Eq II-3) est  $\Delta_r H = -285.83$  kJ·mol<sup>-1</sup>

Cette énergie est négative (exothermique) et est valorisée dans le cas d'un moteur thermique par la combustion du dihydrogène.

Dans le cas d'une pile à combustible fonctionnant à température et à pression constante, le travail électrique maximum est donné par le changement de l'énergie libre de Gibbs  $(\Delta_r G)$  de la réaction électrochimique. La tension maximale d'une cellule d'un point de vue exergétique (sachant que l'enthalpie libre exprime l'exergie) appelée aussi tension standard à l'équilibre, en supposant que toute l'enthalpie libre se transforme en énergie électrique est donnée par la formule suivante :

$$E_{ex,max} = \frac{-\Delta_r G}{2F}$$
 Eq II-6

où F est la constante de Faraday qui est la charge électrique d'une mole d'électrons égale à 96485 C/mol.

Dans le cas de la formation de l'eau par les deux demi-réactions (Eq II-1) et (Eq II-2), cette énergie par mole de dihydrogène consommée est donnée pour différentes valeurs de température et en fonction de l'état physique de l'eau produite selon le Tableau II-1. Ainsi, pour une température de fonctionnement de 80°C correspondant au cas des piles PEM, la tension maximale  $E_{ex,max}$  aux bornes des électrodes en circuit ouvert est égale à environ 1.2V. Dans la pratique la tension d'une cellule est inférieure à cette valeur à cause des irréversibilités qui seront discutées par la suite (§ f).

La tension d'équilibre est calculée grâce à la loi de Nernst (Eq II-7) et elle définit la tension en circuit ouvert en fonction des concentrations en gaz.

1

$$E_{max} = E_{ex,max} + \frac{RT}{2F} ln(\frac{P_{O_2}^{\frac{1}{2}}P_{H_2}}{a_{H_2O}})$$
 Eq II-7

où  $P_{O_2}$ ,  $P_{H_2}$  sont les pressions relatives des gaz ;  $a_{H_2O}$  l'activité de l'eau ; T la température et R la constante des gaz parfaits.

Le rendement théorique maximal de la pile, fonctionnant dans des conditions réversibles (sans pertes), est le rapport de l'enthalpie libre de Gibbs et de l'enthalpie de la réaction est donné par  $\eta_{ex,max}$  (Eq II-8):

$$\eta_{ex,max} = \frac{\Delta_{\rm r}G}{\Delta_{\rm r}H}$$
 Eq II-8

Tableau II-1 Enthalpie et rendement de la réaction (Eq 1-3), en fonction de la température et de l'état physique de l'eau produite [13]

Etat physique de l'eau	Température (C°)	$\Delta_r G$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	Rendement $\eta_{ex,elec}$ (%)
Liquide	25	-237.2	83
Liquide	80	-228.2	80
Vapeur	100	-225.5	79
Vapeur	200	-220.4	77
Vapeur	400	-210.3	74
Vapeur	600	-199.6	70
Vapeur	800	-188.6	66
Vapeur	100	-177.4	62

Cependant, le rendement électrique total réel d'une cellule est le produit de plusieurs rendements calculés séparément [14]:

$$\eta_{r\acute{e}el,total} = \eta_{ex,max} \times \eta_{ex,elec} \times \eta_{farad} \times \eta_{mat} \times \eta_{sys}$$
 Eq II-9

où  $\eta_{ex,elec}$  est le rendement exergétique électrique calculé par l'Eq II-10 comme le rapport de la tension réelle mesurée  $E_{mes}$  de la cellule sur la tension maximale :

$$\eta_{ex,elec} = \frac{E_{mes}}{E_{max}}$$
 Eq II-10

La tension réelle mesurée étant de l'ordre d'environ 0.7V, le rendement électrique en potentiel pour une température de fonctionnement de 80°C, est d'environ 60%.

Le rendement faradique  $\eta_{farad}$  mesure les pertes dues à des réactions électrochimiques parasites et le courant de « crossover » associé au passage du combustible à travers la membrane pour se combiner spontanément avec le dioxygène sans produire de travail électrique :

$$\eta_{farad} = \frac{I_{mes}}{I_{theo}}$$
 Eq II-11

où  $I_{mes}$  est le courant réel mesuré, et  $I_{théo}$  est donné par la formule (Eq II-12)

$$I_{theo} = \frac{2FD_v}{V_m N}$$
 Eq II-12

où  $D_v$  est le débit d'hydrogène en l/s ;  $V_m$  le volume molaire de l'hydrogène en l/mol et N le nombre de cellules.

Le rendement matière  $\eta_{mat}$  estime le taux d'utilisation réel des réactifs au niveau des électrodes. Il est généralement aux alentours de 95% pour l'hydrogène. Ce rendement peut être confondu avec le rendement faradique car il concerne aussi les pertes en combustible.

Enfin, le rendement système  $\eta_{sys}$  prend en compte l'énergie nécessaire au préconditionnement, l'humidification et la compression des réactifs ainsi qu'à l'électronique de commande.

#### (2) Mécanismes de transport des ions et des électrons

Dans une pile à combustible typique, le carburant (généralement l'hydrogène à l'anode) et un oxydant (l'oxygène de l'air) sont envoyés sans interruption aux électrodes. Les réactions électrochimiques ont lieu aux électrodes pour produire un courant faradique. Un courant ionique circule via l'électrolyte et un courant électronique fournit le travail électrique à la charge. Pour comprendre les mécanismes réactionnels dans une pile à combustible, il est nécessaire de rappeler que les réactifs (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) arrivent dans une zone appelée « zone de triple contact » (Figure II.7). Autour des particules du catalyseur, une continuité est assurée avec l'électrolyte pour la conduction du courant ionique et une autre continuité avec l'électrode pour la conduction électronique. La structure des interfaces à cet endroit doit avoir plusieurs propriétés permettant la diffusion des molécules du dihydrogène et dioxygène ; le transport des ions et des électrons ; un caractère hydrophobe du côté cathodique afin d'éliminer l'eau formée, ainsi qu'une bonne conduction thermique afin de dissiper la chaleur de la réaction. La conception optimale de cette zone de la réaction est un point clé dans la prévention contre les dégradations de l'AME.



Figure II.7 Couche catalytique d'une cathode d'une Pile PEM [15]

Les deux réactions du côté anodique et cathodique se décomposent en plusieurs étapes : le transport des réactifs vers la surface de l'électrode, leur adsorption à la surface du catalyseur. Ensuite, le catalyseur accompagne la dissociation des molécules et la libération/acceptation des protons et des électrons. Enfin le transport ionique est assuré par la membrane et le transport électronique par le circuit externe.

Le processus qui se déroule entre l'étape d'adsorption des molécules de gaz et la désorption des produits de la réaction est appelé « Activation ». Il implique une énergie d'activation que les réactifs doivent franchir pour leur consommation. Comme nous allons voir par la suite ce processus engendre une chute de la tension de la cellule.

Dans certains cas où la réaction d'oxydoréduction est incomplète, on peut assister à la formation du peroxyde d'hydrogène qui est un composé très réactif et pouvant attaquer chimiquement les composants de la pile causant leur dégradation [16].

#### f) Courbe de polarisation (Point de fonctionnement)

Le potentiel réel des cellules est diminué par rapport au potentiel idéal en raison de plusieurs types de pertes irréversibles, comme représenté sur la Figure II.8. Ces pertes sont dues à la réaction électrochimique (ou de transfert de charge) à l'interface électrode / électrolyte dans la couche active, au transport de charge dans les matériaux d'électrode, la membrane et la plaque bipolaire ainsi qu'au transport de matière dans la couche de diffusion.

Ces pertes sont désignées souvent sous le nom de polarisation ou de surtension, bien que seules les pertes ohmiques se comportent réellement comme une résistance. Des phénomènes multiples contribuent aux pertes irréversibles dans une pile à combustible :

- Pertes d'activation : Celles-ci proviennent de l'énergie d'activation des réactions électrochimiques aux électrodes. Ces pertes dépendent des réactions, du matériau électro-catalytique et de sa microstructure, de l'activité des réactifs (et par conséquent de leur utilisation) et de la densité de courant.
- Pertes ohmiques : Elles sont provoquées par la résistance ionique dans l'électrolyte et des résistances électroniques dans les électrodes, les collecteurs et l'interconnexion de courant et les résistances de contact. Les pertes ohmiques sont proportionnelles à la densité de courant, et elles dépendent du choix des matériaux, de la géométrie de l'empilement et de la température.
- Pertes de concentration : C'est un résultat des limitations de transport des réactifs dans la couche de diffusion et elles dépendent fortement de la densité de courant, de l'activité des réactifs et de la structure de l'électrode.

Du fait de ces différentes irréversibilités, la courbe de polarisation d'une pile à combustible (tension de cellule en fonction de la densité de courant) présente un comportement électrochimique non-linéaire. Cette caractéristique est appelée loi de polarisation et est généralement décrite par une relation de la forme :

$$V_{pac}(j) = E - R_0 j - \frac{RT}{\alpha n F} ln\left(\frac{j}{j_0}\right) - \frac{RT}{\alpha n F} ln\left(1 - \frac{j}{j_L}\right)$$
Eq II-13

où  $R_0$  est la résistance surfacique de l'AME ( $\Omega$ .m<sup>2</sup>) ; j la densité de courant (A/m<sup>2</sup>) ; R la constante des gaz parfait (8.314 J/mol.K) ;  $\alpha$  le coefficient de transfert de charge ; n le nombre d'électrons échangé ;  $j_0$  est la densité de courant d'échange (A/m<sup>2</sup>) ;  $j_L$  la densité de courant de limite (A/m<sup>2</sup>).

Cette caractéristique peut être obtenue expérimentalement en augmentant le courant progressivement et en mesurant la tension aux bornes de la pile. La figure (Figure II.8) représente la courbe de polarisation d'une pile GENEPAC de 100 cellules. La tension tracée est la moyenne de la tension des cellules du stack.



Figure II.8 Courbe de polarisation d'une cellule GENEPAC

On distingue trois zones sur la courbe de polarisation, deux zones non linéaires à faible et à fort courant, et une zone linéaire à moyen courant.

A faible courant les pertes d'activation sont majoritaires, car une grosse partie de l'énergie est consommée pour activer les réactions électrochimiques de réduction et d'oxydation. Cette zone est appelée région de polarisation d'activation.

A courant moyen, la pile présente un comportement plus résistif et des pertes ohmiques, dues à la résistance des flux ioniques à travers l'AME ainsi que la résistance électrique des électrodes, viennent s'ajouter aux surtensions d'activation. Des pertes ohmiques dues aux résistances de contact entre les différents éléments de la pile sont aussi à signaler. Cette deuxième zone est généralement appelée zone de polarisation ohmique. A mesure que la densité de courant augmente, la tension dans la pile chute du fait de l'apparition d'un gradient de concentration d'oxygène au niveau de la cathode et du noyage des électrodes. Cette dernière zone est appelée zone de polarisation de concentration.

#### g) Paramètres de fonctionnement

Du fait du caractère multiphysique de la pile à combustible, ses performances et son rendement dépendent fortement des conditions opératoires. Les performances des cellules sont affectées par les conditions de fonctionnement telles que la température, la pression, la composition en gaz, l'utilisation des réactifs, et la densité de courant.

Nous présentons dans cette partie quelques paramètres régissant le fonctionnement de la pile à combustible, ainsi que les auxiliaires qui permettent le préconditionnement des réactifs en température, humidité relative et pression.

#### (1) Température et pression

L'effet de la température et de la pression sur la tension idéale (E) d'une cellule peut être analysé sur la base des changements de l'énergie libre de Gibbs avec la température et la pression. Cependant, la température a un impact fort sur un certain nombre d'autres facteurs. En effet, la vitesse de la réaction suit le comportement d'Arrhenius. Par conséquent, ces pertes diminuent exponentiellement avec l'augmentation de la température.

Une augmentation de la pression de fonctionnement a plusieurs effets bénéfiques sur les performances parce que la solubilité des gaz et les vitesses de transfert de masse sont plus fortes.

#### (2) Humidité relative

La maîtrise de l'hydratation de la membrane d'une pile à combustible est primordiale pour assurer un niveau de performance élevé de celle-ci. La bonne conductivité ionique est en effet conditionnée par la teneur en eau de la membrane.

Une humidification des gaz en entrée est donc nécessaire dans un système pile à combustible. Elle permet aussi de réduire l'écart de température entre les gaz entrants et les cellules ; et parallèlement de garantir un taux d'humidité de ces gaz proche de la saturation.

L'humidité des gaz d'entrée à l'anode et à la cathode a un effet significatif, mais l'impact de l'humidification de l'hydrogène sur les performances de la pile est comparativement plus faible que celui de l'humification de l'air. Cela explique pourquoi les humidificateurs d'hydrogène sont rarement présents dans les systèmes pile.

#### (3) Stæchiométrie

Le coefficient de stœchiométrie est défini comme étant le rapport entre le débit des gaz fourni à l'électrode et celui nécessaire pour la réaction électrochimique. La maîtrise de ce

paramètre est primordiale car une sous ou une sur-stœchiométrie peut changer le conditionnement d'une partie de membrane ce qui engendre une variation de la concentration d'eau à ces endroits. Des variations répétitives causent un stress mécanique plus important sur ces zones.

#### 2. Empilement de cellules (stack)

Selon les besoins énergétiques de l'application, des cellules sont arrangées dans un empilement et connectées électriquement en série. Les plaques terminales permettent la tenue mécanique de l'ensemble. Le nombre de cellules et leurs surfaces sont choisis selon la tension et le courant demandés par l'application. Toutes les cellules sont traversées par le même courant et la tension du stack est la somme des tensions de chaque cellule. Ces tensions sont en général différentes à cause des caractéristiques spécifiques à chaque cellule et de leur état de santé. Les réactifs et les fluides de refroidissement sont amenés par des circuits gravés sur les plaques bipolaire selon des designs différents [17].

Les études du comportement d'une seule cellule portant notamment sur les mécanismes de dégradations, sont relativement nombreuses dans la littérature. Celle-ci, ne prennent pas en compte les inhomogénéités thermiques et fluidiques que la mise en stack induit. A titre d'exemple, les empilements possèdent généralement une seule entrée et sortie de gaz, ce qui induit une répartition inhomogène des gaz et fait apparaître des anomalies sur les cellules les plus éloignées.



Figure II.9 Empilement de cellules : (a) Schéma d'un stack, (b) Stack GENEPAC du CEA [8]

#### 3. Dégradations

Parmi les composants de la pile PEM, l'AME est le composant le plus sujet à des dégradations car il doit résister à différents stress (mécanique, thermique et chimique). D'autres composants tels que les plaques bipolaires et les joints d'étanchéité, peuvent présenter des défauts sous différentes formes [18] [19] [20] [21]. Nous énumérons dans cette partie les différentes sources de dégradation entrainant des défauts réversibles et irréversibles. Nous nous focalisons sur les dégradations affectant les membranes.

#### a) Dégradations réversibles

On parle de dégradations réversibles, lorsque celles-ci peuvent être corrigées en ajustant les paramètres régissant le fonctionnement de la pile. Ces défaillances sont souvent liées aux conditions opératoires. Ces corrections peuvent être automatiques par un contrôle en temps réel ou bien par une intervention manuelle.

La gestion de l'eau est le problème critique principal pour les PEMFC fonctionnant à une température inférieure à 100°C. D'une part, l'eau est nécessaire pour assurer une bonne conductivité ionique de l'électrolyte polymère (généralement le Nafion<sup>®</sup>). D'autre part, le noyage des cellules se produit à cause de l'accumulation de l'eau à la cathode. Dans ce deuxième cas, l'apport en gaz à l'emplacement des sites catalytiques est alors bloqué. Il y a enfin plusieurs éléments qui viennent compliquer la gestion de l'eau. On a un transport d'eau associé au déplacement des protons de l'anode vers la cathode. Ce processus s'appelle "électrososmose". Typiquement entre 1 et 2.5 molécules "sont entraînées" pour chaque proton [22] [23]. Ceci signifie que particulièrement aux fortes densités de courant, le côté anodique de l'électrolyte peut s'assécher même si le côté cathodique est bien hydraté. Enfin, un assèchement de la membrane peut être occasionné par les flux gazeux à haute température.

#### (1) Noyage des cellules

Le noyage peut apparaître essentiellement à deux niveaux :

• Aux électrodes

L'évacuation de l'eau produite ou apportée peut être rendue difficile à cause d'un faible débit de gaz ou d'un fonctionnement à basse température. Dans les deux cas, un noyage des électrodes peut être dû à l'accumulation d'eau liquide plus difficile à transporter. Le noyage peut apparaître aussi dans le cas où les gaz réactifs sont trop humidifiés.

• Au niveau des canaux

En plus des causes citées au niveau des électrodes, les canaux de distribution des gaz peuvent être bouchés par accumulation d'eau liquide dans le cas d'un mauvais design ou d'un défaut de fabrication.

Dans les deux cas, une accumulation de l'eau liquide dans la cellule limite l'apport des gaz réactifs aux sites réactionnels. Le comportement des cellules noyées se retrouve modifié, et une chute de tension apparait aux bornes de celles-ci [24].

#### (2) Assèchement de la membrane

A l'opposé, une membrane déshydratée contribue à une augmentation significative de la résistance de la cellule. Des pertes ohmiques supplémentaires apparaissent et une diminution de la tension de cellule est encore observée [25].

L'assèchement est causé par plusieurs paramètres : un débit de gaz très important donc une évacuation de l'eau accrue ; une température de fonctionnement trop élevée ou bien un gaz trop sec.

#### b) Dégradations irréversibles

De manière plus générale, les dégradations irréversibles concernent l'AME. Les mécanismes les plus connues sont la corrosion du carbone qui est le support du catalyseur, la corrosion du platine et enfin la perte des propriétés mécaniques de la membrane due à un vieillissement.

Dans un premier temps, nous parlerons de l'appauvrissement en gaz réactif qui a comme conséquence indirecte la corrosion du carbone.

#### (1) Appauvrissement en gaz

L'appauvrissement en gaz réactifs est connu pour être à l'origine de dégradations irréversibles des cellules. Ces dégradations apparaissent essentiellement dans les zones de la cellule où la concentration en gaz réactifs (en comburant ou en combustible) n'est plus suffisante pour assurer la fourniture de courant. Ces zones ne se comportent alors plus comme un générateur électrochimique mais comme un récepteur, siège de réaction parasite, (non désirée dans un fonctionnement nominal). Dans le cas d'un manque de dihydrogène, le dioxygène passant au travers de la membrane peut se réduire à l'anode et induire une augmentation très importante du potentiel anodique et cathodique. Cette dernière provoque alors un phénomène d'oxydation des matériaux relativement stable dans les conditions de fonctionnement habituelles des piles à combustible ; tels que le platine et le carbone ; induisant une dégradation rapide de la performance des cellules (Figure II.10 - (a)). Dans le cas d'un appauvrissement en dioxygène, les zones non alimentées en oxygène peuvent être le siège d'un mécanisme de pompe à protons, l'énergie présente dans les zones alimentées en gaz servant alors à recombiner les protons  $H^+$  pour former du dihydrogène (Figure II.10 – (b)). Ce type de dégradation est très souvent associé aux phases de démarrage non contrôlée. De plus, la présence simultanée d'hydrogène et d'oxygène sur une même électrode peut conduire : (i) à des phénomènes de combustion directe des réactifs, (ii) à une élévation forte de température et (iii) à la dégradation à la fois de l'électrode et de la membrane [26].



Figure II.10 Dysfonctionnement de l'alimentation en gaz [26] : (a) Coté anodique, (b) Coté cathodique

La Figure II.11 illustre quelques réactions éventuelles entre différents éléments pouvant se retrouver sur la même électrode.



Figure II.11 Les différentes réactions pouvant se produire aux électrodes d'une pile à combustible [27]

#### (2) La corrosion du carbone

Le carbone utilisé comme support de catalyseur est thermodynamiquement instable aux conditions typiques de fonctionnement à la cathode. La corrosion de ce dernier est par ailleurs catalysée par le platine. Même si ce mécanisme demeure de faible impact en général, la corrosion du support carbone peut toutefois être accélérée à fort potentiel ou lorsqu'un front oxygène / hydrogène apparaît à l'anode.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
 Eq II-14
Cette dégradation du support carbone peut entraîner une perte de platine électro-actif ou modifier également la structure du réseau provoquant l'agglomération de certaines particules de platine et favorisant le phénomène de maturation d'Ostwald [28].

#### (3) Dégradation du catalyseur platine

Dans le cas des PEMFC, les pertes en catalyseur conduisent à une diminution irréversible de la surface active et de ce fait de la puissance de la cellule. La perte de surface active de platine peut être provoquée par différents mécanismes de dégradation. Le platine peut subir des transformations chimiques et électrochimiques conduisant à la formation d'ion Pt<sup>2+</sup> [29]. D'après [30], le phénomène de « Crossover » responsable de la combustion directe entre les réactifs est directement lié à la forme que prend le platine dans la membrane (ionique ou métallique).

Le transport du platine sous forme métallique est dû à la perte de son support qui est le carbone lors de la corrosion de ce dernier. Dans ce cas le platine garde sa forme chimique initiale et peut soit se diriger vers la membrane, soit être évacué avec l'eau produite vers l'extérieur de la pile.

Enfin, on peut observer une diminution de la surface de catalyseur par la coalescence des particules de catalyseur (processus de maturation d'Ostwald [28]).

Pour pallier les problèmes liés au platine, dans les travaux de [31] le remplacement du Platine par des alliages Platine/Or est proposé.

#### (4) Dégradation de la membrane

Une membrane peut aussi se détériorer à cause d'une sollicitation mécanique inhabituelle. Ainsi, les changements de régime de fonctionnement de la pile, lors d'arrêt/démarrage, causent un stress mécanique qui se traduit par des cycles de « Gonflement/Contraction » de cette dernière. D'autres contraintes mécaniques peuvent apparaître instantanément comme les pics de variations de pression. Ces sollicitations variables provoquent la perte irréversible des propriétés mécaniques de la membrane. De manière similaire, une variation cyclique de l'humidité relative des gaz d'entrée provoque une alternance de gonflements et de rétrécissements de la membrane à cause des fluctuations de la teneur en eau, ce qui peut engendrer l'apparition de fissures au sein du polymère.

Des dégradations de type chimique apparaissent aussi au niveau de la membrane lorsqu'un faible transport des gaz H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> à travers celle-ci survient. En effet, la perméation des gaz conduit à la formation lente de peroxyde d'hydrogène H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (à l'anode ou à la cathode). Il a été montré que la décomposition de ces molécules d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en radicaux libres OH° est favorisée à haut potentiel et catalysée par la présence d'ions fer ou cuivre dans le milieu, due à la corrosion éventuelle de composants du système (des plaques bipolaires par exemple). Les radicaux OH° attaquent alors les chaînes pendantes de la membrane, dégradant ainsi la structure du Nafion<sup>®</sup>. Cette dégradation chimique peut, à terme, provoquer localement l'apparition d'un trou ou « Pinhole » [32] dans la membrane. Celui-ci entraine alors la réaction locale de combustion entre le dioxygène et le dihydrogène, produisant une augmentation de la température locale et donc un agrandissement de ce trou initial.

Une source de dégradation qui fait l'objet de quelques études est le démarrage à froid des piles à combustibles. Il a été démontré qu'après quelques cycles de gel/dégel de la membrane, celle-ci est sujette à l'apparition de trous sur sa surface [33].

#### (5) Dégradation des GDL

La dégradation de la GDL joue un rôle majeur dans la diminution des performances de la pile. Elle a pour conséquence une répartition hétérogène des réactifs en surface causant ainsi un appauvrissement local en gaz. Au cours du vieillissement de la pile, trois mécanismes de dégradation peuvent être observés : perte d'hydrophobie, corrosion du carbone et modification de la résistance électrique et thermique.

Parmi les mécanismes de dégradation listés, la perte d'hydrophobicité est la cause principale de la diminution des performances d'une pile. Dans [34], il été a démontré que l'eau liquide augmente la perte d'hydrophobie. De plus, il a été montré que la diffusion de gaz diminue lorsque la fraction de pores hydrophiles augmente.

Selon [35] il est très difficile de séparer la dégradation de la GDL de celle de la membrane. Dans [36] des courbes de polarisation ont été présentées et elles indiquent que la dégradation de GDL a plus d'impact sur les performances de la pile aux densités de courant élevées.

#### c) Dégradation et lien avec la distribution locale du courant

Les mécanismes de dégradations impactent indirectement la distribution du courant dans la pile de différentes manières ; soit par la modification locale de la résistance des cellules ce qui fait apparaître des chemins privilégiés pour le transport ionique, ou bien par la diminution de la surface active de la cellule à cause de la dégradation du catalyseur par exemple.

Dans le cas d'un appauvrissement en hydrogène, la distribution de la densité de courant d'une cellule soumise à différentes stœchiométries d'hydrogène (de 0.2 à 1) a été étudié dans [37]. Une mesure du courant est effectuée à l'aide d'une cathode segmentée (5 segments, segment 1 : entrées gaz et segment 5 : sortie gaz). La Figure II.12 montre la variation des densités de courant sur les 5 segments en fonction du temps. Au démarrage, la densité de courant mesurée est assez homogène sur tous les segments. Au fur et à mesure que l'hydrogène est consommé sa concentration diminue en « sortie gaz » ce qui entraine la diminution de la densité de courant localement et ce qui est observé sur le segment 5. Cette baisse est franche au niveau des autres segments à la fin du processus. Nous remarquons aussi que la baisse de la densité de courant sur un segment est compensée par sa hausse sur le segment voisin.



Figure II.12 Évolutions des densités de courant locales pour une cellule segmentée : (a) Stæchiométrie H<sub>2</sub> à 1, (b) Stæchiométrie H<sub>2</sub> à 0.9 [37]

Le noyage ou l'assèchement dû respectivement à un excès ou un appauvrissement en gaz réactif modifient sensiblement la répartition des courants à l'intérieur de la pile. Ces deux phénomènes engendrent directement une augmentation ou une diminution de la résistance de la cellule.

D'autres facteurs impactant la distribution de la densité de courant dans la pile tel que l'hétérogénéité de la température en surface ont été mis en évidence [38]. Il a été démontré que pour une basse température de fonctionnement (65°C), la concentration en eau liquide est importante ce qui engendre une distribution inhomogène de densité de courant.

#### 4. Moyens de diagnostic

De nombreuses méthodes de diagnostic ont été développées pour répondre à la problématique du vieillissement des piles à combustible. Nous allons passer en revue ces méthodes en les classant par leurs capacités à ne pas perturber le système à diagnostiquer. Nous allons aussi nous focaliser sur celles qui peuvent être installées dans un système embarqué en vue d'un contrôle en temps réel. Ainsi les méthodes se basant sur le démontage des composants de la pile et des analyses post-mortem ne seront pas présentées.

#### a) Invasifs

Afin de récolter des informations ciblées sur le comportement de la pile à des endroits particuliers, des techniques invasives reposant sur l'insertion de composants actifs à l'intérieur de la pile ont été développées.

Des mesures de température de l'AME sont réalisées afin de détecter d'éventuels points chauds. Par exemple, un capteur de température invasif formé de film basé sur l'utilisation de thermistances a été développé [39].

Une carte de mesures de la densité locale de courant est commercialisée par une entreprise allemande ( $S^{++}$  Simulation Services). Cette carte est insérée entre deux plaques bipolaires. Elle permet d'obtenir une image de la distribution du courant sur toute la surface de l'AME.

Des mesures de champs magnétiques internes ont été explorées dans différents travaux. Dans [40], des capteurs de champs magnétiques sont insérés dans les plaques terminales de la pile. A partir des mesures des champs, les densités de courant sont directement calculées en utilisant l'équation de Maxwell-Ampère.

Le diagnostic par la mesure du champ magnétique interne est aussi étudié par une équipe japonaise [41]. Ils utilisent des sondes au bout desquelles des capteurs de champ magnétique sont accrochés (Figure II.13 – (a)). Ces sondes sont insérées dans les canaux de refroidissement de la pile. A partir de chaque mesure de champ magnétique (Figure II.13 – (b)), la densité de courant sur la partie de la cellule où la sonde a été insérée est calculée. La technique a été validée sur un stack de 300W, comportant 20 cellules, en insérant un réseau de 15 capteurs tri-axes toute les 4 cellules.



Figure II.13 Système de mesure du champ magnétique invasif [41] : (a) Sonde de champ magnétique, (b) Flux magnétique

Ces méthodes invasives de diagnostic sont généralement très performantes car la mesure est réalisée au plus près du défaut et l'exploitation est généralement directe. Par contre, un inconvénient important est que l'introduction de capteurs dans le stack modifie son comportement intrinsèque. Aussi, il peut être difficile de discriminer l'influence du défaut de celle de la présence du capteur. Les approches non-invasives sont ainsi préférées.

#### b) Non-invasifs

#### (1) Mesure de la pression de fonctionnement

Dans la partie diagnostic non-invasive, on peut citer les détections des fuites basées sur la mesure de la différence de la pression  $\Delta P$  [42]. Deux formes de fuites peuvent être constatées, les fuites externes et les fuites internes. Dans le premier cas, les deux compartiments anodique et cathodique sont mis sous pression (200 mbars d'azote), ensuite les gaz sont coupés, si la pression diminue on conclut à une fuite externe. Dans le deuxième cas, seule une électrode est sollicitée en pression. En bouchant la pile des deux côtés, si au bout de 5 minutes, un équilibrage des deux pressions anode et cathode intervient, il est possible de conclure à une fuite interne. La mesure de la chute de pression en fonctionnement du côté cathodique met aussi en évidence un noyage ou un assèchement au niveau d'un stack.

Cet indicateur peut servir pour entreprendre des actions correctives en régulant les paramètres de fonctionnement de la pile [43]. Ce mode de diagnostic est intéressant dans une première étape pour détecter un éventuel défaut et sa nature (interne ou externe) mais il ne permet pas de localiser exactement l'endroit de la fuite.

D'autres méthodes de diagnostic se basant sur la mesure des grandeurs électriques sont développées. Les grandeurs qui permettent de constater une anomalie sur une cellule ou sur un stack donné sont le courant et la tension.

#### (2) Analyse harmonique

La spectroscopie d'impédance est une technique très répandue pour caractériser les piles à combustible. Elle repose sur l'application à la pile d'un signal alternatif sinusoïdal de fréquence et d'amplitude connues (tension ou courant) et sur l'enregistrement de la réponse temporelle de la pile (tension ou courant). Pour chaque fréquence d'excitation, l'impédance de la pile est calculée à l'aide de la loi d'Ohm complexe. Un diagramme de Nyquist est ensuite tracé.

La forme de ces diagrammes est ensuite analysée afin de relever une relation avec un état interne des AMEs de la pile dans le cas d'un assèchement ou d'un noyage. Cette méthode a été proposée pour contrôler une pile à combustible dans une application embarquée [25].

Une autre analyse harmonique plus rarement utilisée est possible. Elle suit le même principe que la spectroscopie d'impédance, la différence réside dans l'utilisation d'un signal d'excitation de forme carrée ou shirp au lieu d'une sinusoïde. L'intérêt de cette technique par rapport à la spectroscopie est le temps d'exécution rapide pour avoir une mesure de l'impédance de la membrane [44].

#### (3) L'échelon et l'interruption du courant

Cette technique consiste à connecter à la pile une charge rapide pouvant changer de régime en quelques microsecondes. Cette charge impose à la pile un échelon de courant d'une

valeur fixe en passant à un courant nul instantanément. La variation du courant et de la tension permet de calculer une résistance dépendante de la teneur en eau des membranes [45] [46].

#### (4) La mesure de la tension de cellule

C'est la technique de diagnostic la plus facile à mettre en œuvre car elle nécessite uniquement des sondes de tensions reliées aux électrodes de chaque cellule. Elle permet de faire un lien direct entre les chutes de tensions survenues dans le cas du noyage et de l'assèchement de la pile. Son intérêt est de pouvoir suivre l'état des cellules d'un stack séparément. L'analyse de ces tensions peut servir d'indicateur pour le contrôle du mode opératoire [47].

#### 5. Diagnostic par la mesure du champ magnétique externe

#### a) Principe

Les dégradations citées auparavant aux niveaux des AMEs modifient essentiellement l'impédance de celles-ci. Cette modification induit une redistribution hétérogène des densités de courant sur la surface des cellules. D'après la loi de Biot et Savart, la signature magnétique externe de la pile à combustible se trouve alors changée (Figure II.14).



Figure II.14 Mesure du champ magnétique externe : (a) Capteurs, (b) Courant hétérogène, (c) Signature magnétique

Le travail de thèse présenté ici repose sur la mesure de cette variation et son exploitation afin de reconstruire localement le courant responsable de cette anomalie en résolvant un problème inverse (Figure II.15). L'idée est donc avec la résolution d'un problème inverse, à savoir, la détermination des causes (la densité de courant) à partir des effets (le champ magnétique externe), de proposer un nouvel outil de diagnostic de stack non invasif.



Figure II.15 Reconstruction à partir d'un champ magnétique externe : (a) Signature magnétique, (b) Courant hétérogène reconstruit

#### b) Avantages

La reconstruction du courant à partir du champ magnétique permettrait à terme, de remonter aux causes des défauts diagnostiqués, ce qui pourrait être un indicateur efficace pour une commande en temps réel des paramètres de fonctionnement de la pile tels que la stœchiométrie, le refroidissement et l'humidification. La levée du verrou de l'encombrement permettra à un tel outil de s'intégrer facilement dans un système embarqué et de corriger les écarts de fonctionnement de la pile à combustible afin de prolonger sa durée de vie et diminuer son coût.

Comparé à d'autres outils de diagnostic existants, celui-ci n'affecte pas le fonctionnement de la pile à combustible de par sa qualité non-invasive. De plus, ce système est passif, ce qui ne nécessite pas une excitation de la pile par un quelconque signal comme dans le cas de la spectroscopie d'impédance.

# c) Etat de l'art du diagnostic des piles à combustible par la mesure du champ magnétique externe

Les premiers travaux, menés sur la thématique en France, ont été réalisés à Grenoble dans le cadre d'une collaboration entre le G2ELab, le LEPMI et le CEA/LITEN. Ce travail a été réalisé sous la forme d'une thèse soutenue en 2012 [1] dans le cadre du programme ANR OMNISCIENT. Il a permis dans un premier temps de développer un modèle électrocinétique d'une pile à combustible [48]. Ce modèle a ensuite été couplé avec un modèle magnétique afin de calculer le champ magnétique externe généré par la pile dans un cas sain et dans un cas de fonctionnement avec défaut. Cette étude a permis de définir un positionnement et une orientation des capteurs de champ magnétique optimaux permettant de n'extraire que l'information utile au diagnostic. Un modèle inverse de la loi de Biot et Savart a ensuite été développé, permettant de reconstruire les densités de courant dans une pile à combustible à partir de mesure externes du champ magnétique [49]. Ce travail s'est focalisé sur l'identification des défauts affectant toutes les cellules et a permis de reconstruire la densité du courant moyenne sur toute la longueur du stack. On adopte la dénomination de courants 2D. Le résultat a été ensuite comparé à une mesure invasive du courant (Figure II.16). L'approche utilisée dans ces travaux se situe dans la continuité et sera plus précisément explicitée dans le troisième chapitre.



Figure II.16 Défaut d'appauvrissement en air [49] :

(a) Courant mesuré par la carte S++, (b) Courant reconstruit à partir de la mesure du champ magnétique externe

Une autre équipe en France (Nancy – laboratoire GREEN) s'est intéressée au diagnostic des piles de type PEM par la mesure du champ magnétique externe [50]. Avec un modèle électro-fluidique, ils ont démontré que si un canal de distribution de l'oxygène est bouché, le champ magnétique sur la largeur de plaque bipolaire est modifié à l'endroit du défaut (Figure II.17). Ce travail a été validé sur une seule cellule.



Figure II.17 Défaut de diffusion de l'air : (a) Canal de diffusion d'oxygène bouché, (b) Champ magnétique [50]

Parmi les travaux les plus aboutis qui traitent le même sujet de par le monde, on distingue le travail d'une équipe allemande [51]. Cette équipe a développé un tomographe magnétique constitué d'un système robotisé sur lequel deux capteurs de champ magnétique sont installés. Ces capteurs permettent de scanner le champ autour de la pile dans plusieurs positions. Cette technique a ses limites car le temps de la mesure est d'environ 15 minutes. L'information obtenue sur l'état de la pile n'est pas instantanée car pendant ce temps le fonctionnement de la pile a pu changer. De plus, l'outil n'a été testé que sur une seule cellule de pile à combustible, alors qu'aujourd'hui la plupart des applications requièrent l'utilisation de stacks de plusieurs dizaines de cellules.

Une équipe japonaise s'est penchée également sur le diagnostic des piles à combustible par la mesure du champ magnétique, et deux travaux complémentaires ont vu le jour [52] [53]. Dans un premier temps, ils ont construit une base de champ en imposant des densités de courants aléatoires sur une seule cellule de pile à combustible. La base comprend 2000 défauts élémentaires et pour chaque vecteur ils calculent le champ magnétique sur 36 positions (Trois composantes, donc 108 mesures) afin de construire la base des champs. A l'aide d'un algorithme génétique, ils cherchent dans la base des champs la combinaison linéaire qui a générée la mesure. Dans la seconde partie de leurs travaux, ils ont posé un problème inverse 2D. Ils décomposent la surface de la pile en 64 parties surfaciques. L'inversion de l'opérateur de Biot et Savart reliant les courants aux champs magnétiques permet d'identifier les 64 (maillage 8x8) sources de courant contribuant au champ mesurés. Cette méthode a été testée sur une seule cellule sur laquelle un défaut artificiel a été créé (Figure II.18). Deux méthodes de régularisation sont testées telles que la régularisation de Tikhonov et la régularisation L1 [54]. Ces méthodes assurent l'unicité de la solution car les problèmes inverses sont mal-posés. Nous développerons ce point dans le chapitre suivant.



Figure II.18 Reconstruction de la distribution du courant à partir du champ magnétique externe [53] :

(a) Le défaut sur une membrane, (b) Courant reconstruit en utilisant régularisation de Thikhonov, (c) Courant reconstruit en utilisant la régularisation L1

#### C.CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'introduire plusieurs points importants qui justifient ce travail. Après avoir situé l'intérêt de la pile à combustible dans l'enjeu énergétique, nous avons détaillé le fonctionnement d'une cellule élémentaire de type PEM. Ensuite les différents types de défaillances survenant sur une pile à combustible et un état de l'art sur les méthodes de diagnostic ont été présentés. Une attention particulière est portée sur le diagnostic par la mesure du champ magnétique externe.

Nous notons la nécessité de corriger les défauts dans le cas de défaillances dues aux conditions opératoires. Dans le cas des défauts dus au vieillissement hétérogène, la surveillance des cellules affectées est primordiale afin de les remplacer au moment opportun pour empêcher une propagation sur les cellules voisines.

Le diagnostic de ces défauts nécessite des moyens non-invasifs et qui donnent une information directement liée aux défauts observés sans perturber le fonctionnement du dispositif. Le diagnostic par la mesure du champ magnétique externe semble avoir toutes ces qualités, car il permet sans perturber le fonctionnement de la pile de reconstruire la distribution du courant qui est une grandeur directement liée à la répartition de l'eau dans l'AME.

Dans le prochain chapitre deux modèles électrocinétiques couplés à un modèle magnétique seront présentés. Ces modèles permettront de générer des signatures de défauts numériques et de mieux comprendre l'impact des défauts de fonctionnement sur le champ magnétique autour du stack. Ils constitueront une base pour les travaux d'inversion traités dans le troisième chapitre.

# III. Chapitre II : Modèle direct électrocinétique et calcul du champ magnétique externe

Avant de poser le problème inverse, nous allons nous pencher sur la résolution du problème direct. Ce dernier est obtenu en établissant les équations de Maxwell qui régissent la conduction électrique dans un volume conducteur et pour un régime stationnaire. Ces équations sont résolues en utilisant deux méthodes numériques : Les volumes finis et les éléments finis de facettes.

A partir des paramètres électriques de la pile et des conditions aux limites, nous obtenons grâce à ces deux modèles la distribution de courant à l'intérieur de la pile. Ensuite nous allons utiliser la loi de Biot et Savart pour calculer la signature magnétique externe de la pile à partir d'une distribution de courant homogène et hétérogène.

La distribution du courant hétérogène et sa signature magnétique sont ensuite décomposées en trois modes : Le mode défaut, le mode commun (pile saine) et le mode différentiel. Le mode différentiel est particulièrement intéressant car il représente uniquement la variation en courant et en champ magnétique dans le cas d'un défaut par rapport à un cas sain. L'orientation des axes capteurs et leurs positions sont ensuite présentées en s'appuyant sur des travaux antérieurs.

Enfin nous présentons un simulateur de pile à combustible qui sera utilisé pour la validation du modèle direct. La géométrie et les matériaux choisis pour le simulateur sont très proches de celles d'un vrai stack, ce qui nous permet d'avoir une conduction électrique équivalente. Des mesures réelles sont obtenues en faisant circuler un courant électrique dans le simulateur et pour plusieurs configurations de défauts. Ces mesures sont comparées avec des mesures simulées obtenues avec le modèle direct.

#### A. INTRODUCTION

Le travail présenté dans ce manuscrit se base essentiellement sur la résolution d'un problème inverse. Ce problème consiste à chercher les causes à partir des effets. Les causes dans notre cas sont les densités de courant et les effets sont le champ magnétique externe. Avant de poser et de paramétrer le problème inverse, il est nécessaire de se pencher sur le problème direct. La modélisation directe se décompose en deux parties : la modélisation du problème électrocinétique qui conduit à une distribution de courant et le couplage de ce dernier avec un modèle magnétostatique permettant à partir d'une distribution de courant de calculer le champ magnétique dans l'espace.

Nous savons que la grandeur modifiée dans le cas de la dégradation d'une pile à combustible est la répartition de la densité de courant. Dans ce chapitre deux modèles électrocinétiques de la pile sont présentés même si un seul sera exploité par la suite. On observera grâce à ces modèles la distribution de la densité de courant dans le cas d'une pile saine et dans le cas d'une pile avec défaut.

Les deux modèles permettent d'évaluer l'impact de chaque composant (plaques bipolaires et plaques terminales) de la pile sur la signature du champ magnétique dans un cas sain et dans un cas défectueux. L'étude du modèle direct aidera à positionner les capteurs de champ magnétique et à les orienter afin d'accéder au maximum d'informations exploitables dans le cas d'un défaut.

Les deux modèles reposent essentiellement sur la conservation du flux de courant à travers les faces des éléments. Pour le premier, l'approche numérique choisie pour la résolution est la méthode des volumes finis [55] codée dans un environnement MATLAB<sup>®</sup> et une bibliothèque de fonctions d'exploitation et de visualisation propre est utilisée. Pour le deuxième, la méthode des éléments finis de facettes [56] est adoptée, et l'environnement de développement est JAVA. Les outils de calcul sont regroupés dans la plateforme MIPSE (Modeling of Interconnected Power SystEms), développée au laboratoire, et interfacée à des logiciels de visualisation tels que ParaView [57] et Gmsh [58].

#### **B.MODELE ELECTROCINETIQUE EN VOLUMES FINIS**

Ce modèle historique a été développé dans le cadre d'une collaboration antérieure entre le G2ELab, LEPMI et CEA pour le diagnostic d'un stack par la mesure du champ magnétique externe. Cette collaboration avait pour cadre le projet ANR OMNISCIENT et la thèse de M. Le Ny [1]. Le modèle a servi dans un premier temps de base pour évaluer les effets d'un défaut affectant un stack sur la répartition spatiale des courants et des tensions. Une série de simulations a ensuite été faite dans le but d'optimiser la position, l'orientation, et la gamme des capteurs avant de passer à la phase expérimentale. Enfin, des défauts de type « global » affectant toutes les cellules d'un stack industriel de type GENEPAC ont été détectés grâce à un algorithme d'inversion du champ magnétique. On rappellera ici les étapes importantes de cette modélisation. Dans ce modèle, seuls les phénomènes électriques sont considérés aux dépens de l'aspect électrochimique microscopique de la pile. Cette simplification est volontaire pour plusieurs raisons : le but est avant tout la reconstruction de la densité de courant dans le cas d'un défaut sans pour autant aller jusqu'à déterminer la cause électrochimique de l'hétérogénéité du courant, et elle permet d'étudier des stacks de dimensions industrielles sans se soucier des problèmes des temps de calcul qui peuvent être très importants en couplant plusieurs physiques.

Le modèle développé dans cette partie présente un atout majeur par rapport à d'autres modèles existants. Il prend naturellement en compte la nature de source de tension d'une cellule de pile à combustible. Ceci est mis en évidence par l'ajout d'un terme source dans les zones actives de la pile.

#### **1.** Equation de conduction

Les équations de conduction électrique s'établissent à partir des équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Gauss :

$$div \mathbf{D} = \rho$$
 Eq III-2

Ajoutons à ces équations les lois des matériaux conducteurs

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}$$
 Eq III-3

$$\mathbf{j} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$$
 Eq III-4

où **E** est le champ électrique (A/m), **B** l'induction magnétique (T), *t* le temps (s), **D** le courant de déplacement électrique (C/m<sup>2</sup>),  $\rho$  la densité volumique de charges électriques (C/m<sup>3</sup>),  $\varepsilon$  la permittivité diélectrique (F/m), **j** la densité de courant électrique (A/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  la conductivité électrique (S.m<sup>-1</sup>).

On simplifie l'équation de Maxwell-Faraday (Eq III-1) en considérant que le régime est stationnaire dans le cas d'une pile à combustible. Les équations finales les suivantes :

$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$	Eq III-5
$div \mathbf{D} = \rho$	Eq III-6
$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}$	Eq III-7
$\mathbf{j} = \mathbf{\sigma} \cdot \mathbf{E}$	Eq III-8

A partir de l'Eq III-5 on démontre que le champ électrique découle d'un potentiel électrique scalaire V (V) ce qui nous amène à l'équation de conduction :

En introduisant la loi d'Ohm locale (Eq III-8), on obtient la densité du courant en fonction du gradient du potentiel électrique :

$$\frac{\mathbf{j}}{\sigma} = -\mathbf{grad} V \qquad \qquad \text{Eq III-10}$$

Des conditions aux limites des deux domaines sont prises en compte pour la résolution éléments finis.

L'absence de charge de volume et une permittivité du milieu égale à celle du vide permettent d'écrire grâce à l'Eq III-6 et l'Eq III-7 :

$$div \mathbf{j} = 0$$
 Eq III-11

Il est nécessaire de considérer les conditions aux limites de notre problème sur la frontière de la pile  $\Gamma_c$ .

La pile est alimentée par un courant total I. Aussi, trois régions surfaciques sont définies comme illustré dans la Figure III.1: Une région  $\Gamma_c$  à flux de courant nul, une région  $\Gamma^-$  à flux de courant négatif non nul (où l'intégrale surfacique de la densité courant vaut –I) et une autre région  $\Gamma^+$  à flux de courant positif non nul (où l'intégrale surfacique de la densité courant vaut +I).

Cette condition aux limites peut se résumer de la façon suivante :

$$\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = \alpha$$
 Eq III-12

où **n** est la normale à un élément du maillage et  $\alpha$  doit être adapté pour assurer la conservation du courant.



Figure III.1 Décomposition des domaines d'étude et conditions aux limites

#### 2. Ajout d'un terme source à l'équation de conduction

Si on désire un comportement actif au niveau de la membrane (AME), celui-ci peut être créé par une force électromotrice responsable du transport des charges à travers celle-ci. Une source de tension est donc ajoutée à l'équation de conduction (Eq III-9).

où  $\mathbf{E}_{\mathbf{m}}$  est le champ électromoteur caractérisant la zone active de la pile (V.m<sup>-1</sup>).

En utilisant les deux équations (Eq III-8) et (Eq III-11), on obtient finalement l'équation électrocinétique.

$$div \sigma \operatorname{grad} V = div \sigma \mathbf{E}_{\mathbf{m}}$$
 EqIII-14

Le champ électromoteur est imposé dans les zones actives, siège de la réaction électrochimique (AME) et il est égal à zéro partout ailleurs.

Le domaine de la pile est décomposé en régions volumiques et l'EqIII-14 est discrétisée, et intégrée sur chaque volume de contrôle [48].

#### C.MODELE ELECTROCINETIQUE EN ELEMENTS FINIS

La seconde méthode proposée dans le cadre de ce travail repose sur le développement d'un modèle électrocinétique en éléments finis. Pour résoudre les deux équations Eq III-5 et Eq III-11, nous introduisons des potentiels et la condition aux limites définies par l'Eq II-12. Deux formulations sont possibles :

• Une formulation en potentiel scalaire électrique V (Eq III-15). Cette formulation assure fortement un rotationnel de **E** nul et impose faiblement la divergence de **j** nulle.

$$\begin{cases} div \mathbf{j} = 0 \\ \mathbf{j} = -\sigma \operatorname{\mathbf{grad}} V \end{cases}$$
 Eq III-15

• Une formulation en potentiel vecteur électrique **T** (Eq III-16). Cette formulation assure fortement une divergence de **j** nulle et impose faiblement le rotationnel de **E** nul.

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \mathbf{0} \\ \mathbf{E} = \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{T} \end{cases}$$
 Eq III-16

Les espaces fonctionnels continus sont discrétisés par des espaces fonctionnels discrets. L'approche est décomposée en deux étapes : Une discrétisation spatiale du domaine d'étude avec des formes géométriques (tétraèdres, des prismes, des hexaèdres ...) et une discrétisation des inconnues en les projetant sur des espaces fonctionnels discrets à l'aide de fonctions de forme. Selon la formulation en potentiel, les fonctions de forme adéquates sont choisies. Nous citerons par la suite les fonctions de forme couramment utilisées.

#### **1.** Potentiel électrique scalaire et fonctions de forme nodales

Nous associons à chaque nœud n du maillage une fonction de forme nodale  $w_n$ . Cette fonction est égale à 1 au nœud n est égale à zéro partout ailleurs. Ces fonctions de forme permettent de définir des fonctions scalaires.

Le potentiel scalaire électrique V s'interpole sur l'espace des éléments nodaux ce qui permet d'assurer la continuité de la composante tangentielle du champ électrique. Il peut être écrit sous la forme :

$$V = \sum_{i=0}^{N} w_i V_i$$
 Eq III-17

où  $V_i$  est la valeur du potentiel scalaire au nœud *i*.

Ces fonctions permettent d'imposer la continuité des fonctions scalaires d'un nœud à un autre sur tout le domaine d'étude. Leur gradient possède une composante tangentielle continue entre éléments.

Toutefois, les interpolations en fonctions de forme nodales ne sont pas adaptées aux problèmes d'électrocinétiques si une d'une divergence de **j** nulle est fondamentale. En effet, il a été démontré que pour des géométries complexes, le courant fuit aux endroits présentant des changements de direction comme illustré dans la Figure III.2.



Figure III.2 Densité de courant sortant des bords du domaine [59].

Dans notre problématique, une conservation du courant est nécessaire car elle va être à l'origine du calcul du champ magnétique et la précision sur ce calcul est primordiale. C'est d'ailleurs pourquoi, dans la thèse de M. Le Ny [1], la méthode des volumes fins avait été préférée. Cette méthode est en effet bien connue pour être très conservative vis-à-vis des flux. Nous allons donc nous tourner vers la deuxième famille de formulation.

#### 2. Potentiel vecteur électrique et fonctions de forme d'arêtes

Une arête  $A_{nm}$  formée de deux nœuds  $N_n$  et  $N_m$ , nous lui associons la fonction de forme d'arête  $w_a$ .

où  $w_n$  et  $w_m$  sont des fonctions de forme nodales associées respectivement aux nœuds  $N_n$  et  $N_m$ . La fonction de forme  $w_a$  est égale à 1 le long de l'arête  $A_{nm}$  et nulle sur les autres arêtes.

Les fonctions de forme d'arêtes permettent d'interpoler les grandeurs vectorielles en assurant la conservation de leur composante tangentielle entre deux éléments. Le potentiel vecteur électrique  $\mathbf{T}$  appartient à l'espace des éléments d'arêtes et il peut être écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{T} = \sum_{i=0}^{a} \mathbf{w}_i T_i$$
 Eq III-19

où  $T_i$  est la valeur de **T** le long de l'arête *i* et *a* le nombre d'arêtes du maillage.

En utilisant la loi d'Ohm locale la densité de courant **j** découle du potentiel vecteur électrique **T**. La densité de courant est donc exprimée selon l'Eq III-22 :

$$\mathbf{j} = \mathbf{rot} \mathbf{T}$$
 Eq III-20

Ces fonctions de forme permettent la conservation de la composante normale du courant. Cependant, le couplage avec un circuit externe via les arêtes est difficile à réaliser car il doit imposer la circulation de  $\mathbf{T}$  sur certaines arêtes du maillage.

#### 3. Densité de courant et fonctions de forme de facettes

Une alternative se base sur les éléments finis de facettes adaptés à l'interpolation des grandeurs vectorielles à flux conservatif ( $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{B}$ ). Ce choix d'interpolation est justifié d'une part, par le fait que la composante normale de ces fonctions est conservée à travers chaque facette ce qui assure la conservation des flux d'un élément à un autre, et d'une autre part par la facilité de connecter un circuit externe via les facettes. Dans notre application ces grandeurs sont les flux de la densité de courant à travers les facettes des éléments finis. Cette densité de courant est interpolée par des fonctions de forme de facettes de premier ordre (Figure II.7). La

représentation en circuit électrique équivalent associe aux branches les facettes des éléments et aux nœuds les barycentres des éléments [60].



Figure III.3 Représentation de fonction de forme de facette de premier ordre {i, j, k} et {i, j, k, l} pour un élément de référence tétraédrique et un élément de référence hexaédrique[60]

$$\mathbf{j} = \sum_{j} \mathbf{w}_{j} \cdot I_{j}$$
 Eq III-21

où  $\mathbf{w}_i$  est la fonction de forme de la facette *j*,  $I_i$  le courant traversant la facette *j*.

En considérant le cas où le maillage est hexaédrique les fonctions de forme de facettes dans l'élément de référence sont définies dans le Tableau III-1.

		1 ( 0 )	
$f_4 f_6 f_3 f_2$	$f_1$	$\mathbf{w}_{f_1} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 0\\0\\1+w \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_1} = \frac{1}{8}$
	$f_2$	$\mathbf{w}_{f_2} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ -1+w \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_2} = \frac{1}{8}$
	$f_3$	$\mathbf{w}_{f_3} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 0\\1+v\\0 \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_3} = \frac{1}{8}$
	$f_4$	$\mathbf{w}_{f_4} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1+u\\0\\0 \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_4} = \frac{1}{8}$
	$f_5$	$\mathbf{w}_{f_5} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 0\\ -1+\nu\\ 0 \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_5} = \frac{1}{8}$
	$f_6$	$\mathbf{w}_{f_6} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1+u\\0\\0 \end{pmatrix}$	$div \mathbf{w}_{f_6} = \frac{1}{8}$

Tableau III-1 Fonction de forme de facettes de premier ordre pour un élément hexaédrique

### a) Discrétisation

En discrétisant par la méthode de Galerkin l'Eq III-10 et en introduisant la fonction  $\mathbf{w}_i$  nous obtenons l'expression suivante :

$$\int_{\Omega_i} \mathbf{w}_i \cdot \frac{\mathbf{j}}{\sigma} \, d\mathbf{\Omega} = -\int_{\Omega_i} \mathbf{w}_i \cdot \mathbf{grad} \, V \, d\mathbf{\Omega}_c \qquad \text{Eq III-22}$$

En interpolant **j** par les fonctions de forme, cette expression se ramène à :

$$\sum_{j} \int_{\Omega_{i}} \frac{\mathbf{w}_{i} \cdot \mathbf{w}_{j}}{\sigma} \, d\mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{I}_{j} = -\int_{\Omega_{i}} \mathbf{w}_{i} \cdot \mathbf{grad} \, V \, d\mathbf{\Omega}_{c}$$
 Eq III-23

L'équation précédente peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\mathbf{R}_{ij} \cdot \mathbf{I}_{bj} = \mathbf{U}_{bi}$$
 Eq III-24

où **R** est la matrice résistive. Cette matrice est creuse car les termes  $\mathbf{R}_{ij}$  sont nuls si les facettes *i* et *j* n'appartiennent pas au même élément.  $\mathbf{I}_{b}$  est le vecteur des courants traversant les facettes et  $\mathbf{U}_{b}$  le vecteur tension.

#### b) Approche circuit électrique équivalent

L'équation (Eq III-24) est ensuite représentée par un circuit électrique équivalent [60]. Les branches sont associées aux facettes et les nœuds aux barycentres des éléments. Le circuit externe est connecté au domaine à travers les facettes localisées à l'interface air/conducteur avec ( $\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \neq 0$ ). Les facettes frontières avec ( $\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = 0$ ) sont simplement retirées du circuit.



Figure III.4 Circuit équivalent [60]

#### c) Résolution

Une fois le circuit construit et les termes de la matrice résistance calculés grâce à l'intégration éléments finis de facettes, un solveur circuit basé sur la recherche de mailles indépendantes est utilisé [61]. Cette technique permet de réduire le nombre de degrés de liberté en cherchant le courant des mailles au lieu du courant dans chaque branche et d'améliorer la vitesse de convergence du solveur [62].

Nous pouvons exprimer les équations des mailles indépendantes par le système matriciel suivant :

$$\mathbf{M}_{\mathbf{MI}} \cdot (\mathbf{U}_{\mathbf{b}} + \mathbf{RI}_{\mathbf{s}}) = \mathbf{0}$$
 Eq III-25

où **R** est la résistance propre à la source de courant externe  $I_s$  et  $M_{MI}$  la matrice incidence des mailles indépendantes/branches

- $\mathbf{M}_{\mathbf{MI}}(i, j) = 0$  Si la branche j n'a pas de lien avec la maille i.
- $\mathbf{M}_{\mathbf{MI}}(i, j) = 1$  Si la branche j est dans le même sens que la maille i.
- $\mathbf{M}_{\mathbf{MI}}(i, j) = -1$  Si la branche j est dans le sens opposé à celle de la maille i.

A partir de (Eq III-24) et (Eq III-25) nous obtenons un nouveau système d'équations

$$\mathbf{M}_{\mathbf{MI}} \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{M}_{\mathbf{MI}}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{I}_{\mathbf{m}} = -\mathbf{M}_{\mathbf{MI}} \, \mathbf{RI}_{\mathbf{s}}$$
Eq III-26

En posant :

$$\mathbf{R}_{\mathbf{m}} = \mathbf{M}_{\mathbf{M}\mathbf{I}} \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{M}_{\mathbf{M}\mathbf{I}}^{\mathrm{T}}$$
 Eq III-27

$$\mathbf{U}_{\mathbf{m}} = -\mathbf{M}_{\mathbf{MI}} \, \mathbf{RI}_{\mathbf{s}}$$
 Eq III-28

L'équation (Eq III-26) devient :

$$\mathbf{R}_{\mathbf{m}} \cdot \mathbf{I}_{\mathbf{m}} = \mathbf{U}_{\mathbf{m}}$$
 Eq III-29

La résolution du système (Eq III-29) nous donne les courants dans chaque maille indépendante. En multipliant par la transposée de la matrice d'incidence, nous obtenons les courants dans les branches et donc la densité de courant dans le domaine via les fonctions de forme de facettes.

$$\mathbf{I_b} = \mathbf{M_{MI}^T} \cdot \mathbf{I_m}$$
 Eq III-30

## D. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DE COURANT DANS UNE

#### PILE SAINE AVEC LES DEUX MODELES ELECTROCINETIQUES

Afin de visualiser et d'estimer la répartition de la densité de courant dans la pile, nous proposons dans cette section de présenter un cas test d'une pile sans défaut. Les deux modèles électrocinétiques présentés auparavant sont utilisés afin de faire une comparaison. Nous nous appuyons sur le modèle en éléments finis de facettes pour faire des illustrations par la suite.

Nous nous basons pour les simulations sur la géométrie d'un stack GENEPAC de 100 cellules (Annexe A). Nous regroupons les paramètres géométriques et électriques de cette pile dans le Tableau III-2.

Conductivité collecteur courant	$5.10^7  \mathrm{S.m^{-1}}$
Conductivité plaque terminale	$5.10^7  \mathrm{S.m^{-1}}$
Conductivité plaques bipolaires	$5.10^3  \mathrm{S.m^{-1}}$
Epaisseur collecteur courant	1 mm
Epaisseur plaques terminales	1 mm
Epaisseur plaques bipolaires	1 mm
Epaisseur AME	0.43 mm
Section collecteur courant	$0.02 x 0.02 m^2$
Section plaque terminale	0.1651x0.1373m <sup>2</sup>
Section plaques bipolaires	0.1651x0.1373m <sup>2</sup>
Section AME	0.1651x0.1373m <sup>2</sup>

Tableau III-2 Paramètres du stack GENEPAC 100 cellules

La distribution de courant obtenue par le modèle volumes finis et par l'approche éléments finis de facette est représentée sur la Figure III.5 pour un courant de pile de 100A.



Figure III.5 Distribution de courant (A.cm<sup>-2</sup>) : (a) Modèle volumes finis, (b) Modèle éléments finis de facettes

La différence entre les deux modèles réside dans le type de source, le modèle « volumes finis » considère la pile comme un élément actif avec l'ajout des sources internes (AME) et le modèle « éléments finis de facettes » considère la pile comme un élément passif avec une source de courant externe imposé à ses bornes.

Malgré cette différence, nous remarquons que d'après les deux modélisations du mode sain de la pile, la répartition du courant est homogène dans les deux cas. Une forte densité de courant est observée sur les plaques terminales. Ceci est dû à la forte conductivité de celles-ci ainsi qu'à leur faible épaisseur. La signature du champ magnétique du mode sain sera calculée à la suite de la définition des positions et des orientations des capteurs.

#### **E. DECOMPOSITION DU COURANT EN MODES**

#### 1. Remarque préliminaire

L'objectif de cette partie est de décrire la répartition réelle du courant au sein d'une pile en fonctionnement. Dans une pile réelle, comme dans tout générateur électrochimique, la densité de courtant est fonction de la tension (donc de la cinétique électrochimique), des conditions de fonctionnement locales à l'endroit où se produit la réaction électrochimique (pression des gaz, composition de milieu réactif, quantité d'eau liquide,) et de paramètres des matériaux où a lieu celle-ci (porosité, tortuosité, conductivité, quantité et activité du catalyseur,). Afin de reconstruire une base de description de la distribution du courant au sein de la pile, nous faisons l'hypothèse d'un comportement linéaire du système en fonctionnement (entre les paramètres de fonctionnement de la pile et l'impact sur la densité de courant).

Nous notons que le courant total fourni par la pile peut être mesuré par un ampèremètre dans un cas sain comme dans un cas avec défaut. Ce courant reste inchangé dans les deux cas, car il est imposé par la charge. Par contre, la mesure directe et non-invasive de la répartition du courant au sein de la pile demeure impossible. A partir de ces deux hypothèses, nous déduisons alors que le courant de défaut constitue une boucle à l'intérieur de la pile.

$$\mathbf{j}_{\text{tot}} = \mathbf{j}_0 + \mathbf{j}$$
 Eq III-31

où  $\mathbf{j}_{tot}$  est la distribution du courant de défaut,  $\mathbf{j}_0$  la distribution de courant dans une pile saine,  $\mathbf{j}$  la distribution de la boucle de courant.

L'hypothèse correspondant à l'Eq III-31 est illustrée dans la Figure III.6. La boucle de courant (Figure III.6 – (c)) est décomposée en deux composantes, une composante circulant dans la partie active de la pile (AME, plaques bipolaires), et une autre partie sur les plaque terminales.



Figure III.6 Décomposition des modes [1] :

(a) Courant quelconque de défaut, (b) Courant d'une pile saine, (c) Boucle de courant

#### 2. Mode défaut : Pile avec défaut

Nous illustrons ici deux cas de figures, une distribution du courant totale dans le cas d'un défaut 2D et une distribution du courant totale dans le cas d'un défaut 3D. Le but de ces

illustrations est de montrer que les boucles de courant peuvent être locales autour du défaut ou bien plus globales sur toute la profondeur de la pile. Un paragraphe est consacré à ces appellations de défaut 2D et défaut 3D dans la suite du manuscrit (§ F.3). Ces deux défauts ont été simulés en imposant une conductivité électrique 10<sup>6</sup> fois plus faible que dans un cas sain. Une zone donnée de la pile (une partie de la surface de toutes les AME dans le cas 2D et une partie de quelques AME dans le cas d'un défaut 3D) est affectée. Nous remarquons d'après la Figure III.7 que toutes les lignes de courant se concentrent sur la partie saine et une faible distribution de courant dans la zone affectée par le défaut.



Figure III.7 Mode défaut : (a) Défaut sur toute la profondeur, (b) Défaut sur une partie de la pile

#### **3.** Mode commun : Pile saine

Le mode commun représente le mode de fonctionnement sain de la pile. Il est illustré dans la Figure III.8 par une distribution de la densité de courant homogène à l'intérieur de la pile et sur toutes les AME. Ce courant est ensuite collecté par des plaques terminales de forte conductivité électrique. Le saut important de conductivité entre les plaques terminales et les plaques bipolaires assure une quasi-homogénéisation du courant à l'intérieur de la pile.



Figure III.8 Mode commun

#### 4. Mode différentiel : Boucle de courant

La distribution de courant du cas idéal (mode commun) est soustraite à la distribution du courant calculée dans le cas d'un défaut, conformément à l'équation (Eq III-31), pour obtenir le mode différentiel. L'opération de soustraction est réalisée pour les deux défauts présentés précédemment (Figure III.7). Nous distinguons dans la Figure III.9 les boucles de courant internes, avec une grande boucle dans le cas d'un défaut 2D et une petite boucle concentrée sur l'endroit du défaut dans le cas d'un défaut localisé (3D).



Figure III.9 Mode différentiel : (a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D

#### 5. Conclusion sur la décomposition du courant en modes

La décomposition en modes permet de ne s'intéresser qu'aux variations locales de la densité de courant par rapport à un fonctionnement sain de la pile. Nous concluons que l'identification du courant différentiel est suffisante pour diagnostiquer une pile à combustible. Nous allons voir par la suite que ces boucles de courant dues aux défauts génèrent aussi un champ magnétique externe résiduel. L'ordre de grandeur des variations du champ magnétique est généralement moins important que l'ordre de grandeur du champ du mode commun. Ce dernier constat et une orientation particulière des capteurs pour être insensibles au champ du mode commun sont intéressants car ils permettent de choisir une gamme de capteurs uniquement en fonction du maximum de champ généré par les courants différentiels.

De plus, nous allons voir que le mode différentiel permet de s'affranchir de quelques sources de bruit magnétique pouvant introduire des erreurs lors de l'inversion de mesures réelles.

#### F. MODELE MAGNETOSTATIQUE

La deuxième étape de ce chapitre s'intéresse au calcul du champ magnétique statique autour de la pile. Elle vient compléter le modèle électrique direct qui dans un premier temps nous a permis de calculer une distribution de courant dans la pile. Il permet d'évaluer le champ généré par une pile à combustible pour deux configurations :

- Dans les conditions de référence de fonctionnement,
- Et dans un cas de défaut.

Il permet également de spécifier la gamme de capteurs (champ maximale mesurable sans saturation et champ minimale perceptible) adéquate pour l'application finale. Des simulations seront faites dans le but de choisir les composantes sensibles aux défauts. Enfin ce modèle permettra de construire une base de projection de champ qui servira dans notre modèle d'inversion.

Le champ magnétique est calculé en résolvant l'équation de Maxwell-Ampère (Eq II-1) associée à l'équation de Maxwell-Thomson (Eq III-33).

$$rot H = j$$
 Eq III-32

$$div \mathbf{B} = 0$$
 Eq III-33

En se plaçant dans le cas où les matériaux qui composent la pile sont amagnétiques

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$$
 Eq III-34

où  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide (H/m).

Nous avons :

$$\mathbf{rot} \ \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{j}$$
 Eq III-35

Le champ **B** peut être obtenu en utilisant la méthode des éléments finis [63]. Ici, nous avons choisi d'utiliser la loi de Biot et Savart. En effet le modèle direct magnétique sera

énormément utilisé pour développer le modèle inverse. Or la méthode des éléments finis est généralement coûteuse en temps de calcul car la résolution des équations Eq II-1 et Eq III-33 peut conduire à la manipulation de matrices de grandes tailles.

A partir de l'équation (Eq III-33), nous déduisons que le champ magnétique découle d'un potentiel vecteur magnétique **A**.

$$rot A = B$$
 Eq III-36

En développant (Eq III-36) et en prenant une jauge de Coulomb (Eq III-37), on obtient :

$$div \mathbf{A} = \mathbf{0}$$
 Eq III-37

$$\begin{cases} \operatorname{rot} (\operatorname{rot} A) = \operatorname{rot} B\\ \operatorname{rot} (\operatorname{rot} A) = \operatorname{grad} (\operatorname{div} A) - \Delta A\\ \Delta A = -\mu_0 \mathbf{j} \end{cases}$$
 Eq III-38

La résolution de l'équation de Poisson (Eq III-38) nous donne le potentiel vecteur magnétique [64] :

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \iiint_{\Omega_{c}} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{c}) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}_{c}) \, d\Omega_{c} \\ \text{avec } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{c}) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{1}{|\mathbf{r}_{c} - \mathbf{r}|} \end{cases}$$
Eq III-39

où **G** est l'opérateur de Green (T.A<sup>-1</sup>), **r** la position dans l'espace dans le domaine  $\Omega$  (m), **r**<sub>c</sub> la position dans l'espace dans le domaine  $\Omega_c$  (m).

La relation (Eq III-36) nous permet d'avoir la loi de Biot et Savart :

$$\begin{cases} \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \iiint_{\Omega_{\mathbf{c}}} \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mathbf{c}}) \wedge \mathbf{j}(\mathbf{r}_{\mathbf{c}}) \, d\Omega_{\mathbf{c}} \\ \text{avec } \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mathbf{c}}) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{(\mathbf{r}_{\mathbf{c}} - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_{\mathbf{c}} - \mathbf{r}|^{3}} \end{cases}$$
Eq III-40

où **F** est le noyau de la loi de Biot et Savart  $(T.A^{-1}.m^{-1})$ .

Les deux modèles électrocinétiques détaillés dans les sections précédentes ont été couplés avec ce modèle magnétique en se basant sur la discrétisation numérique de la loi de Biot et Savart.

La décomposition en mode est aussi valable pour le champ magnétique qui peut être exprimé comme dans l'équation ( Eq III-31 ). Dans ce cas, cette décomposition permet de dé-

coupler la contribution de chaque source de courant séparément. C'est ce champ différentiel qui va être utilisé dans la suite du travail pour identifier la distribution du courant à l'aide d'un modèle inverse.

$$\mathbf{B}_{tot} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}$$
 Eq III-41

où  $\mathbf{B}_{tot}$  est le champ magnétique total (ambiant, pile saine et défaut),  $\mathbf{B}_0$  le champ magnétique généré par la pile saine et le champ ambiant,  $\mathbf{B}$  le champ magnétique généré par le courant différentiel (boucle de courant) dont les causes seront à identifier.

#### 1. Positions et orientations des capteurs magnétiques

La détermination des positions et des orientations des capteurs permet de satisfaire plusieurs points :

- Choix de la gamme de capteur adéquate à ce type d'applications,
- Choix de la sensibilité des capteurs selon le niveau de champ des défauts à détecter,
- L'encombrement et le coût du système,
- Un conditionnement amélioré du modèle inverse.

## a) Orientation des capteurs magnétiques et choix des composantes à mesurer

Nous rappelons que le mode commun du courant circule essentiellement suivant la direction z dans la zone active de la pile (plaques bipolaires et AME) et suivant les deux directions x et y dans les plaques terminales. Ce constat impose un champ magnétique généré autour de la zone active principalement orthoradial. Pour découpler le mode commun du mode différentiel nous nous intéressons alors à ne mesurer que le champ généré par la boucle de courant due au défaut en plaçant les capteurs autour de la pile (Figure III.10) suivant une orientation étudiée dans les travaux de M. LeNy [1]. L'affranchissement du champ du mode commun (plus important par rapport à un champ différentiel) par ce choix d'orientation des axes des capteurs permet d'utiliser une gamme de capteurs plus basse.



Figure III.10 Plan de capteurs et orientation des axes capteurs

La contribution au champ magnétique total des plaques terminales et de la zone active dans le cas d'un mode commun est illustrée (Figure III.11). Celle-ci est majoritairement selon la direction orthoradiale (Bv en bleu sur la Figure III.10). Cette composante n'est donc pas prise en compte dans la mesure.



Figure III.11 Distribution des densités de courant pour  $I = 100A (A.m^{-2})$  et du champ magnétique ( $\mu T$ ) sur un plan de capteurs central :

(a) Courant dans les plaques terminales, (b) Courant dans la zone active

En s'intéressant aux composantes radiale et axiale du champ magnétique, nous remarquons que celles-ci sont dépendantes de la boucle de courant due au défaut. Nous proposons donc de n'identifier que ces boucles de courant lors de la résolution du problème inverse. La distribution de courant de défaut au sein de la pile est calculée en ajoutant un mode commun numérique à la boucle de courant identifiée selon le schéma (Figure III.6).

#### b) Positions des plans de capteurs le long de la pile

Nous souhaitons maintenant dupliquer le nombre des plans de capteurs pour avoir des informations complémentaires en termes de champ sur les défauts se trouvant à n'importe quelle position en profondeur de la pile. Pour cela nous simulons cinq défauts à différents endroits de la pile, en changeant leurs positions en profondeur (Figure III.12).



Figure III.12 Positions des cinq défauts simulés, conductivité de 5.10<sup>-3</sup> S.m<sup>-1</sup>sur la zone bleue et conductivité de 5.10<sup>3</sup> S.m<sup>-1</sup>sur la zone rouge

Nous avons calculé le champ magnétique sur deux capteurs radiaux à différentes positions suivant la longueur de la pile (Figure III.13). Le but de cette démarche est de choisir les positions des plans de capteurs où le champ est différent pour chaque configuration de défaut.



Figure III.13 Les deux capteurs sur lesquels le champ est observé

Ces configurations de défauts 3D montrent que le champ magnétique est différent aux positions -0.025m et 0.025m par rapport au centre de la pile, et ceci pour les deux capteurs. Ces positions sont intéressantes pour visualiser un défaut en termes de champ magnétique.



Figure III.14 Champ magnétique sur un seul capteur pour différents défauts (µT) : (a) Capteur 1, (b) Capteur 2

Nous proposons de garder le plan central car celui-ci permet de décrire en champ magnétique des défauts 2D, comme cela a été prouvé auparavant [1].

La disposition finale des plans de capteurs sur la pile GESI (Annexe A) est illustrée dans la Figure III.15. L'ensemble est constitué de 3 plans de 24 capteurs bi-axes. Soit au total un ensemble de 72 capteurs ou encore 144 mesures.



Figure III.15 Positions des plans de capteurs autour de la pile GESI

Une numérotation des capteurs est aussi adoptée pour faire un lien entre la position du défaut et sa signature sur les capteurs proches de celui-ci. Cette numérotation facilitera aussi la lecture des figures présentant des signatures de champ magnétique. Deux plans de capteurs sont disponibles au laboratoire, un plan comportant 24 capteurs biaxes pour la pile GESI et un plan comportant 30 capteurs biaxes pour la pile GENEPAC de plus grande section. La numérotation va de 1 à 24 pour la GESI (de 1 à 30 pour la GENEPAC) et ceci sur les trois plans de capteurs.



Figure III.16 Numérotation des capteurs : (a) Plan de 24 capteurs de la pile GESI, (b) Plan de 30 capteurs de la pile GENEPAC

#### 2. Signature magnétique d'une pile fonctionnant de manière idéale.

Nous avons vu auparavant uniquement la répartition du courant dans le cas d'une pile saine en faisant une résolution d'un problème de conduction en utilisant deux modèles électrocinétiques différents pour un régime à 100A (§ D). Afin de justifier l'utilisation d'un modèle aux dépens d'un autre, nous avons comparé les signatures des champs magnétiques générées par ces deux distributions de courant. Ces signatures sont calculées sur les trois plans de capteurs (gauche, milieu et droit – colonnes de la Figure III.17) en prenant en compte que deux composantes (axiale et radiale – lignes de la Figure III.17). Nous constatons que ces deux modèles aboutissent aux mêmes signatures du champ magnétique. L'ordre de grandeur et la forme de ces champ magnétiques sur les trois plans de capteurs sont identiques (Figure III.17).



Figure III.17 Comparaison des champs magnétiques ( $\mu T$ ) : (a) Modèle volumes finis, (b) Modèle éléments finis de facette

## 3. Simulation du champ magnétique dans le cas d'un défaut s'étendant à l'ensemble de la pile et dans le cas d'un défaut localisé sur quelques cellules

Dans cette section nous adopterons deux appellations pour les défauts. Les défauts 2D survenus généralement à cause d'un paramètre fonctionnement non-nominal de la pile et les défauts 3D qui sont généralement dus à un vieillissement sur quelques cellules.

a) Défaut 2D : Global

Ce défaut peut apparaître lors d'un noyage ou d'un assèchement d'une partie du stack. Le noyage est caractérisé par une augmentation de la concentration d'eau sur une partie de la zone active dans le cas d'un faible débit des gaz. En effet, le gaz joue un rôle important dans l'évacuation de l'eau à l'extérieur de la pile. Un assèchement est causé par un débit très important. Ces deux phénomènes se traduisent dans le modèle par un changement de la conductivité électrique dans la partie concernée, ce qui conduit à une distribution de courant hétérogène. L'appellation 2D est utilisée car le courant est invariant dans la direction principale du courant.

La signature magnétique (Figure III.18 - (c)) se trouve fortement modifiée à cause de l'hétérogénéité du courant par rapport à un mode sain.



Figure III.18 : Défaut 3D :

(a) Répartition de la densité du courant différentiel (A.m<sup>-2</sup>), (b) Champs sur les capteurs, (c) Signature du champ magnétique (μT)

b) Défaut 3D : Local

Le vieillissement d'une ou plusieurs cellules dans la pile modifie les propriétés électrochimiques de quelques AMEs. L'appellation défaut 3D est adoptée car la direction du courant est modifiée le long de la pile.

Le champ magnétique (Figure III.19-b) dans ce cas est plus faible que dans le cas du défaut 2D présenté auparavant. Ce constat n'est pas tout le temps vrai pour toutes les configurations de défauts, car l'ordre de grandeur du champ magnétique différentiel est principalement lié à l'ordre de grandeur du défaut (nombre de cellules affectées et surfaces des AMEs affectées) et dans notre cas à la différence de la conductivité électrique de la zone de défaut par rapport à celle d'une zone saine.



Figure III.19 : Défaut 3D :

(a) Répartition de la densité courant différentiel (A.m<sup>-2</sup>), (b) Champs sur les capteurs, (c) Signature du champ magnétique ( $\mu T$ )

#### 4. Conclusion sur les défauts

La distinction entre un défaut 2D et un défaut 3D est nécessaire pour la suite de la modélisation car cela nous permettra de chercher une base de défauts élémentaires qui définit les deux types de défauts à déterminer. Un défaut 2D est généralement lié aux conditions opératoires (stœchiométrie, humidité relative, pression) et sa présence permanente peut induire un vieillissement accéléré des AME. La correction d'un tel défaut peut se faire uniquement en
régulant les paramètres de fonctionnement de la pile. Un défaut 3D est généralement dû à un dysfonctionnement localisé de la pile (point chaud, trou, défaut de fabrication).

La valeur du champ magnétique généré par les deux configurations de défaut est indépendante de la taille (2D ou 3D) du défaut et elle est plutôt liée à l'ordre de grandeur de la boucle de courant (surface totale du défaut et le rapport de conductivité entre la zone de défaut et un cas sain). Par conséquent nous pouvons avoir une signature plus importante sur un plan de capteur pour un défaut 3D comparé à la signature d'un défaut 2D.

# G. COMPARAISON ENTRE DES MESURES NUMERIQUES ET DES

# **MESURES REELLES**

Pour valider le modèle numérique développé par la méthode des éléments finis de facettes, une comparaison des résultats de simulation avec des mesures réelles a été réalisée. Ces mesures ont été obtenues grâce à un simulateur qui reproduit le comportement électrique d'une pile à combustible.

Cette démarche est décomposée en deux étapes. Dans un premier temps, nous nous sommes inspirés d'un simulateur déjà existant au laboratoire réalisé lors des travaux de M. LeNy [1]. Celui-ci est composé de barreaux de graphite. La géométrie et les résultats obtenus en utilisant la pile en barreaux sont présentés en l'Annexe A.

Au vu des conclusions tirées de cette première approche, nous nous sommes ensuite penchés sur la nécessité de changer la conception du simulateur. Une autre configuration a été adoptée, en prenant à la place des barreaux, trois blocs de graphite, un représentant une pile saine et deux autres représentants des piles avec des défauts de tailles différentes.

# 1. Description du dispositif expérimental de mesure du champ magnétique

# a) Plan de capteurs

Le plan de capteur (Figure III.21) est composé de plusieurs capteurs bi-axes de type fluxgate (Figure III.20). Le principe de fonctionnement de ces capteurs repose sur la dissymétrie de la saturation d'un matériau magnétique entouré d'une bobine excitatrice [65]. Ces capteurs sont connus pour être très précis pour mesurer les champs statiques.

	Nombre d'axes	2 axes
	Gamme de mesure	[-200µT, 200µT]
	Bande passante	800Hz
	Niveau de bruit créte à crète	<5 nT
( 13	Précision	±5%

Figure III.20 Capteur fluxgate biaxe

Le nombre de capteur est choisi selon la dimension de la section de la pile et de manière à éviter d'avoir des informations redondantes (24 pour le simulateur, 30 pour la pile GENEPAC). La gamme de mesure est de [-200 $\mu$ T, 200 $\mu$ T]. Les capteurs sont intégrés sur une pièce en polycarbonate permettant un bon positionnement et une bonne reproductibilité de celui-ci. Ce plan est coulissant le long de la pile suivant un rail usiné sur le support en aluminium afin définir plusieurs plans de mesures.



Direction de coulissement du plan de capteur

Figure III.21 Plan de capteurs coulissant

b) Baie de conditionnement

Un boitier de conditionnement du signal est connecté aux capteurs d'un côté et au système d'acquisition de l'autre. Il est constitué d'un ensemble d'alimentation et de filtres permettant d'atténuer le bruit de mesure.

# c) Système d'acquisition

Un système d'acquisition, de type PXI composé de trois cartes de 32 voies analogiques, permet de numériser le signal analogique mesuré par le capteur avec une fréquence d'échantillonnage allant jusqu'à 500 kHz. Une plateforme LabView est installée pour concevoir le système de mesure et visualiser en temps réel le résultat des mesures.

# 2. Bruits et erreurs de mesure

Pour caractériser l'environnement magnétique ambiant, la première mesure que nous faisons est toujours la mesure sans courant. La caractérisation est décomposée en deux étapes : une mesure du champ ambiant, et une mesure en allumant tous les auxiliaires autour de la pile avec un courant nul à l'intérieur de celle-ci. Ces deux mesures servent à déterminer d'éventuels changements de la signature magnétique de l'environnement ambiant dans la salle. Elle est réalisée au moins deux fois dans la journée (au début et à la fin des mesures). Cette signature est composée essentiellement du champ terrestre et de la signature des dispositifs électriques se trouvant dans la salle et autour de celle-ci.

Le bruit propre aux capteurs est atténué par des filtres installés dans la baie de conditionnement. Une deuxième étape de filtrage est faite lors de l'exploitation en faisant une moyenne sur près de 2400 points pour chaque mesure.

Ajouté au bruit de mesures, des erreurs de mesure peuvent aussi être dues à un mésalignement mécanique de la pile par rapport capteurs. Pour illustrer ce problème nous avons modélisé deux situations : avec et sans mésalignement. Nous considérons deux fils alimentés par un courant de 100 A (Figure III.22). Les deux fils sont suffisamment longs pour les considérer comme infinis. Un de ces fils est maintenu perpendiculaire à l'axe y ce qui permet d'avoir une composante orthoradial du champ magnétique nulle, et l'autre fil est décalé volontairement de 3° par rapport l'axe y.



Figure III.22 Disposition des fils

Les champs magnétiques calculés pour le fil dans l'axe du plan de mesure et dans le cas d'un fil désaxé par rapport à ce plan de  $3^{\circ}$  sont représentés sur la Figure III.23. Dans le cas d'un fil dans l'axe du plan de mesure, les composantes radiale et axiale sont nulles vu l'orientation des axes des capteurs (Figure III.23-courbe rouge). Pour le second fil ayant subi une rotation de  $3^{\circ}$  par rapport au premier, une projection du champ magnétique sur les axes radial et axial des capteurs est observée (Figure III.23-courbe bleue). Cette projection est de l'ordre de 12 µT sur certains capteurs. Une telle erreur pourrait complètement noyer le champ d'un défaut survenu dans une pile et une solution aberrante pourrait être obtenue en identifiant le défaut par notre méthode.



Figure III.23 Champ dû au mésalignement ( $\mu T$ ) : (courbe rouge) sans mésalignement, (courbe bleu) avec mésalignement de 3°

# 3. Simulateur de pile en bloc de graphite

Nous avons dans un premier temps essayé d'exploiter un simulateur de pile disponible au laboratoire. Ce simulateur est composé de barreaux de graphite et a été utilisé pour simuler des défauts 2D. Les premières mesures n'ont pas été convaincantes car nous nous sommes rendu compte que ce simulateur n'est pas adéquat pour simuler des défauts 3D. Cette partie est détaillée dans l'Annexe C.

Suite aux difficultés rencontrées avec le simulateur de pile en barreaux, nous avons choisi de le remplacer avec des blocs de graphite entiers cubiques. Cette forme géométrique est choisie dans le but de pourvoir réaliser différents défauts en disposant les blocs dans une direction différente. Nous disposons de trois blocs de graphites :

• Le premier bloc (Figure III.24 – (a)) représente le mode commun de la pile (sans défaut),

- Le second (Figure III.24 (b)) est amputé d'une partie importante du graphite (24% du volume total), il permet d'avoir des configurations de défaut 2D et en le positionnant autrement on obtient des défauts 3D,
- Enfin le troisième bloc (Figure III.24 (c)) est amputé d'une petite partie (3% du volume total) du graphite afin de ne réaliser que des défauts 3D de petites tailles.



Figure III.24 Simulateur de pile en bloc de graphite : (a) Mode commun, (b) Défaut 3D – a, (c) Défaut 3D - b

La Figure III.25 représente le dispositif complet de mesure et le simulateur de pile (bloc de graphie Figure III.24 – (b)) pris entre deux plaques terminales en cuivre et des vis amagnétiques pour assurer un contact homogène avec le bloc de graphite à plusieurs endroits. Le champ magnétique généré par la boucle de courant externe est atténué en éloignant celle-ci du plan de capteurs. Nous rappelons que le plan de capteurs est constitué de 24 capteurs biaxes. La mesure se fait sur trois positions le long de la pile et les deux composantes mesurées du champ sont exploitées (radiale et axiale).





Figure III.25 Système experimental : (a) Dispositif complet, (b) Simulateur de pile

a) Répétabilité de la mesure du mode commun

Comme précédemment pour constater la répétabilité de la mesure du mode commun, nous avons fait plusieurs montages et démontages du simulateur. Nous alimentons avec un courant constant de 25A le bloc de graphite (Figure III.24 - (a)) mis entre deux plaques terminales.

Nous mesurons ensuite le champ magnétique à chaque remontage de la pile (Figure III.26). Nous constatons que le champ magnétique est moins perturbé que dans le cas précèdent. Les problèmes des résistances de contact entre barreaux sont résolus. Les signatures magnétiques ont la même forme pour les différents démontages de la pile et les dispersions ont diminués.



Figure III.26 Champ magnétique du mode commun après plusieurs démontages de la pile

# b) Mesure du mode différentiel

Les deux blocs amputés sont ensuite installés entre les deux plaques terminales (Figure III.27). Un courant de 25 A est imposé à l'intérieur du simulateur.



(a)



Figure III.27 Les défauts réalisés : (a) Défaut 3D – a, (b) Défaut 3D - b

La signature du champ différentiel (Figure III.28) est calculée en soustrayant la signature du mode commun mesurée auparavant. La figure (Figure III.28 – (a)) présente le champ différentiel sur les trois plans et les deux composantes axiale et radiale quand le simulateur (Figure III.27 – (b)) est alimenté par un courant 25A. De manière similaire, la Figure III.28 – (b) présente le champ différentiel sur les trois plans de capteurs et les deux composantes axiale et radiale pour le simulateur (Figure III.27 – (c).

Il est important de constater que les champs mesurés et les champs calculés ont la même forme bien que les ordres de grandeurs sur certains capteurs soient différents. Ces différences sont sur les capteurs (essentiellement sur le capteur 7) proches des bornes d'entrée et de sortie du courant. Elles peuvent donc être dues à une dissymétrie entre ces deux bornes qui sont censées être identiques.



Figure III.28 Signatures du mode différentiel (μT) :
Rouge : Valeurs simulées ; Bleu : Valeurs mesurées du champ magnétique
(a) Signature différentiel du défaut Figure III.27 – (a) ;
(b) Signature différentiel du défaut Figure III.27 – (b)

# H. CONCLUSION SUR LE MODELE DIRECT

Dans cette partie, deux problèmes directs électrocinétique et magnétostatique sont couplés. Les distributions du courant dans une pile saine et dans une pile défectueuse ont été présentées. Selon la forme, la cause et l'ordre de grandeur des défauts, des appellations ont été adoptés afin de simplifier la compréhension par la suite. Des positions des plans de capteur sont choisies dans le but d'avoir le maximum d'informations sur des défauts situés à différents endroits de la pile. Ces capteurs sont orientés pour détecter les variations du courant dans la pile par rapport à un mode sain.

L'hypothèse de la linéarité du champ nous a permis de décomposer le problème en trois modes distincts en densité de courant et en champ magnétique. Le mode différentiel nous sera très utile car il permettra d'éliminer les bruits dus à l'environnement et ceux dus au mode commun. Ces modèles serviront de base au modèle inverse présenté dans le prochain chapitre.

Une partie expérimentale est présentée dans ce chapitre afin de comparer les signatures du champ magnétique modélisé avec un cas réel. Les mesures réelles sont réalisées sur un simulateur électrique d'une pile à combustible. Cette étape nous a permis de nous rendre compte de la difficulté de superposer un champ magnétique mesuré et un champ magnétique calculé. Cette difficulté est due à la sensibilité du champ magnétique à une variation quelconque de l'environnement où la mesure est réalisée (bruit, erreurs mécaniques, pièces magnétiques...). Ce problème est en partie contourné en ne considérant que le mode différentiel du champ magnétique par rapport un mode sain.

# IV. Chapitre III : Modèle Inverse

Après la présentation du modèle direct dans le chapitre précèdent, nous présenterons dans ce chapitre un modèle inverse magnétostatique. Les entrées de ce modèle sont les mesures externes du champ magnétique autour de la pile et la sortie est la distribution des densités du courant 3D reconstruite à l'intérieur de la pile. Nous allons insister sur le caractère linéaire du modèle en considérant que tous les matériaux de la pile sont amagnétiques.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous présenterons les problèmes inverses d'une manière générale. Nous insisterons sur les difficultés que nous rencontrerons dans la résolution des problèmes inverses dues essentiellement au caractère mal posé de ceux-ci. Quelques méthodes de résolution et de régularisation seront présentées.

Il faudra ensuite paramètriser notre problème inverse ce qui se fera en deux étapes :

La première étape s'intéresse à la paramètrisation de la distribution du courant. Différentes approches définissant différentes bases de courant seront présentées.

Ces bases définissent les deux configurations de défauts (2D et 3D) présentées dans le chapitre précèdent. Nous utilisons ensuite le modèle direct électrocinétique pour simuler trois défauts de conductivité. Les distributions de courant obtenues sont projetées sur les bases de courant définies par les différentes approches et les erreurs de représentativité de chaque base sont calculées. La Figure IV.1 propose les différentes étapes suivies.



Figure IV.1 Etapes de la projection d'un courant différentiel sur la base des courants

La deuxième étape consiste à calculer les bases du champ magnétique à partir des vecteurs des bases de courant. Les signatures magnétiques des trois défauts seront projetées

sur ces bases de champ. La distribution de courant correspondant à chaque signature sera reconstruite. Ces approches seront ensuite comparées afin de sélectionner la meilleure d'entre elles. Le critère de comparaison sera l'erreur minimale obtenue pour différents défauts identifiés par ces approches. La Figure IV.2 montre les étapes de la projection du champ différentiel sur la base des champs.



Figure IV.2 Etapes de la projection d'une signature magnétique différentielle sur la base des champs

Enfin dans la dernière partie nous testerons la stabilité du problème inverse vis-à-vis du bruit magnétique et nous étudierons le rapport entre le bruit magnétique est le paramètre de troncature qui régularise le modèle inverse et assure l'unicité de la solution.

#### A. INTRODUCTION

La modélisation directe d'un problème physique repose toujours sur la mise en place d'un certain nombre d'équations de comportement qui décrivent un phénomène donné. Ceci est traduit par une fonction de transfert pour laquelle on fournit une entrée (sollicitations, paramètres, conditions aux limites ...) et on désire prédire par le modèle les sorties. Cette fonction, établie à partir des équations de la physique, a fait l'objet du précédent chapitre. La modélisation directe s'est décomposée en deux parties : le modèle électrocinétique suivi du modèle magnétique. Le modèle électrocinétique nous donne une distribution de densité de courant quelconque dans une pile à combustible et le modèle magnétique calcule la signature magnétique de cette distribution de courant sur un réseau de capteurs externe.

Dans un premier paragraphe, des généralités sur les problèmes inverses sont présentées en rappelant leurs spécificités, ensuite des méthodes de résolution utilisées pour obtenir des solutions physiques sont décrites. Dans un deuxième temps, un exemple en traitement d'images sera présenté afin d'illustrer la complexité de résolution d'un problème inverse et la nécessité de régulariser afin d'obtenir une solution stable. Enfin, nous nous nous concentrerons sur notre application en proposant une méthodologie pour résoudre le problème inverse magnétostatique. Ce modèle sera mis sous forme matricielle et résolu en utilisant la décomposition en valeurs singulières.

#### B. GENERALITES SUR LES PROBLEMES INVERSES

Les problèmes inverses sont apparus pour la première fois au début du 20<sup>ième</sup> siècle grâce à l'astrophysicien soviétique et arménien Viktor Ambartsumian [66]. Ils sont devenus depuis ce temps une grande discipline dans la recherche et ils sont utilisés dans plusieurs branches scientifiques.

On peut expliciter le problème direct et inverse en utilisant la notion de *système*. Le problème direct consiste à calculer une réponse **d** (tension, courant, déplacement, température, ...) à partir de sollicitations **X** (sources de tensions, sources de courants, conditions aux limites, conditions initiales, forces, ...) et des paramètres **p** (conductivités, perméabilités, géométries, ...). L'équation physique donne la réponse **d** comme fonction implicite (Eq. 1) ou explicite (Eq. 2) de **X** et **p**.

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{p})$$
 Eq IV-2

où G symbolise un opérateur liant les lois de la physique, les réponses aux sollicitations et les paramètres, cette opérateur peut être linéaire où non-linéaire.

Le modèle inverse consiste à inverser l'opérateur G pour obtenir les sollicitations X ou les paramètres p à partir de la réponse d. Ceci peut être exprimé comme suit :

$$(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = \mathbf{G}^{-1}(\mathbf{d})$$
 Eq IV-3

où  $G^{-1}$  est le modèle inverse de l'opérateur G.

# 1. Le caractère mal-posé des problèmes inverses

Dans la plupart des cas les problèmes inverses sont mal posés contrairement aux problèmes directs, et par conséquent ils ne respectent pas une des trois conditions au sens d'Hadamard [67] :

- Existence : Il existe au moins une solution satisfaisante.
- Unicité : Cette solution est unique.
- Stabilité : Un faible changement dans les données induit un faible changement dans la solution. Le caractère mal-posé d'un problème inverse linéaire peut aussi être observé en évaluant le conditionnement de l'opérateur, plus le conditionnement est élevé plus la solution est instable vis-à-vis du bruit. La stabilité peut être obtenue en régularisant le problème inverse.

# 2. Quelques applications des problèmes inverses

# a) Diffusion des polluants

Ils sont utilisés dans le cadre de détection de l'évolution de la pollution industrielle. La méthode se base sur la mesure de la concentration en un nombre fini de points, ensuite une équation au dérivées partielles définissant le transport des polluants est résolue afin de d'estimer la position d'une source de pollution donnée [68].

# b) Sciences de la terre

La détermination des propriétés du sous-sol est un domaine de la géologie qui profite beaucoup à l'industrie pétrolière et minière, or il est impossible de scruter tous les recoins de terre par des forages onéreux et longs. Une technique basée sur l'enregistrement des ondes sismique par des capteurs posés à la surface de la terre est utilisée. Ces mesures en fonction du temps sont appelées « sismogrammes ». Elles fournissent une observation indirect des propriétés du sous-sol [69].

# c) Tomographie

C'est une technique très répandue dans le domaine du médicale, où on s'intéresse à reconstruire à partir d'un certain nombre de projections le volume et les constituants du corps à analyser. Des rayons X sont envoyés sur le corps. Ces rayons d'intensité  $I_0$  sont plus ou moins atténués en fonction de la densité du tissu qu'ils traversent. L'atténuation I suit une loi exponentielle.

$$I = I_0 e^{-ux} Eq IV-4$$

où u est le coefficient d'atténuation, x est la distance du chemin parcouru par le rayon.

Maintenant si le rayon traverse plusieurs objets de différents coefficients d'atténuation dépendant de la position x, l'intensité finale est calculée selon Eq IV-5.

$$I = I_0 e^{-\int_L u(x)dx} \qquad \qquad \text{Eq IV-5}$$

Ces atténuations sont enregistrées et des acquisitions sont effectuées sur plusieurs angles de projections.

$$\int_{L} u(x)dx = -\ln\frac{I}{I_0}$$
 Eq IV-6

Le but de la tomographie est de déterminer la fonction d'atténuation u(x) à partir de quelques mesures de l'intensité I.

# d) L'identification d'aimantation

Plusieurs travaux sur la détermination de l'état magnétique de structure quelconques ont été menés. La démarche consiste à mesurer l'induction magnétique et à partir de celle-ci, l'aimantation de l'objet est calculée en résolvant un problème inverse [70] [71].

#### 3. Paramétrisation

Cette étape permet de définir les entrées et les sorties du modèle inverse. Les causes, ainsi que les effets sont définies par des ensembles bornés qui représentent au mieux toutes les solutions possibles du problème. Des fonctions sont donc choisies en fonction de la physique étudiée et des conditions que doit respecter la solution finale.

Les causes, qui sont les inconnues du système inverse, peuvent être de plusieurs natures. Nous pouvons ainsi citer :

- Les sources :
  - Densité de courant,
  - $\circ$  Aimantation,
  - o Température.
- Les propriétés physiques des matériaux :
  - Conductivité thermique,
  - Conductivité électrique.

• Les géométries : Si une partie de celles-ci sont inconnues.

# 4. Spécificités de notre problème inverse :

Le choix de la méthode de résolution et de régularisation du problème inverse dépend de ces caractéristiques. Nous allons donc naturellement déterminer les différentes spécificités du problème inverse qui sera développé dans ce chapitre.

# a) Le caractère stationnaire

Dans le cas d'une pile à combustible les courants générés par la pile sont continus, ce qui engendre des champs magnétiques continus. La notion de temps intervient uniquement quand le champ magnétique ambiant est modifié car des sources externes sont éteintes ou allumées ou bien un changement d'orientation des capteurs vis-à-vis du champ terrestre. Ces deux problématiques sont résolues par la suite en prenant uniquement les signatures différentielles et en faisant des mesures périodiques du champ ambiant.

# b) Le caractère discret

La mesure du champ magnétique est faite sur un nombre fini de points autour la pile. Chaque mesure est la somme des contributions élémentaires de toutes les sources de courants discrétisées.

# c) Le caractère linéaire

La signature externe du champ magnétique de la pile est uniquement due à la distribution du courant à l'intérieur de celle-ci. Toute variation de la distribution du courant est suivie de la même variation en champ magnétique. Cette caractéristique est possible à cause des considérations faites sur les matériaux amagnétiques utilisés dans la conception de la pile.

A partir de la caractéristique de la linéarité nous adoptons une écriture matricielle simplifiée du système direct :

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$
 Eq IV-7

où  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$  est une matrice pleine dépendant du modèle du maillage et de la position des capteurs,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  la mesure,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$  le vecteur représentatif des sources que nous cherchons. Le nombre de lignes *n* de la matrice **A** correspond au nombre de mesures (équations) et le nombre de colonnes *m* de la matrice **A** correspond au nombre d'inconnues.

#### 5. Résolution des problèmes inverses linéaires

Dans ce paragraphe nous allons énumérer, d'une manière générale et synthétique, quelques méthodes qui nous permettent de résoudre un problème inverse linéaire. Il existe plusieurs algorithmes et techniques d'inversion qui se base généralement sur la décomposition de la matrice A (Eq IV-7). Cette matrice est souvent rectangulaire et pleine, ce qui nous amène à utiliser des méthodes généralisées pour leurs inversions. Pour plus de détails sur les outils numériques utilisés pour faire des décompositions nous invitons le lecteur à lire la référence [72].

#### a) Les moindres carrés

La solution  $\mathbf{x}$  de l'équation (Eq IV-7) est toujours entachée d'incertitudes car les données  $\mathbf{b}$  sont imparfaites (bruit de mesure). Ces considérations nous amènent à poser un problème d'optimisation en cherchant un vecteur qui minimise la norme euclidienne (Eq IV-8).

Nous introduisons dans le système rectangulaire précèdent (Eq IV-7) la transposée  $A^{T}$  de A. Ceci a pour but de rendre le système carré :

$$(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{b}$$
 Eq IV-9

La solution x est ensuite obtenue en calculant l'inverse au sens des moindres carrées.

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{b}$$
 Eq IV-10

La résolution par les moindres carrés est très facile à mettre en œuvre, mais elle ne permet pas de caractériser la matrice  $\mathbf{A}$  en étudiant ses propriétés (rang, noyau, spectre). Elle peut nous donner une solution aberrante à cause du bruit de mesure car le conditionnement de la matrice  $\mathbf{A}^{T}\mathbf{A}$  est le carré du conditionnement la matrice  $\mathbf{A}$ . Or le conditionnement de  $\mathbf{A}$  peutêtre initialement très mauvais. Il s'agit donc d'une approche très naïve.

L'accès aux caractéristiques de la matrice **A** est très important car il nous permet de déterminer la difficulté à résoudre le problème inverse, ainsi que les solutions inaccessibles en étudiant le noyau de **A**. Il faut donc privilégier des méthodes basées sur des décompositions de la matrice qui rendent ces informations accessibles.

# b) Les résolutions directes

D'autres techniques algébriques se reposant sur la décomposition matricielle peuvent être utilisées. Nous présenterons dans cette section deux d'entre elles.

#### (1) La décomposition LU

Cette technique consiste à décomposer la matrice A en deux matrices L et U. La matrice L est triangulaire inférieure et la matrice U est triangulaire supérieure.

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{U}$$
 Eq IV-11

Deux systèmes sont ensuite résolus :

$$Ly = b$$
 Eq IV-12

$$\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{y} Eq IV-13$$

Les deux systèmes obtenus sont faciles à résoudre à cause du caractère triangulaire des matrices L et U. Par contre la décomposition LU est très coûteuse en temps de calcul et elle ne permet pas de connaître le conditionnement de la matrice A, ce qui se traduit généra-lement par l'obtention de solutions entachées d'erreurs.

# (2) La décomposition en valeurs singulières

La décomposition en valeurs singulières permet de calculer des pseudos-inverses de matrice de tous types (rectangulaires ou carrées). N'importe quelle matrice  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  peutêtre décomposée en trois matrices. Chaque matrice permet d'avoir des propriétés importantes sur le système global, tels que le conditionnement, la dimension du noyau et le rang de la matrice.

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \, \mathbf{\Sigma} \, \mathbf{V}^{\mathrm{T}}$$
 Eq IV-14

où  $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$  et  $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  sont orthogonales,  $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  est diagonale.

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & 0 & 0 \\ & \cdots & & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & 0 & \sigma_m & 0 & 0 \end{pmatrix} si m < n$$
 Eq IV-16

où  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_{n,m} \geq 0$ 

Dans la plupart des problèmes inverses, on est souvent dans le cas où le nombre de mesures est nettement supérieur au nombre des inconnus (m < n)

Les colonnes des matrices U et V sont appelées les vecteurs singuliers et les éléments de la matrice  $\Sigma$  sont les valeurs singulières.

Le conditionnement de la matrice A de rang r peut être calculé en utilisant les valeurs singulières :

$$k(\mathbf{A}) = \frac{\sigma_1}{\sigma_r}$$
 Eq IV-17

Si toutes les valeurs singulières sont non nulles, la solution du système est la suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^+ \mathbf{b}$$
 Eq IV-18

avec :

$$\mathbf{A}^{+} = \mathbf{V} \mathbf{\Sigma}^{-1} \mathbf{U}^{\mathrm{T}}$$
 Eq IV-19

où  $A^+$ la pseudo inverse de A et :

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \dots & & & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & & & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & 0 & 0 \\ 0 & & & 0 & \frac{1}{\sigma_m} & 0 & 0 \end{pmatrix} si m < n$$
 Eq IV-21

#### 6. Existence et unicité de la solution

L'existence et l'unicité de la solution du problème (Eq IV-7) est fortement dépendante des propriétés de la matrice **A**. Deux cas sont possibles :

- Si A est carré : le système (Eq IV-7) admet rigoureusement une seule solution et l'inversion de la matrice A est triviale.
- Si A est rectangulaire, le système (Eq IV-7) est surdéterminé ou sous-déterminé et il admet une infinité de solutions. Certaines de ces solutions sont inaccessibles et elles sont contenues dans le noyau de la matrice A. La matrice A est inversée selon la pseudo inverse de Moore-Penrose et l'unicité de la solution est assurée par l'ajout d'informations « *a priori* » afin d'orienter la résolution vers une solution respectant la physique du système définie par le modèle direct

# 7. Régularisation d'un problème inverse linéaire

La régularisation d'un problème inverse correspond à l'idée que les données seules ne permettent pas d'obtenir une solution acceptable et qu'il faut donc introduire une information « *a priori* » sur la régularité de la solution. Nous entendons ici par le terme régularité le fait que la solution, pour des raisons physiques tenant à sa nature même, doit posséder certaines propriétés, ou encore obéir à certaines règles (de signe, de taille, de fréquences par exemple). La solution résulte alors d'un compromis entre l'exigence de fidélité aux données et celle de la régularité postulée de la solution. Des techniques de régularisation permettant de choisir la solution adéquate sont citées :

# a) Troncature du spectre

La plupart des problèmes inverses sont mal conditionnés et ceci est directement dépendant de l'opérateur représenté par la matrice **A** liant les causes aux effets. Le conditionnement, tel qu'il est défini dans l'équation (Eq IV-17), peut être très important si l'écart entre les valeurs singulières est très grand. D'un point de vue algébrique l'apparition de trop faibles valeurs singulières signifie que des équations du système sont linéairement dépendantes.

L'idée de la troncature est de supprimer l'influence des combinaisons linéaires de ces équations. Par la troncature du spectre, nous procédons tout simplement à exclure les plus petites valeurs singulières sur un critère d'erreur de reconstruction par rapport à une solution connue.

Le choix du paramètre de troncature peut aussi être fait par rapport aux erreurs de mesures (Eq IV-22) si ces incertitudes sont parfaitement connues [73].

$$\varepsilon = w_1 \frac{\|\Delta \mathbf{b}\|}{\|\mathbf{b}\|}$$
 Eq IV-22

où  $w_1$  est la plus grande valeur singulière,  $\Delta \mathbf{b}$  est l'incertitude sur la mesure,  $\mathbf{b}$  est le vecteur de mesures.

La solution du système est donc modifiée (Eq IV-24) en tronquant le spectre de l'opérateur matriciel en obtenant une nouvelle pseudo inverse.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_{\mathbf{tronguée}}^{+} \mathbf{b}$$
 Eq IV-23

avec

$$\mathbf{A}_{\text{tronquée}}^{+} = \mathbf{V} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{tronquée}}^{-1} \mathbf{U}^{\text{T}}$$
 Eq IV-24

# b) Régularisation de Tikhonov

L'idée de la régularisation de Tikhonov est d'utiliser les propriétés physiques (modèle direct) de la solution que nous cherchons afin d'ajouter de l'information « *a priori* »'qui fera converger le système inverse vers une solution physiquement acceptable [74].

L'opérateur régularisant L qui contient l'information « *a priori* » modifie le système à résoudre en définissant une autre fonctionnelle à minimiser. Ainsi :

- Au lieu de trouver x qui minimise  $||\mathbf{A}\mathbf{x} \mathbf{b}||$
- Nous chercherons x qui minimise  $||\mathbf{A}\mathbf{x} \mathbf{b}|| + \alpha ||\mathbf{L}\mathbf{x}||$

Avec  $\alpha > 0$  le paramètre de régularisation.

La matrice  $\mathbf{L}$  est choisie en fonction du type d'information qu'on souhaite ajouter. Si la solution que nous cherchons doit avoir une norme faible, la matrice  $\mathbf{L}$  est donc la matrice identité. Par contre, si la solution doit respecter un critère de régularité avec des variations faibles entre éléments voisins, l'opérateur discret de dérivation est plus approprié.

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & -1 \\ 0 & \dots & & 1 \end{pmatrix}$$
 Eq IV-25

Le choix du paramètre de régularisation  $\alpha$  peut être fait selon la technique de la « *L*curve » (Figure IV.3) qui consiste à tracer  $||\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}||$  en fonction de  $||\mathbf{L}\mathbf{x}||$  en faisant plusieurs résolutions pour des  $\alpha$  différents. Le paramètre optimal se situe au niveau du coude de la courbe car il permet d'avoir la somme des normes  $||\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}|| + \alpha ||\mathbf{L}\mathbf{x}||$  minimale [75].



Figure IV.3 La technique de la L-curve

# 8. Exemple : Reconstruction d'images

Pour mieux comprendre le caractère instable et la nécessité de régulariser un problème inverse nous allons nous appuyer sur un problème récurrent en traitement d'images. La restauration d'une image à partir d'une autre qui présente des dégradations dues à des oxydations et au vieillissement. Nous allons définir une base de projection se basant sur les fonctions de Fourier (Eq IV-26).

$$I(u, v) = \begin{cases} \sin(k_u \pi u) \cdot \sin(k_v \pi v) \\ \cos(k_u \pi u) \cdot \sin(k_v \pi v) \\ \sin(k_u \pi u) \cdot \cos(k_v \pi v) \\ \cos(k_u \pi u) \cdot \cos(k_v \pi v) \end{cases}$$
Eq IV-26

où  $k_u$  est l'ordre de la décomposition suivant la direction u, et  $k_v$  l'ordre de la décomposition suivant la direction v.

Nous faisons une décomposition jusqu'à l'ordre  $k_{u_max} = k_{u_max} = 8$  suivant les deux directions, ce qui nous donne un total de 256 vecteurs en prenant les 4 fonctions (Eq IV-26). Le nombre d'inconnues est donc 256. La matrice **A** du système contient donc 256 vecteurs de la base, quelques-uns de ces vecteurs sont présentés dans la Figure IV.4.



Figure IV.4 Les premiers harmoniques de la décomposition

Nous utilisons une image (Figure IV.5 – (a)) contenant des fréquences spatiales très basse dans le but de simplifier le problème et de limiter la décomposition à des ordres moins importants ( $k_{u\_max} = k_{u\_max} = 8$ ). Cette image contient 512x512 pixels. Pour la rendre illisible nous augmentons la taille des pixels et nous lui ajoutons un bruit gaussien (Figure IV.5 – (b)). La Figure IV.7 - (b) représente le vecteur **b** entaché d'erreurs.



Figure IV.5 Image étudiée : (a) Sans bruit (b) Avec bruit

On cherche à retrouver les coefficients  $\mathbf{x}$  correspondant à la contribution de chaque vecteur de la base  $\mathbf{A}$  à l'image original. La matrice  $\mathbf{A}$  étant rectangulaire, sa pseudo inverse est calculée en utilisant la décomposition en valeurs singulières. On s'aperçoit que le conditionnement est très élevé (Figure IV.6) ce qui nous laisse penser que la solution sera aberrante.



Figure IV.6 Spectre de la matrice

L'échec de reconstruction (Figure IV.7 – (a)) s'explique par le fait que le bruit ajouté à l'image est amplifié lors de l'inversion de la matrice **A** car le spectre (Figure IV.6) de celleci contient des valeurs singulières trop petites qui prennent un poids très important lors de l'inversion selon l'équation (Eq IV-20). La technique de régularisation par troncature du spectre (paramètre de troncature = 200) a permis de reconstruire avec succès l'image (Figure IV.5 – (a)). Le résultat est illustré dans Figure IV.7 – (b).



Figure IV.7 Reconstruction de l'image : (a) Sans régularisation, (b) Avec régularisation

# C. MODELE INVERSE EN MAGNETOSTATIQUE

Nous présenterons dans cette section le cœur de notre travail qui est le développement d'un problème inverse magnétostatique avec les caractéristiques que nous avons énuméré dans le § B.4 (stationnarité, discret et linéarité). On a vu dans le chapitre précèdent que le champ magnétique **B** est lié aux sources de courants **j** par la loi de Biot et Savart. Cette loi est tout simplement écrite sous forme matricielle en introduisant un opérateur **F** linéaire de la manière suivante :

La recherche de **j** à partir de **B** implique une transformation inverse de l'opérateur **F**. Cette opération correspond à une inversion algébrique de l'opérateur **F** :

 $\mathbf{j} = \mathbf{F}^+ \mathbf{B}$  Eq IV-28

où  $F^+$  est la pseudo inverse de **F**.

# 1. Rappel sur l'identification de défaut 2D

Le travail présenté dans ce manuscrit est une continuité d'un travail réalisé en 2012 par M. LeNy dans sa thèse où il a développé une méthode d'identification de défaut 2D dans un stack industriel [1]. Nous allons donc naturellement rappeler la méthode d'identification de défauts 2D où les fonctions paramétrant la densité de courant sont des fonctions harmoniques 2D. Les vecteurs de densité de courant obtenus sont par ailleurs définis en 3D, car le modèle « volumes finis FVM » utilisé pour résoudre l'équation de conduction est strictement 3D et il prend en compte la forte conductivité électrique des plaques terminales. Ce modèle est simplifié en considérant trois régions dans la pile (Figure IV.8 – (b)) au lieu des quatre définies au préalable (Figure IV.8 – (a)). L'ensemble AME et plaques bipolaires présente désormais une seule région.





Des modifications des équations sont aussi apportées en remplaçant le terme source caractérisant une cellule de pile à combustible par une des fonctions de Fourier (Eq IV - 29) et imposant un potentiel nul (condition de Dirichlet) sur la borne d'entrée et une conductivité surfacique h (condition de Robin) sur la borne de sortie ce qui revient à connecter une charge aux bornes du stack. Cette configuration permet d'avoir des boucles de courant invariantes suivant la profondeur du stack tout en assurant les retours de ces boucles au niveau des plaques terminales.

$$\begin{cases} \operatorname{div} \sigma \operatorname{\mathbf{grad}} V = \operatorname{div} \mathbf{j}_{\mathbf{m}} \operatorname{sur} \Omega_{s}^{PT} \operatorname{et} \Omega_{s}^{\operatorname{centre}} \\ V = 0 \quad \operatorname{sur} \Gamma_{s}^{-} \\ \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = \operatorname{hV} \operatorname{sur} \Gamma_{s}^{+} \\ \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = 0 \operatorname{sur} \Gamma_{s}^{0} \end{cases}$$
Eq IV-29

où  $\mathbf{j_m}$  est la densité de courant source définie par une des fonctions de Fourier (Eq IV-30). Celles-ci permettent de piloter les courants à l'intérieur pour différents ordres et fonctions. Chaque changement d'ordre ou de fonction nous donne un vecteur d'une base de courant.

$$\Phi_{uvw}^{2D}(x_s, y_s) = \begin{cases} \cos(uk_x x_s) \cdot \cos(vk_y y_s) & \text{si } w = 1\\ \cos(uk_x x_s) \cdot \sin(vk_y y_s) & \text{si } w = 2\\ \sin(uk_x x_s) \cdot \cos(vk_y y_s) & \text{si } w = 3\\ \sin(uk_x x_s) \cdot \sin(vk_y y_s) & \text{si } w = 4 \end{cases}$$
Eq IV-30

où  $k_x = \frac{2\pi}{L_x}$  et  $k_y = \frac{2\pi}{L_y}$  sont les fréquences spatiales,  $L_x$  et  $L_y$  les dimensions de la section du stack.

Les premiers vecteurs de la base sont illustrés dans la Figure IV.9.



Figure IV.9 Premières vecteurs de la base [1]

Ce modèle a été validé sur une vraie pile à combustible en comparant les résultats par rapport à ceux trouvés par un outil invasif de mesure interne de distribution de courant (carte S++). Il a permis de reconstruire les distributions des densités de courant en 2D dans le cas d'une variation de stœchiométrie d'air par exemple (Figure IV.10). Le même phénomène est observé par les deux outils : lorsque le stack est appauvri en air, les densités de courant se concentrent près des entrées des canaux d'air



Figure IV.10 Variation temporelle des densités de courants reconstruites, correspondant à une variation temporelle de la stæchiométrie d'air (A.cm<sup>-2</sup>) [49] :

(a) Défaut 2D reconstruit avec un outil invasif (carte S++), (b) Défaut 2D reconstruit à partir de la mesure externe du champ magnétique

# 2. Base des courants 3D pour l'identification de défaut 2D et 3D

La première étape de la paramétrisation consiste à définir un ensemble de distributions de courants 3D élémentaires. Cet ensemble est appelé « base » d'un point de vue algébrique et chaque distribution de courant est un « vecteur » de cette base. On écrira donc qu'une distribution de courant quelconque dans la pile est une combinaison linéaire des vecteurs de cette base.

$$\mathbf{j}(\mathbf{r_c}) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \, \mathbf{j_i}(\mathbf{r_c})$$
 Eq IV-31

où j est une distribution de courant quelconque à un point  $\mathbf{r}_{c}$ ,  $\alpha_{i}$  le coefficient de contribution de chaque vecteur j<sub>i</sub> de la base du courant.

L'approche est décomposée en plusieurs étapes :

- Trois défauts de conductivité sont simulés avec le modèle électrocinétique direct,
- Un critère d'erreur relative de reconstruction est défini,
- Les courants du mode différentiel des défauts simulés sont projetés selon l'Eq IV-32 sur différentes approches de bases de courant,
- Le niveau de description de ces défauts par chaque base est évalué en calculant l'erreur relative à chaque projection.

$$\alpha_{i} = \frac{\int_{\mathbf{\Omega}_{s}} \mathbf{j}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{j}_{i} \, d\mathbf{\Omega}_{c}}{\int_{\mathbf{\Omega}_{s}} \mathbf{j}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{j}_{i} \, d\mathbf{\Omega}_{c}} \qquad \text{Eq IV-32}$$

#### a) Définition de défauts tests en courant

Dans cette étape nous utilisons la géométrie d'une pile de type GESI dont les dimensions sont précisées le Tableau IV-1. Les bornes de collecte du courant se situent au milieu des plaques terminales. Nous imposons pour les simulations un courant de 100A.

Tableau IV-1 Géométrie de la pile

Longueur	Largeur	Epaisseur d'une plaque terminale
95 mm	100 mm	2 mm

Afin d'évaluer le degré de représentativité de chaque base, trois défauts de conductivité électrique ont été définis : un défaut 2D (Figure IV.12 - (a)) et deux défauts 3D (Figure IV.12 - (b) et (c)). Ces défauts sont obtenus en imposant une conductivité électrique à certains endroits 10<sup>6</sup> fois plus faible que la conductivité du reste de la pile. Les défauts 3D sont simulés avec deux configurations de piles différentes : Une pile comportant des plaques terminales et une autre pile sans plaques terminales. Ces deux configurations serviront à étudier l'effet des plaques terminales sur le niveau d'identification du courant. Nous rappelons que les plaques terminales servent à homogénéiser le courant à l'intérieur de la pile. Dans une pile dépourvue de plaques terminales nous constatons que les lignes de courant sont homogènes uniquement au centre de la pile et elles tendent à s'hétérogénéiser aux bords de celle-ci.

Nous constatons aussi que la distribution du courant est modifiée dans les plaques terminales dans le cas d'un défaut survenu à l'intérieur de la pile (Figure IV.11) et ceci malgré son importante conductivité. L'outil d'identification de la distribution du courant à partir du champ magnétique doit prendre en compte ce saut de conductivité car les courant de défaut se rebouclent au niveau des plaques terminales. Ce phénomène est observé de plus en plus quand les défauts sont proches des plaques terminales dans le cas d'une pile de longueur suffisante. Dans notre cas, la pile est assez petite en longueur pour que tous les défauts modifient les chemins des courants sur les plaques terminales.



Figure IV.11 Distribution des densités de courant dans les plaques terminales (A.m<sup>-2</sup>) : (a) Sans défaut, (b) Avec défaut 3D

Ces simulations ont été effectuées en utilisant les modèles électrocinétiques présentés dans le chapitre précèdent. Les distributions de courants calculées pour chaque défaut sont ensuite projetées sur chaque base de courant définie séparément pour avoir tous les coefficients  $\alpha_i$  de l'équation (Eq IV-31). Les pseudos inverses des matrices sont calculés en utilisant la décomposition en valeurs singulières. Une distribution de courant représentative de cette projection est obtenue par l'équation (Eq IV-31) et elle est comparée à la distribution de courant nous donne le niveau de représentativité de chaque base des défauts prise séparément.

Les illustrations (Figure IV.12) des défauts sont uniquement le courant différentiel, c'est-à-dire les boucles de courant dues aux défauts. Ce courant est obtenu en soustrayant le courant du mode commun (homogène) au courant hétérogène de défaut. Dans toute la suite du manuscrit trois plans de coupe seront insérés dans chaque figure représentant le courant. Un plan de coup au milieu de la pile et des plans de coupe latéraux.



Figure IV.12 Distribution des densités du courant différentiel pour trois types de défauts étudiés (A.m<sup>-2</sup>) :

(a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D : pile avec plaques terminales, (c) Défaut 3D : pile sans plaque terminale

# b) Erreur relative d'identification

Pour choisir une base permettant de définir les défauts simulés nous allons proposer une formule d'erreur relative. Cette formule est la racine du rapport de deux normes. L'erreur est calculée par rapport à un courant maximum dans la zone active de la pile en excluant le courant dans les plaques terminales.

En observant le courant de défaut (boucle de courant) (Figure IV.13), on s'aperçoit que sa valeur est maximale autour de la zone de défaut, et c'est ce courant que nous tentons d'identifier par la mesure du champ magnétique externe.

Nous notons que cette erreur est uniquement utilisée dans le cas où on connaît le courant à identifier car il nous faut absolument le courant réel pour la calculer. Or la distribution de courant réelle est uniquement connue si les défauts sont simulés. Dans le cas où le courant n'est pas connu (défaut quelconque dans une vraie pile) en travaillant sur des mesures de champs magnétiques réelles nous allons confronter nos résultats à la littérature qui définit les phénomènes se produisant dans une pile à combustible dans le cas d'un défaut.

$$err = \sqrt{\frac{\int_{\Omega_{s}} (\mathbf{j}_{real} - \mathbf{j}_{idn})^{T} \cdot (\mathbf{j}_{real} - \mathbf{j}_{idn}) d\Omega_{c}}{\int_{\Omega_{s}} (\mathbf{j}_{real_{max}}^{T} \cdot \mathbf{j}_{real_{max}}) d\Omega_{c}}}$$
Eq IV-33

où  $\mathbf{j}_{real}$  est le courant de défaut simulé avec le modèle électrocinétique,  $\mathbf{j}_{idn}$  le courant identifié, et  $\mathbf{j}_{real_{max}}$  le courant maximal du courant simulé à l'intérieur de la pile.



Figure IV.13 Boucle de courant de défaut (A.m<sup>-2</sup>)

c) Les bases de courant développées

Nous avons exploré quelques approches permettant de définir des bases de courant. Les bases 2D dupliquées et les bases conductivités sont obtenues en résolvant un modèle électrocinétique alors que les bases, boucles locales et harmoniques de courant sont purement mathématiques avec un « *a priori* » sur la conservation du courant.

# (1) Base 2D dupliquée

A partir de la base 2D développée par M. LeNy dans le travail précèdent [1] nous allons dupliquer celle-ci pour avoir une base 2D non sur la totalité de la pile mais uniquement sur une partie de celle-ci. Nous utilisons le même modèle électrocinétique que la base 2D décrivant le comportement électrique d'un stack. Nous remplaçons le terme source  $\mathbf{E}_{m}$  dans l'équation de conduction par des densités de courant issues de fonctions de Fourier 2D (Eq IV-30).

où  $\sigma$  est la conductivité, V le potentiel électrique et  $\mathbf{j}_{\mathbf{m}}$  la densité de courant imposée.

L'idée ici, est de décrire la densité de courant uniquement au niveau de quelques cellules du stack. Nous décomposons pour cela le stack en quatre parties (Figure IV.14). Ceci permet de définir des défauts sur 25 cellules pour une pile en contenant 100.



Figure IV.14 Stack découpé en 4 parties avec une densité de courant imposée

Les fonctions de Fourier (Eq IV-30) sont ensuite utilisées pour construire des bases de densités de courant 3D, en ne les imposant que sur une partie du stack. Les neuf premiers vecteurs de la base sont illustrés dans la Figure IV.15, en distinguant les quatre parties de la pile.

Nous ferons varier les ordres de décomposition  $k_{xmin} = k_{ymin} = 1$  jusqu'à  $k_{xmax} = k_{ymax} = 4$ , ce qui fait 16 vecteurs (en comptant la distribution homogène du courant) pour chaque partie. En ne gardant que les modes différentiels (boucles de courant) pour chaque partie nous aurons 15 vecteurs au lieu de 16. Nous avons au total 60 inconnus à déterminer pour 144 mesures (réparties sur 3 plans de 24 capteurs biaxes chacun).



Figure IV.15 Les premiers vecteurs de la base des densités de courants pour chaque partie du stack – 2D dupliquée

Les distributions de courants 3D calculées par le modèle électrocinétique pour chaque défaut défini auparavant sont ensuite projetées sur la base des courants. La projection nous donne les  $\alpha_i$  de l'Eq IV-31 et le courant **j** représenté par la Figure IV.16.



Figure IV.16 Reconstruction de la distribution des densités de courant à partir de la base des courants « 2D dupliquée » (A.m<sup>-2</sup>) :

(a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D avec plaques terminales, (c) Défaut 3D sans plaques terminales

Nous traçons sur la Figure IV.17 l'erreur relative (Eq IV-33) en fonction du nombre de vecteurs de la base des courants ajoutés pour avoir la somme selon l'Eq IV-31. Cette erreur est uniquement calculée à partir de la projection du courant différentiel du défaut (Figure IV.12 – (b)). Ainsi, la première valeur de l'erreur est calculée par rapport à l'ajout du premier vecteur de la base multiplié par le premier coefficient obtenu lors de la projection ( $\alpha_1 \mathbf{j}_1$ ).



Figure IV.17 Erreur relative en fonction du nombre de vecteurs ajoutés à la solution j (%)

Le niveau de représentativité de chaque défaut par la base « 2D dupliquée » est évalué par les erreurs relatives présentées dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection des courants différentiels sur la base des courants « 2D dupliquée »

Défaut 2D avec plaques terminales	Défaut 3D avec plaques terminales	Défaut 3D sans plaques terminales
29%	26%	32%

Conclusion par rapport à la base des courants « 2D dupliquée »

Nous constatons qu'en faisant une coupe au niveau de l'interface entre deux parties (Figure IV.18) selon la décomposition que nous avons fait du stack, que le courant reconstruit dans cette interface devrait être homogène dans le cas du défaut 3D (Figure IV.18 – (b)). Or à la reconstruction nous constatons une densité de courant hétérogène. Cette observation limite l'intérêt de ce modèle de base à reconstruire uniquement les défauts dans chaque partie parmi les quatre. Il est donc impossible à reconstruire le courant aux interfaces de deux parties.



Figure IV.18 Courant reconstruit au niveau de l'interface entre deux parties par la méthode « 2D dupliquée » :

(a) Illustration de l'interface entre deux parties, (b) Courant reconstruit pour le défaut 3D avec plaques terminales

# (2) Boucles locales : Potentiel vecteur électrique imposé sur les arêtes internes du maillage

Nous savons qu'une représentation plus fine 3D des défauts nécessite une base complète qui couvre tout l'espace des défauts possibles. Nous allons proposer dans cette section une technique nous permettant de définir la plus petite boucle au niveau de quatre éléments de
maillage. Cette idée est basé sur la condition nécessaire de conservation de la densité de courant (Eq IV-35).

Nous déduisons de cette équation que la densité de courant **j** découle d'un potentiel vecteur électrique **T**.

$$\mathbf{j} = \mathbf{rot} \mathbf{T}$$
 Eq IV-36

Ce potentiel est interpolé sur les éléments d'arêtes du maillage. Nous l'imposons uniquement sur les arêtes internes et il vaut zéro sur les arêtes externes pour empêcher le courant de sortir en dehors du domaine de la pile. Nous obtenons ainsi base qui contient autant de vecteurs que d'arêtes internes.

Comme nous avons définis dans la partie défauts dans une pile avec et sans plaques terminales, nous prenons évidement deux configurations de pile pour construire la base. Pour la pile avec les plaques terminales, nous allons avoir 352 vecteurs pour un maillage de 5x5x7, ce qui fait 352 inconnus pour 144 mesures. Pour la pile sans les plaques terminales, nous allons avoir 240 vecteurs pour un maillage 5x5x5, ce qui fait 240 inconnus pour 144 mesures.

$$\begin{cases} T = 1 \text{ sur les arêtes internes} \\ T = 0 \text{ sur les arêtes externes} \end{cases}$$
 Eq IV-37

Les premiers vecteurs de cette base sont illustrés dans la Figure IV.19.



Figure IV.19 Les premiers vecteurs de la base des courants obtenus – Boucles Locales

Nous remarquons que nous avons créé une base dont les vecteurs courant sont des boucles tournant autour de chaque arête interne du maillage. Ces boucles sont toutes à flux conservatifs, la combinaison linéaire de celles-ci le sera donc aussi. On remarquera que ces

boucles ne sont toutefois pas linéairement indépendantes. En effet, certaines sont des combinaisons linéaires d'autres. En toute rigueur, pour assurer cette indépendance, il faudrait passer par une technique d'arbre [76]. Un arbre doit être généré sur les arêtes internes du maillage et seules les arrêtes du co-arbre doivent être gardées pour générer les boucles. On obtient un jeu (non unique) de boucles indépendantes. Cette approche a été testée dans le cadre de ces travaux et conduit à un nombre d'inconnu plus réduit. Toutefois, elle n'améliore pas significativement la qualité de la reconstruction.

Les distributions des densités de courant 3D calculées par le modèle électrocinétique pour chaque défaut définis auparavant sont ensuite projetées sur la base des courants. La projection permet d'obtenir les  $\alpha_i$  de l'Eq IV-31 et la densité de courant **j** représentée par la Figure IV.20.



Figure IV.20 Reconstruction du courant à partir de la base des courants (A.m<sup>-2</sup>) : (a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D avec plaques terminales, (c) Défaut 3D sans plaques terminales

Nous suivons la même démarche en traçant sur la Figure IV.21 l'erreur relative (Eq IV-33) en fonction du nombre de vecteurs de la base des courants ajoutés en respectant l'Eq IV-31.



Figure IV.21 Erreur en fonction du nombre de vecteurs ajoutés (%)

Nous observons qu'au fur et à mesure que nous ajoutons des vecteurs au courant reconstruit l'erreur relative diminue. Cette erreur est très importante au départ car le courant est reconstruit uniquement sur quatre éléments de maillage. Nous constatons que s'agissant de la projection du courant de défaut sur la base des courants, l'erreur relative est très petite, ce qui nous amène à dire que cette base définit parfaitement le défaut 3D simulé.

Le niveau de représentativité de chaque défaut par la base « boucles locales » est évalué par les erreurs relatives présentées dans le Tableau IV-3.

Tableau IV-3 Erreurs d'identification	n du courant différenti	el lors de la de projec	tion des cou-
rants différentiels su	r la base des courants	« boucles locales »	

Défaut 2D avec	Défaut 3D avec	Défaut 3D sans
plaques terminales	plaques terminales	plaques terminales
1x10 <sup>-8</sup> %	4x10 <sup>-9</sup> %	2.5x10 <sup>-10</sup> %

Conclusion par rapport à la base des courants « Boucles locales »

Les résultats obtenus quand nous projetons les courants différentiels sur cette base, nous montrent que l'approche « Boucles locales » est très intéressante. Vu le nombre de vecteurs que nous générons en prenant toutes les arêtes internes du maillage (352 pour un maillage 5x5x7), nous préférons attendre la confirmation de ces résultats lors la conclusion finale quand des champs différentiels seront projetés sur la base des champs issue de cette approche.

#### (3) Base harmoniques de courant 3D

Dans un souci de diminution du nombre d'inconnus par rapport à la méthode précédente, nous allons définir un autre potentiel vecteur électrique en s'inspirant des fonctions de Fourier. Ceci devrait permettre de définir une plus grande discrétisation et une variation dans les trois directions associées à une indépendance par rapport au maillage.

Le potentiel vecteur électrique est défini par une fonction sinus. Cette fonction est nulle au bord du domaine de la pile. Cette propriété permet d'assurer la conservation du courant et ainsi éviter que le courant sorte du domaine de la pile. Ce potentiel est interpolé sur les éléments d'arêtes du maillage.

$$T_{i} = sin(\pi k_{x}x) \cdot sin(\pi k_{y}y) \cdot sin(\pi k_{z}z)$$
 Eq IV-38

où  $i = x, y, k_x, k_y, k_z$  correspondent aux ordres de décomposition suivant les axes x, y et z

Trois de ces vecteurs sont illustrés dans la Figure IV.22. Les vecteurs sont normalement portés par les arêtes, mais pour une bonne visualisation, ils sont sur la figure aux barycentres des éléments.



Figure IV.22 Les premiers vecteurs T développés selon l'axe x – Base harmonique

En faisant varier les ordres de décomposition  $(k_{xmin} = k_{ymin} = k_{zmin} = 1$  jusqu'à  $k_{xmax} = k_{ymax} = k_{zmax} = 5$ ), et en développant le potentiel vecteur *T* suivant les deux directions *x* et *y*, une base de courant comportant 125x2 vecteurs est construite. Ce qui fait en total 250 inconnues pour 144 mesures. Nous appliquons ensuite l'opérateur rotationnel pour avoir les vecteurs de courants associés à chaque vecteur du potentiel (Figure IV.23).



Figure IV.23 Les premiers vecteurs de la base des courants obtenus en prenant T suivant x - Base harmonique

Les distributions de courants 3D calculées par le modèle électrocinétique pour chaque défaut défini auparavant sont ensuite projetées sur la base des courants. La projection nous donne, là encore, les  $\alpha_i$  de l'Eq IV-31 et la distribution de courant **j** représentée par la Figure IV.24.



Figure IV.24 Reconstruction du courant à partir de la base harmonique des courants (A.m<sup>-2</sup>) : (a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D avec plaques terminales, (c) Défaut 3D sans plaques terminales

La Figure IV.25 représente l'erreur sur la projection du courant différentiel du défaut 3D (Figure IV.12 – (b)).



Figure IV.25 Erreur relative en fonction du nombre de vecteurs ajoutés à la solution j (%).

Le niveau de représentativité de chaque défaut par la base « harmoniques de courant » est évalué par les erreurs relatives présentées dans le Tableau IV-4.

Tableau IV-4 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection des courants différentiels sur la base des courants « harmoniques de courant »

Défaut 2D avec	Défaut 3D avec	Défaut 3D sans
plaques terminales	plaques terminales	plaques terminales
44%	29%	12%

D'après les erreurs observées, la base harmonique de courant décrit mieux les défauts 3D quand la pile est dépourvue de plaques terminales. Ce constat est tout à fait logique car en regardant les boucles de courant générées par un défaut, nous constatons que ces boucles présente une déviation franche (Figure IV.26 - (b)) à l'interface entre les plaques terminales et le cœur de la pile, or les vecteurs de la base harmonique sont plus lisses (Figure IV.26 - (a)) à ces endroits.



Figure IV.26 Différence de la distribution de courant à l'interface plaque terminale/cœur de pile :

#### (a) Vecteur de la base harmoniques de courant, (b) Boucle de défaut

#### Conclusion par rapport à la base des courants « Harmoniques de courants 3D »

La base « Harmoniques de courant » permet de définir le courant à l'intérieur (zone active) de la pile et dans les plaques terminales. Or nous avons vu que l'intensité de la distribution du courant dans les plaques terminales est différente de celle de la zone active pour chacun des défauts étudiés. A partir de ces remarques, nous constatons qu'il est nécessaire de prendre en compte la physique de la pile et c'est l'objet du prochain paragraphe.

#### (4) Base des conductivités

Les deux bases de courant présentées précédemment ont été construites en utilisant le potentiel vecteur électrique et la condition de conservation du courant. Or ces deux approches ne prennent pas en compte la physique de la pile (conductivité électrique et géométrie de chaque partie de la pile). Nous proposons une nouvelle base qui repose sur la simulation de défauts élémentaires avec le modèle électrocinétique FEM de facettes. Pour limiter le nombre d'inconnues par rapport au nombre limité de mesures, nous construisons une base de 125 vecteurs.

Le domaine de la pile est donc divisé en 125 parties volumiques. Une partie de la pile correspond à 0.8 % de son volume. Sur chaque partie nous imposons une conductivité électrique nulle. La distribution du courant est obtenue en résolvant le modèle électrocinétique. Pour chaque configuration, une densité de courant homogène est soustraite afin de n'avoir que la boucle de courant due au défaut. Le système final est composé de 125 inconnues pour 144 mesures.



Figure IV.27 Les premiers vecteurs de la base des courants – base des conductivités

Les distributions de courants 3D calculées par le modèle électrocinétique pour chaque défaut défini auparavant sont ensuite projetées sur la base des courants. La projection nous donne les  $\alpha_i$  de l'Eq IV-31 et le courant j représenté par la Figure IV.16.



(a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D avec plaques terminales, (c) Défaut 3D sans plaques terminales

L'erreur sur la projection du courant différentiel du défaut 3D (Figure IV.12 – (b)) est tracée Figure IV.29.



Figure IV.29 Erreur relative en fonction du nombre de vecteurs ajoutés à la solution j (%).

Nous constatons que la forme de l'erreur en fonctions du nombre de vecteurs ajouté à la solution finale est différente de ce que nous avons vu précédemment pour les autres bases. Cette différence vient du fait que la contribution des vecteurs de la base de courant de défaut est soit très faible ou soit très importante. Nous observons ceci en traçant les coefficients  $\alpha_i$  sur la Figure IV.30.



Figure IV.30 Coefficients de contribution de chaque vecteur de la base au courant de défaut

Le niveau de représentativité de chaque défaut par la base « conductivités » est évalué par les erreurs relatives présentées dans le Tableau IV-5.

Tableau IV-5 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection des courants différentiels sur la base des courants « conductivités »

Défaut 2D avec plaques terminales	Défaut 3D avec plaques terminales	Défaut 3D sans plaques terminales
3.9%	3.1%	1.7%

Conclusion par rapport à la base des courants « Conductivités »

Les résultats de la projection des courants différentiels sur la base de courant « Conductivités » montre que celle-ci définie convenablement les défauts étudiés 2D et 3D et dans les deux cas avec et sans plaques terminales. Ces résultats sont attendus car cette base est obtenue en résolvant un problème électrocinétique et le nombre d'inconnues est très réduit par rapport aux autres approches.

# (5) Conclusion sur les bases de courant

Nous n'avons maintenant travaillé qu'avec les distributions de courant. Différentes bases de courant ont été présentées. Certaines bases peuvent être qualifiées de physique (2D dupliquée et conductivités) car elles sont obtenues en résolvant un problème électrocinétique. D'autres bases sont qualifiées de mathématiques (boucle locales et harmoniques de courant) et l'imposition de la conservation du courant est incluse dans le choix des fonctions qui définissent le potentiel vecteur électrique. Les erreurs de projections des courants différentiels des trois défauts présentés sur ces différentes bases ont permis de distinguer la base des boucles locales et la base des conductivités comme celles qui représentent le mieux les défauts. Nous allons voir par la suite si le même constat peut être fait quand les signatures magnétiques de ces défauts seront projetées sur les bases des champs magnétiques.

#### 3. Base des champs magnétiques

La deuxième étape de la paramétrisation consiste à définir un ensemble de positions et d'orientations des capteurs (Figure IV.31) pour calculer les champs magnétiques générés par la base des courants. Ce point est présenté dans le chapitre précèdent par l'étude du problème direct. Nous rappelons que les capteurs sont bi-axes et ils sont orientés pour être le moins sensible au mode commun (homogène) et ne détecter que les variations du champ magnétique induites par un défaut. Le nombre de composantes du champ magnétique définissant les défauts est aussi choisi pendant cette étude, les composantes radiale et axiale sont les plus sensibles au champ magnétique de défaut. Le champ magnétique est exprimé comme une combinaison linéaire des vecteurs de la base des champs. Nous notons que du fait de la linéarité du problème, les coefficients  $\alpha_i$  sont les mêmes pour les deux équations (Eq IV-31) et (Eq IV-38).

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \, \mathbf{B}_i(\mathbf{r})$$

Eq IV-39



Figure IV.31 Positions des capteurs :

(a) Positions des plans de capteurs, (b) Positions des 24 capteurs autour de la section du stack

Nous illustrons sur la Figure IV.32 la démarche du passage de la base des courants à la base des champs par la loi de Biot et Savart.



(a)

**(b)** 

Figure IV.32 Passage de la base des courants à la base des champs magnétiques : (a) Courants, (b) Champs magnétiques

Remarque par rapport aux champs magnétiques :

Pour un défaut 2D, la modification de la composante radiale (Figure IV.33- ligne 1 - rouge) du champ magnétique est du même ordre de grandeur sur tous les plans de capteurs. Une symétrie parfaite au niveau de la composante axiale (Figure IV.33- ligne 2 - rouge) du champ magnétique est observée car la boucle de courant s'étale sur toute la profondeur de la pile.

Pour un défaut 3D, la composante radiale (Figure IV.33- ligne 1 - bleue) du champ magnétique se trouve modifiée que sur le plan de capteurs proche du défaut car les courants à cet endroit sont dans la même direction que le courant principal. La composante axiale (Figure IV.33- ligne 2 - bleue) est plus forte du côté opposé au défaut car les courants à cet endroit présentent des composantes perpendiculaires à la direction du courant principale.



Figure IV.33 Signatures magnétiques dans le cas d'un défaut 2D et dans le cas d'un défaut  $3D(\mu T)$ 

a) Projections du champ de défaut sur la base des champs

Dans cette partie nous allons identifier les défauts en faisant la projection des champs magnétiques calculés pour une distribution de courant donnée sur la base des champs construite à partir des bases de courants présentées précédemment. Les signatures différentielles en champs pour chaque défaut sont représentées dans la Figure IV.34. Ces Signatures sont inversées par le modèle inverse afin de trouver les distributions de courant différentielles (boucles de courant) qui sont à leurs origines.



Figure IV.34 Signatures magnétiques différentielles pour les trois défauts étudiés ( $\mu T$ ), PT pour plaques terminales

b) Base 2D dupliquée

Les champs magnétiques calculés pour chaque distribution de courant de défaut défini précédemment sont ensuite projetés sur la base champ afin de reconstruire le courant. Nous notons que ces champs sont dépourvus de tout bruit magnétique hormis le bruit numérique.



Figure IV.35 Reconstruction du courant à partir du champ magnétique externe – Base 2D dupliquée (A.m<sup>-2</sup>):

Nous avons remarqué qu'en projetant le courant de défaut sur la base des courants la distribution de celui-ci au niveau de l'interface entre deux parties (Figure IV.18) est hétérogène alors qu'elle devrait être homogène pour la configuration de défaut que nous avons testée. Cette observation pose la limitation de ce modèle de base à reconstruire uniquement les défauts dans chaque partie séparée. Un défaut survenu entre deux parties est impossible à reconstruire.

Les erreurs d'identification pour chaque défaut sont résumées dans le Tableau IV-6. Le niveau d'identification est faible vu les valeurs de ces erreurs. Malgré ces erreurs cette base a permis d'aborder la démarche d'identification de défauts 3D. Elle nous a encouragés à améliorer l'inversion en proposant une base plus adéquate.

Tableau IV-6 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection du champ différentiel sur la base des champs « 2D dupliquée »

Défaut 2D avec plaques terminales	Défaut 3D avec plaques terminales	Défaut 3D sans plaques terminales
42%	32%	40%

c) Boucles locales : Potentiel vecteur électrique imposé sur les arêtes internes

La position des défauts est bien localisée grâce à l'identification par la mesure du champ magnétique (Figure IV.36).



Figure IV.36 Reconstruction du courant à partir du champ magnétique externe – Base boucles locales  $(A.m^{-2})$ :

Nous constatons néanmoins à partir des erreurs de reconstruction (Tableau IV-7) que l'erreur est plus importante dans le cas où on a des plaques terminales. Nous notons aussi que les faibles erreurs d'identifications retrouvées auparavant en projetant les courants sur la base des courants n'ont pas été confirmées quand les champs magnétiques sont projetés sur la base des champs. Ces résultats sont justifiés par le caractère sous déterminé de notre système car il comprend beaucoup plus d'inconnues que de mesures (équations). Cette approche mathématique par le potentiel vecteur ne permet pas de prendre en compte le saut de conductivité entre les plaques terminales et la zone active. Nous concluons que si l'erreur est importante dans un cas numérique et sans ajout de bruit de mesure, elle le sera aussi en voulant inverser des mesures réelles.

Tableau IV-7	' Erreurs d	<i>'identification</i>	n du coure	int différent	iel lors	de la	projection	du	champ
	diffé	rentiel sur la	base des d	champs « Bo	oucles la	ocales	. »		

Défaut 2D avec	Défaut 3D avec	Défaut 3D sans
plaques terminales	plaques terminales	plaques terminales
51%	55%	45%

d) Base harmoniques de courant 3D

Nous avons voulu diminuer le nombre d'inconnues par rapport à l'approche précédente en prenant une fonction potentiel vecteur électrique définie sur plusieurs arêtes internes, mais nous observons que mes défauts ne sont pas mis en évidence sur la Figure IV.37.



Figure IV.37 Reconstruction du courant à partir du champ magnétique externe – Base harmoniques des courants (A.m<sup>-2</sup>) :

Ces résultats visuels sont confirmés par les erreurs d'identification (Tableau IV-8) et le même constat est fait que pour la base « Boucles locales » car on remarque une nette différence entre l'erreur d'identification quand la pile est sans plaques terminales. Nous concluons encore une fois que ces plaques terminales sont indispensables dans la construction d'une base de courant définissant la physique de la pile.

Tableau IV-8 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection du champdifférentiel sur la base des champs « Harmoniques de courant 3D »

Défaut 2D avec plaques terminales	Défaut 3D avec plaques terminales	Défaut 3D sans plaques terminales
55%	62%	54%

e) Base des conductivités

La base des conductivités a permis de reconstruire la densité de courant (Figure IV.38) dans la pile comportant les plaques terminales pour les deux défauts avec une erreur acceptable (Tableau IV-9).



Figure IV.38 Reconstruction du courant à partir du champ magnétique externe – Base des conductivités  $(A.m^{-2})$ :

Vu l'erreur importante, la densité de courant reconstruite dans la pile ne comportant pas de plaques terminales est loin de la densité de courant réelle. Ceci est dû au fait que le courant du mode commun n'est déjà pas homogène sur les bords de la pile. Les boucles de courant sont plus significatives et mieux réparties dans le cas où la pile comporte des plaques terminales. Ceci est donc de bon augure car la vraie pile comporte des plaques terminales.

Tableau IV-9 Erreurs d'identification du courant différentiel lors de la projection du champ différentiel sur la base des champs « Conductivités »

Défaut 2D avec	Défaut 3D avec	Défaut 3D sans
plaques terminales	plaques terminales	plaques terminales
12%	14%	53%

f) Bilan sur les bases de champ

Différentes bases de champs ont été proposées et utilisées pour essayer de retranscrire le comportement des distributions de courants. Un critère d'erreur d'identification a été mis en place afin dégager au mieux les performances respectives de ces bases.

Ainsi, l'erreur de reconstruction par l'Eq IV-33 a été calculée afin de déterminer la configuration de base de courants la plus adéquate pour notre application. Ces résultats sont présentés dans le Tableau II-1.

	Défaut 2D avec plaques terminales	Défaut 3D avec plaques terminales	Défaut 3D sans plaques terminales
2D dupliquée	42%	32%	40%
Harmoniques de courant	55%	62%	54%
Boucles locales	51%	55%	45%
Conductivités	12%	14%	53%

Tableau IV-10 Erreurs d'identification du courant différentiel pour chaque méthode et chaquedéfaut

Au vu des résultats, la base qui permet de reconstruire les défauts avec le moins d'erreurs est celle des conductivités dans le cas d'une pile comportant des plaques terminales. Dans tous les cas, on ne devrait travailler qu'avec un modèle comportant des plaques terminales. Ce cas permet de se rapprocher d'une vraie pile.

Nous remarquons aussi que la base des harmoniques et la base des arêtes internes présentent une erreur moins importante dans le cas où la pile est privée de plaques terminales. Nous expliquons ceci par le fait que ces deux bases sont strictement mathématiques et elles ne prennent pas en compte le saut de conductivité électrique entre les plaques terminales et la partie active de la pile.

Nous constatons aussi que les erreurs de projection sur la base des courants et les erreurs de projection sur la base des champs sont différentes. Nous estimons que le conditionnement de la base des courants s'est détérioré en lui appliquant l'opérateur de Biot et Savart. Ceci est logique car la fonction de transfert à inverser s'est complexifiée.

Suite aux résultats obtenus la base des conductivités est retenue pour le reste de ce travail.

### 4. Sensibilité au bruit magnétique et paramètre de troncature optimal

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes placés dans le cas idéal où le bruit de mesure est uniquement introduit par la précision limitée de l'ordinateur. Nous proposons ici d'ajouter du bruit blanc à la mesure numérique calculée. Le niveau de bruit indiqué dans le Tableau IV-12 est le niveau crête à crête d'un bruit blanc pris aléatoirement. Nous allons aussi faire des simulations qu'avec la base des conductivités et en ne prenant en compte que les défauts simulés dans une pile comportant des plaques terminales: Figure IV.12 - (a) et Figure IV.12 -(b).

Les niveaux de champs pour les différents défauts sont rappelés dans le Tableau IV-11.

Défaut 2D	Défaut 3D avec plaques terminales
44µT	22μΤ

Tableau IV-11 Niveaux des champs magnétiques crête à crête pour chaque défaut

Le paramètre de troncature est choisi pour avoir des erreurs minimales. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV-12.

Niveau de bruit	Niveau de troncature	Défaut 2D	Défaut 3D avec plaques terminales
1µT	40	23%	35%
2μΤ	30	26%	28%
3μΤ	20	21%	34%
4μΤ	15	30%	40%
5μΤ	10	28%	40%

Tableau IV-12 Erreurs de reconstruction pour chaque niveau de bruit

La connaissance des défauts que nous cherchons nous a beaucoup aidée à choisir le paramètre de troncature pour une configuration donnée. Le choix se fait en traçant l'erreur de reconstruction pour un bruit donné et pour un courant connu (Figure IV.39). Nous constatons par ailleurs que celui-ci dépend fortement de l'environnement dans lequel se trouve la pile. Plus l'environnement est bruité plus le nombre de valeurs singulières pris dans le calcul de la solution est faible. La connaissance de ce niveau de bruit apparaît comme un point très important. Même si numériquement nous pouvons jouer différents scénarios, en pratique cela nous amène à devoir connaître au mieux le niveau de bruit dans lequel les mesures, utiles à l'inversion, ont été réalisées. Une phase de caractérisation du bruit magnétique dans lequel nous faisons de vraies mesures s'avère nécessaire.



Figure IV.39 Erreur en fonction du paramètre de troncature pour un bruit blanc de  $2\mu T$  (%)

## D. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait de manière générale quelques rappels sur les problèmes inverses. Ensuite nous avons présenté le problème inverse magnétostatiques et ses caractéristiques dans notre application. Pour les besoins de la validation du modèle inverse nous avons défini trois types de défauts de conductivités. Un défaut réalisé sur une pile sans plaques terminales est simulé pour conclure sur l'influence de ces plaques sur la distribution du courant et la signature magnétique associée. Plusieurs approches définissant les bases de description des défauts sous forme de distribution de courant hétérogènes ont été explorées. Les distributions de courant différentielles obtenues pour chaque défaut sont projetées sur la base des courants et les signatures magnétiques différentielles associées à chaque défaut sont projetées sur la base des champs. Dans les deux cas une erreur de reconstruction est calculée pour déterminer la pertinence de chaque base par rapport à une autre. Nous avons noté des avantages et des inconvénients propres à chaque approche. Nous parlerons de l'importance de chaque approche séparément :

- Base 2D : Elle permet de définir efficacement les défauts 2D, par contre elle ne permet pas d'identifier des défauts 3D.
- Base 2D dupliquée : Cette base découle de la base 2D ce qui lui permet de définir des défauts 2D, mais avec une précision moins importante car le courant à l'interface entre deux partie n'est pas aussi bien reconstruit. L'autre inconvénient de ces interfaces qui constituent normalement la partie active de la pile transformée en plaque terminale est l'impossibilité de reconstruire un défaut affectant ces régions.

- Base 3D des boucles locales (arêtes internes): Elle permet de définir mathématiquement des boucles de courant internes dans le cas où on a une conductivité homogène partout dans la pile, mais elle ne prend pas en compte les sauts de conductivités. Elle est simple à mettre en œuvre dans le cas d'une petite pile car le nombre d'inconnus est lié au nombre d'arêtes internes.
- Base 3D harmonique : C'est une base mathématique qui permet certes de définir des boucles de courant et qui assure une conservation du courant, mais elle ne tient pas compte de la physique de la pile à combustible. Il est donc nécessaire d'ajouter soit de l'« *a priori* », ou bien définir des fonctions aux interfaces plaque terminale/partie active qui prennent en compte le saut de conductivité. Nous avons beaucoup travaillé sur cette base, hélas les résultats obtenus n'ont pas été à la hauteur de notre investissement. Nous restons convaincus qu'il s'agit d'une bonne idée qui pourrait être exploitée dans un contexte plus favorable que celui spécifique à la pile.
- Base 3D des conductivités : Malgré le mauvais conditionnement de cette décomposition, nous avons réussi à reconstruire les défauts avec une qualité acceptable. Elle est basée sur un modèle électrocinétique ce qui nous évite d'ajouter un « *a priori* » pour orienter la solution.

Nous ajoutons que toutes les décompositions sont limitées aux défauts détectables et à la qualité des capteurs utilisés. Nous admettons que ces défauts sont tellement faibles que leurs impacts sur le fonctionnement de la pile sont minimes.

Nous avons remarqué pour différentes simulations de défauts que chaque configuration a une distribution de courant différente au niveau des plaques terminales, nous supposons qu'en théorie nous pouvons construire un défaut juste en ayant la distribution du courant dans les plaques terminales avec un outil invasif.

Nous avons vu qu'il n'existe pas de paramètre de troncature optimal qui peut être appliqué à n'importe configuration. Il est primordial d'étudier le bruit de mesures dans une application donnée afin de choisir le paramètre de troncature qui nous donne une solution la plus proche possible de ce que nous cherchons.

# V. Chapitre IV : Validation Expérimentale

Les deux modèles (direct et inverse) ont été présentés dans les deux précédents chapitres. Le modèle direct a été validé en comparant des mesures simulées à des mesures réelles, et le modèle inverse a été validé en identifiant des densités de courant dans le cas de défauts simulés. Nous allons dans ce dernier chapitre présenter les résultats de la validation expérimentale du modèle inverse.

Cette étape est indispensable car elle nous permettra de déployer et de tester notre outil sur des mesures réelles dans un environnement laboratoire avec des contraintes de bruits magnétiques. Le passage d'un environnement numérique à un environnement réel constituera une preuve de la capacité de l'outil à détecter des défauts 2D et 3D.

Nous commençons tout d'abord par exploiter les mesures effectuées en utilisant le simulateur de pile à combustible présenté dans le deuxième chapitre. Trois configurations de défauts seront étudiées : un défaut 2D et deux configurations de défauts 3D.

Ensuite, nous allons utiliser le modèle inverse pour identifier des défauts 2D et 3D sur une pile à combustible réelle de type GENEPAC comportant 100 cellules. Différents changements dans les paramètres opératoires (stœchiométrie d'air, humidité relative) seront réalisés afin de provoquer intentionnellement des défauts 2D et d'analyser les performances de notre méthode et la capacité à identifier ces défauts 2D. Un défaut 3D, portant sur cinq cellules sera ensuite réalisé en couvrant le quart de ces cellules avec une résine pour diminuer la surface active, la mesure générée par ce défaut sera inversée pour identifier la densité de courant qui lui est associée.

Enfin, nous allons combiner ce défaut 3D avec un défaut 2D afin vérifier si la linéarité en champ magnétique et en courant est confirmée. Dans un premier temps, la mesure due aux deux défauts sera inversée. Dans un deuxième temps, connaissant la signature du défaut 3D, la signature due à une variation d'un paramètre de fonctionnement (défaut 2D) peut être extraite de la signature globale (défaut 3D + défaut 2D). Cette dernière opération nous permet d'avoir la signature d'un défaut 2D. Cette signature est inversée et le défaut 2D est identifié.

# A. VALIDATION SUR LE SIMULATEUR DE PILE A

# COMBUSTIBLE

Nous avons déjà présenté dans le deuxième chapitre un simulateur de pile qui nous a permis de valider le modèle direct. Ce même système va être utilisé pour la validation du modèle magnétique inverse. Pour cela, nous définissons plusieurs configurations de défauts ayant différentes signatures magnétiques. La géométrie du simulateur de pile à combustible est rappelée dans l'Annexe B et l'Annexe C.

# 1. Protocole de mesure et paramètre de troncature du spectre

Avant toute mesure, la répétabilité du champ de mode commun est évaluée en faisant plusieurs mesures ; lors de plusieurs démontages et montages de la pile.

Cette étape a permis de déterminer l'erreur commise lors de ces manipulations. Cette erreur se traduit par un écart de signatures magnétiques entre deux mesures. C'est cet écart en plus du bruit des capteurs qui va être considéré comme bruit magnétique par la suite afin d'évaluer le paramètre de troncature qui nous donnera la meilleure solution à l'inversion. Le paramètre de troncature est choisi selon le Tableau IV-12 du précédent chapitre. Nous avons choisi une valeur de 15 comme paramètre de troncature pour un bruit blanc maximal de 4  $\mu$ T crête à crête.

Nous rappelons que nous ne nous intéressons qu'à l'identification de la boucle de courant locale générée par le défaut à l'intérieur de la pile ce qui nous amène à travailler avec la signature différentielle du champ magnétique. Ces mesures sont obtenues en imposant un courant de 25 A pour l'ensemble des défauts étudiés. La mesure est par conséquent obtenue en suivant plusieurs étapes :

- Installation du simulateur avec le bloc complet de graphite (Figure III.24 (a)) et les plaques terminales
  - (1) Mesure des deux composantes du champ magnétique pour trois positions différentes du plan de capteurs à courant nul,
  - Détermination du champ magnétique ambiant,
  - (2) Mesure des deux composantes du champ magnétique pour trois positions différentes du plan de capteurs à un courant donné,
  - Détermination du champ magnétique du mode commun + champ ambiant,
  - $\circ$  (2) (1) : Le champ ambiant est soustrait de la somme du champ de mode commun et du champ ambiant,
  - Détermination du champ magnétique de mode commun.
- Installation du simulateur avec un bloc de graphite permettant de simuler le défaut (Figure III.24 (b) ou Figure III.24 (c)) à étudier

- (D1) Mesure des deux composantes du champ magnétique pour trois positions différentes du plan de capteurs à courant nul,
- Détermination du champ magnétique ambiant (qui peut être diffèrent d'une mesure à une autre),
- (D2) Mesure de deux composantes du champ magnétique pour trois positions différentes du plan de capteurs à un courant donné,
- Détermination du champ magnétique sous courant + champ ambiant,
- $\circ$  (D2) (D1) : Le champ ambiant est soustrait du champ de mode sous courant,
- Détermination du champ magnétique de mode défaut,
- Enfin soustraction du champ magnétique du mode commun au champ magnétique de mode défaut pour obtenir uniquement la signature magnétique différentielle du défaut.

# 2. Résultats de la reconstruction de la distribution du courant électrique dans le cas de trois défauts

Les résultats de reconstruction de la distribution du courant électrique à partir du modèle inverse seront présentés dans le cas de trois défauts : un défaut 2D et deux défauts 3D. Le défaut 2D est obtenu en orientant le bloc de graphite comme sur la Figure V.1 – (a). Les défauts 3D correspondent aux blocs de graphite Figure V.1 – (b) et Figure V.1 – (c).



(a) (b) (c) Figure V.1 Les différentes configurations de défauts étudiés : (a) Défaut 2D, (b) Défaut 3D - a (24% du volume total), (c) Défaut 3D - b (3% du volume total)

Ces signatures sont illustrées dans la Figure V.2. Nous rappelons que la mesure est faite sur trois plans et que deux composantes du champ sont enregistrées (axiale et radiale). Le courant passant à travers la pile est maintenu constant à 25 A.



Figure V.2 Signatures différentielles du champ magnétique des trois défauts étudiés (μT) : En rouge, B2D est la signature pour un défaut 2D obtenue en orientant le bloc de graphite comme sur la Figure V.1- (a).

En bleu et en vert, B3D - 1 et B3D - 2 sont respectivement les signatures des deux défauts 3D Figure V.1 – (b) et Figure V.1 - (c)

La comparaison des signatures numériques et mesurées du mode commun et des modes différentiels a été effectuée dans le deuxième chapitre (problème direct). Nous avons constaté des écarts entre les signatures du mode commun prédit par le modèle direct et celles mesurées. Ces différences sont essentiellement dues à la non-prise en compte de la boucle de courant externe dans le modèle hormis les fils d'injection du courant.

Des mesures de répétitivité du mode commun ont été aussi réalisées. Ceci a permis de s'assurer que la signature du mode commun reste inchangée lors des différents montage/démontage du simulateur.

Nous avons observé que les signatures des modes différentiels mesurées et numériques concordent beaucoup plus dans la forme que dans l'ordre de grandeur. En effet la soustraction du mode commun a permis de supprimer l'influence de la boucle de courant externe. Nous constatons à partir de ces remarques que le mode différentiel est plus facile à modéliser que le mode commun.

L'inversion se base sur le modèle inverse des conductivités. Nous rappelons que le système d'équations à inverser est le suivant :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{MD}}\mathbf{j}_{\mathbf{MD}} = \mathbf{B} - \mathbf{S}_{\mathbf{MC}}\frac{\mathbf{I}_{\mathbf{tot}}}{\mathbf{s}_{\mathbf{pile}}}$$
 Eq V-1

où  $S_{MD}$  et  $S_{MC}$  sont le modèle du mode différentiel et du mode commun,  $j_{MD}$  la densité de courant différentielle inconnue, **B** la mesure du champ magnétique et  $I_{tot}$  le courant mesuré à l'ampèremètre,  $s_{pile}$  est la section de la pile.

#### a) Défaut 2D

Dans cette partie nous présentons le résultat d'inversion de la signature différentielle mesurée d'un défaut 2D. Les résultats d'inversion sont donnés dans la Figure V.3. La Figure V.3 – (a) et la Figure V.3 – (c), montrent la distribution du courant différentiel et la distribution de courant obtenues avec le modèle direct pour le défaut 2D. La Figure V.3 – (b) est la distribution de courant différentiel reconstruite par l'inversion du champ magnétique différentiel. La Figure V.3 – (d) est la distribution du courant de défaut obtenue en ajoutant à la distribution du courant différentielle reconstruite la distribution de courant d'un mode commun numérique.

Pour chaque figure, nous plaçons trois plans de coupe à différentes positions dans la longueur de la pile. Ceci nous permettra de mieux distinguer les défauts 2D des défauts 3D.

Nous constatons que le modèle inverse des conductivités permet de reconstruire la distribution de courant différentielle à partir de la mesure du champ magnétique. Nous remarquons que le courant reconstruit est plus intense sur le bord de la pile car celui-ci est plus proche des capteurs par rapport à un courant circulant plus au centre de la pile. Pour avoir un ordre de grandeur de l'erreur de reconstruction nous avons fait le choix de comparer le courant reconstruit à un courant calculé par le modèle direct dans le cas d'un défaut.



Figure V.3 Renconstruction de la densité de courant à partir de la mesure du champ magnétique externe généré pour un défaut 2D (A.m<sup>-2</sup>) :
(a) Courant différentiel cible prédit par le modèle direct, (b) Courant différentiel reconstruit, (c) Courant de défaut cible prédit par le modèle direct, (d) Courant de défaut reconstruit

L'écart entre les deux courants permet de définir une erreur comme dans le chapitre précédent (Eq I - 30). Cette erreur ne représente pas rigoureusement le niveau de reconstruction car le champ mesuré est entaché d'incertitudes. La meilleure manière de faire cette comparaison serait de faire une mesure invasive du courant dans le cas du défaut et ensuite de le comparer au courant identifié par la mesure du champ. Ceci est malheureusement complexe à mettre en œuvre. Pour le défaut 2D identifié, l'erreur est de 25%.

#### b) Défaut 3D – a

La mesure du champ magnétique différentiel obtenue pour le défaut 3D - a est représentée sur la Figure V.1 – (b). Cette mesure est inversée et la distribution du courant différentiel ainsi obtenue est illustrée sur la Figure V.4 – (b). En ajoutant un mode commun numérique calculé pour un courant de 25A à la distribution de courant différentiel reconstruite, nous obtenons la distribution de courant de défaut Figure V.4 – (d). Les résultats obtenus en inversant le champ magnétique externe (Figure V.4 – (b)) et (Figure V.4 – (d)) sont comparés aux résultats prédits par le modèle direct en imposant le même défaut et courant (Figure V.4 – (a)) et (Figure V.4 – (c)). Une première analyse visuelle montre que la densité de courant est importante et hétérogène sur les plans de coupe droit près de la zone du défaut et celui du milieu avec une plus faible intensité.



Figure V.4 Renconstruction de la densité de courant à partir de la mesure du champ magnétique dans le cas du défaut 3D - a (A.m<sup>-2</sup>) :
(a) Courant différentiel cible prédit par le modèle direct, (b) Courant différentiel reconstruit, (c) Courant de défaut cible prédit par le modèle direct, (d) Courant de défaut reconstruit

A ce constat purement visuel nous ajoutons une estimation de l'erreur de reconstruction. Cette erreur de reconstruction vaut 25% pour le défaut 3D - a identifié.

## a) Défaut 3D – b

Nous allons maintenant inverser la signature magnétique différentielle du défaut 3D défini par la Figure V.1 – (c). Le maximum de la mesure du champ pour ce défaut (3  $\mu$ T) est plus faible que pour les deux précédentes configurations (7.5  $\mu$ T et 17  $\mu$ T). Cette signature est susceptible de se noyer dans le bruit magnétique qui est estimé au maximum à 2  $\mu$ T. La densité de courant différentielle est reconstruite Figure V.5 – (b).

Nous constatons par ailleurs que la distribution de courant prédit par le modèle direct (Figure V.5 – (a) et Figure V.5 – (c)) est hétérogène en surface et en profondeur du défaut, alors que les courants reconstruits se concentrent sur le bord en haut à droite de la pile. Ce phénomène est aussi observé dans le cas précédent.



Figure V.5 Renconstruction de la densité de courant à partir de la mesure du champ magnétique externe généré par défaut 3D - b (A.m<sup>-2</sup>) :
(a) Courant différentiel cible prédit par le modèle direct, (b) Courant différentiel reconstruit, (c) Courant de défaut cible prédit par le modèle direct, (d) Courant de défaut reconstruit

Au-delà du résultat visuel, l'erreur de reconstruction est estimée à 35% pour le défaut 3D - b identifié.

## 3. Conclusion sur les résultats du simulateur de pile

Nous avons démontré dans cette partie l'intérêt de la technique de reconstruction de la distribution de densité de courant par la mesure du champ magnétique externe. Malgré un environnement expérimental bruité, la distribution du courant est identifiée pour les différentes configurations de défaut 2D et 3D. Ceci avec des erreurs acceptables (Tableau V-1). D'autres configurations de défaut ont également été réalisées avec le simulateur de pile. Pour plus d'information se reporter à l'Annexe D.

Type du défaut	Erreur (%)
Défaut 2D	25
Défaut 3D - a	25
Défaut 3D - b	35

Tableau V-1 Erreur d'identification des trois défauts - Simulateur de pile

Nous ajoutons aussi que le modèle différentiel suffit pour identifier les boucles de courant dues au défaut.

#### Remarque par rapport à la mesure du mode commun

Toutes les mesures différentielles sont obtenues à partir de la soustraction de la signature du mode commun et la signature d'un défaut quelconque. Une mesure du mode commun avec le moins de bruit possible est donc indispensable, car si celle-ci est fortement bruitée, ce bruit se retrouve aussi sur la mesure différentielle. La vérification de la répétabilité du mode commun est donc indispensable.

# **B. VALIDATION SUR UNE PILE GENEPAC DE 100 CELLULES**

Dans la seconde étape de cette phase de validation, des mesures sur une pile réelle en fonctionnement ont été réalisées. Pour ce faire une pile à combustible à base de plaques métalliques embouties de type G a été utilisée. Les dimensions géométriques de la pile, qui contient 100 cellules, sont rassemblées dans le Tableau V-2. Cette pile est 5 cm plus longue que le simulateur de pile ce qui éloigne légèrement les plans de capteurs latéraux (gauche et droite) des effets des plaques terminales et des câbles reliés à la charge. Contrairement à la fausse pile, ici les bornes d'amenée et de collecte du courant sont situées au centre des plaques terminales.
Section rectangulaire	$0.164 \mathrm{x} 0.136 \ m^2$
Epaisseurs des AME	0,43 mm
Epaisseur d'une plaque bipolaire	1 mm
Epaisseur d'une plaque terminale	2.5 mm
Longueur de la pile	148 mm
Distance plan de capteurs / surface active	35 mm
Nombre de cellules	100

Tableau V-2 Paramètres géométriques de la pile

Le Tableau V-3 regroupe quelques paramètres nominaux de fonctionnement de la pile. Ces paramètres sont considérés dans la suite comme les conditions nominales assurant un bon fonctionnement de la pile sans défaut. En d'autres termes, le mode commun de la pile GENEPAC sera défini comme étant celui correspondant à la distribution de densité de courant dans la pile fonctionnant avec ces paramètres et chaque modification de ces conditions sera considérée comme un état défectueux de la pile.

Tableau V-3 Conditions nominales de référence de fonctionnement de la pile

Stæchiométrie Air	2
Stæchiométrie H <sub>2</sub>	1,5
Humidité relative Air	80 %
Humidité relative H <sub>2</sub>	80 %
Pression anode	1,5 bar
Pression cathode	1,5 bar
Température de fonctionnement	80°C
Courant	50 A et 100 A

Le schéma de la pile et du plan de capteurs coulissant sont donnés sur la Figure V.6. La section de la pile étant plus importante que précédemment le nombre de capteurs fluxgate est fixé à 30. Les pièces constituants le système de mesure et la pile sont choisies amagnétiques afin d'éviter des effets non-linéaires sur le champ magnétique mesuré. La boucle de courant externe est éloignée des capteurs au maximum mais demeure tout de même plus proche de la pile que dans le système simulateur de pile.



Figure V.6 Schéma du système experimental : (a) Pile GENEPAC de 100 cellules, (b) Plan de 30 capteurs fluxgate biaxes, (c) Pile GE-NEPAC + Capteurs

La pile a été installée sur un banc de test disponible au CEA-Liten (Figure V.7). Le système de mesure est entouré de beaucoup plus d'appareils que le simulateur de pile (auxiliaires de la pile, portes magnétiques, et charge de puissance). De ce fait, le bruit de mesure est susceptible d'être bien plus important que lors des mesures sur le simulateur au G2ELab.



(a)



Figure V.7 Photos du banc de mesures : (a) Environnement de mesures, (b) Pile GENEPAC + Plan de capteurs coulissant, (c) Entrées des gaz

### 1. Protocole de mesure

L'outil d'inversion du champ magnétique a été utilisé pour identifier la distribution des densités de courant différentiel lors du fonctionnement de la pile hors de ces conditions de référence (Tableau V-3) ou lors de l'introduction d'un défaut local au sein de la pile.

Une première série de mesures a tout d'abord été réalisée afin d'évaluer la capacité de la méthodologie magnétique à identifier les défauts de distribution de courant ayant lieu dans la totalité de la pile (défauts de type 2D). Les travaux de thèse de M. LeNy, portant sur le même type de pile ont démontré qu'une variation des conditions de fonctionnement ; en particulier de la stœchiométrie en air et de l'humidité relative ; conduisait à une modification de la distribution des densités de courant à l'intérieur de la pile [1]. Le même type de modification des conditions de fonctionnement sera donc utilisé ici pour valider le modèle inverse développé. Cette première série de mesures a permis également de caractériser et d'identifier les ni-

veaux de bruit réel avec et sans courant. La connaissance de ces bruits de mode commun nous sera utile non seulement pour fixer le paramètre de troncature mais aussi dans la deuxième phase pour identifier un défaut 3D.

Une seconde série de mesures a ensuite été réalisée afin de tester la capacité de la méthode à détecter des défauts localisés sur quelques cellules de la pile (défauts 3D). Pour ce faire, cinq cellules avec 20% de surface active en moins ont été introduites dans la pile.

Pour les deux séries d'essais la pile est testée en étanchéité et une courbe de polarisation est enregistrée et comparée avec les performances attendues pour ce type de pile.

Pour avoir la mesure sur champ du mode commun nous allons suivre le protocole suivant :

- (1) La pile est arrêtée et une mesure magnétique est réalisée. Les auxiliaires de la pile sont éteints, afin d'enregistrer les champs magnétiques de la pièce sur l'ensemble des points de mesure,
  - Détermination du champ magnétique ambiant (pour constater la répétitivité de la mesure du champ du champ ambiant lors des prochaines compagnes de mesures).
- (2) Une seconde série de mesures magnétiques est enregistrée cette fois-ci, pile en fonctionnement mais à courant nul afin d'enregistré le champ magnétique résultants du fonctionnement du banc de test,
  - Détermination du champ magnétique des auxiliaires + le champ ambiant,
  - (3) Ensuite, la charge est connectée et un courant (50 A ou 100 A) est débité par la pile dans les conditions de référence rappelées dans le Tableau V-3,
  - Détermination du champ de mode commun + champ ambiant + champ des auxiliaires.
- [(3) (2)] Enfin nous faisons la soustraction du champ magnétique des auxiliaires + le champ ambiant du mode commun + champ ambiant + champ des auxiliaires.
  - Détermination du champ de mode commun (présentée dans l'Annexe E).

Pour avoir la mesure du champ du mode défaut nous allons suivre les étapes suivantes :

- (D1) Nous répétons les deux premières étapes (1) et (2) exécutées précédemment. Ceci permet de prévoir un éventuel changement dans le champ ambiant
  - Détermination du champ magnétique ambiant,
  - Détermination du champ magnétique des auxiliaires + le champ ambiant.

- (D2) Ensuite, le même courant que dans le cas du mode commun est débité par une la pile avec un défaut de fonctionnement (2D) ou un défaut 3D,
  - Détermination du champ de mode défaut + champ ambiant + champ des auxiliaires.
- [(D2) (D3)] Nous faisons la soustraction du champ magnétique des auxiliaires + le champ ambiant du mode défaut + champ ambiant + champ des auxiliaires.
  - Détermination du champ de mode défaut.

Enfin pour avoir la signature différentielle, le champ du mode commun est soustrait du champ du mode défaut.

#### 2. Identification de défauts 2D

Le modèle magnétique a dans un premier temps été utilisé en imposant des défauts 2D à la pile. Les distributions de courant calculées dans cette série d'expérience ont été comparées à celles trouvées dans la littérature [1].

a) Défaut de stœchiométrie d'air

Le champ magnétique sur les 3 plans de capteur a été enregistré pour un courant nominal I=100 A pour trois valeurs de stœchiométrie d'air différentes (la valeur de 2 qui correspond au fonctionnement de référence de la pile puis 1,5 et 1,3). Ces signatures sont présentées dans la Figure V.8. Nous constatons que la forme du champ est identique sur les trois plans de capteurs ce qui semble indiquer que la distribution de courant est relativement homogène sur l'ensemble de la pile comme attendu pour un défaut 2D.



Figure V.8 Signatures magnétiques differentielles pour différentes valeurs de stoechiométrie d'air ( $\mu T$ ) :

En rouge, le champ différentiel pour une stæchiométrie d'air de 1.5 ; En bleu, le champ différentiel pour une stæchiométrie d'air de 1.3 ; En vert, le champ différentiel pour un retour à une stæchiométrie de référence de 2.

Le champ magnétique différentiel est inversé pour chaque valeur de stœchiométrie d'air. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure V.8. Nous constatons que lorsque la stœchiométrie d'air diminue l'hétérogénéité de la distribution des densités de courant augmente et que de plus fortes densités de courant se concentrent près des entrées d'air [1]. Le retour à une stœchiométrie nominale de 2 induit une densité de courant différentielle homogène sur les trois plans de coupe. Nous constatons par ailleurs que le défaut est globalement 2D car sur les trois plans de coupe la distribution du courant est quasiment identique quel que soit la stœchiométrie d'air.



Figure V.9 Densité de Courant de défaut reconstruite pour différentes valeurs de stæchiométrie (A.m-<sup>2</sup>) :
(a) Mode commun, Stæchiométrie air = 2 ; (b) Stæchiométrie air = 1.5 ; (c) Stæchiométrie air = 1.3 ; (d) Retour à stæchiométrie air = 2

## b) Défaut d'humidité relative : Assèchement

Dans le but d'assécher les membranes de la pile, nous diminuons l'humidité relative de l'air en entrée du compartiment cathodique. Nous mesurons ensuite le champ magnétique pour différentes valeurs d'humidité relative (50%, 30%), et ensuite nous revenons à une humidité relative de référence de 80%.

Pour chaque valeur d'humidité relative, le champ magnétique différentiel est mesuré. Les signatures du champ pour les trois cas sont tracées sur la Figure V.10. Nous constatons encore une fois que la forme de la signature du champ magnétique prédit déjà un défaut 2D car celle-ci est identique sur les différents plans de capteurs.



Figure V.10 Signatures magnétiques differentielles pour différentes valeurs d'humidité relative de l'air  $(\mu T)$  :

En rouge, le champ différentiel pour une humidité relative d'air de 50 % ; En bleu, le champ différentiel pour une humidité relative d'air de 30 % ; En vert, le champ différentiel pour un retour à une humidité relative d'air de référence de 80 %.

Le champ magnétique différentiel de la Figure V.10 est inversé afin d'identifier les densités de courant qui l'ont généré. Les résultats obtenus sont illustrés sur la Figure V.11. Nous remarquons que lorsque la pile est asséchée, les densités de courant se concentrent près des sorties d'air. En effet, lorsqu'on est dans le cas d'un assèchement, la membrane s'hydrate uniquement avec l'eau produite par la réaction, or cette eau produite dans le cœur de la pile est drainée vers la sortie d'air où elle vient humidifier la membrane. L'hétérogénéité de la distribution des densités de courant est plus importante à 30% qu'à 50% d'humidité relative. Ce résultat est observé dans la littérature [1]. Nous notons encore une fois le caractère deux dimensions du défaut car sur les trois plans de coupe la distribution du courant est quasiment la même.



Figure V.11 Densité de courant de défaut reconstruit (A.m<sup>-2</sup>) pour différentes valeurs d'humidité relative d'air :

(a) Mode commun, humidité relative d'air =80%; (b) Humidité relative d'air = 50%
(c) Humidité relative d'air = 30%; (d) retour à humidité relative d'air = 80%

## c) Conclusion sur l'identification des défauts 2D

Les résultats obtenus sur le stack GENEPAC démontrent et confirment la capacité d'un outil de diagnostic par la mesure du champ à détecter les variations des conditions de fonctionnement de la pile (stœchiométrie d'air et humidité relative). Ces variations provoquent une redistribution du courant qui affecte toutes les cellules du stack. Les distributions de courant identifiées concordent avec celles obtenues dans la littérature et les travaux précédents réalisés par M. LeNy [49].

## 3. Identification d'un défaut local au sein d'une pile (défaut 3D)

Afin de valider la capacité de la méthode de mesure magnétique à localiser un défaut local au sein d'une PEMFC, la pile utilisée précédemment a été démontée partiellement. Les cellules 61 à 65 ont été extraites de l'empilement et une partie de la surface active a été recouverte d'une résine inhibant ainsi le fonctionnement de cette surface. Une fois les cellules remontées et la pile testée en étanchéité et remontée sur le banc de test, une mesure de la performance de la pile a été réalisée.

La Figure V.12 – (a) représente un AME dont 20 % environ de la surface active est recouverte de résine. La position du défaut engendré par la modification de la surface active de ces quelques cellules au sein de la pile est schématisée sur la Figure V.12 – (b).



Figure V.12 Défaut 3D sur 5 cellules : (a) Cellule défectueuse, (b) Endroit du défaut dans la pile sur les cinq cellules

La Figure V.13 rassemble l'évolution de la tension en fonction du courant pour chacune des cent cellules de la pile. Comme on peut le voir sur cette figure, à courant donné, les cellules de plus faibles surfaces actives possèdent des performances plus faibles que les cellules non affectées par le défaut. Dans le même temps, les AME non modifiés présentent tous sensiblement les mêmes caractéristiques électriques. Seule la cellule 66 située juste à côté du défaut semble avoir des performances légèrement supérieures aux autres cellules. Ce comportement a déjà été observé et semble être dû à un phénomène de constriction des lignes de courant au voisinage d'un défaut [48].



Figure V.13 Evolution des tensions de cellules en fonction du courant dans les conditions de référence (V)

a) Défaut 3D sur cinq cellules

Sur la Figure V.14 sont rassemblées les mesures du champ magnétique réalisées sur la pile avec un défaut 3D en conditions de fonctionnement de référence à I=100 A. La signature différentielle du champ magnétique générée par ce défaut est plus importante sur la composante radiale du plan de capteurs gauche et il est de l'ordre de 40  $\mu$ T. Cette indication permet de conclure que le défaut est strictement 3D et qu'il est situé à gauche de la pile.



Figure V.14 Signature différentielle du défaut 3D sur cinq cellules ( $\mu T$ )

La Figure V.15 représente la densité de courant identifiée par la mesure du champ magnétique dans le cas du défaut 3D. Nous avons mis volontairement un plan de coupe à l'endroit du défaut, ce qui a permis de mettre en évidence une zone de faible courant qui correspond à la zone de défaut. A cet endroit, le courant reconstruit est quasi nul ce qui valide la capacité du système de mesure magnétique à identifier un défaut local.



Figure V.15 Densité de courant de défaut reconstruite par la mesure du champ magnétique dans le cas d'un défaut 3D sur cinq cellules sous les conditions de fonctionnement de référence  $(A.m^{-2})$ 

a) Défauts combinés : 2D et 3D

Nous allons maintenant, en plus du défaut 3D, appauvrir la pile en air en diminuant la stœchiométrie d'air à 1,4. La signature magnétique différentielle générée par ce défaut est présentée dans l'annexe B.

Théoriquement, nous allons avoir une combinaison de deux boucles de courant qui représenteront ce défaut : Une boucle globale 2D et une boucle locale 3D. Départager ces défauts en les identifiant par le champ magnétique externe est impossible car les champs générés par les deux défauts sont superposés.

Nous constatons en effet d'après le résultat Figure V.16 que le défaut 3D est plus important en ordre de grandeur que le défaut 2D.



Figure V.16 Densité de courant de défaut reconstruite dans le cas d'un défaut combiné 2D (Défaut de stoechiométrie passant de 2 à 1.4) et 3D (A.m<sup>-2</sup>)

# b) Identification du Défaut 2D à partir des défauts combinés : 2D et 3D

Dans tout ce travail nous avons considéré que deux sources de courant combinées génèrent la somme de leurs champs magnétiques respectifs. Ayant déjà uniquement la signature magnétique du défaut 3D, on se propose d'utiliser cette signature pour retrouver le défaut 2D.

Pour cela, nous faisons l'opération, [Signature (Défaut 2D et Défaut 3D combiné) -Signature défaut 3D]. La signature résultante devrait correspondre à la signature du défaut 2D.

Le résultat de cette soustraction est inversé afin d'identifier la distribution de densité courant (Figure V.17). Nous constatons le même phénomène que dans le résultat précédent (§ 2.a)). Pour un appauvrissement en air, on observe une concentration de la densité de courant en entrée d'air.



Figure V.17 Densité de courant de défaut reconstruite à partir du résultat de la soustraction de la signature magnétique du défaut 3D à celle du défaut combiné 3D+2D (stoechiométrie d'air à 1,4) (A.m<sup>-2</sup>)

Un autre défaut combiné (2D + 3D) a été étudié, le défaut 2D provoqué est dû à une diminution de l'humidité de relative de l'air. Ce résultat est présenté en Annexe E.

### c) Conclusion sur l'indentification des défauts 3D

A la vue des résultats présentés, le défaut 3D a été identifié avec succès et une densité de courant représentative de ce défaut est calculée par le modèle inverse magnétique. De plus, il faut noter que la signature magnétique dépend de l'ordre de grandeur du défaut (nombre de cellule affectées et rapport de conductivité électrique entre le cas sain et celui avec défaut) et non de sa taille (2D où 3D). En effet, la signature d'un défaut 3D peut être plus importante que la signature d'un défaut 2D.

Dans le cas des défauts combinés (2D + 3D), la signature différentielle du champ magnétique sera toujours plus importante sur un plan de capteur en fonction de l'endroit où se trouve le défaut 3D. En effet, la signature d'un défaut 3D est toujours importante sur le plan de capteurs proche du défaut, alors que la signature d'un défaut 2D et identique sur les trois plans.

#### C.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence la capacité à identifier d'éventuels dysfonctionnements de la pile à combustible à partir de mesures non-invasives de champ magnétique. La validation sur le simulateur de pile nous a permis de tester notre outil dans un environnement contrôlé, peu pollué par les différents auxiliaires d'une vraie pile à combustible. Les différentes configurations de défauts ont été identifiées avec une qualité acceptable.

Les résultats expérimentaux obtenus sur la pile GENEPAC montrent la sensibilité du champ magnétique vis-à-vis d'un changement des conditions opératoires (Stœchiométrie, humidité relative) et d'un défaut localisé sur quelques cellules de la pile. Pour démontrer la robustesse de l'outil, il faudra néanmoins vérifier la répétabilité de ces expériences et rendre plus robuste le modèle inverse vis-à-vis des perturbations magnétiques induites par un environnement réel en général et par les auxiliaires de pile en particulier. Une validation en conditions réelles (stationnaire ou embarquée) devrait permettre à terme de mesurer le potentiel réel de la méthodologie.

## VI. Conclusion générale

## A. BILAN SUR LE TRAVAIL EFFECTUE

Nous arrivons à la fin de ce manuscrit. Il s'agit maintenant de pour un bilan sur les objectifs atteints par rapport à ceux imaginés initialement. Ce travail présente une méthode innovante pour l'identification des défauts dans une pile à combustible (PAC). Cette méthode repose sur l'exploitation de la mesure du champ magnétique externe généré par la pile à combustible et en résolvant un problème inverse afin de retrouver les distributions de densité de courant qui sont un indicateur du mode de fonctionnement de la PAC. L'avantage principal de ce procédé repose sur son caractère « non invasif », car les capteurs de champ magnétique sont disposés autour de la pile.

Pour arriver à notre but ultime qui est la validation expérimentale de la méthode, nous avons suivi plusieurs étapes :

La première étape a consisté dans un rappel sur les atouts que présente la filière hydrogène en général et la pile à combustible en particulier. Ensuite, les mécanismes de fonctionnement de la pile à combustible ont été présentés avec une attention particulière concernant les différents défauts pouvant l'affecter. Le point le plus important que nous avons soulevé dans cette première étape porte sur la relation entre la distribution des densités de courant dans la pile et les défauts affectant celle-ci.

Nous avons aussi vu que les méthodes de diagnostic sont diverses et variées. Les méthodes les plus répandues sont : soit celles qui donnent une information globale sur l'état de la pile sans préciser l'endroit du défaut, soit celles qui sont invasives et qui perturbent le fonctionnement de la pile. Nous avons donc tout naturellement opté pour le diagnostic par la mesure du champ magnétique externe qui est une méthode non-invasive permettant de donner une information locale.

Dans la deuxième étape, deux modèles directs ont été présentés : un modèle électrocinétique et un modèle magnétostatique. Le premier modélise la distribution des densités de courant dans une pile à combustible à partir de paramètres électriques. Le deuxième évalue l'impact de ces densités de courant sur la signature magnétique externe de la pile.

L'hétérogénéité de la distribution des densités de courant en présence d'un défaut de conductivité électrique est constatée et la variation du champ magnétique par rapport un mode de fonctionnement sain de la pile est ensuite quantifiée.

La modélisation directe nous a aussi été utile pour :

• La définition des modes associés aux différents types de distributions de courant : Le mode commun qui représente un courant homogène à l'intérieur de la pile, le mode défaut quand le courant est hétérogène et enfin le mode différentiel qui définit une boucle de courant à l'intérieur de la pile,

• Dans le placement des capteurs magnétiques autour de la pile, et ceci pour avoir le plus d'informations dans la signature magnétique pour toutes les configurations de défaut (locale ou globale). Pour l'orientation des axes capteurs, nous nous sommes inspirés du travail de M. LeNy ; les axes sont orientés afin que les capteurs soient les plus insensibles au mode commun et les plus sensibles au mode différentiel. Leur positionnement nous permet d'adapter la terminologie de capteurs de défaut.

En troisième étape, nous avons développé le cœur de notre travail, en proposant quatre approches permettant de construire des bases de courant sur lesquelles repose le modèle inverse magnétostatique linéaire. Nous avons tout de suite constaté le caractère mal posé de notre problème inverse en voulant inverser des signatures magnétiques simulées avec le modèle direct. Les résultats obtenus peuvent être complètement aberrants. La technique de régularisation par la troncature du spectre a permis de stabiliser les solutions.

Cette partie a été délicate car les bases des courants proposées ont chacune des avantages et des inconvénients. Nous avons cependant réussi à faire un choix quant à la base des courants qui définit au mieux les défauts en calculant l'erreur d'identification. Rappelons ici les points clés de cette partie :

- L'imposition de la conservation du courant à l'intérieur de la pile,
- La prise en compte du fort saut de conductivité électrique entre les plaques terminales et le cœur de la pile,
- La limitation du nombre de vecteurs de la base des courants par rapport au nombre des mesures à disposition,
- La garantie des performances quand on travaille avec la base des champs associée : nous avons d'ailleurs observé qu'une base des courants qui définit bien les défauts en courant, ne les définit pas forcement bien en champ magnétique,

Finalement nous avons pu valider notre technique en deux étapes :

• Sur un simulateur de pile :

Celui-ci est conçu spécialement pour reproduire un comportement électrique similaire à celui d'une vraie pile (sans influence des auxiliaires d'une vraie pile et sans électrochimie). La partie active d'une pile saine est remplacée par un bloc de graphite. Des défauts ont été réalisés en coupant une partie de ce bloc de graphite et en faisant circuler un courant dans ce simulateur. Une mesure du champ magnétique est alors obtenue pour chaque configuration. Le travail sur le simulateur nous a aidé à poser le protocole expérimental afin d'avoir une mesure qui s'approche le plus de ce qui est obtenu en modélisation dans un environnement contrôlé.

• Sur une pile GENEPAC comportant 100 cellules :

En réalisant des défauts de fonctionnement et en insérant volontairement un défaut local sur cinq cellules. Le protocole de mesure est légèrement différent par rapport à celui suivi pour le simulateur de pile. En effet, la pile GENEPAC n'est démonté

qu'une seule fois pour insérer le défaut local, alors que le simulateur est démonté plusieurs fois pour insérer les différents blocs de graphite.

Les défauts de fonctionnement de la pile ont été choisis pour pouvoir les comparer à ceux que l'on peut trouver dans la littérature. Nous avons donc validé notre méthode lors d'une variation de stœchiométrie et d'humidité relative d'air. Les résultats obtenus concordent avec ceux présentés dans les travaux précédents et confirment l'intérêt de la mesure magnétique pour identifier ce type de variation de mode de fonctionnement (défaut global 2D).

Nous avons ensuite inséré un défaut local sur cinq cellules de la pile. La partie active de ces cellules est ainsi diminuée. La distribution des densités de courant est largement modifiée sur ces cellules et ceci a été nettement observé sur la signature magnétique de la pile. L'inversion de cette signature a permis de reconstruire un courant hétérogène avec une zone présentant de faibles densités de courant autour du défaut. La mesure magnétique externe n'est donc pas limitée à l'identification de défauts globaux mais peut être appliquée à un défaut local (3D). Les résultats obtenus montrent bien que ce type de défaut local peut être identifié par notre méthode.

#### **B.PERSPECTIVES POUR AMELIORER LA METHODE**

Plusieurs pistes d'améliorations sont à prévoir sur la modélisation du problème inverse, notamment dans la paramétrisation de la distribution des densités du courant. Pour la validation expérimentale, nous avons utilisé une base de courant qui est certes obtenue en résolvant le problème direct mais nous sommes convaincus qu'une base mathématique reposant sur des fonctions trigonométriques et suivant la logique des décompositions harmoniques devraient être capable de définir rigoureusement tout l'espace des défauts dans une pile à combustible. Le principal défi porte sur le choix de ces fonctions, pour qu'elles assurent la conservation du courant et qu'elles prennent en compte le saut de conductivité électrique apparaissant sur les collecteurs de courant, ainsi que l'épaisseur des plaques terminales.

La validation de cette méthode en environnement laboratoire est insuffisante au regard de l'objectif de ce travail. Une étude sur le placement, l'optimisation du nombre de capteurs et la gestion du bruit magnétique dans un système embarqué est nécessaire avant de conclure définitivement sur les performances cette méthode. Les principales contraintes dans un cas d'un système embarqué sont probablement la prévision du champ terrestre et la modélisation des sources de champ perturbatrices (linéaires et non-linéaires) présentes autour de la pile. Néanmoins, des compétences dans ces domaines ont été développées au sein de l'équipe des champs magnétique faibles (ERT CMF) pour palier à ces contraintes. Il serait aussi très utile de coupler cette méthode avec la spectroscopie d'impédance pour filtrer le bruit magnétique. En effet, la spectroscopie permet de moduler le courant sur une fréquence connue, ce qui permet d'exploiter uniquement la signature magnétique ayant la même fréquence.

Jusqu'à maintenant nous avons travaillé sur des mesures différentielles et les boucles de courants dues au défaut sont identifiées. Il serait judicieux de développer un modèle capable de reconstruire la distribution de la densité de courant de défaut dans la pile. Un tel modèle permettra de s'affranchir de la mesure du mode commun, et ainsi d'alléger le protocole de mesure en faisant que deux mesures : une mesure à un courant nul et une mesure à un courant donné.

Enfin il serait intéressant de prendre en compte les aspects électrochimiques de la pile dans la modélisation afin de pousser l'inversion encore plus loin. Le but étant de déterminer la cause de l'hétérogénéité du courant (conductivité et force électromotrice).

## VII. Annexes

## A. ANNEXE A

## La pile GESI et la pile GENEPAC

Dans cette annexe nous allons rappeler les caractéristiques des deux piles citées dans le manuscrit :

## La pile GESI

Tableau VII-1 Paramètres géométriques de la pile GESI

Section carrée	$0.1 \times 0.1 m^2$
Epaisseurs des AME	0,05 mm
Epaisseur d'une plaque bipolaire	4 mm
Epaisseur d'une plaque terminale	2 mm
Longueur de la pile	95 mm
Distance plan de capteurs / surface active	35 mm
Nombre de cellules	10

Tableau VII-2 Conditions nominales de référence de fonctionnement de la pile GESI

Stæchiométrie Air	2
Stæchiométrie H <sub>2</sub>	1,5
Humidité relative Air	80 %
Humidité relative $H_2$	80 %
Pression anode	1,5 bar
Pression cathode	1,5 bar
Température de fonctionnement	80°C
Courant	25 A et 50 A

## La pile GENEPAC

Tableau VII-3 Paramètres géométriques de la pile GENEPAC

Section rectangulaire	$0.164 \mathrm{x} 0.136 \ m^2$
Epaisseurs des AME	0,43 mm
Epaisseur d'une plaque bipolaire	1 mm
Epaisseur d'une plaque terminale	2.5 mm
Longueur de la pile	148 mm
Distance plan de capteurs / surface active	35 mm
Nombre de cellules	100

Stæchiométrie Air	2
Stæchiométrie H <sub>2</sub>	1,5
Humidité relative Air	80 %
Humidité relative H <sub>2</sub>	80 %
Pression anode	1,5 bar
Pression cathode	1,5 bar
Température de fonctionnement	80°C
Courant	50 A et 100 A

Tableau VII-4 Conditions nominales de référence de fonctionnement de la pile GENEPAC

### <u>Remarque par rapport aux deux piles</u>

Les différences les plus importantes entre les deux piles sont la longueur et la section qui définissent le nombre de capteurs et le nombre de plans de capteurs à mettre autour de chaque pile. Un autre point important est la position des bornes collectrices de courant. En effet, la pile GESI possède des bornes reliées au côté haut des plaques terminales, alors que les bornes de la pile GENEPAC sont reliées au centre des plaques terminales. Sachant que de forts courants sont collectés au niveau de ces bornes, les capteurs proches de celles-ci dans le cas de la pile GESI mesurent des champs très importants. Il est donc nécessaire de bien les modéliser et de les prendre en compte dans les modèles direct et inverse.

## **B.ANNEXE B**

### Géométrie du simulateur de pile

Nous avons déjà présenté dans le deuxième chapitre un simulateur de pile qui nous a permis de valider le modèle direct. Ce même système va être utilisé pour la validation du modèle magnétique inverse. Pour cela, nous définissons plusieurs configurations de défauts ayant différentes signatures magnétiques.

La géométrie du simulateur de pile à combustible est schématisée dans la Figure VII.1.Les dimensions du simulateur sont exactement les mêmes qu'une pile de type GESI comportant 10 cellules. Cette pile est quasi cubique ce qui nous permettra de l'alimenter par n'importe quelle face afin d'orienter les défauts dans des directions différentes. Les fils en entrée et en sortie du simulateur ont été pris en compte car ces derniers contribuent à la signature magnétique de la pile notamment sur les plans de capteurs latéraux (gauche et droite). Nous notons aussi que les bornes d'injection du courant du simulateur sont en haut des plaques terminales (au lieu d'être au centre de la section des plaques terminales).



Figure VII.1 Géométrie du simulateur de pile : (a) Vue du coté, (b) Vue de face, (c) Vue de haut

C.ANNEXE C

## Simulateur de pile en barreaux

Pour valider le modèle direct ( § III.C ), un simulateur de pile à combustible a été utilisé. Ce simulateur a servi dans de précédents travaux comme outil de validation d'un algorithme d'inversion [49]. Il est composé de 25 barreaux en graphite de section carrée. Ils sont assemblés pour former un cube ayant les mêmes dimensions géométriques qu'une pile disponible au LEPMI (GESI). L'assemblage est ensuite pris entre des plaques terminales (anode et cathode) en cuivre. A l'inverse de ce qui a été fait auparavant où les plaques terminales sont différentes, dans notre approche nous les avons choisies identiques pour se rapprocher au mieux du comportement électrique d'une vraie pile (Figure VII.2 – (c)).

Les barreaux dans la précédente version (Figure VII.2 - (a)) sont parallèles au courant ce qui permet de créer des défauts 2D sur toute la profondeur de la pile, en alimentant que certain barreaux. Dans notre approche nous avons choisi de positionner ces barreaux per-

pendiculaires à la direction du courant total (Figure VII.2 - (b)). Ce schéma permet d'avoir plusieurs configurations de défauts 3D et 2D en créant un trou dans le simulateur par enlèvement d'un ou plusieurs barreaux à celui-ci. Le contact électrique entre les barreaux se fait directement par la surface de chaque barreau.



**(a)** 

**(b)** 

(c)

Figure VII.2 Simulateur de pile en barreaux de graphite : (a) Positionnement vertical des barreaux, (b) Positionnement horizontal des barreaux, (c) Plaque terminale en cuivre

## Répétabilité de la mesure du mode commun

On souhaite utiliser le simulateur de pile pour placer à l'intérieur des zones de non conduction à différents endroits (défauts). Nous sommes donc amenés à devoir la démonter et la remonter. En dehors d'un bon repositionnement du simulateur de pile dans le système, il est important de pouvoir garantir la même qualité de montage des différents éléments qui la constitue. Afin d'évaluer le degré de reproductibilité de la mesure, nous démontons le simulateur plusieurs fois et nous faisons une mesure à chaque remontage de celle-ci. Cette étape est réalisée avec le mode commun du simulateur, en ayant tous les barreaux à l'intérieur du support (Figure VII.3). Nous alimentons ensuite le simulateur avec un courant de 25A et nous faisons la mesure du champ sur les trois plans de capteurs (Figure VII.4).



Figure VII.3 Mode commun du simulateur en barreaux disposés verticalement

Nous constatons d'après la Figure VII.4, une dispersion sur les mesures magnétiques de plus de  $5\mu$ T sur certains capteurs. Ces différences montrent que le remontage de la pile ne garantit pas la même distribution du courant à l'intérieur pour une même configuration des barreaux.



Figure VII.4 Champ magnétique du mode commun après plusieurs démontages de la pile en barreaux

### Conclusion sur le simulateur de pile en barreaux

Les mesures de répétabilité du champ du mode commun ont montré que le champ magnétique est très sensible aux erreurs de positionnement mécaniques dues au démontage et au remontage de la pile. Ceci peut être expliqué par le changement des chemins privilégiés du courant à chaque remontage. Ces chemins sont essentiellement dépendants des résistances de contact entre les barreaux.

## D. ANNEXE D

Nous restons toujours sur le principe d'un simulateur de pile qui nous permette de ne s'intéresser qu'aux phénomènes de conduction mais dorénavant, nous aurons recours à des blocs de graphites homogènes pour limiter les résistances de contact uniquement au niveau des plaques bipolaires. De plus ces blocs permettront un cheminement plus naturel des lignes de courant. En plus des résultats présentés dans le chapitre « validation expérimentale », nous allons dans cette annexe ajouter deux résultats obtenus en travaillant sur le simulateur de pile (Figure VII.5).



(a) (b) Figure VII.5 Deux autres défauts 3D avec le simulateur de pile : (a) Défaut 3D - c, (b) Défaut 3D - d <u>Autres résultats sur le simulateur de pile</u>

<u>Défaut 3D – c</u>

Ce défaut est obtenu en positionnant le bloc de graphite (Figure III.24 - (c)) de manière à avoir le défaut en sortie de la pile.

Nous constatons d'après la Figure VII.6 que le défaut est identifié à partir de sa signature en champ magnétique. En effet, nous remarquons une zone faible en courant à l'endroit du défaut.



Figure VII.6 Renconstruction de la densité de courant à partir de la mesure du champ magnétique externe généré par défaut 3D - c (A.m<sup>-2</sup>) :
(a) Courant différentiel cible prédit par le modèle direct, (b) Courant différentiel reconstruit, (c) Courant de défaut cible prédit par le modèle direct, (d) Courant de défaut reconstruit

## <u>Défaut 3D – d</u>

Ce défaut est obtenu en positionnant le bloc de graphite (Figure III.24 - (b)) pour avoir le défaut en entrée de la pile sur la partie inférieure de celle-ci.

La représente les courants identifiés par la mesure du champ comparés aux courants prédit par le modèle direct. Nous remarquons Figure VII.7 - (c) que le courant passe principalement par le haut de la pile. Ceci est normal car cette partie de la pile ne présente pas de défaut. L'identification du courant par la mesure du champ montre aussi un courant circulant en haut de la pile en entrée de celle-ci.



Figure VII.7 Renconstruction de la densité de courant à partir de la mesure du champ magnétique externe généré par défaut 3D - d (A.m<sup>-2</sup>) :

(a) Courant différentiel cible prédit par le modèle direct, (b) Courant différentiel reconstruit,
(c) Courant de défaut cible prédit par le modèle direct, (d) Courant de défaut reconstruit

## Erreurs d'identification

Nous avons calculé les erreurs d'identification pour le défaut 3D - c et le défaut 3D - d. Ces erreurs sont rassemblées dans le Tableau VII-5.

Type du défaut	Erreur (%)
Défaut 3D - c	34
Défaut 3D - d	28

Tableau VII-5 Erreurs d'identification des trois défauts - Simulateur de pile

Quelques signatures de la pile GENEPAC Signature du mode commun à 100 A



Figure VII.8 Signature du mode commun pour 100A ( $\mu T$ )

Signature du défaut combiné 2D + 3D



Figure VII.9 Signature différentielle du défaut combiné  $2D + 3D (\mu T)$ 

Signature du défaut 2D obtenue à partir de la signature du défaut combiné et la signature du défaut 3D



Figure VII.10 Signature magnétique obtenue en faisant la soustraction de la signature magnétique du défaut 3D à celle du défaut combiné  $3D+2D(\mu T)$ 

## VIII. Bibliographie

- [1] M. L. Ny, "Diagnostic non invasif de piles à combustible par mesure du champ magnétique proche," phdthesis, Université de Grenoble, 2012.
- [2] "Report of the Hydrogen Production Expert Panel: A Subcommittee of the Hydrogen & Fuel Cell Technical Advisory Committee." .
- [3] "Fiche 1.3 Production et consommation d'hydrogène rev. fev2016 PM Fiche 1.3 Production et consommation d'hydrogène rev. fev2016 PM.pdf.".
- [4] "Hydrogène énergie," Connaissance des Énergies, août-2011. [Online]. Available: http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie. [Accessed: 24-Mar-2017].
- [5] A. Kerry, "The Fuel Cell and Hydrogen, Annual Review, 4th Energy Wave," 2016. [Online]. Available: http://ballard.com/files/PDF/Media/4th\_Energy\_Wave\_2016\_FC\_and\_Hydrogen\_Annual. pdf.
- [6] T. Elmer, M. Worall, S. Wu, and S. B. Riffat, "Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 913–931, février 2015.
- [7] W. Zhang, N. Wang, and S. Yang, "Hybrid artificial bee colony algorithm for parameter estimation of proton exchange membrane fuel cell," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 14, pp. 5796–5806, mai 2013.
- [8] S. Lyonnard, "Membranes pour piles à combustible : structure et transport. Apport de la diffusion neutronique," Éc. Thématique Société Fr. Neutron., vol. 11, pp. 177–197, 2010.
- [9] H. A. Gasteiger, J. E. Panels, and S. G. Yan, "Dependence of PEM fuel cell performance on catalyst loading," J. Power Sources, vol. 127, no. 1–2, pp. 162–171, Mar. 2004.
- [10] "Brevet EP1672726A2 Plaque bipolaire pour pile à combustible Google Brevets."
   [Online]. Available: http://www.google.com/patents/EP1672726A2?cl=fr. [Accessed: 18-Apr-2017].
- [11] J. Zhang, *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [12] Atkins et al., Chimie: molécules, matière, métamorphoses, De Boeck Supérieur. 1998.
- [13] W. Freundlich, A. Pacault, and G. Pannetier, *Compléments au "Nouveau traité de chimie minérale" [de Paul Pascal]*. Paris New York Barcelone [etc.]: Masson, 1978.
- [14] M. Prigent, Les piles à combustible : état du développement et des recherches en cours à l'aube de l'an 2000, Technip. 1997.

- [15] A. Caillard, "Elaboration d'électrodes de pile à combustible par plasma," Orléans, 2006.
- [16] W. Liu and D. Zuckerbrod, "In Situ Detection of Hydrogen Peroxide in PEM Fuel Cells," J. Electrochem. Soc., vol. 152, no. 6, pp. A1165–A1170, Jun. 2005.
- [17] P. A. C. Chang, J. St-Pierre, J. Stumper, and B. Wetton, "Flow distribution in proton exchange membrane fuel cell stacks," J. Power Sources, vol. 162, no. 1, pp. 340–355, Nov. 2006.
- [18] X. Zhang, Y. Rui, Z. Tong, X. Sichuan, S. Yong, and N. Huaisheng, "The characteristics of voltage degradation of a proton exchange membrane fuel cell under a road operating environment," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 17, pp. 9420–9429, juin 2014.
- [19] P. Pei and H. Chen, "Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review," *Appl. Energy*, vol. 125, pp. 60–75, juillet 2014.
- [20] R. Borup *et al.*, "Scientific Aspects of Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability and Degradation," *Chem. Rev.*, vol. 107, no. 10, pp. 3904–3951, Oct. 2007.
- [21] J. Park, H. Oh, T. Ha, Y. I. Lee, and K. Min, "A review of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Durability and degradation," *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 866–880, Oct. 2015.
- [22] S. Ge, B. Yi, and P. Ming, "Experimental Determination of Electro-Osmotic Drag Coefficient in Nafion Membrane for Fuel Cells," J. Electrochem. Soc., vol. 153, no. 8, pp. A1443–A1450, Aug. 2006.
- [23] Y. H. Park and J. A. Caton, "An experimental investigation of electro-osmotic drag coefficients in a polymer electrolyte membrane fuel cell," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 24, pp. 7513–7520, décembre 2008.
- [24] H. Li *et al.*, "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 103–117, Mar. 2008.
- [25] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillant, G. Dauphin-Tanguy, and B. Ould-Bouamama, "Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements," *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 905–913, Sep. 2006.
- [26] D. Candusso *et al.*, "Fuel cell operation under degraded working modes and study of diode by-pass circuit dedicated to multi-stack association," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 4, pp. 880–895, avril 2008.
- [27] J. Durst *et al.*, "Degradation heterogeneities induced by repetitive start/stop events in proton exchange membrane fuel cell: Inlet vs. outlet and channel vs. land," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 138, pp. 416–426, Jul. 2013.

- [28] P. W. Voorhees, "The theory of Ostwald ripening," J. Stat. Phys., vol. 38, no. 1–2, pp. 231–252, Jan. 1985.
- [29] S. Mitsushima, S. Kawahara, K. Ota, and N. Kamiya, "Consumption Rate of Pt under Potential Cycling," J. Electrochem. Soc., vol. 154, no. 2, pp. B153–B158, Feb. 2007.
- [30] W. Bi, G. E. Gray, and T. F. Fuller, "PEM Fuel Cell Pt/C Dissolution and Deposition in Nafion Electrolyte," *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. B101–B104, May 2007.
- [31] J. Zhang, K. Sasaki, E. Sutter, and R. R. Adzic, "Stabilization of Platinum Oxygen-Reduction Electrocatalysts Using Gold Clusters," *Science*, vol. 315, no. 5809, pp. 220– 222, Jan. 2007.
- [32] C. Chen, G. Levitin, D. W. Hess, and T. F. Fuller, "XPS investigation of Nafion® membrane degradation," J. Power Sources, vol. 169, no. 2, pp. 288–295, juin 2007.
- [33] M. Pineri, G. Gebel, R. J. Davies, and O. Diat, "Water sorption-desorption in Nafion® membranes at low temperature, probed by micro X-ray diffraction," *J. Power Sources*, vol. 172, no. 2, pp. 587–596, Oct. 2007.
- [34] J. Pauchet, M. Prat, P. Schott, and S. P. Kuttanikkad, "Performance loss of proton exchange membrane fuel cell due to hydrophobicity loss in gas diffusion layer: Analysis by multiscale approach combining pore network and performance modelling," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1628–1641, Jan. 2012.
- [35] F. A. de Bruijn, V. a. T. Dam, and G. J. M. Janssen, "Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components," *Fuel Cells*, vol. 8, no. 1, pp. 3–22, Feb. 2008.
- [36] G. Chen, H. Zhang, H. Ma, and H. Zhong, "Electrochemical durability of gas diffusion layer under simulated proton exchange membrane fuel cell conditions," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, no. 19, pp. 8185–8192, Oct. 2009.
- [37] D. Liang, M. Dou, M. Hou, Q. Shen, Z. Shao, and B. Yi, "Behavior of a unit proton exchange membrane fuel cell in a stack under fuel starvation," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 13, pp. 5595–5598, Jul. 2011.
- [38] F. Nandjou, "Etude locale de la thermique dans les piles à combustibles pour application automobile. Corrélation à la durée de vie," Grenoble Alpes, 2015.
- [39] S. He, M. M. Mench, and S. Tadigadapa, "Thin film temperature sensor for real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 125, no. 2, pp. 170–177, Jan. 2006.
- [40] D. Candusso, J. P. Poirot-Crouvezier, B. Bador, E. Rullière, R. Soulier, and J. Y. Voyant, "Determination of current density distribution in proton exchange membrane fuel cells," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 1, pp. 67–74, Jan. 2004.
- [41] Y. Akimoto and K. Okajima, "Experimental Study of Non-Destructive Approach on PEMFC Stack Using Tri-Axis Magnetic Sensor Probe," J. Power Energy Eng., vol. 03, no. 03, p. 1, Mar. 2015.
- [42] T. Génevé, Méthodes de diagnostic des piles à combustible. Toulouse, INPT, 2016.
- [43] F. Barbir, H. Gorgun, and X. Wang, "Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells," J. Power Sources, vol. 141, no. 1, pp. 96–101, février 2005.
- [44] M. A. Danzer and E. P. Hofer, "Electrochemical parameter identification—An efficient method for fuel cell impedance characterisation," J. Power Sources, vol. 183, no. 1, pp. 55–61, août 2008.
- [45] F. N. Büchi, A. Marek, and G. G. Scherer, "In Situ Membrane Resistance Measurements in Polymer Electrolyte Fuel Cells by Fast Auxiliary Current Pulses," J. Electrochem. Soc., vol. 142, no. 6, pp. 1895–1901, Jun. 1995.
- [46] C. Lagergren, G. Lindbergh, and D. Simonsson, "Investigation of Porous Electrodes by Current Interruption Application to Molten Carbonate Fuel Cell Cathodes," J. Electrochem. Soc., vol. 142, no. 3, pp. 787–797, Mar. 1995.
- [47] D. Hissel, M. C. Péra, and J. M. Kauffmann, "Diagnosis of automotive fuel cell power generators," *J. Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 239–246, avril 2004.
- [48] M. Le Ny, O. Chadebec, G. Cauffet, J. M. Dedulle, and Y. Bultel, "A Three Dimensional Electrical Model of PEMFC Stack," *Fuel Cells*, vol. 12, no. 2, pp. 225–238, Apr. 2012.
- [49] M. L. Ny et al., "Current Distribution Identification in Fuel Cell Stacks From External Magnetic Field Measurements," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 5, pp. 1925–1928, mai 2013.
- [50] M. Hinaje, O. Bethoux, G. Krebs, and B. Davat, "Nonintrusive Diagnosis of a PEMFC," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, pp. 1–4, Mar. 2015.
- [51] K.-H. Hauer, R. Potthast, and M. Wannert, "Algorithms for magnetic tomography—on the role of a priori knowledge and constraints," *Inverse Probl.*, vol. 24, no. 4, p. 045008, 2008.
- [52] R. Yamanashi, Y. Gotoh, M. Izumi, and T. Nara, "Evaluation of Generation Current inside Membrane Electrode Assembly in Polymer Electrolyte Fuel Cell Using Static Magnetic Field around Fuel Cell," *ECS Trans.*, vol. 65, no. 1, pp. 219–226, Jan. 2015.
- [53] "Estimation of localized current anomalies in polymer electrolyte fuel cells from magnetic flux density measurements," *AIP Adv.*, vol. 6, no. 5, p. 056603, Mar. 2016.
- [54] C. R. Vogel, *Computational Methods for Inverse Problems*. Philadelphia: Society for Industrial & Applied Mathematics, U.S., 2002.

- [55] J. Murthy and S. Mathur, "Numerical methods in heat, mass, and momentum transfer," *Sch. Mech. Eng.*, 2002.
- [56] P. A. Raviart and J. M. Thomas, "A mixed finite element method for 2-nd order elliptic problems," in *Mathematical Aspects of Finite Element Methods*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1977, pp. 292–315.
- [57] "ParaView." [Online]. Available: https://www.paraview.org/. [Accessed: 15-Sep-2017].
- [58] "Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities." [Online]. Available: http://gmsh.info/. [Accessed: 15-Sep-2017].
- [59] Y. Le Menach, "Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques : prise en compte des inducteurs," Lille 1, 1999.
- [60] T. T. Nguyen, "Méthode PEEC inductive par élément de facette pour la modélisation des régions conductrices volumiques et minces," Grenoble, 2014.
- [61] T.-S. Nguyen, J.-M. Guichon, O. Chadebec, G. Meunier, and B. Vincent, "An Independent Loops Search Algorithm for Solving Inductive Peec Large Problems," *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 23, pp. 53–63, 2012.
- [62] G. Antonini, D. Frigioni, and G. Miscione, "Hybrid Formulation of the Equation Systems of the 3-D PEEC Model Based on Graph Algorithms," *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.*, vol. 57, no. 1, pp. 249–261, Jan. 2010.
- [63] K. Preis *et al.*, "Numerical analysis of 3D magnetostatic fields," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 5, pp. 3798–3803, Sep. 1991.
- [64] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 2007.
- [65] B. Wilsch, "Dispositif de magnétomètres pour la mesure de courant en exploitant les harmoniques d'espace : application aux réseaux électriques," Grenoble Alpes, 2016.
- [66] L. A. Shepp, *Computed Tomography*. American Mathematical Soc., 1983.
- [67] J. Hadamard, *Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations*. New Haven Yale University Press, 1923.
- [68] A. HAZART, J.-F. GIOVANNELLI, S. DUBOST, and L. CHATELLIER, "Pollution de milieux poreux : identifiabilité et identification de modèles paramétriques de sources," *GRESTI*, 2005.
- [69] V. Monteiller, "Tomographie à l'aide de décalages temporels d'ondes sismiques P : développements méthodologiques et applications," Université de Savoie, 2005.

- [70] M. Legris, "Identification de l'état magnétique d'un système ferromagnétique à partir de mesures du champ proche," phdthesis, Institut National Polytechnique de Grenoble -INPG, 1996.
- [71] O. Chadebec, "MODELISATION DU CHAMP MAGNETIQUE INDUIT PAR DES TOLES IDENTIFICATION DE L'AIMANTATION Application à l'immunisation en boucle fermée d'une coque ferromagnétique," phdthesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001.
- [72] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*, 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [73] G. L. Lagier, Application de la methode des elements de frontiere a la resolution de problemes de thermique inverse multidimensionnels. Grenoble INPG, 1999.
- [74] G. Golub, P. Hansen, and D. O'Leary, "Tikhonov Regularization and Total Least Squares," *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, vol. 21, no. 1, pp. 185–194, Jan. 1999.
- [75] P. Hansen and D. O'Leary, "The Use of the L-Curve in the Regularization of Discrete Ill-Posed Problems," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 14, no. 6, pp. 1487–1503, Nov. 1993.
- [76] T. S. Nguyen, "Réduction de modèles issus de la méthode PEEC pour la modélisation électromagnétique des interconnexions électriques," phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2012.

## IX. Bibliographie personnelle

## A. ARTICLE DE JOURNAL

Ifrek L., Cauffet G., Chadebec O., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2017), 2D and 3D fault basis for fuel cell diagnosis by external magnetic field measurements. EPJ AP, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 79: 20901.

## **B.ARTICLES DE CONFERENCES**

Ifrek L., Bultel Y., Cauffet G., Chadebec O., Rosini S., Rouveyre L. (2017), 3D current density reconstruction on a fuel cell simulator by external magnetic field measurements, 7th International Conference on "Fundamentals & Development of Fuel Cells, Sttutgart.

Ifrek L., Chadebec O., Cauffet G., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2017), Spatial harmonic current density basis for faults identification in fuel cell stack from external magnetic field measurements, The Applied Computational Electromagnetics Society, Florence.

Ifrek L., Chadebec O., Cauffet G., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2016), *Comparison between 3d current density basis used for faults identification in fuel cell stack from external magnetic field measurments*, The International Workshops on 'Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism', Rome.

Ifrek L., Cauffet G., Chadebec O., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2016), 3D current density reconstruction in a fuel cell stack with external magnetic field measurement, International Symposium on Electric and Magnetic Fields, Lyon.

Ifrek L., Cauffet G., Chadebec O., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2016), Base de description des défauts 2D et 3D pour le diagnostic d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe, Symposium en Genie Electrique, Grenoble.

Ifrek L., Cauffet G., Chadebec O., Bultel Y., Rosini S., Rouveyre L. (2014), *Diagnostic d'une pile à combustible de type PEMFC par la mesure de champ magnétique externe*, Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Électrique, Cherbourg.

## Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe. « Vers la détermination de défauts locaux »

#### <u>Résumé</u>

Ce travail a permis de développer une technique non invasive d'identification de la distribution du courant dans une pile à combustible à partir du champ magnétique externe. La mesure du champ s'effectue sur un ensemble de points de mesures choisis pour détecter les variations du champ par rapport à un fonctionnement optimal de la pile. Les deux composantes du champ magnétique sensibles aux variations sont utilisées. La mesure du champ exploitable est la différence entre un mode sain et un mode quelconque de fonctionnement.

Autour de ces mesures de champ magnétique, un problème inverse est modélisé en explorant plusieurs approches de paramétrisation de la distribution du courant. Le caractère mal posé du problème s'est traduit par la non-unicité de la solution et sa sensibilité au bruit. L'affranchissement de ces problèmes est atteint par la régularisation du modèle inverse. L'outil développé a permis de reconstruire la distribution du courant indépendamment de la taille du défaut dans la limite de la précision des capteurs. La validation est faite sur un simulateur électrique d'une pile à combustible et sur une pile de type GENEPAC dans un environnement de laboratoire.

### Mots clés

Problème inverse magnétostatique ; densité de courant ; diagnostic non invasif ; pile à combustible ; décomposition en valeurs singulières ; régularisation.

# Faults identification on a fuel cell by external magnetic measurements. "Towards of determination of local faults"

#### <u>Abstract</u>

This work has allowed the development of a noninvasive technique for identifying the current distribution in a fuel cell from the external magnetic field. The magnetic field measurement is performed on different points chosen in order to detect the variations of the magnetic field in correspondence to the optimal operation of the fuel cell. The two components of the magnetic field which are sensitive to variation are used. The usable field measurement is the difference between a mode considered safe and any other operating mode.

Based on these magnetic field measurements, an inverse problem modeling is proposed by exploring several approaches of parametrization of the current distribution. The ill-posed character of the inverse problem is reflected by the non-uniqueness of the solution and its sensitivity to noise. To overcome these drawbacks, a regularization of the inverse model is achieved. The developed tool makes possible the identification of the current distribution in the fuel cell independently of the size of the fault within the limit of the precision of the sensors. The validation is carried out on both an electric simulator of a fuel cell and a real fuel cell (GENEPAC type) in a laboratory environment.

#### Index terms

Magnetostatic inverse problem; current density; non-invasive diagnosis; fuel cell; singular value decomposition; regularization.