



HAL
open science

Outils de caractérisation et de diagnostic d'une pile à combustible de type PEM par mesure du champ électromagnétique externe

Tahar Hamaz

► **To cite this version:**

Tahar Hamaz. Outils de caractérisation et de diagnostic d'une pile à combustible de type PEM par mesure du champ électromagnétique externe. Automatique / Robotique. Université de Grenoble, 2014. Français. NNT : 2014GRENT074 . tel-01128850

HAL Id: tel-01128850

<https://theses.hal.science/tel-01128850>

Submitted on 10 Mar 2015

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Automatique et Productique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Tahar HAMAZ

Thèse dirigée par **Mme. Catherine CADET** et
codirigée par **Mme. Florence DRUART** et **M. Gilles CAUFFET**

préparée au sein du **Laboratoire GIPSA**,
du **LEPMI** et du **G2ELab**.

dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique,
Automatique, Traitement du Signal (EEATS)**

Outils de caractérisation et de diagnostic d'une pile à combustible de type PEM par mesure du champ électromagnétique externe

Thèse soutenue publiquement le **13 novembre 2014**,
devant le jury composé de :

M, Daniel, HISSEL

Professeur, Université de Franche-Comté, Belfort (Rapporteur)

M, Antoine, GRALL

Professeur, Université Technologie de Troyes, Troyes (Rapporteur)

Mme, Delphine, RIU

Professeur, Grenoble-INP, Grenoble (Examinatrice)

M, Rachid, OUTBIB

Professeur, Université d'Aix-Marseille, Marseille (Examineur)

M, Sami, OTHMAN

Maître de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon (Examineur)

Mme, Catherine, CADET

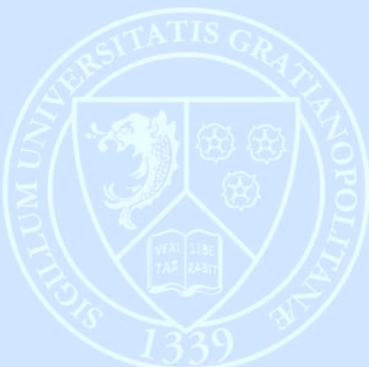
Maître de Conférences, Université Joseph Fourier, Grenoble (Directrice de thèse)

Mlle, Florence, DRUART

Maître de Conférences, Grenoble-INP, Grenoble (Co-Encadrante)

M, Gilles, CAUFFET

Maître de Conférences, Université Joseph Fourier, Grenoble (Co-Encadrant)



Description du sujet :

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) constituent une alternative aux moteurs thermiques utilisés dans le cadre d'applications transport ou dans le cadre d'applications stationnaires. Cependant, une large commercialisation des PEMFC dépend des progrès qui peuvent être réalisés pour améliorer leur fiabilité et leur durabilité. La PEMFC est sujette à plusieurs types de dégradations complexes et non entièrement maîtrisées qui varient en fonction des conditions de fonctionnement. Cependant, il est admis qu'il est souhaitable de faire fonctionner la PEMFC à distributions de courant uniformes car des distributions de courant hétérogènes entraînent une mauvaise utilisation des réactifs et des catalyseurs, une diminution des performances globales et une possible dégradation des matériaux constitutifs du cœur de la pile. De nouvelles stratégies de diagnostic doivent donc être proposées en s'appuyant sur les distributions de courant.

Mes travaux de recherche consistent à développer un nouvel outil de diagnostic s'appuyant sur une mesure du champ électromagnétique externe (non invasive) rayonné par la pile PEMFC. Le champ magnétique possède l'intérêt d'être corrélé à la distribution locale du courant circulant à l'intérieur de la pile, et permet d'avoir des informations sur les performances locales. Cette distribution est liée aux conditions opératoires de la pile. Il est alors possible, à partir d'une signature magnétique de remonter à une information locale et à la cause des distributions de courant non uniformes.

Des bases (vecteurs) qui contiennent les données des champs magnétiques issues des 30 capteurs disposés autour de la PAC sont construites à partir de distributions de courant spécifiques. Ces bases constituent un espace de représentation du comportement anormal de la PEMFC et permettront de d'élaborer des signatures caractérisant les fonctionnements indésirables.

Ainsi, deux méthodes ont été développées pour permettre : (i) d'extraire des paramètres pertinents sur la répartition de la densité de courant traduisant les performances locales de la PAC, (ii) de classifier les différents modes de fonctionnements indésirables. La première méthode consiste à générer des résidus vectoriels en comparant le comportement réel du système (caractérisé par un vecteur mesure) avec les bases générées. Des variables qualitatives ont été élaborées pour classifier les modes de fonctionnement indésirables de la pile. La deuxième méthode consiste à extraire des paramètres à partir de la projection du vecteur mesure dans la direction des bases. La classification est réalisée dans des espaces 2D.

Une validation des deux méthodes proposées a été effectuée à partir de mesures expérimentales sur une PEMFC de taille industrielle (stack GENEPAC de 40 cellules construit par le CEA et PSA). La pertinence des paramètres extraits a été vérifiée en s'appuyant sur des distributions de courant mesurées directement. Les modes de fonctionnement indésirables prédéfinis permettent de localiser les paramètres opératoires ayant conduit à l'évolution de la distribution de courant. Les outils ainsi réalisés sont très facilement transposables à d'autres piles PEMFC.

Mots Clés : Pile à combustible de type PEM, Modèle de représentation, Diagnostic, Classification, Distribution de la densité de courant, Champ magnétique.

Abstract:

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is a potential alternative energy conversion device for stationary and automotive applications. Wide commercialization of PEMFC depends on progress that can be achieved to enhance its reliability and durability. The PEM fuel cell is subject to several types of complex and not fully mastered degradations which vary with operating conditions. It is desirable to operate the PEMFC at uniform current distribution because non uniform current distribution over the MEA could result in poor reactant and catalyst utilization, overall cell performance degradation as well as corrosion processes inside the PEM fuel cell. Therefore, new diagnostic strategies must be proposed, including choice of information gathered on the system and the fuel cell operation representation.

My research is to develop a new diagnostic tool based on a measure of the external electromagnetic field (non-invasive) radiated by the fuel cell. The magnetic field has the advantage of being correlated to the local distribution of the current flowing inside the fuel cell (a physical indicator to obtain information on local performance of a fuel cell); it is linked to the local operating conditions: relative humidity level, temperature etc. It is then possible, from a magnetic signature to trace local information.

Baselines (vectors) which contain the magnetic fields data generated by specific current distribution are built to characterize the magnetic field generated by the undesirable operation of the fuel cell. Baselines constitute a representation space of abnormal system behavior.

Two methods have been developed to enable: (i) to extract the relevant parameters on the distribution of the current density resulting from PEM fuel cell stack local performance, (ii) to classify different types of undesirables operations. The first method is to generate vector residuals by comparing the actual behavior of the system (characterized by a measurement vector) with the baselines generated. Qualitative variables were created to classify the undesirable modes of PEM fuel cell stack operation. The second method is to extract parameters from the projection of the vector in the direction of measurement baselines. The classification is performed in 2D space.

Validation from experimental measurements of the two proposed methods has been carried out on a commercial scale PEMFC (GENEPAC stack of 40 cells built by the CEA and PSA). The relevance of the extracted parameters was verified based on current density distributions measured directly. The undesirable predefined operating modes were used to locate the operating conditions parameters that led to the evolution of the current density distribution. The tools are made easily transferable to other PEMFC stack.

Key-words: PEM fuel cell, Representation model, Diagnosis, Classification, Current density distribution, Magnetic field.

Remerciements :

En premier lieu, je tiens à remercier les personnes qui ont accepté d'être membre du jury : Rachid OUTBIB de l'Université d'Aix-Marseille pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Antoine GRALL de l'Université Technologie de Troyes pour avoir effectué un examen minutieux de mon manuscrit, en attachant une attention particulière aux méthodes de diagnostic proposées. Daniel HISSEL de l'Université de Franche-Comté, pour avoir également été rapporteur de mon manuscrit, et avoir attaché une importance particulière aux aspects diagnostic des PEMFC. Delphine RIU de Grenoble-INP pour avoir bien voulu examiner mon manuscrit et avoir soulevé des perspectives intéressantes. Sami OTHMAN de l'université Claude Bernard Lyon 1, pour avoir également bien voulu examiner mon manuscrit et avoir pointé des applications intéressantes.

J'adresse mes remerciements, bien évidemment, à mes trois encadrants qui ont dirigé ma thèse : Catherine CADET de l'Université Joseph Fourier, Florence DRUART de Grenoble-INP et Gilles CAUFFET de l'Université Joseph Fourier. Vous avez formé un encadrement complémentaire qui m'a permis d'avoir toujours quelqu'un à qui m'adresser en cas de besoin. Je vous remercie également pour la grande confiance que vous m'avez accordée. Vous avez réussi grâce à votre pédagogie et votre persévérance à me transmettre la rigueur et la passion pour la recherche.

Je tiens également à remercier Mathieu LE NY pour m'avoir donné ses modèles magnétiques directs et électrocinétiques qui constituent la base de mon travail, mais aussi et surtout pour l'aide apportée sur leurs compréhensions et utilisations. Je lui dois énormément et j'espère qu'il trouvera dans ces lignes ma très profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier vivement le CEA et PSA, en particulier Sébastien ROSINI du LITEN pour avoir mis à ma disposition les données issues des expériences menées sur la pile à combustible du CEA et de PSA lors des travaux de thèse de Mathieu LE NY et dans cadre du projet ANR OMNISCIANTS. Sans ces données, l'impact des résultats de cette thèse aurait été bien moindre. J'espère qu'il trouvera dans ces lignes ma très profonde reconnaissance.

Je remercie vivement ma famille qui m'a soutenu quotidiennement et qui continue de le faire. Merci à mes parents, mes deux frères Hachemi et Idir, mes tantes, ma grand-mère Cethi Hnifa.

Enfin, ne pouvant pas citer toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche (Collègues, amis, famille), je terminerai en leur disant simplement

MERCI.

Table des matières

I. INTRODUCTION GENERALE	1
II. PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM ET DIAGNOSTIC	5
1. INTRODUCTION	5
2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE PILE A COMBUSTIBLE	5
2.1. PRINCIPE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM	5
2.2. LA CELLULE ELEMENTAIRE (LE CŒUR DE LA PILE)	6
2.2.1. La membrane (électrolyte)	6
2.2.2. Les électrodes	7
2.3. LE STACK (EMPILEMENT DE CELLULES)	7
3. DESCRIPTION D'UN SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE	9
3.1. LES SOUS SYSTEMES	9
3.2. LES CONDITIONS OPERATOIRES	10
3.2.1. La pression	10
3.2.2. La température du stack	10
3.2.3. Les débits des gaz	10
3.2.4. Humidité relative des gaz	10
3.2.5. Courant	10
4. PERFORMANCES ET DURABILITE	11
4.1. PERFORMANCES	11
4.1.1. Courbe de polarisation	11
4.1.2. Homogénéité des tensions d'une pile	12
4.1.3. Homogénéité de la distribution de courant	12
4.2. DURABILITE	12
5. DEGRADATIONS DANS UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM	12
5.1. DEGRADATIONS LIEES A LA GESTION DE L'EAU	13
5.1.1. Noyage	13
5.1.2. Assèchement	14
5.2. DEGRADATIONS LIEES A UNE MAUVAISE GESTION DES DEBITS, DES PRESSIONS, DES TEMPERATURES ET DE L'HUMIDITE RELATIVE DES GAZ	14
5.2.1. Alimentation en gaz	14
5.2.2. Pression des gaz	15
5.2.3. Température de la pile	15
5.2.4. Humidité relative	15
5.3. CONTAMINATION PAR LES REACTIFS	15

5.4. VIEILLISSEMENT NATUREL	15
6. MESURES ET TESTS SUR LES PILES A COMBUSTIBLES POUR LE DIAGNOSTIC	16
6.1. MESURES	16
6.1.1. Mesures possibles	16
6.1.2. Mesure invasive de la distribution de la densité de courant	18
6.1.3. Mesure non invasive (mesure indirecte) de la densité de courant par mesure du champ magnétique	18
6.2. TESTS DE CARACTERISATION	19
6.2.1. Spectroscopie d'impédance électrochimique	19
6.2.2. Interruption du courant	20
7. LES DIFFERENTES APPROCHES DU DIAGNOSTIC	20
7.1. GENERALITES ET CONCEPTS	20
7.2. METHODES DE DIAGNOSTIC	22
7.2.1. Les méthodes internes	22
7.2.1.a. Redondance analytique et espace de parité	23
7.2.1.b. Observateurs	23
7.2.1.c. Estimation paramétrique	23
7.2.2. Les méthodes externes	24
7.2.2.a. Reconnaissance des formes (Rdf)	24
7.2.2.b. Traitement du signal	26
7.2.2.c. Analyse des signatures	27
7.2.2.d. Arbre de décision	28
8. DIAGNOSTIC DES SYSTEMES PILE A COMBUSTIBLE	28
8.1. DIAGNOSTIC DES PILES A COMBUSTIBLE A BASE DE METHODES INTERNES	28
8.1.1. Redondance analytique	29
8.1.2. Observateurs	29
8.1.3. Identification paramétrique	30
8.2. DIAGNOSTIC DES PILES A COMBUSTIBLE A BASE DE METHODES EXTERNES	31
8.2.1. Diagnostic par reconnaissance de formes	31
8.2.2. Traitement du signal	32
8.2.3. Arbre de décision et logique	33
9. CONCLUSION	33

III. ETABLISSEMENT DU MODELE CARACTERISANT LE FONCTIONNEMENT INDESIRABLE DE LA PILE A COMBUSTIBLE

1. INTRODUCTION	35
2. INTERACTIONS ENTRE LES CONDITIONS OPERATOIRES ET LES DISTRIBUTIONS DE COURANT NON UNIFORME A L'INTERIEUR D'UNE PILE A COMBUSTIBLE	35
3. MODELE ELECTRODYNAMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE	37
4. LE COMPORTEMENT MAGNETIQUE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE	39
4.1. MODELE MAGNETIQUE DIRECT	39
4.2. EMBLEMES ET ORIENTATIONS DES CAPTEURS MAGNETIQUES	41
4.2.1. Emplacements des capteurs	42
4.2.2. Orientations	42

4.2.3. Nombre et localisations	43
4.3. LA COMPOSANTE SUIVANT L'AXE Z	44
5. SIGNATURES MAGNETIQUES	45
5.1. FORTE DENSITE DE COURANT A L'ENTREE DE L'AIR	46
5.2. FAIBLE DENSITE DE COURANT A L'ENTREE DE L'AIR	47
5.3. FAIBLE DENSITE DE COURANT AU NIVEAU D'UN QUADRANT	48
6. ESPACE DE REPRESENTATION DU FONCTIONNEMENT INDESIRABLE DE LA PAC	49
6.1. FORMULATION DU PROBLEME	50
6.2. CONSTRUCTION DES BASES	50
6.2.1. Bases à partir de six zones principales	51
6.2.2. Bases à partir de quatre zones principales et de trois zones principales	52
7. FORMULATION DU PROBLEME DE DIAGNOSTIC A PARTIR DES BASES CONSTRUITES	55
8. CONCLUSION	57

IV. CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC PAR GENERATION DE RESIDUS **58**

1. INTRODUCTION	58
2. PRINCIPE DE DETECTION ET DE CARACTERISATION DE DISTRIBUTION DE COURANT HETEROGENE PAR GENERATION DE RESIDUS	58
2.1. GENERATION DES RESIDUS	59
2.2. EVALUATION DES RESIDUS	60
2.3. DECISION	62
3. LOCALISATION DES HETEROGENEITES LE LONG DU STACK	63
4. LES SIGNATURES DE REFERENCE COMME OUTIL DE DIAGNOSTIC	65
5. ILLUSTRATION DE LA PERTINENCE DES SYMPTOMES	66
5.1. ILLUSTRATION AVEC LE MODELE MAGNETIQUE DIRECT	66
5.2. EXEMPLE D'ILLUSTRATION D'HETEROGENEITES LE LONG DU STACK AVEC LE MODELE ELECTROCINETIQUE	67
5.2.1. Exemple à faibles densités de courant dans deux zones	68
5.2.2. Exemple à faibles densités de courant dans quatre zones	69
5.3. EXEMPLE D'ILLUSTRATION D'HETEROGENEITES DE QUELQUES CELLULES DU STACK AVEC LE MODELE ELECTROCINETIQUE	70
5.3.1. Exemple 1	71
5.3.2. Exemple 2	73
5.3.3. Exemple 3	76
6. CONCLUSION	78

V. CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC PAR PROJECTION DANS LA DIRECTION DES BASES **80**

1. EXTRACTION DES PARAMETRES POUR LA DETECTION DES HETEROGENEITES	80
2. ILLUSTRATION DE LA PERTINENCE DES PARAMETRES	82
2.1. EXEMPLE AVEC LE MODELE MAGNETIQUE DIRECT	82
2.2. EXEMPLE D'HETEROGENEITES LE LONG DU STACK EN UTILISANT LE MODELE ELECTROCINETIQUE	83
2.2.1. Exemple à faibles densités de courant dans deux zones	83
2.2.2. Exemple à faibles densités de courant dans quatre zones	84

2.3. EXEMPLE D'HETEROGENEITES DE QUELQUES CELLULES DU STACK AVEC LE MODELE ELECTROKINETIQUE	85
2.3.1. Exemple 1	85
2.3.2. Exemple 2	86
2.3.3. Exemple 3	88
3. APPROXIMATION DE LA DISTRIBUTION DE LA DENSITE DE COURANT A PARTIR DES PARAMETRES	90
3.1. EXEMPLE 1	95
3.2. EXEMPLE 2	97
4. DIAGNOSTIC	98
4.1. CLASSIFICATION NON SUPERVISEE	98
4.1.1. Signe des paramètres	98
4.1.2. Variables qualitatives	99
4.2. CLASSIFICATION SUPERVISEE	100
4.2.1. Résolution du problème de classification	101
4.2.1.a. Construction d'un nouvel espace de représentation	101
4.2.1.b. Sélection des paramètres	103
5. CONCLUSION	104

VI. APPLICATION SUR UN STACK INDUSTRIEL **106**

1. INTRODUCTION	106
2. PRESENTATION DU SYSTEME EXPERIMENTAL	106
3. MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE A COMBUSTIBLE	108
4. EXPLOITATION DES MESURES REALISEES SUR LA PAC – ILLUSTRATION SUR DEUX CAS.	110
4.1. VARIATION DE STOECHIMETRIE DE L'AIR	110
4.2. EXPERIENCE DE L'IMPACT DE LA DUREE DE FONCTIONNEMENT	111
5. LOCALISATION DES HETEROGENEITES SUR LA SECTION DE LA PILE A COMBUSTIBLE	112
5.1. SYMPTOMES GENERES AVEC LA METHODE DES RESIDUS	112
5.1.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air	112
5.1.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement	115
5.1.3. Conclusion	118
5.2. HETEROGENEITES OBTENUES PAR LA METHODE PAR PROJECTION	119
5.2.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air	119
5.2.1.a. Paramètres générés par la méthode par projection	119
5.2.1.b. Approximation de la valeur de la distribution de courant	121
5.2.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement	121
5.2.2.a. Paramètres générés par la méthode par projection	121
5.2.2.b. Approximation de la distribution de courant pour l'impact de la durée de fonctionnement	123
5.2.3. Conclusion	123
6. LOCALISATION DES HETEROGENEITES LE LONG DU STACK	123
6.1. SYMPTOMES GENERES AVEC LA METHODE DES RESIDUS	124
6.1.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air	124
6.1.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement	125
6.2. HETEROGENEITES OBTENUES PAR LA METHODE PAR PROJECTION	126
6.2.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air	126

6.2.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement	128
7. LOCALISATIONS DES DEFAUTS AU NIVEAU DES SOUS-SYSTEMES	129
7.1. SIGNATURES OBTENUES AVEC LA METHODE DES RESIDUS	129
7.2. CLASSIFICATION NON SUPERVISEE	130
7.2.1. Table des signatures	130
7.2.2. Variables qualitatives	131
7.2.3. Classification supervisée	132
7.2.3.a. Séparation des données en utilisant $V1 = (p1, p2, p3, p4) T$	132
7.2.3.b. Séparation des données en utilisant $V2 = (p5, p6, p7, p8) T$	133
7.2.3.c. Séparation des données en utilisant $V = (V1, V2, V3)$	134
8. CONCLUSION	134
VII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	137
<hr/>	
BIBLIOGRAPHIE	145
<hr/>	
ANNEXE	151
<hr/>	

Figure II-1 : Principaux composants d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible et principe de fonctionnement [Le Ny, thèse 2012].....	6
Figure II-2 Composition d'un stack [Le Ny, thèse 2012].....	8
Figure II-3 Assemblage d'une pile à combustible [Tant, thèse 2013]	8
Figure II-4 : Le diagramme d'un système pile à combustible [Niroumand et al., 2011]	9
Figure II-5 Allure d'une courbe de polarisation et détails des différentes pertes de tension [Candusso, Thèse 2002]	11
Figure II-6 : Courbes de polarisation d'une pile à combustible PEM qui illustre l'effet du noyage sur les performances : (1): pas de noyage ; (2-4) : évolution du noyage [Li et al., 2008]	14
Figure II-7: Mesures sur un système pile à combustible.....	17
Figure II-8 Schéma équivalent de la pile à combustible [Sailler, thèse 2007].....	19
Figure II-9 : Schéma du raisonnement utilisé pour le diagnostic dans la méthode MVIM [Chin & Danaï, 1991].....	27
Figure III-1: A gauche, La cellule d'essai avec des canaux d'écoulement à co-courant. A droite, variation de la distribution de la densité de courant entre $\lambda_{air} = 2$ et $\lambda_{air} = 4$ sur la distribution de la densité de courant [Hauer et al., 2005]	36
Figure III-2 : A gauche, le sens de l'écoulement de l'air. A droite, La variation temporelle (entre $\lambda_{Air} = 1.2$ et $\lambda_{Air}=2$) des densités de courants au niveau d'une cellule en $A.cm^{-2}$ obtenus avec une carte S++ [Le Ny, thèse 2012].....	37
Figure III-3 : Entrées et sorties du modèle électrocinétique direct.....	39
Figure III-4 : Entrées et sorties du modèle magnétique direct.....	39
Figure III-5 : Pile à combustible et système de capteurs fixés autour de celle-ci	42
Figure III-6 : Champ magnétique du mode commun (bleu) et orientation des capteurs mono-axes (rouge) pour le stack GENEPAC [Le Ny, thèse 2012]	43
Figure III-7 : Contour de la zone active de la pile (en noir) et réseau de capteur utilisé pour le stack GESI [Le Ny, thèse 2012].	44
Figure III-8 : Pile étalon, magnétomètres et leurs supports. Le trajet du courant principal est représenté en vert. Des capteurs bi-axes (composante rouge et bleu) sont fixés sur le support transparent. Les deux composantes (rouge et bleu) seront utilisées pour détecter des hétérogénéités le long du stack [Le Ny, thèse 2012].....	45
Figure III-9 : Configurations de la densité de courant (jaune : densité de courant élevée. Bleu : densité de courant faible)	46
Figure III-10 : Champ magnétique perçu par les capteurs. A gauche : sans normalisation, à droite : avec normalisation	47
Figure III-11 : Champ magnétique perçu par les capteurs	48
Figure III-12 : Configurations à faible densité de courant à l'entrée de l'hydrogène d'une pile à combustible.....	48
Figure III-13 : Champ magnétique perçu par les capteurs	49
Figure III-14 : Subdivision de la section de la pile en 6 zones principales	51
Figure III-15 : Définition des zones principales au niveau de la section de la pile à combustible	52
Figure III-16 : Les données de champ magnétiques pour les quatre bases principales après normalisation	53
Figure III-17 : Définition des zones pour les régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe Y	54
Figure III-18 : Définition des zones pour les régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe X	55

Figure IV-1 : Principe de la détection et de la caractérisation de distributions de densités de courant hétérogènes à partir des bases	59
Figure IV-2 : Evaluation des résidus	61
Figure IV-3 : Distribution de la densité de courant en $A.m^{-2}$ et le champ magnétique (flèche rouge) généré par cette distribution de courant.....	66
Figure IV-4 : Densités de courants en $A.cm^{-2}$ et le champ magnétique généré (flèche rouge)	68
Figure IV-5 : Champs magnétiques de la composante u généré par la configuration de la Figure IV-4	69
Figure IV-6 : Densités de courants en $A.cm^{-2}$ et le champ magnétique généré (flèche rouge)	70
Figure IV-7 : Densités de courants en $A.cm^{-2}$ et le champ magnétique généré (flèche rouge)	71
Figure IV-8 : Champs magnétiques de la composante u généré par la configuration de la Figure IV-7	71
Figure IV-9 : Champs magnétiques de la composante w perçu par les capteurs	72
Figure IV-10 : Densités de courants en $A.cm^{-2}$ et le champ magnétique généré (flèche).....	74
Figure IV-11 : Composante u du champ magnétique pour la distribution de courant de la Figure IV-10	74
Figure IV-12 : Composante w du champ magnétique pour la distribution de courant de la Figure IV-12	75
Figure IV-13 : Densités de courants en $A.cm^{-2}$ et le champ magnétique généré (flèche).....	77
Figure V-1 : Schéma du raisonnement permettant d'extraire des paramètres, illustré dans un espace à trois dimensions.	80
Figure V-2 : Densités de courant en $A.m^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche rouge)	82
Figure V-3 : Densités de courant en $A.cm^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche)	84
Figure V-4 : Densités de courant en $A.cm^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche)	85
Figure V-5 : Densités de courant au sein de la PAC et champ magnétique à l'extérieur (flèche).....	87
Figure V-6 : Densités de courant et champ magnétique généré (flèche)	89
Figure V-7 : Section de la pile à combustible	91
Figure V-8 : Cas avec 3 densités de courant différentes	96
Figure V-9 : Densités de courant en A/m^2 sur la section de la pile	97
Figure V-10 : Schéma de principe de la classification	100
Figure V-11 : Représentation des coordonnées Si , ψiF et φOF pour $k=6$ et $F= (-0.2, 0.6, 0.4, -0.4, 0.4, 0.2)^T$	102
Figure VI-1 : Stack GENEPAC et le système de positionnement mécanique [LE NY, thèse 2012].....	106
Figure VI-2 : Photo du stack GENEPAC et le système de positionnement mécanique [LE-NY, thèse 2012].....	107
Figure VI-3 : Plaque invasive de mesure de la distribution de courant [Le Ny, thèse 2012]	108
Figure VI-4 : Evaluation du résidu RB entre les instants t_1 et t_2	109
Figure VI-5 : Variations de la stœchiométrie de l'air et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur	111
Figure VI-6 : Evolution de la tension cellule et du champ magnétique (composante u) au cours du temps (Capteur 15/ Cellule 20)	111
Figure VI-7 : Signature externe du champ magnétique (composante u) correspondant à la diminution de la stœchiométrie de l'air pour les différents paliers au temps t_1 à t_7	113
Figure VI-8 : Variation temporelle (entre t_1 et t_6) des densités de courants en $A.cm^{-2}$. A gauche, courants obtenus avec la carte S++. A droite, courants calculés par méthode inverse à partir du champ magnétique (carte S++ éteinte) [Le Ny, thèse 2012].....	114

Figure VI-9 : Représentation des zones de la PAC présentant une faible densité de courant (en gris) d'après les symptômes (Sj) obtenus.....	115
Figure VI-10 : Signature externe du champ magnétique (composante u) correspondant à la dégradation des performances au cours du temps dans les mêmes conditionnements opératoires	116
Figure VI-11 : Variation temporelle (entre t1 et t5) des densités de courants en A.cm ⁻² . A gauche, courants obtenus avec la carte S++. A droite, courants obtenus avec le système magnétique non invasif [Le Ny, thèse 2012]	116
Figure VI-12 : Représentation des zones de la PAC présentant une faible densité de courant (en gris) d'après les symptômes obtenus.....	118
Figure VI-13 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une diminution de la stœchiométrie de l'air pour une mesure moyennée	120
Figure VI-14 : Approximation de l'évolution de la densité de courant en A.cm ⁻² entre les instants t1 et t6.....	121
Figure VI-15 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour un suivi de dégradation des performances avec une mesure moyennée.....	122
Figure VI-16 : Approximation de l'évolution de la densité de courant en A.cm ⁻² entre t1 et t5.....	123
Figure VI-17 : Projection des quatre premiers paramètres avec $\varphi1V1$	132
Figure VI-18 : Projection des quatre premiers paramètres avec $\varphi0V1$	133
Figure VI-19 : Projection du cinquième jusqu'au huitième paramètre avec $\varphi0V2$	133
Figure VI-20 : Projection des douze premiers paramètres avec $\varphi1P$	134
Figure VII-1 : Schéma global de diagnostic correctif pour uniformiser la distribution de courant	143

Notations

Chapitre II

F : Débit ()

I : Courant (A)

P : Pression (Pa)

T : Température (°C)

U : Tension (V)

λ : Coefficient de stœchiométrie

η : Surtension (V)

Chapitre III

B : Champ magnétique (T)

$B_{référence}$: Champ magnétique de référence (T)

B_1 : Composante du champ magnétique suivant la direction de B_1

B_2 : Composante du champ magnétique suivant la direction de B_2

E : Champ électrique (V/m)

E_m : Champ électromoteur (V/m)

G : Fonction de Green ($T.A^1$ en 3D et $T.A^1.m$ en 2D)

j : Densité de courant (A/m^2)

j_m : Densité de courant imposée ($A.m^2$)

L_{AME} : Épaisseur d'un AME selon l'axe Z (m)

N : Nombre de bases

Nbs : Nombre de capteurs installés autour de la pile à combustible

r : Position de la mesure (m)

Notations

\mathbf{R}_B : Résidu vectoriel (T)

r' : Position des densités de courant (m)

Ref : référence

\mathbf{S} : Modèle direct discrétisé ($T.A^1.m^2$)

u : Vecteur de dimension Nbs, contenant toutes les composantes B1 du champ magnétique aux niveaux des Nbs capteurs.

V : Potentiel (V)

w : Vecteur de dimension Nbs, contenant toutes les composantes B2 du champ magnétique aux niveaux des Nbs capteurs.

x_i : Élément i de la base \mathbf{X}_j (T)

\mathbf{X}_j : Base (T)

$\overline{\mathbf{X}}_j$: Base normalisée

$\mathbf{Y}(t)$: Champ magnétique mesuré (T)

σ : Conductivité (S/m)

Chapitre IV

\mathbf{A} : Matrice de données (contenant les données de champ magnétique des bases construites)

D : Le numéro du symptôme le plus élevé parmi douze premiers symptômes

G : Le numéro du symptôme le plus élevé parmi les symptômes représentant trois zones à faibles densités de courant

H : Le numéro du symptôme le plus élevé parmi les symptômes représentant une seule zone à faibles densités de courant

Half : Le numéro du symptôme le plus élevé parmi les symptômes représentant deux zones à faibles densités de courant

$\mathbf{Mresidu}[i, j]$: Matrice binaire

$\mathbf{Mresidus}[i, j]$: Matrice contenant les résidus vectoriels

$\mathbf{résidu}_j$: Résidu vectoriel généré à partir de la base j

$Symptome_j$: Nombre compris entre 0 et Nbs

τ : Seuil pour l'évaluation des résidus

Notations

Chapitre V

\bar{a}_{ij} : Élément de la i ème ligne et de la j ème colonne de la matrice A

$E(f_i)$: Ensemble d'expériences effectuées pour le défaut numéro i

f_i : Défaut numéro i

j_k : Densité de courant dans la zone K

\mathbf{P} : Vecteur des paramètres extraits par projection

p_i : Élément i du vecteur des paramètres \mathbf{P}

s_i : Variable booléenne

S_i : Sommet d'un polygone régulier

V_j : Vecteur à dimension variable constitué d'éléments du vecteur des paramètres \mathbf{P}

w_i : Composante i du vecteur \mathbf{W}

\mathbf{W} : Vecteur de dimension de dimension K

\bar{y}_i : Élément i du vecteur mesure normalisé

\mathbf{Y} : Vecteur mesure (T)

$\bar{\mathbf{Y}}$: Vecteur mesure normalisé

Z : nombre de défauts

β_k : Coefficients liés à la valeur de la densité de courant dans la zone k

β_{kk} : Coefficients liés à la valeur de la densité de courant dans la zone k

$\psi_i(W)$: Un point dans le segment $S_i S_{i+1}$

$\varphi_0(W)$: Coordonnées dans l'espace 2D

$\varphi_1(W)$: Coordonnées dans l'espace 2D

Notations

Abréviations

AME : Assemblage Membrane Electrode

FDI : Fault Detection and Isolation

PAC : Pile à Combustible PAC

FTC : Fault Tolerant Control

Rdf : Reconnaissance des formes

SIE : Spectroscopie d'impédance électrochimique

Notations

I. Introduction générale

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) représentent une alternative de conversion d'énergie pour des applications stationnaires et automobiles. Cependant, le développement et le déploiement de la technologie de la pile à combustible dépend des progrès qui peuvent être réalisés pour améliorer leurs fiabilités et durabilités. Pour parvenir à ces deux dernières, il est nécessaire d'optimiser la conception et le fonctionnement des piles à combustible, afin d'augmenter la durée de vie des composants de la pile à combustible, en particulier l'élément central d'une pile à combustible qu'est l'Assemblage Membrane Electrode (AME).

Il est souhaitable de faire fonctionner la PEMFC à distributions de courant uniformes au niveau de l'Assemblage Membrane Electrode (AME). En effet, des distributions de courant non uniformes entraînent une mauvaise utilisation des réactifs et des catalyseurs, une possible apparition de mécanisme de dégradation des matériaux et des interfaces à l'intérieur de la pile à combustible ainsi qu'une dégradation des performances globales. En partant de ce constat, de nouvelles stratégies de diagnostic doivent donc être proposées en s'appuyant sur les distributions de courant à l'intérieur de la pile à combustible. La compréhension de la distribution de la densité de courant locale et de ses caractéristiques spatiales, sous les différentes conditions opératoires d'exploitation, est d'une importance cruciale en vue de développer une conception optimale et des stratégies de contrôle efficaces.

L'apparition de dégradations au niveau de la pile à combustible induit une perte de performance et une réduction de la durée de vie de la pile à combustible. Les performances initiales d'une pile à combustible peuvent être rétablies dans le cas où le système de diagnostic permet de discriminer l'origine des défauts réversibles. Les systèmes de contrôle pourront être utilisés pour pallier à ces défauts par modification des conditions opératoires en agissant sur les différents auxiliaires (sous-système du combustible, sous-système du comburant, circuit de refroidissement de la pile et/ou humidificateurs...).

Pour approfondir la compréhension du comportement des piles à combustibles de type PEMFC et optimiser leurs performances, Le LEPMI et G2ELAB travaillent en collaboration afin de développer des méthodes de mesure et de caractérisation non invasives. La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE), l'émission acoustique, le bruit électrochimique ainsi que le champ magnétique induit sont les méthodes pertinentes étudiées.

Les travaux de thèse de Mathieu LE NY [Le Ny, thèse 2010] ont permis de démontrer l'intérêt du champ magnétique pour reconstruire la distribution de la densité de courant à l'intérieur de la pile à combustible. Ces travaux de thèse se sont inscrits dans le cadre du projet OMNISCIENTS dans lequel interviennent des acteurs du secteur des applications transports (PSA) et des applications stationnaires (HELION). L'objectif affiché de ces partenaires est d'implanter à l'intérieur des systèmes qu'ils ont développés pour ces applications, un outil permettant de détecter de manière rapide et pertinente les défauts susceptibles de dégrader les performances et les durées de vie de leurs systèmes. L'objectif final est de permettre des actions de correction en cas d'apparition d'un

fonctionnement indésirable. L'étape de diagnostic n'a toujours pas été abordée. C'est dans ce contexte que des travaux de recherche au GIPSA Lab ont été entrepris afin de développer des outils de diagnostic pour les piles à combustible.

L'objectif de mes travaux de thèse est de proposer un nouvel outil de caractérisation et de diagnostic des piles à combustibles de type PEMFC en s'appuyant sur une mesure du champ électromagnétique externe (non invasive) rayonné par la pile PEMFC. Le champ magnétique possède l'intérêt d'être corrélé à la distribution de courant, ce qui permet d'avoir des informations sur les performances de conversion énergétiques locales. Ces performances de conversion énergétiques locales sont liées aux conditions opératoires de la pile.

La problématique est de trouver des méthodes de diagnostic adaptées à la spécificité de la pile à combustible et de la mesure du champ magnétique. Celles-ci doivent permettre :

- 1) de construire des indicateurs de la répartition de la densité de courant (indicateurs de performances) à l'intérieur de la pile pour détecter les hétérogénéités,
- 2) de caractériser les différents modes de fonctionnement en utilisant ces indicateurs,
- 3) de déterminer la cause des dégradations des performances locales.

Les méthodes de diagnostic développées dans cette thèse s'appuient sur une nouvelle manière d'exploiter la mesure du champ magnétique induit par la pile à combustible. L'objectif est de remonter aux performances de conversion énergétiques locales et aux origines de leurs évolutions au cours du temps de manière rapide et pertinente. Les méthodes de diagnostic développées peuvent être utilisées en phase de fonctionnement ou durant les tests de maintenance.

Ce manuscrit est organisé de la manière suivante :

Une partie du chapitre II porte sur la description de la pile à combustible et du système permettant la gestion de son fonctionnement. L'ensemble des dégradations pouvant affecter une pile à combustible est également présenté. Nous allons voir que des mesures, de nature différente, permettent de recueillir des informations. Ces mesures peuvent être invasives ou non invasives, comme elles peuvent être locales ou globales. Le diagnostic de la pile à combustible s'appuie sur ces mesures.

La suite du chapitre est consacrée au diagnostic. Un état de l'art succinct sur les méthodes de diagnostic des défauts est présenté. Ces techniques se partagent en deux familles : les méthodes internes et les méthodes externes. Les méthodes internes reposent sur l'existence d'un modèle mathématique décrivant le comportement du système alors que les méthodes externes reposent sur les observations prélevées par le système de mesure. Ensuite, une synthèse des méthodes de diagnostic actuellement recensées dans la littérature dans le cadre du diagnostic des piles à combustible est présentée.

Dans le chapitre III, nous mettons tout d'abord en évidence l'existence d'interactions entre les conditions opératoires de la pile à combustible et les distributions de courant non uniformes. Ensuite, nous présentons le modèle électrocinétique qui permet d'obtenir la distribution de courant

et de tension en fonction d'une distribution de paramètres électriques (conductivités et forces électromotrices). Ce modèle électrocinétique permet de prendre en considération les phénomènes d'interactions entre les différentes cellules d'un même stack. Dans un deuxième temps, nous présentons le modèle magnétique direct qui permet de calculer le champ magnétique en tout point de l'espace à partir d'une distribution de courant donnée. Ces deux modèles, modèle magnétique direct et modèle électrocinétique, nous permettent de simuler le champ magnétique généré par n'importe quelle distribution de paramètres électriques afin de tester l'outil de diagnostic dans les chapitres IV et V. En utilisant le modèle magnétique direct, nous mettons en évidence l'existence de signatures externes spécifiques pour certaines familles de distributions de courant non uniformes.

En s'inspirant de ces signatures, nous présentons à la fin du chapitre le modèle caractérisant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible sous forme de vecteurs contenant des données de champ magnétique. Ces vecteurs sont appelés par la suite bases.

Le chapitre IV est consacré à la caractérisation et au diagnostic de la pile à combustible. Dans ce chapitre, à partir des bases construites, nous proposons d'établir un outil qui permet de remonter à l'état interne de la pile à combustible, plus précisément, aux performances de conversion énergétiques locales. Cet outil est basé sur la génération de résidus afin de détecter les hétérogénéités sous forme de symptômes. Une classification des hétérogénéités à partir des symptômes, s'affranchissant de la connaissance a priori des dysfonctionnements, est proposée. Les signatures de référence sont prédéfinies a priori pour caractériser le fonctionnement de la pile à combustible indépendamment de l'origine du fonctionnement indésirable. Concernant la partie diagnostic des dysfonctionnements, nous montrons comment les signatures de référence peuvent être utilisées comme un outil efficace dans le contexte de la détection et de l'isolation des défauts. Nous montrons également qu'il est possible, à partir des symptômes extraits à partir des composantes du champ magnétique, de se prononcer sur la localisation des hétérogénéités le long du stack. Enfin, l'outil de diagnostic par génération de résidus est testé en simulation sur plusieurs exemples.

Dans le chapitre V, nous proposons d'utiliser à présent, pour la caractérisation et le diagnostic d'une pile à combustible, une méthode basée sur la projection du vecteur des mesures dans les directions des bases construites. Les bases sont considérées comme des vecteurs dans l'espace multidimensionnel qui peuvent être définis par leurs directions. L'angle formé entre le vecteur mesure et une base donnée peut être utilisé comme un moyen de détection d'hétérogénéités. Cet angle permet de quantifier le rapprochement ou l'éloignement d'une mesure par rapport aux bases sous forme de paramètres. L'outil de diagnostic par projection est testé en simulation sur les mêmes exemples qu'au chapitre précédent.

Dans ce chapitre, les paramètres extraits par projection sont utilisés afin d'estimer la distribution de la densité de courant dans la pile à combustible. Ensuite, deux classifications de type non supervisée permettent de caractériser le fonctionnement indésirable de la pile à combustible indépendamment de son origine. Nous présentons également une classification supervisée, séparant des données étiquetées dans le plan bidimensionnel et utilisant plusieurs sous classifieurs.

Enfin dans le chapitre VI, une validation des deux méthodes proposées à l'aide de mesures expérimentales est effectuée sur des mesures réelles sur une PEMFC de taille industrielle utilisée lors du projet OMNISCIANT (stack GENEPAC de 40 cellules construit par le CEA et PSA). La pertinence des

symptômes et des paramètres extraits est vérifiée en s'appuyant sur des distributions de courant mesurées directement avec une carte de mesure de densité de courant invasive et sur des distributions de courant obtenues avec une méthode d'inversion du modèle magnétique direct [Le Ny, thèse 2012]. La distribution de courant estimée à partir des paramètres extraits par la méthode des projections est comparée à celles obtenues avec la plaque invasive ainsi que la méthode inverse. Ce chapitre présente aussi l'utilisation des classes définies aux chapitres IV et V pour la localisation des défauts au niveau du système pile à combustible et auxiliaires. Ensuite nous donnons la classification des défauts à partir des paramètres dans le plan bidirectionnel.

Ce manuscrit se termine par une conclusion générale résumant les points abordés dans cette thèse et donnant des idées pour de futures investigations.

Ce travail a donné lieu aux publications suivantes :

Hamaz T., C. Cadet, F. Druart, G. Cauffet. Diagnosis of PEM Fuel Cell Stack Based on Magnetic Fields Measurements. 19th IFAC World Congress, 24-29 août, 2014, Cape Town, South Africa, pp. 11482-11487.

Hamaz T., C. Cadet, F. Druart, G. Cauffet. Diagnosis of PEM fuel cell stack based on magnetic fields measurements. International Discussion on Hydrogen Energy and Applications (IDHEA) – May 12th-14th 2014 – Nantes, France (papier n° 152)

Hamaz T., C. Cadet, F. Druart, G. Cauffet. Failure detection in PEM fuel cells for diagnosis. Récents Progrès en Génie des Procédés. SFGP 2013, Numéro 104 – 2013 ISSN: 1775-335X ; ISBN: 978-2-910239-78-7, Ed. SFGP, Paris, France

Hamaz T., Cadet C., Druart F., Cauffet G., Le-Ny M., Exploitation de la mesure des champs magnétiques pour le diagnostic des PEMFC, GdR PACS-ACTHYF, France (2013)

Hamaz T., C. Cadet, F. Druart, G. Cauffet, M. Le-Ny. Interest of magnetic field to detect defaults on PEMFC", proceedings of 5th international conference Fundamentals & Development of Fuel Cells, FDFC 2013, April 16th-18th, 2013, Karlsruhe, Germany

Hamaz T., C. Cadet, F. Druart, (2012), "Détection de dysfonctionnements d'une pile à combustible PEMFC à partir de sauts de courant", Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2012, Grenoble le 4-6 Juillet 2012, pp. 715-720

II. Pile à combustible de type PEM et diagnostic

1. Introduction

Les piles à combustible (PAC) sont des convertisseurs d'énergie chimique en énergie électrique et en chaleur. Il en existe plusieurs types classés selon la nature de l'électrolyte et/ou la température de fonctionnement. Parmi les différents types de pile à combustible, on trouve les piles à combustibles à membrane échangeuse de protons, appelée PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell ou Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sur lesquelles nous travaillerons.

Afin d'établir le contexte de ce travail, ce chapitre présente les éléments nécessaires à notre étude. Les deux premiers paragraphes permettent de comprendre le fonctionnement de la pile à combustible et des sous-systèmes (les auxiliaires) qui la font fonctionner ainsi que leurs interactions. Les deux paragraphes suivants posent les problématiques des piles à combustible de type PEM. Pour cela, nous donnerons les différentes dégradations qui peuvent survenir au cours de la vie d'une pile à combustible ainsi que leurs origines et leurs impacts sur les performances et la durabilité des piles à combustible. Le paragraphe suivant présente différents moyens d'observation lors du fonctionnement du système, soit à travers des capteurs, soit par une caractérisation des phénomènes au moyen de tests à réaliser sur la pile à combustible.

Les dernières parties abordent les aspects de diagnostic. Nous présentons une brève revue bibliographique sur les différentes approches de diagnostic et de surveillance des systèmes industriels. Ensuite, nous donnerons les principales méthodes de diagnostic appliquées au diagnostic des piles à combustible de type PEM.

2. Description et fonctionnement d'une pile à combustible

2.1. Principe d'une pile à combustible de type PEM

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique d'énergie qui permet de transformer directement l'énergie chimique contenue dans un combustible et un oxydant en électricité et en chaleur. Une pile à combustible est constituée de deux électrodes et d'un électrolyte. La nature des électrodes, des catalyseurs et de l'électrolyte définissent le type de pile à combustible. Les électrodes d'une PEMFC sont chargées en platine. L'Assemblage Membrane-Electrode (AME) constitue le cœur de pile.

Tous les types de piles à combustible fonctionnent sur le même principe de base. A l'anode, un combustible est oxydé, et à la cathode, l'oxygène est réduit. Le principe de fonctionnement d'une PEMFC est illustré dans la figure II.1. Les gaz sont acheminés par les canaux d'alimentation jusqu'à la surface de l'électrode. Ensuite ils diffusent à travers la couche de diffusion de l'électrode (GDL : Gaz Diffusion Layer). Enfin, ils réagissent au niveau de la couche active (CA : couche active) contenant le catalyseur (ici, du platine), l'électrode est alors dite volumique.

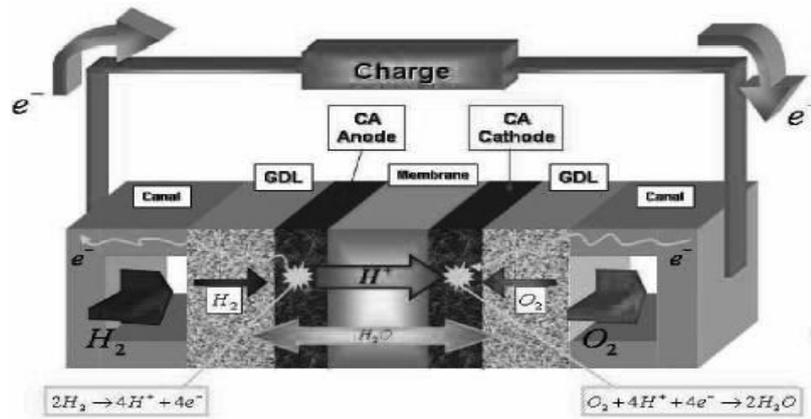


Figure II-1 : Principaux composants d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible et principe de fonctionnement [Le Ny, thèse 2012].

A l'anode a lieu la réaction d'oxydation de l'hydrogène, l'atome d'hydrogène est décomposé en protons positifs et électrons négatifs.

Réaction à l'anode :

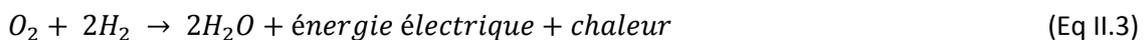


A la cathode a lieu la réaction de réduction de l'oxygène :



L'électrolyte (ici une membrane polymère) permet le transport des protons de l'anode vers la cathode. Les électrons, quant à eux, se déplacent à travers le circuit externe, produisant ainsi la puissance électrique utile.

En combinant les équations (Eq II.1) et (Eq II.2), on trouve la réaction électrochimique globale se produisant dans l'ensemble de la PEMFC :



L'eau est un sous-produit de la réaction. La gestion de l'eau dans la membrane est critique pour l'obtention de bonnes performances : la pile à combustible doit fonctionner dans des conditions où la vitesse d'évaporation et d'évacuation du sous-produit (eau) est plus lente que sa vitesse de production afin de maintenir la membrane hydratée.

2.2. La cellule élémentaire (Le cœur de la pile)

2.2.1. La membrane (électrolyte)

La membrane à polymère électrolyte de la pile à combustible (PEMFC) joue un rôle crucial dans le fonctionnement de la pile à combustible. Elle est d'une épaisseur de l'ordre d'une dizaine de

micromètres (de 20 à 200 μm en règle générale). Elle doit posséder les propriétés physiques et chimiques particulières qui font d'elle un conducteur de protons entre l'anode et la cathode et une barrière efficace entre les deux gaz réactifs (le combustible hydrogène et le comburant oxygène). La membrane doit donc posséder des propriétés telles qu'une bonne conduction protonique, une bonne stabilité physique et chimique, une bonne résistance mécanique et une très faible perméabilité au gaz. Les membranes commerciales sont réalisées en Nafion. Le comportement de la membrane Nafion est fortement lié à la température et à sa teneur en eau. Une faible teneur en eau diminue la conductivité ionique de la membrane et augmente sa perméabilité au gaz, ce qui entraîne des pertes considérables en performance. D'autre part, des teneurs en eau trop élevées peuvent provoquer des tensions mécaniques à cause du gonflement de la membrane.

2.2.2. Les électrodes

Les électrodes sont constituées d'un support poreux, conducteur électronique (tissu, feutre de carbone) et d'un catalyseur (généralement à base de métaux précieux). Elles sont constituées de deux couches : les couches de diffusion et les couches actives. Pour la PEMFC, le catalyseur est le platine qui est sous forme de particules très fines réparties dans la couche active.

Les couches actives sont le lieu de la réaction électrochimique. La couche active correspond à la zone où s'effectue le contact entre gaz réactif, proton, électrons et catalyseurs, on parle de point triple. Dans cette couche a lieu le couplage entre les phénomènes électriques, chimiques et le transport de matière.

Les couches de diffusion ont pour rôle d'approvisionner la couche active en gaz réactif et d'évacuer l'eau présente. Elles assurent la distribution des fluides entre les canaux d'alimentation et la couche active. Les couches de diffusion doivent assurer un approvisionnement en réactif le plus uniforme possible sur la surface de l'électrode afin d'éviter les points chauds dus au caractère exothermique de la réaction électrochimique ou des zones d'appauvrissements en gaz réactif. La couche de diffusion assure une bonne évacuation de l'eau produite par la réaction grâce au caractère hydrophobe du PTFE (Polytétrafluoroéthylène) ou Téflon.

2.3. Le stack (Empilement de cellules)

Une cellule unitaire fournit une tension limitée entre 0.4 et 1.1 V. Pour obtenir une puissance suffisante, il est indispensable d'associer plusieurs cellules unitaires en série pour créer un assemblage (stack) (Figure II-2). En général, toutes les cellules sont empilées et connectées électriquement en série et fluidiquement en parallèle. Des composants supplémentaires tels que les plaques bipolaires et des éléments d'assemblage sont nécessaires. Les plaques bipolaires ont plusieurs fonctions :

- l'alimentation en continu en gaz réactifs de façon homogène sur l'ensemble de toute la surface des couches de diffusion à travers des canaux gravés sur l'une des surfaces de la plaque et assurant l'étanchéité des compartiments.
- l'évacuation de l'eau produite.
- le transfert des électrons entre les cellules en assurant le contact électrique entre les AME (Assemblage Membrane Electrode).

- le refroidissement de la pile à combustible en permettant la circulation de fluides caloporteurs au sein de la pile et conditionnant la bonne régulation thermique de l'assemblage.

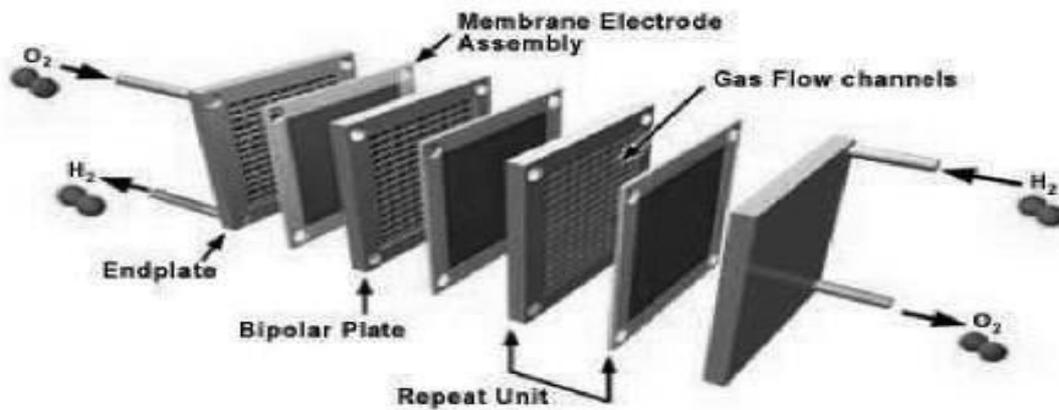


Figure II-2 Composition d'un stack [Le Ny, thèse 2012]

Les différents composants d'assemblage d'un empilement de cellules sont donnés dans la Figure II-3. Les plaques collectrices de courant servent à collecter le courant aux extrémités de la pile. Les autres éléments (joints, tirants, plaques de serrage...) sont essentiels car ils assurent la tenue mécanique et l'étanchéité de la pile.

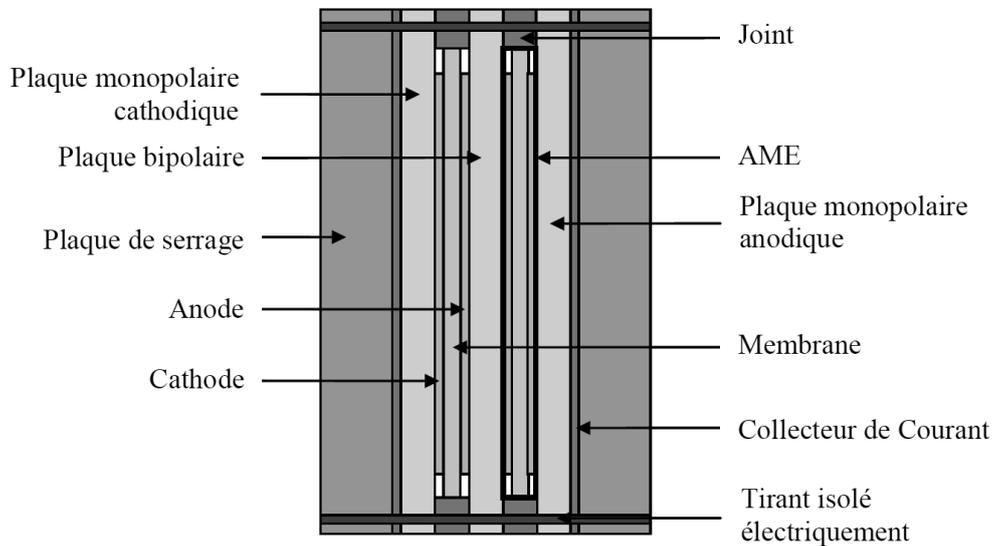


Figure II-3 Assemblage d'une pile à combustible [Tant, thèse 2013]

La situation idéale serait que les cellules d'un stack fonctionnent de manière homogène, indépendamment les unes des autres et qu'elles aient un comportement similaire à celui qu'elles auraient si elles n'étaient pas intégrées dans un stack. Pour cela, il faut maîtriser la distribution des gaz sur chacune des cellules et l'évacuation efficace de la chaleur produite. De nombreux tests réalisés sur des stacks montrent qu'il est difficile d'obtenir une telle homogénéité [Miller & Bazylak,

2011]. Ce comportement hétérogène au sein du stack peut affecter les performances et la durabilité de la PAC [Schmittinger & Vahidi, 2008].

3. Description d'un système pile à combustible

3.1. Les sous systèmes

Un système pile à combustible se compose de la pile elle-même (le stack) et d'organes auxiliaires destinés à la faire fonctionner. Le système pile à combustible peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes assurant des fonctions de base (Figure II-4) : écoulement des gaz (approvisionnement et de conditionnement des réactifs), température de la pile (évacuation de la chaleur), humidification des gaz et charge (conversion et exploitation de l'énergie) [Varigonada & Kamet, 2006]. Les sorties de ces sous-systèmes sont les entrées de la pile à combustible qui produit elle-même une tension de sortie V . La Figure II-4 permet de mettre en évidence les interactions entre la pile et les organes auxiliaires. Les conditions opératoires (indice ref) sont mises en évidence. Les températures ayant l'indice dp sont les températures de rosée.

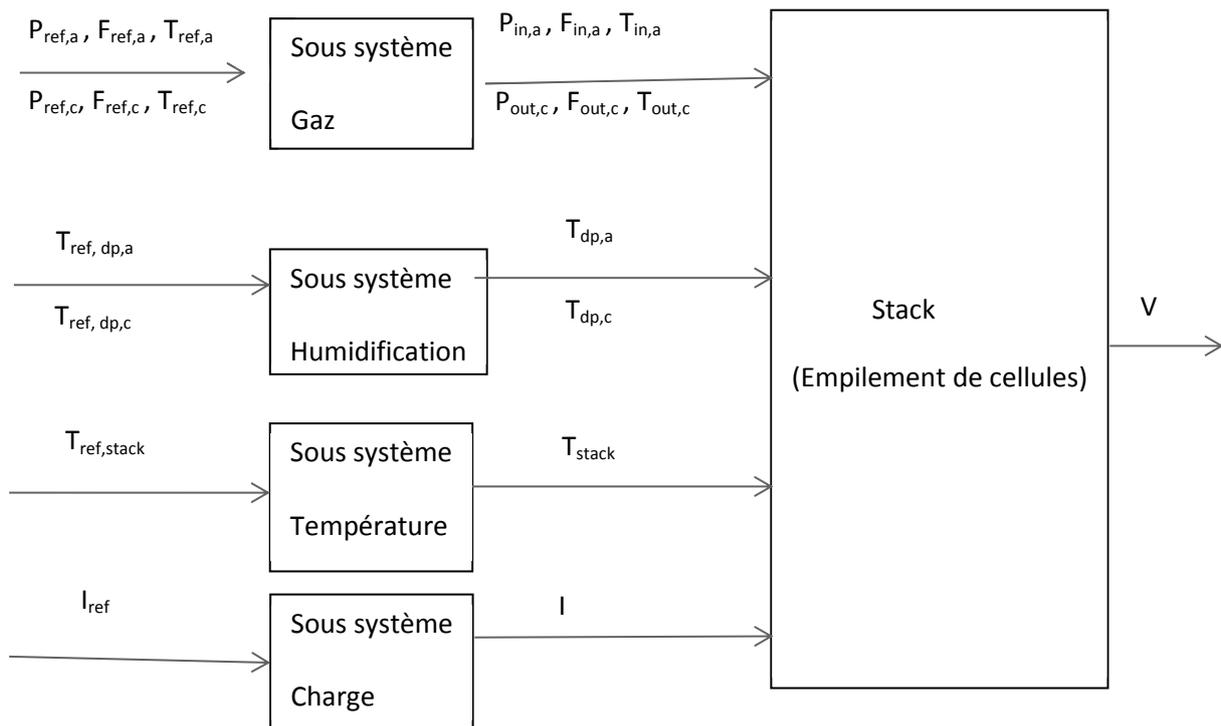


Figure II-4 : Le diagramme d'un système pile à combustible d'après [Niroumand et al., 2011]

3.2. Les conditions opératoires

3.2.1. La pression

La pression de fonctionnement est déterminée par les propriétés mécaniques de la cellule, ainsi que par les sources utilisées en hydrogène et en oxygène / air. Le sous-système d'écoulement des gaz contrôle la pression de sortie à l'anode $P_{out,a}$ et à la cathode $P_{out,c}$.

3.2.2. La température du stack

Le sous-système de la température commande la température du stack. Le point de fonctionnement du stack est généralement déterminé par la température de fonctionnement optimale de la membrane utilisée. La température du stack est limitée par la nature de la membrane (Nafion), la gamme de température et le type de régulation à eau ou à air. La température des gaz réactifs à l'anode et à la cathode est maintenue proche de la température de la pile de sorte à éviter une accumulation de l'eau et à avoir une cinétique optimale au niveau des électrodes.

3.2.3. Les débits des gaz

Les valeurs de référence pour les débits d'écoulement dépendent de la densité de courant de la pile à combustible et d'un facteur de sur-stœchiométrie. La sur-stœchiométrie en temps réel peut être calculée en utilisant les relations suivantes :

$$\lambda_a = \frac{F_{in,a}}{F_{utilisé,a}} \quad \lambda_c = \frac{F_{in,c}}{F_{utilisé,c}} \quad \lambda_c = \frac{F_{in,c}}{F_{utilisé,c}} \quad \text{avec} \quad F_{utilisé,a \text{ ou } c} = \frac{M}{nF} I \quad (\text{Eq II.4})$$

avec M la masse molaire (H_2 ou air) , n le nombre d'électron échangé, F la constante de Faraday.

$F_{in,c}$ étant le débit d'entrée à la cathode, $F_{in,a}$ étant le débit d'entrée à l'anode, débits mesurés à l'aide d'un débitmètre. $F_{utilisé,c}$ et $F_{utilisé,a}$ sont les débits de l'air et d'hydrogène consommés respectivement. Ils sont calculés à partir du courant I de la pile à combustible (I en ampères), en utilisant la relation suivante [Larminie & Dicks, 2000] :

$$F_{utilisé,a} = 1.0510^{-8} I \quad (kg / s) \quad F_{utilisé,c} = 3.57 \times 10^{-7} I \quad (kg / s) \quad (\text{Eq II.5})$$

3.2.4. Humidité relative des gaz

Le sous-système d'humidification est essentiellement chargé de contrôler la température du point de rosée de l'anode et de la cathode. L'humidification des écoulements de gaz à l'anode et à la cathode aide à bien humidifier la membrane, améliorant ainsi sa conductivité protonique. Une faible température de point de rosée peut entraîner un assèchement de la membrane, tandis qu'une température de point de rosée supérieure à la température du stack pourrait provoquer une condensation de l'eau et un noyage au niveau des électrodes et des canaux d'alimentation.

3.2.5. Courant

La pile à combustible délivre une puissance, elle peut être pilotée en mode galvano-statique ou potentio-statique. Dans la majorité des cas, le mode galvano-statique est choisi : le courant est imposé à la pile à combustible, la tension obtenue dépend alors du point de fonctionnement, des

conditions opératoires et de l'état interne de la pile. Dans la majorité des applications industrielles, c'est un convertisseur (hacheur élévateur) qui régule le courant délivré par la pile à un courant de référence désiré.

4. Performances et durabilité

Ce paragraphe présente succinctement les différentes manières d'évaluer les performances de la pile, ainsi que les différents paramètres influant la durabilité des PAC de type PEM.

4.1. Performances

4.1.1. Courbe de polarisation

La performance électrique d'une pile à combustible peut s'observer à travers une courbe de polarisation (tension = f (courant)). La tension d'une cellule réelle ($V_{cellule}$) est toujours inférieure à la tension thermodynamique réversible (V_{rev}) en raison des pertes de tension irréversibles, qui sont connues comme les surtensions de la cellule. La relation entre la tension de la cellule, la tension réversible de la cellule et les surtensions (pertes) de la cellule peut être exprimée comme suit :

$$V_{cellule} = V_{rev} - \eta_{cellule} \quad (\text{Eq II.6})$$

Où

$$\eta_{cellule} = \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (\text{Eq II.7})$$

η_{act} , η_{ohm} et η_{conc} représentent respectivement les pertes par activation, les pertes ohmiques et les pertes diffusives.

La tension de la cellule diminue lorsque le courant de charge augmente à causes de ces pertes (Figure II-5). Il est important de noter que cette courbe de polarisation dépend des conditions opératoires imposées à la pile à combustible.

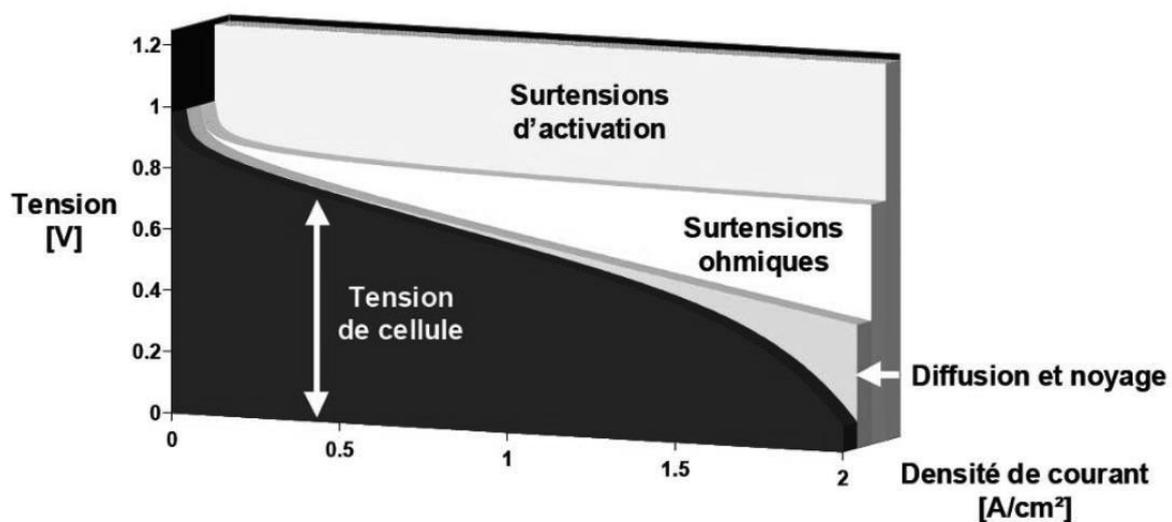


Figure II-5 Allure d'une courbe de polarisation et détails des différentes pertes de tension [Candusso, Thèse 2002]

4.1.2. Homogénéité des tensions d'une pile

L'un des paramètres permettant de vérifier les performances d'une pile à combustible est l'observation de l'homogénéité des tensions de cellules. L'homogénéité des tensions des cellules est synonyme de l'homogénéité de la distribution en fluides réactifs et en liquide caloporteur, de l'absence de perforations importantes des AME (Assemblage Membrane Electrode), de noyage ou d'assèchement de cellules et une bonne répartition des efforts dans l'empilement des cellules [Antoni et al., 2007].

4.1.3. Homogénéité de la distribution de courant

Les performances de la pile sont influencées par la distribution de la densité de courant. Lorsque les gaz sont uniformément distribués sur les surfaces des électrodes, la distribution du courant est homogène. Cependant, lorsque la distribution des gaz réactifs n'est pas homogène, des pertes dans les zones à faibles concentrations sont constatées. De ce fait, le courant circulera dans les zones où la pression partielle des gaz réactifs est la plus élevée, générant ainsi une distribution de courant hétérogène. Par conséquent, les performances globales de la pile à combustible se dégradent. Le défi majeur est de réussir à distribuer de manière homogène les réactifs tout en maîtrisant le contenu en eau du stack. Il est souhaitable de faire fonctionner la PEMFC à distribution de densité de courant locale uniforme sur la surface de l'ensemble d'électrode-membrane (AME).

4.2. Durabilité

Dans [Schmittinger & Vahidi, 2008], les auteurs ont donné un aperçu des différents paramètres impactant les performances et la durabilité des PEMFC à savoir la gestion de l'eau, la dégradation des éléments d'une pile à combustible (couche actives, couches de diffusion) en terme de corrosion et dégradation chimique et mécanique, contamination de la pile, appauvrissement en gaz (impacte la durabilité) et la gestion thermique. Ils constatent qu'il est difficile de quantifier la durabilité du fait de la multitude des composants et de l'interaction qui existe entre ces derniers. Toutefois, ils remarquent que la corrosion des électrodes et les changements dans la structure chimique de la membrane sont les plus importantes sources de problème durant le fonctionnement, et que la dégradation des autres composants détériore les performances mais joue un faible rôle dans les défaillances brusques.

5. Dégradations dans une pile à combustible de type PEM

Lorsqu'un défaut se manifeste sur une pile à combustible, les performances de la pile à combustible se détériorent. Ce qui se traduit par un changement dans la courbe de polarisation (Figure II-5). En d'autres termes, à courant constant, la pile à combustible voit sa tension diminuer.

Il y a différentes manières de classer les défauts qui peuvent survenir au niveau du stack. Comme la pile fait intervenir plusieurs phénomènes multi-physiques, on peut se baser sur la nature physique des phénomènes à l'origine de défauts : origines mécanique, thermique, ou électrochimique ... Les défauts peuvent aussi être classés par leurs degrés de gravité. Les dégradations réversibles des performances mettent en cause la stabilité des performances et généralement une modification adéquate des conditions opératoires s'avère suffisante pour retrouver les performances électriques initiales. D'autres dégradations causent une baisse irréversible des performances. La dégradation irréversible la plus grave signifie une impossibilité de fonctionner pour la pile.

Une autre façon de voir les choses est celle qui a été adoptée par [Wasterlain, thèse 2010] et qui consiste à considérer chacun des composants de la PAC : plaques bipolaires, joints d'étanchéité, couches de diffusion, couches actives et membrane etc...

Les défauts qui surviennent au niveau de la pile peuvent aussi être attribués soit à un vieillissement naturel des composants du stack, soit à un mauvais contrôle du système PAC. Des défauts dans le stack peuvent avoir un lien direct avec des conditions opératoires qui ne sont pas bien adaptées comme par exemple une humidité relative des gaz ou des débits des gaz trop forts, ou encore une température de fonctionnement de la pile trop élevée.

Ce paragraphe présente les causes des dégradations physiques qui sont principalement dues à une mauvaise gestion de la pile.

5.1. Dégradations liées à la gestion de l'eau

La gestion de l'eau constitue un élément essentiel au bon fonctionnement d'un stack. La production d'eau est principalement reliée au courant débité par la pile. L'eau est produite à la cathode mais en raison d'un gradient de concentration, celle-ci diffuse à travers la membrane pour atteindre l'anode. Un flux inverse (électro-osmose) est aussi présent : le courant de protons dans la membrane entraîne avec lui un flux d'eau depuis l'anode vers la cathode. Certaines conditions opératoires appliquées à la pile à combustible peuvent donner lieu à deux types de défauts antagonistes : les noyages et les assèchements.

5.1.1. Noyage

Une accumulation d'eau liquide au sein d'une PEMFC peut provoquer un noyage, ce qui entraîne une perte importante du rendement de la cellule. L'eau peut s'accumuler soit au niveau des canaux d'alimentation, ce qui provoque des problèmes d'écoulements et une augmentation des pertes de charges liées au bouchon d'eau, soit au niveau des électrodes (couche active et couche de diffusion), ce qui limite l'accessibilité des gaz. Cela induit une limitation du transfert de matière qui provoque une chute de la tension. La Figure II-6 présente l'évolution des performances globales : les courbes de polarisation avec divers degrés de noyage sont comparées à une courbe de polarisation qui est à l'abri d'un noyage. La performance électrique des cellules touchées par le noyage devient beaucoup plus faible à des densités de courant plus élevées où la production d'eau interne est plus grande. Au niveau des performances locales, la répartition de la distribution de courant sera modifiée du fait que la répartition de l'eau à l'intérieur de la pile se trouve modifiée par le noyage.

Différents moyens de corrections sont possibles :

- augmentation des débits des gaz,
- diminution du courant demandé à la pile quand l'application le permet,
- diminution de l'hygrométrie des gaz en entrée de pile.

Une purge de la pile à combustible est nécessaire lorsque celle-ci est fortement noyée. Cependant, il est difficile de purger un stack dans lequel le nombre de cellules noyées est faible.

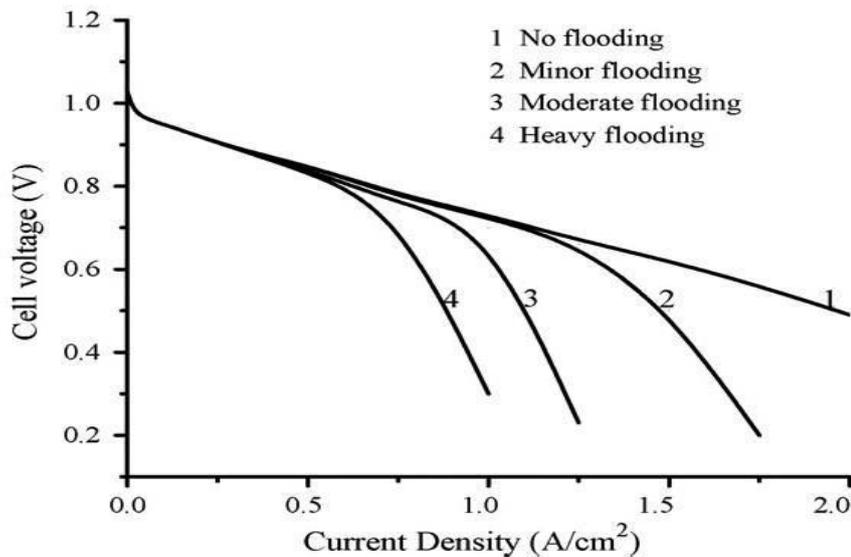


Figure II-6 : Courbes de polarisation d'une pile à combustible PEM qui illustre l'effet du noyage sur les performances : (1): pas de noyage ; (2-4) : évolution du noyage [Li et al., 2008]

5.1.2. Assèchement

La présence d'eau est nécessaire pour que la réaction électrochimique de conduction des protons dans la membrane ait lieu. Un assèchement se produit lorsque l'hydratation des membranes devient insuffisante pour assurer une bonne conductivité ionique. Elle s'accompagne d'une très forte augmentation des pertes ohmique et cinétiques [Stumper et al., 2005] et donc d'une diminution des tensions aux bornes des cellules. La déshydratation de la membrane est plus susceptible de se produire du côté anode de la membrane.

Les conditions d'assèchement sont très sévères pour la pile et peuvent provoquer des dégradations irréversibles pour la membrane en quelques centaines de secondes.

Afin de réhydrater la membrane, les actions possibles sont :

- diminution des débits des gaz,
- augmentation du courant demandé à la pile si l'application le permet,
- augmentation de l'hygrométrie des gaz en entrée de pile.

5.2. Dégradations liées à une mauvaise gestion des débits, des pressions, des températures et de l'humidité relative des gaz

Les défauts qui apparaissent au niveau du stack ont souvent un lien direct avec la gestion des systèmes placés autour de la pile et qui ont pour rôle de fournir des conditions opératoires nécessaires au bon fonctionnement de la pile.

5.2.1. Alimentation en gaz

Les débits des gaz réactifs doivent être réajustés pour fournir la quantité de réactifs anode /cathode nécessaires pour débiter le courant demandé par la charge. Dans le cas où ces quantités ne sont pas

suffisantes, pour une raison ou une autre, la pile se retrouve dans un état d'appauvrissement en réactifs qu'on appelle aussi sous stœchiométrie. Cet état est dangereux pour la pile et peut lui causer des dégradations irréversibles. Il a été démontré que l'appauvrissement en réactifs coté anode est beaucoup plus nocif pour la pile à combustible qu'un appauvrissement coté cathode [Taniguchi et al., 2008].

Si les réactifs sont fournis en quantité suffisante pour débiter le courant demandé par la charge et sont répartis de façon uniformément distribuée sur toute la surface des électrodes, la distribution du courant résultante sera homogène. Dans le cas où la distribution des gaz est hétérogène, le courant circulera plus dans les zones à fortes concentrations en réactifs, ce qui aura pour conséquence une distribution de courant hétérogène. En outre, de faibles débits pour les réactifs peuvent provoquer un noyage de la pile et à l'opposé de forts débits peuvent provoquer un assèchement de la PAC, un équilibre très délicat doit être trouvé en fonction de l'état hydrique du stack.

5.2.2. Pression des gaz

Les membranes sont des dispositifs fragiles (épaisseur de l'ordre 25 – 100 μm), un fort gradient de pression entre l'anode et la cathode peut endommager la membrane.

5.2.3. Température de la pile

La température est une condition opératoire déterminante pour les performances de la pile. Le comportement de la membrane Nafion est fortement lié à la température et à sa teneur en eau. La température constitue un paramètre très critique à surveiller : une température trop élevée peut provoquer un assèchement et /ou dégradation de la membrane, tandis qu'une température basse favorise la formation d'eau liquide à l'intérieur de la pile.

5.2.4. Humidité relative

Une baisse de la valeur de l'humidité relative des réactifs en amont de la pile multiplie la valeur de la résistance de la membrane par un facteur de plusieurs centaines, occasionnant ainsi une forte diminution des performances de la pile. D'un autre côté, une forte humidité relative peut provoquer un noyage de la pile.

5.3. Contamination par les réactifs

Les membranes et les couches actives peuvent être affectées par des contaminants tels que le monoxyde et le dioxyde de carbone, le soufre, et le NH_3 . Cela conduit à la diminution des surfaces actives dans les assemblages membrane – électrodes.

5.4. Vieillessement naturel

Une pile à combustible fonctionnant avec des conditions opératoires nominales et stables sera affectée par un processus de vieillissement naturel des composants qui la constituent à savoir les membranes, les électrodes, les couches de diffusion, les plaques bipolaires et les joints d'étanchéité. Cela aura pour effet une diminution des performances de la pile : diminution des propriétés liées aux transports des réactifs, diminution des propriétés électriques des matériaux, diminution de l'activité

catalytique ainsi que l'apparition des phénomènes d'inétanchéité entre les différents compartiments du stack.

6. Mesures et tests sur les piles à combustibles pour le diagnostic

Le diagnostic d'une PAC s'appuie sur un système de mesure permettant d'obtenir des informations sur le fonctionnement de ce système. En général, ces mesures sont utilisées par le système contrôle-commande pour son contrôle ou pour un suivi dans le cadre d'une supervision.

Lorsque les signaux disponibles, c'est-à-dire ceux généralement utilisés par le système de contrôle-commande, ne permettent pas d'extraire suffisamment de connaissance ou dans le but d'approfondir et renforcer le diagnostic, des signaux d'excitation ou des phases de tests sont imposés à la pile pour permettre d'extraire des informations à travers sa réponse. En général, cela nécessite une instrumentation spécifique dédiée.

Nous répertorions ici non seulement les mesures possibles, mais également les tests permettant de mettre en évidence certaines dégradations.

6.1. Mesures

6.1.1. Mesures possibles

La Figure II-7 présente l'ensemble des mesures qu'il est possible de réaliser sur un système PAC. Elle fait apparaître les spécificités des différentes grandeurs : mesurables ou non et celles des mesures associées : invasives ou non. On distingue aussi les mesures utilisées ou non par les systèmes de contrôle. Durant le fonctionnement de la pile à combustible, plusieurs grandeurs facilement accessibles peuvent être mesurées - telles que : la tension du stack et celles des cellules élémentaires, le courant, les pressions des gaz et les pertes de charge (différence entre la pression à l'entrée et à la sortie de la pile à combustible), les débits des gaz, les humidités relatives des gaz, la température de la pile ainsi que celles des différents gaz.

Des signaux de natures physiques différentes peuvent aussi être prélevés sur la pile à combustible de manière non-invasive. Citons par exemple l'émission acoustique dont le principe est le suivant : lorsque des matériaux se transforment, ils émettent spontanément de l'énergie sous forme d'une onde élastique. L'onde élastique peut alors être mesurée par un capteur piézoélectrique dont la particularité est de transformer une ondulation mécanique en ondulation électrique. Ces ondes sont appelées « événements d'émission acoustique » ou plus simplement « émission acoustique » (EA) [Tant, thèse 2013]. Une autre mesure non-invasive est celle de la distribution de l'eau à l'intérieur de la pile à l'aide de l'imagerie par neutrons [Park et al., 2008]. Toutes ces mesures constituent des pistes de recherche pour leur utilisation en diagnostic.

D'autre part des mesures invasives ont été aussi développées pour atteindre des grandeurs difficilement accessibles du fait de leurs natures locales (distribuées sur la surface de la cellule) : distributions spatiales du courant, de la température et de l'eau. Dans [Chikahissa et al., 2009], les auteurs ont inséré une carte de mesure directe de la distribution de courant dans la cellule et ont montré qu'il y avait de bonnes corrélations entre les distributions de densité de courant, la distribution de la température et la distribution de l'eau à l'intérieur de la pile. La mesure de ces

grandeurs physiques, et plus particulièrement de la distribution de densité de courant, qui permet d'évaluer les performances locales, a été utilisée pour évaluer l'état de fonctionnement d'une pile à combustible.

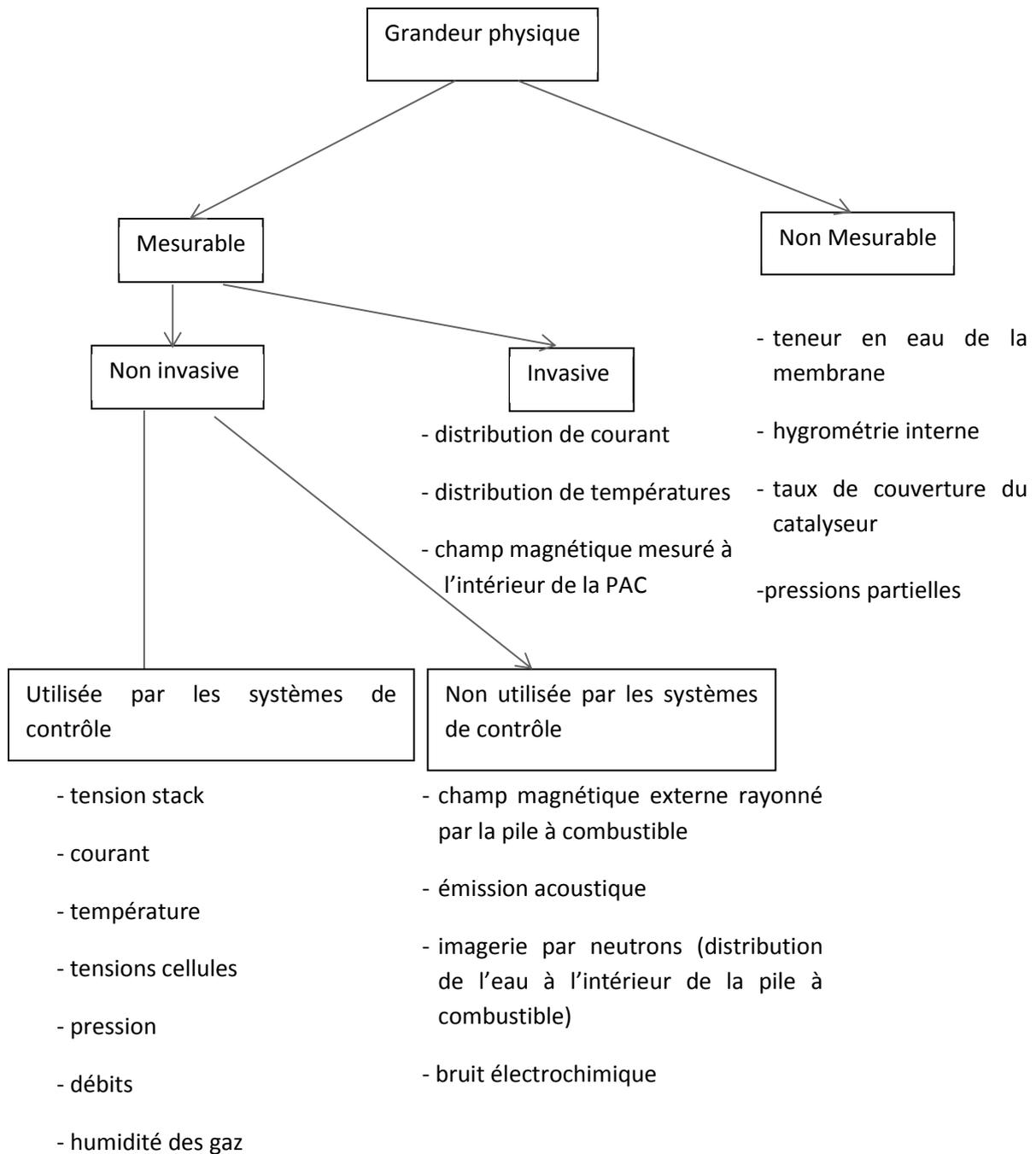


Figure II-7: Mesures sur un système pile à combustible

6.1.2. Mesure invasive de la distribution de la densité de courant

De nombreux travaux se sont intéressés à la mesure directe de la densité de courant à l'intérieur d'une pile. Parmi ces travaux, nous pouvons par exemple citer les références [Stumper et al., 1998], [Freunberger et al., 2006], [Schulze et al., 2007] et [Maranzana et al., 2010]. Nous pouvons citer un exemple d'outil, la carte S++ qui est une plaque invasive de mesure de densité de courant qui peut être insérée entre deux plaques bipolaires d'un stack afin d'obtenir une cartographie de la densité de courant dans une section de la pile à combustible. Les inconvénients d'un tel système de mesure est sa sensibilité aux variations de température et les contraintes mécaniques exercées par la plaque invasive sur les éléments de la pile à combustible. Ce type de mesure perturbe le fonctionnement de la pile à combustible et son influence sur la pile n'est pas maîtrisée. Une autre technique, basée sur la mesure directe du champ magnétique à l'intérieur de la pile a été testée [Candusso, thèse 2002].

6.1.3. Mesure non invasive (mesure indirecte) de la densité de courant par mesure du champ magnétique

Une manière non invasive d'obtenir la densité de courant est de mesurer le champ magnétique externe rayonné par la pile à combustible. La relation physique donnant le courant à partir du champ magnétique étant relativement bien connue (loi de Biot et Savart), il doit donc être possible à partir des mesures magnétiques de remonter à la densité de courant l'ayant générée. Des modèles magnétiques inverses estimant les densités de courant à partir des champs magnétiques mesurés à proximité de la pile ont été réalisés. Cependant, on obtient une matrice mal conditionnée (le rapport entre la plus grande valeur singulière et la plus faible valeur singulière étant élevé) [Le Ny, thèse 2012]. De ce fait, si les données de champ magnétique ne sont pas exactes (présence de bruits de mesure dans la pratique), l'inversion de la matrice donne des résultats aberrants. Ces méthodes passent donc par une régularisation de cette matrice pour l'obtention de bons résultats de reconstruction.

Parmi les travaux qui ont été réalisés dans la littérature, nous citons les travaux de [Hauer et al., 2005]. Ils utilisent un système expérimental qui consiste à scanner le champ magnétique à l'aide d'un robot déplaçant deux magnétomètres autour de la pile. Le scan de la signature magnétique dure environ quinze minutes. Malheureusement l'état de la pile peut évoluer pendant cette période. Pour remédier à cette contrainte de temps d'acquisition, M. Le Ny [Le Ny, thèse 2012] a fait le choix de caractériser la signature magnétique en utilisant un nombre de mesures beaucoup plus faible en réalisant des mesures simultanées sur un seul contour autour de la pile (milieu du stack). De plus, une orientation spécifique des capteurs a été utilisée. Des capteurs mono-axes ont été orientés de manière à ce qu'ils soient insensibles au champ magnétique généré par une distribution de courant uniforme. Il devient ainsi possible d'utiliser des capteurs de précision plus élevée ayant une gamme de mesure de 200 μT au lieu de 800 μT . Pour rendre le système insensible à la distribution de courant homogène, un modèle magnétique direct donnant le champ magnétique en fonction de la distribution de courant est utilisé pour calculer numériquement le champ magnétique généré par une distribution de courant homogène. Les orientations sont ensuite choisies de manière à ce que celles-ci soient perpendiculaires au champ magnétique calculé. Nous pouvons dire qu'en quelque sorte un "capteur de densité de courant hétérogène" a été conçu.

6.2. Tests de caractérisation

Il existe beaucoup de méthodes de caractérisation de l'état de la pile à combustible pour des fins de diagnostic. Ce sont des méthodes actives utilisant des signaux d'excitation. Parmi ces tests, citons la réponse en tension pour une excitation en température [Fouquet et al., 2006], et la mesure de la résistance haute fréquence par milliohmètre ou à l'aide d'ondulations hautes fréquences du convertisseur DC-DC (sous-système charge) permettant de déterminer la résistance de la membrane [Sankir, 2007]. Toutefois, la spectroscopie d'impédance électrochimique et l'interruption de courant restent les plus utilisées.

6.2.1. Spectroscopie d'impédance électrochimique

La Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) est une méthode d'analyse électrochimique qui est largement utilisée pour caractériser les piles à combustible de type PEM [Sailler, thèse 2007], [Latham, 2001]. C'est une technique capable de discerner plusieurs processus physico-chimiques à condition que leurs constantes de temps soient distinctes. La SIE consiste à imposer un courant de polarisation (statique) et à ajouter une composante sinusoïdale. L'amplitude de la composante sinusoïdale doit être relativement faible par rapport à la valeur continue pour rester dans la zone de linéarité. Selon le principe de superposition, la réponse en tension aura une composante continue et une autre sinusoïdale. L'impédance de la pile est définie comme étant le rapport entre la composante sinusoïdale de la tension et la composante sinusoïdale en courant. Pour une bande de fréquence donnée, le tracé de la partie réelle de l'impédance en fonction de sa partie réelle, permet de construire le spectre d'impédance (Tracé de Nyquist).

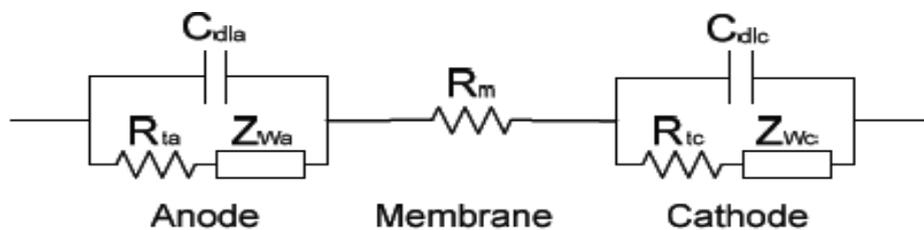


Figure II-8 Schéma équivalent de la pile à combustible [Sailler, thèse 2007]

Il est possible de modéliser ces différents processus physico-chimiques à l'aide d'un circuit électrique ayant un comportement équivalent (Figure II-8). Dans cette représentation, chaque composant électrique représente un phénomène électrochimique. La membrane est représentée par une chute ohmique (R_m) due au transport des protons dans cette dernière. Les deux électrodes (cathode et anode) sont décrites comme l'association en parallèle d'une capacité de double couche (C_{dla} , C_{dlc}) et d'une impédance faradique qui est la somme d'une résistance de transfert de charge (R_{ta} , R_{tc}) et d'une impédance de Warburg (Z_{wa} , Z_{wc}). Le phénomène le plus difficile à modéliser est la diffusion des espèces gazeuses hydrogène et oxygène au niveau des électrodes. Elle est représentée par l'impédance de Warburg. Celle-ci peut s'exprimer sous la forme utilisant une tangente hyperbolique :

$$Z_{wk}(s) = Rd_k \frac{\tanh \sqrt{s \tau_k}}{\sqrt{s \tau_k}} \quad (\text{Eq II.8})$$

Tel que $k=a$ ou c , Rd_k la résistance de diffusion (Ω), τ_k la constante de diffusion.

6.2.2. Interruption du courant

Le test de l'interruption de courant consiste à faire un saut rapide de courant et à acquérir la réponse de la pile à combustible en tension. La constante de temps d'un élément purement résistif est théoriquement nulle. De ce fait, la variation instantanée de la tension permet d'isoler les surtensions liées aux pertes ohmiques des autres surtensions et donc de calculer la résistance de la membrane en connaissant la résistance de contact (les fils d'alimentation). Cette méthode peut aussi être utilisée pour identifier les paramètres électriques et électrochimiques d'un circuit électrique équivalent de la pile à combustible.

7. Les différentes approches du diagnostic

Les dégradations pouvant impacter les piles à combustibles ainsi que les différentes mesures et tests de caractérisation pouvant être effectués sont les éléments de base sur lesquels un outil de diagnostic peut être développé. Ce paragraphe passe en revue les méthodes de diagnostic les plus courantes.

7.1. Généralités et concepts

Le diagnostic d'un système permet d'identifier son mode de fonctionnement. Cela est effectué par une comparaison entre les données réelles et la connaissance sur les modes de fonctionnement du système. Après avoir détecté un mode défaillant, le système de diagnostic doit identifier les causes possibles de cette défaillance, et fournir les informations sur son instant d'apparition et son amplitude. Selon les instances nationales et internationales (AFNOR, CEI) :

« Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. »

Cette définition résume les deux tâches essentielles en diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique qui considère les observations et les connaissances sur le système.

Une stratégie de diagnostic doit apporter des réponses aux questions suivantes en ce qui concerne ses objectifs, ses principes de mises en œuvre et ses critères d'évaluation :

Objectifs : que veut-on surveiller ? Quels types de défauts doit-on détecter ? La première question que l'on se pose lorsque l'on conçoit un système de diagnostic, est de savoir ce que l'on veut détecter, c'est à dire de définir le type de dysfonctionnement que l'on veut diagnostiquer et donc les défauts susceptibles d'altérer le bon fonctionnement du système.

Principes : quel est le principe de diagnostic à mettre en œuvre ? Selon qu'il est possible ou non d'établir un modèle analytique, les méthodes seront différentes. D'autres méthodes se basent sur un

modèle traduisant un mauvais fonctionnement. Le modèle étant une représentation mathématique de situations types.

Critères : quelles performances de la méthode sont attendues ? Quels sont les indices d'évaluation de ces performances ?

Pour accomplir ces tâches, le diagnostic se réalise en quatre étapes principales :

- L'acquisition de données a pour objectif de fournir les informations sur le comportement du procédé. Elle consiste à collecter toutes les données issues des capteurs, ou bien des paramètres réels de ses composants.
- La détection (Fault detection) est l'opération qui permet de décider si le système est défaillant ou non. Les défauts sont détectés par classification des situations observables comme étant normales ou non.
- La localisation (Fault isolation) permet d'attribuer le défaut à un sous-système particulier : capteur, actionneur, organe de commande, processus.
- L'estimation ou identification (Fault evaluation) permet d'avoir des informations quantitatives sur le défaut telles que l'instant d'apparition ou son amplitude.

La détection de défauts est la tâche qui consiste à signaler la présence de défauts dans le système et leurs instants d'apparition. Cette tâche est suivie de la localisation de défauts (en anglais, isolation), qui a pour but de les classer en fonction de leur type et de leur emplacement dans le système. Enfin, l'identification (ou estimation) de défauts vise à caractériser leurs amplitudes et leurs évolutions temporelles. Le processus complet est classiquement désigné sous les acronymes FDI pour Fault Detection and Isolation ou FDD pour Fault Detection and Diagnosis (détection et diagnostic de défauts), ce dernier incluant l'identification. Ces procédures nécessitent la plupart du temps de générer des résidus, c'est-à-dire des indicateurs de la présence de défauts calculés à partir de l'écart entre les mesures relevées sur le système et le comportement prédit par un modèle. Ces signaux sont censés être de faible amplitude lorsque le système fonctionne normalement, et s'écarter suffisamment de leurs valeurs initiales pour être détectable en présence de défauts.

Une fois qu'un défaut a été détecté, il est intéressant de chercher à le compenser par une modification adéquate de la loi de commande. C'est ce que réalise la commande tolérante aux fautes (FTC for Fault Tolerant Control). La commande tolérante aux fautes est un domaine de recherche à part entière, qui ne sera pas abordé dans ce mémoire.

Nous donnons ici quelques définitions du vocabulaire utilisé dans ce manuscrit :

- Dégradation : modification d'une des caractéristiques physiques d'un composant amenant à une baisse des performances de l'une de ses fonctions. Dans le cas de la pile à combustible, elle se traduit par une baisse de la tension de la pile à courant constant.
- Défaut : tout écart entre la caractéristique observée sur le procédé et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. C'est une modification indésirable du système se traduisant par une dégradation des performances. Un défaut est détecté par un indicateur ou symptôme. Le défaut peut donner lieu à une défaillance.

- Défaillance : modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour qu'une fonction ne puisse plus être assurée dans les conditions prévues.

7.2. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic regroupent les méthodes permettant de générer des symptômes des défauts. Ils peuvent être déterminés soit en utilisant un modèle comportemental explicite (méthodes internes), soit à partir uniquement des signaux mesurés.

7.2.1. Les méthodes internes

Ce sont les approches basées sur un modèle mathématique du système, ce qui nécessite une connaissance considérable de ce dernier. Ces modèles peuvent être construits en se basant sur les relations de la physiques, on parle alors de modèles de connaissances. Ils peuvent également être construits en se basant sur des techniques d'identification et on parle de modèle de représentation. Ces modèles permettent de décrire les relations entre les entrées et les sorties d'un système pour représenter son comportement global. Les phénomènes sont donc décrits par des formulations mathématiques, comportementales (type boîte noire) ou semi-empiriques issues d'une simplification d'un modèle physique. Les paramètres de ces modèles n'ont généralement pas de sens physique. Une fois un modèle établi, il est nécessaire de le valider expérimentalement.

Le diagnostic consiste à utiliser le modèle comme une référence pour la détection de défauts. Il s'agit de comparer un certain nombre de valeurs issues du modèle avec celles mesurées sur le système réel. Tout écart entre les observations et les valeurs prédites par le modèle est interprété comme la présence d'un ou de plusieurs défauts.

Le diagnostic est réalisé en deux étapes :

La génération de résidus : un résidu ou un indicateur de défaut exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle. C'est sur la base de sa valeur que la décision de détection est prise. Un résidu nul implique un fonctionnement normal. En pratique, le résidu est conçu afin d'avoir une moyenne nulle dans un cas de bon fonctionnement, ses dispersions autour de zéro sont liées aux bruits. En revanche, lorsque le résidu s'éloigne de cette valeur moyenne nulle, il indique la présence d'un défaut (détection de défaut).

La prise de décision : cette phase intervient dès qu'un défaut a été détecté. Elle comprend les phases de localisation et d'identification. Cette étape nécessite une connaissance a priori sur les types de dysfonctionnements pouvant affecter le système. Pour évaluer ces résidus, une solution simple consiste à comparer le résidu par rapport à un seuil prédéfini qui prend en compte le niveau de bruit au niveau des capteurs.

Cependant, lorsqu'il n'est pas possible de décrire la dynamique d'un système à l'aide d'un modèle analytique du fait de sa complexité ou d'un manque de données quantitatives, des modèles qualitatifs peuvent être mis en œuvre. Une autre façon de construire un modèle est d'exprimer les connaissances que l'on a d'un système sous la forme d'un ensemble de règles qui sont souvent du type "SI prémisse ALORS conclusion". Il s'agit alors d'un système expert. Il est composé d'une base de connaissance qui regroupe ces règles et d'un moteur d'inférence qui permet de conclure.

L'inconvénient avec cette représentation de la connaissance est qu'elle ne permet pas une compréhension de la physique qu'il y a derrière le système, et les cas non prévus dans la base de connaissance ne peuvent être traités.

C'est dans cette catégorie qu'on trouve le raisonnement qualitatif, les graphes causaux, et les bases des règles.

Dans les paragraphes suivant, les méthodes quantitatives (redondance analytique, espace de parité, observateurs, estimation paramétrique) sont développés.

7.2.1.a. Redondance analytique et espace de parité

Afin de détecter et d'isoler les défauts d'un système, une certaine redondance de l'information est nécessaire. Cette redondance est utilisée dans le but d'établir les tests de consistance entre les variables couplées du système. Elle constitue un indicateur de bon et de mauvais fonctionnement. La redondance d'information est assurée par un modèle analytique du système. La redondance est relation extraite de la combinaison des équations du modèle dans le but de construire un résidu qui ne dépend que des mesures effectués sur le système. La génération de résidus robustes constitue d'ailleurs sans doute la principale difficulté relative à cette approche de diagnostic à base de modèles analytiques.

Les méthodes de diagnostic par espace de parité font partie des méthodes envisageables pour l'obtention de résidus à partir de modèles analytiques. Elles reposent sur la vérification d'une relation statique ou dynamique [Deckert et al., 1977]; [Gertler & Singer, 1990]; [Gertler, 1998] qui relie uniquement les mesures sur une certaine fenêtre temporelle. L'espace de parité est souvent défini comme étant l'orthogonal de la matrice d'observabilité, ce qui permet d'éliminer l'influence des états sur le système. Des méthodes permettant de maximiser la sensibilité aux défauts et de minimiser la sensibilité aux perturbations ont été élaborées. Ces méthodes qui ont été établies à l'origine pour les systèmes linéaires ont été étendues aux cas non linéaire, comme par exemple [Comtet-Varga et al., 2000].

7.2.1.b. Observateurs

Plusieurs méthodes de reconstruction d'état pour le diagnostic ont été développées dans la littérature [Benallouch et al., 2007] [Brunet et al., 1990] [Maquin & Ragot, 2000] [Toscano, 2004]. La méthode des observateurs repose sur l'estimation des états ou des sorties d'un système. Les sorties reconstruites pourront être comparées avec les mesures effectuées sur le système réel pour obtenir des résidus, lesquels seront analysés pour le diagnostic.

7.2.1.c. Estimation paramétrique

Le diagnostic à base de modèles peut aussi être réalisé par l'utilisation des techniques d'identification et d'estimation paramétrique [Isermann, 1997]; [Isermann, 1993]. Ces méthodes considèrent que les défauts peuvent se refléter aussi sur les paramètres du système. Le diagnostic consiste généralement à évaluer la cohérence des paramètres estimés avec des plages de valeurs qui reflètent les différents modes de fonctionnement. Elles présentent de bonnes capacités de localisation et d'estimation des défauts, ce qui peut se révéler utile pour la compensation de leur influence.

7.2.2. Les méthodes externes

Ces méthodes de diagnostic ne supposent pas l'existence d'un modèle pour décrire les relations entrées/sorties, mais uniquement la présence d'observations des différents modes de fonctionnement regroupées dans une base de données. Ces méthodes reposent sur l'analyse des mesures prélevées par l'instrumentation placée sur le système. Ces mesures sont souvent regroupées et désignées comme étant une « signature externe ». Ces méthodes utilisent un module de reconnaissance qui permet de trouver des relations de cause à effet entre les défauts et les classes. Elles offrent d'intéressantes perspectives pour le diagnostic des systèmes complexes, car elles ne nécessitent pas de modèle.

Dans cette catégorie, on trouve les méthodes basées sur la reconnaissance des formes, le traitement du signal, l'analyse des signatures ainsi que le traitement de l'information, qui sont développées ci-après.

7.2.2.a. Reconnaissance des formes (Rdf)

Le diagnostic par reconnaissance des formes [Dubuisson, 1990], [Dubuisson, 2001a], [Dubuisson, 2001b] attribue une classe correspondant à un mode de fonctionnement, pour une observation du système fournie par des capteurs. La reconnaissance de formes consiste à définir des algorithmes permettant de classer des objets ou des formes en les comparant à des formes types.

Le diagnostic par reconnaissance de formes passe par les étapes suivantes :

1) Espace de représentation

Extraction du vecteur « formes » ou « caractéristiques » ou « paramètres » ou « objets » à partir des grandeurs mesurées (signature externe), ce qui permet de définir l'espace de représentation. L'espace de représentation consiste à choisir les paramètres les plus pertinents des observations vis-à-vis des modes de fonctionnement. Cette étape est réalisée généralement par des phases successives de paramétrisation des signaux mesurés, puis par sélection de paramètres pertinents. Il n'existe pas de méthode systématique pour extraire les paramètres constituant le vecteur forme, et on s'oriente généralement vers des approches de modélisation paramétrique des signaux utilisant un modèle unique pour tous les signaux, ou vers des approches heuristiques de paramétrisation utilisant basées essentiellement sur l'observation et l'expertise des signaux en absence de toute théorie.

La définition des classes risque d'être complexe à réaliser si le nombre de paramètres retenus est trop important. Une réduction de dimension de l'espace de représentation tout en conservant les informations utiles est souhaitable pour simplifier la structure du classifieur et réduire le calcul. Pour optimiser l'espace de représentation, deux approches peuvent être employées :

- En partant d'un espace de dimension K (nombre de paramètres), on peut sélectionner un sous-ensemble de paramètres parmi ceux existants. Les critères souvent utilisés sont à base de matrices de variance inter et intra-classes. Ils permettent de ne retenir que les paramètres qui rendent les classes plus compactes et plus éloignées les unes des autres. Parmi ces critères, on trouve le critère de Fisher [Kittler, 1986].
- On peut également combiner linéairement les paramètres de départ, tout en conservant les informations pertinentes, ce qui donne un nouvel espace de représentation. L'analyse en composantes principales [Saporta, 1990] fait partie de ces approches, elle permet de

projeter les données initiales, sans prendre en considération leur classe d'appartenance, dans un espace de faible dimension. La projection est faite dans le sens de maximisation de la variance du nuage de points initial après projection. On peut aussi citer une autre approche, qui tient compte de l'appartenance à une classe, pour la construction de nouveaux paramètres est la régression PLS (Partial Least Squares) [Tenenhaus, 1998]. Ces méthodes sont théoriquement optimales, cependant les nouveaux paramètres obtenus en combinant les paramètres initiaux qui avaient un sens physique peuvent le perdre et sont donc difficiles à interpréter.

2) Réalisation d'une base d'apprentissage

L'étape suivante consiste à construire à partir de l'ensemble des observations, un ensemble de données défini dans l'espace de représentation choisi (si l'espace de représentation est de dimension D par exemple, chaque observation sera représentée par D paramètres). Cette ensemble de données contenant les paramètres est appelé base d'apprentissage.

Les données de cette base d'apprentissage peuvent être de deux natures suivant le contexte du diagnostic :

- données étiquetées : on connaît à l'avance les différentes classes (classe1, classe2,..., classeN) dans lesquelles les observations doivent être classées.
- données non étiquetées : on ne connaît pas à l'avance les différentes classes dans lesquelles les observations doivent être classées.

La façon de déterminer les classes est alors différente.

3) Définition des classes ou des modes de fonctionnement

La définition des différentes classes revient à identifier les régions de l'espace de représentation correspondant à chaque classe. Les techniques de classification permettent d'y parvenir à partir de la base d'apprentissage. On parle d'apprentissage supervisé dans le cas de données étiquetées et d'apprentissage non supervisé dans le cas de données non étiquetées. La définition des classes revient à déterminer une règle de décision, qui sera ensuite utilisée pour classer de nouvelles observations dans la phase d'exploitation. Cette règle de décision (fonction discriminante) permet de partitionner l'espace de représentation en autant de régions que de classes en définissant les frontières entre chacune d'elles. Pour cela, certaines frontières sont fondées sur la notion de proximité et nécessitent de calculer une distance ou une probabilité de ressemblance avec les classes prédéfinies.

Parmi les techniques de classification qu'on trouve dans la littérature, nous citons les techniques probabilistes et les approches floues (algorithmes fuzzy c-means FCM,...) qui exploitent des modélisations probabilistes ou floues des formes [Dubuisson, 1990]; [Dubuisson, 2001b]; [Devroye et al., 1996]; [Masson et al., 1996], les classificateurs statistiques (le classificateur bayésien, les K plus proches voisins) [Casimir, 1971]; [Mechraoui et al., 2008]; [Charniak, 1991], les réseaux de neurones [Venkatasubramanian et al., 1990] et les Machines à Vecteurs Supports (SVM) [Widodo & Yang, 2007].

4) Exploitation de la méthode

Une fois les frontières de décision définies, toute nouvelle observation peut être classée. Cependant, un problème peut survenir si une observation ne peut être affectée à aucune classe. Deux cas se présentent [Dubuisson, 2001a] :

- soit la nouvelle observation n'appartient à aucune classe, ce qui est le cas si cette observation correspond à un mode de fonctionnement (classe) qui ne figurait pas dans la base d'apprentissage. On procède alors à un rejet en distance.
- soit la nouvelle observation est proche d'une frontière entre deux classes, entraînant une ambiguïté qui risque de déboucher sur une erreur de classification. Dans ce cas, on a un rejet en ambiguïté. Ces rejets peuvent être pris en compte dans l'évaluation des performances de la classification.

7.2.2.b. Traitement du signal

Dans ces méthodes, le diagnostic est basé sur l'analyse des signaux issus des capteurs mis en place sur le système. Ces méthodes peuvent être divisées en trois familles : les méthodes statistiques, les méthodes fréquentielles et les méthodes temps-fréquence, qui sont listées ci-après.

Analyse statistique : Ces méthodes, historiquement les plus anciennes, consistent à analyser des caractéristiques temporelles du signal enregistré. Une synthèse de l'application de ces techniques peut être trouvée dans [Basseville, 1988] et [Chiang et al., 2001]. On y retrouve la moyenne, la variance, l'asymétrie (Skewness), l'aplatissement (Kurtosis) et la valeur efficace (RMS root mean square). L'idée est que toute apparition d'un défaut entraînera une modification des caractéristiques statistiques du signal. Ces indicateurs statistiques temporels présentent l'avantage d'être simple, facile à interpréter et ils peuvent être comparés à des seuils dont le dépassement déclenche une alarme en situation anormale. Cependant, ces descripteurs génèrent souvent des « fausses alarmes » lorsque les signaux ne sont pas gaussiens.

Analyse fréquentielle : L'analyse fréquentielle [Randall, 1987] consiste à extraire les composantes spectrales des signaux analysés. Dans cette approche, l'outil mathématique le plus souvent utilisé est la transformée de Fourier qui consiste à décomposer l'énergie du signal analysé par bandes de fréquence. Cela offre la possibilité de dissocier dans le domaine fréquentiel des phénomènes indépendants caractérisés par des contenus fréquentiels différents. L'analyse dans le domaine fréquentiel est souvent complémentaire à l'analyse dans le domaine temporel du signal ; des phénomènes difficilement discernables dans l'un des domaines apparaissent clairement dans l'autre. L'analyse de Fourier permet la surveillance et le diagnostic par le suivi des changements du spectre fréquentiel. L'analyse de Fourier est particulièrement bien adaptée à la surveillance et au diagnostic des machines tournantes dont l'énergie des signaux est répartie sur des harmoniques bien localisés en fréquence. L'amplitude et la position de ces harmoniques constituent une signature de l'état de la machine.

Analyse temps-fréquence : Le diagnostic peut aussi se faire dans le plan temps-fréquence. Il s'agit de caractériser dans le domaine fréquentiel des signaux non stationnaires, par exemple ceux dont les caractéristiques varient dans le temps. La transformée en ondelettes [Yousfi Steiner et al., 2011a] est un outil plus récent adapté à la localisation autant temporelle que fréquentielle de changements dans le signal analysé. Son principe est de projeter le signal sur des espaces d'analyse possédant des propriétés particulières.

7.2.2.c. Analyse des signatures

Ces méthodes passent par une première étape d'apprentissage qui permet de définir des signatures de référence représentant les modes de fonctionnement normal et défectueux connus du système. L'acquisition des signatures peut se faire avec les cinq sens humains, avec des capteurs spécialisés ou par traitement des mesures prélevées sur le système. Parmi ces signatures, on peut citer les signatures électriques, vibratoires, acoustiques ainsi que les signatures magnétiques. Ensuite, le diagnostic consiste à comparer la signature courante aux signatures de référence prédéfinies. Dans le cas où la signature courante ne correspond à aucune des signatures de référence prédéfinies, le défaut est classé dans la catégorie du fonctionnement anormal mais inconnu.

Une méthode MVIM (Multi-Valued Influence Matrix), basée sur l'apprentissage pour l'extraction de signature [Chin & Danai, 1991], [Danai & Chin, 1991], a attiré notre attention. Elle est utilisée dans les systèmes complexes et ne nécessite pas de modèle du système. Dans cette approche, les signatures des n défauts sont représentées par des vecteurs colonnes ($V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$) et regroupés dans une matrice A . Les vecteurs V_i représentant les signatures des défauts ne sont pas connus a priori et doivent être estimés. Dans la phase d'apprentissage, l'estimation des V_i est basée sur la minimisation du nombre de fausses alarmes et de défauts non détectés. En se basant sur la matrice A , toute nouvelle observation $Y(t)$ est classée suivant sa proximité (par exemple : $\cos \alpha$) aux vecteurs V_i (Figure II-9).

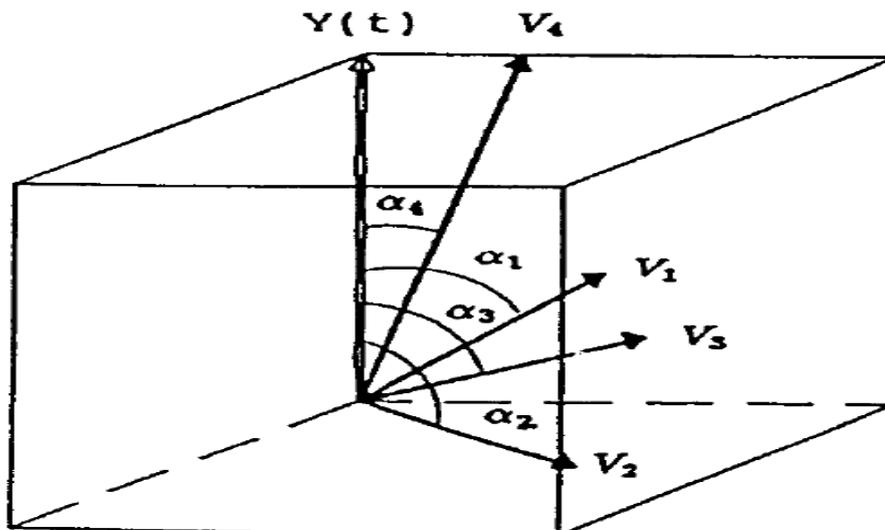


Figure II-9 : Schéma du raisonnement utilisé pour le diagnostic dans la méthode MVIM [Chin & Danai, 1991]

Une autre méthode a été développée dans [Youssef & Alamir, 2003], [Youssef, 2005], permettant de générer des graphiques 2D, appelés signatures, à partir des mesures d'un système donné. Plus précisément, il s'agit de la définition d'une application d'un espace de grande dimension dans le plan bi-dimensionnel R^2 . Le vecteur des mesures passées sur une fenêtre temporelle donnée constitue l'espace de départ. En appliquant cette méthode aux mesures passées sur un horizon glissant, une courbe 2D appelée "signature" est obtenue.

L'objectif est que pour chaque scénario de défaut, la signature correspondante diffère de la signature nominale d'une façon décelable à la perception humaine, rendant ainsi possible de détecter les défauts. Leurs localisations peuvent se faire s'il existe des signatures variant d'une façon propre à chaque scénario de défaut. Dans ce cas, le rôle de l'opérateur humain est essentiel. C'est grâce à sa capacité de classification que des résidus géométriques peuvent être obtenus à partir des signatures. Ensuite, ces résidus sont transformés en résidus analytiques utilisés dans le cadre du diagnostic en ligne. Cette courbe dans le plan bi-dimensionnel s'est avérée être un outil efficace de détection des défauts.

7.2.2.d. Arbre de décision

Les arbres de décision font partie des méthodes de traitement de l'information. L'arbre de décision est une représentation graphique d'une succession de décisions/événements. Il est obtenu en passant par les étapes suivantes :

- identifier l'ensemble des choix possibles face à des événements,
- définir un critère de partage entre les décisions alternatives,
- représenter l'enchaînement des décisions et événements sous forme d'un graphe logique.

Pour que l'arbre de décision ainsi obtenu soit cohérent, il est nécessaire qu'il soit exhaustif mais aussi exclusif, dans le sens où les décisions et les événements s'excluent mutuellement. Un arbre de décision est composé d'une succession de niveaux. Chaque événement est généré à partir des événements du niveau inférieur par l'intermédiaire de divers opérateurs de type « ET » ou « OU » et les décisions sont fondées sur des règles du type « Si... ALORS... SINON ». L'arbre de décision ainsi construit servira à représenter les diverses combinaisons possibles d'événements qui peuvent entraîner la réalisation d'un événement indésirable : un défaut ou une défaillance.

8. Diagnostic des systèmes pile à combustible

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu les principaux défauts pouvant apparaître sur une PAC ainsi que les principales méthodes de diagnostic. Nous allons maintenant nous intéresser à l'application de ces méthodes sur les piles à combustible. La diversité des causes des pertes de performances et des défauts ne permet pas à une seule méthode de diagnostic de les prendre tous en compte. De nombreuses stratégies de diagnostic ont été développées, chacune apportant sa contribution pour l'amélioration des performances, durabilité et fiabilité des systèmes pile à combustible. Dans le cas où le système de diagnostic permet de discriminer l'origine des défauts réversibles, les systèmes de contrôle pourront être utilisés pour pallier à ces défauts par modification des conditions opératoires en agissant sur les différents auxiliaires (sous-système du combustible, sous-système du comburant, circuit de refroidissement de la pile et/ou humidificateurs...).

8.1. Diagnostic des piles à combustible à base de méthodes internes

Dans le diagnostic à base de méthodes internes, le raisonnement s'appuie sur un modèle explicite, qualitatif ou quantitatif de la pile à combustible. Un état de l'art portant sur les approches de diagnostic des PEMFC à base de modèles a été proposé dans [Petroni et al., 2013].

8.1.1. Redondance analytique

Les méthodes utilisant des modèles de type physique ont été utilisées uniquement pour détecter des défauts dans les systèmes alimentant la pile à combustible. Parmi ces travaux, citons ceux de [Aitouche et al., 2011] où les auteurs ont présenté une méthode de détection et d'isolation de défauts sur la base de la redondance analytique non linéaire (NLAR) par extension de la technique de l'espace de parité au cas de systèmes non linéaires. L'approche a été appliquée pour le diagnostic de défauts dans les actionneurs et les capteurs du sous-système de pression et celui de l'écoulement des gaz.

Les approches utilisant des modèles de type boîte noire sont les plus utilisées du fait que le modèle est plus facile à bâtir dans la mesure où il dépend directement des essais expérimentaux à réaliser sur la pile à combustible. Ce type d'approche a été mis en œuvre par Nadia Steiner pour détecter des phases de noyage dans une PAC [Yousfi Steiner, Thèse 2009], [Yousfi Steiner et al., 2010]. Le principe de la détection du noyage des électrodes d'une pile à combustible, à partir d'un modèle décrivant les pertes de charge cathodique (basé sur un réseau de neurones), est basé sur la génération d'un résidu. Ce travail a ensuite été complété par la prise en compte supplémentaire de l'évolution de la tension de pile pour diagnostiquer l'assèchement en plus du noyage par la génération d'un second résidu [Yousfi Steiner, Thèse 2009], [Yousfi Steiner et al., 2011b].

Dans [Niroumand et al., 2011], les auteurs ont développé une méthode de diagnostic en temps réel à base de modèles semi-empiriques pour isoler trois défauts (appauvrissement en gaz à l'anode, appauvrissement en gaz à la cathode, et le noyage de la cathode). Dans ce travail, le régulateur PID qui régule la pression à la sortie de la cathode a été réglé de façon à ce que la réponse soit sous-amortie (présente de faibles oscillations). Des modèles semi-empiriques ont été développés pour décrire le comportement de la pile. Pour le diagnostic, ils mesurent le courant de la pile, la tension de la pile, le débit massique du gaz à l'entrée de la cathode et de l'anode pour générer des résidus. Des règles logiques ont été utilisées pour isoler les défauts entre eux.

Dans [Hissel et al., 2004], un modèle flou d'une pile à combustible combiné à une analyse de résidus dédiée est proposé pour diagnostiquer deux défauts : l'assèchement de la membrane et l'accumulation d'eau ou d'azote dans le compartiment anodique. Ce modèle est utilisé pour estimer la courbe de polarisation de référence. Les résidus sont calculés en considérant la différence entre le point de fonctionnement expérimental (courant-tension) et le couple courant-tension issu de la courbe de polarisation de référence. Un seuil de vraisemblance empirique (défini par l'auteur) combiné à un circuit logique est utilisé pour la décision. L'approche ne nécessite que deux capteurs (courant et tension). Cependant, elle ne permet pas l'identification spatiale du défaut.

8.1.2. Observateurs

Dans ces approches, le diagnostic de la pile à combustible est basé sur l'utilisation de modèles mathématiques (représentation d'état) décrivant le comportement de celle-ci. Dans la littérature, très peu de travaux de diagnostic des systèmes de piles à combustible à base d'observateurs ont été réalisés. La plupart des travaux réalisés avec les observateurs dans les systèmes de piles à combustible se concentrent sur l'estimation d'état sans aucune phase de diagnostic. La détection et la localisation des défauts peuvent être réalisées en surveillant l'évolution de ces états. Dans [Arcak et al., 2004], les auteurs utilisent le principe de conservation de masse pour l'estimation de la variation de la pression de l'hydrogène à l'anode. La tension de la pile est considérée pour l'équation

de sortie. L'utilisation d'un observateur adaptatif à une entrée inconnue (pression partielle de l'hydrogène à l'entrée de l'anode comme entrée inconnue constante ou variant très lentement) permet l'estimation de la pression partielle de l'hydrogène à l'anode. Dans [Görgün et al., 2005], les auteurs ont développé une approche qui permet d'estimer la teneur en eau de la membrane. Elle est basée sur les chutes de tension ohmiques (la résistance de la membrane dépend de la teneur en eau de la membrane). Cette approche nécessite la mesure de la tension, du courant, de la température, des pressions totales à la cathode et à l'anode, et l'estimation des pressions partielles de l'oxygène et de l'hydrogène.

Dans [Benallouch et al., 2008], les auteurs ont développé une technique de diagnostic pour détecter le défaut de noyage qui repose sur l'estimation du volume d'eau liquide. Pour ce faire, ils utilisent un observateur dit « fonctionnel ». Il s'agit d'un observateur qui permet d'estimer seulement la partie utile du vecteur d'état.

Dans [De Lira et al., 2010], un observateur linéaire à paramètres variant (LPV) a été utilisé pour générer des résidus. L'approche développée permet d'identifier et d'évaluer de multiples défauts capteurs au niveau des sous-systèmes de la pile à combustible PEM.

8.1.3. Identification paramétrique

Il s'agit d'identifier les paramètres d'un modèle qui serviront à établir le diagnostic. Généralement, on utilise des modèles semi-empiriques qui sont à l'intersection entre les modèles physiques et les modèles comportementaux. Les modèles de type circuits électriques équivalents du type de la figure II-8 sont souvent utilisés. L'apparition de chacun des défauts se manifeste sur le circuit électrique équivalent d'une façon particulière. L'utilisation de l'identification paramétrique nécessite d'être couplée à une autre approche, utilisant le plus souvent des arbres de décision pour accomplir la tâche du diagnostic. Parmi les méthodes utilisant un circuit électrique équivalent, nous pouvons citer :

[Forrai et al., 2005] : un modèle a été utilisé sur une mesure dite d'interruption de courant pour l'estimation des paramètres de la pile à combustible PEM afin de diagnostiquer son état.

[Sugiura et al., 2006] : les auteurs ont développé un autre circuit électrique équivalent constitué de trois cellules RC placées en série pour modéliser la relation non linéaire entre la tension et le courant. Cette méthode a été utilisée pour détecter le phénomène du noyage.

[Rubio et al., 2007] : une corrélation entre la valeur de la résistance de la couche de diffusion et la teneur en eau dans la pile a été trouvée.

[Hamaz et al., 2012] : l'évolution des paramètres a été étudiée en utilisant un filtre de Kalman étendu, dans le cas de sollicitations dynamiques en courant. Une autre méthode d'identification basée sur les moments généralisés de l'entrée et de la sortie à partir de mesures de saut de courant a permis de connaître l'évolution des phénomènes électrochimiques lors d'un processus de vieillissement.

Les méthodes d'identification ont l'avantage d'être simple à mettre en œuvre; cependant, la méthode de diagnostic peut présenter des difficultés d'exploitation du fait de l'utilisation de signaux

tests. C'est pourquoi sa mise en œuvre doit être accompagnée d'une stratégie complémentaire, notamment lors des applications en temps réel.

Dans [Hernandez et al., 2010], les auteurs proposent l'extrapolation des lois appliqués aux circuits électriques (loi des nœuds et des mailles) sur d'autres systèmes hydrauliques ou pneumatiques. Le modèle proposé pour la pile à combustible est capable de suivre l'évolution de la dynamique des gaz à l'anode et la cathode (pression et débit) et de prédire la tension du stack. Le modèle permet la détection de la détérioration de la membrane, l'assèchement et le noyage des cellules. Le diagnostic est basé sur l'identification des résistances à l'écoulement. Par exemple, un défaut de noyage est localisé à la cathode si la chute de la tension de la pile est graduelle, les résistances équivalentes à la cathode augmentent et celles de l'anode restent invariantes.

8.2. Diagnostic des piles à combustible à base de méthodes externes

8.2.1. Diagnostic par reconnaissance de formes

Une approche par reconnaissance de forme dans un cadre supervisé a été proposée dans [Yousfi Steiner, Thèse 2009]. Des mesures de saut de courant et des mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) ont été réalisées. Trois approches de paramétrisation ont été explorées : une approche heuristique, une approche par modélisation et une autre par décomposition en paquets d'ondelettes. Dans ces approches, les paramètres extraits n'ont pas de signification physique. Pour la phase de classification, plusieurs classifieurs ont été utilisés et comparés (perceptron, réseaux de neurones non linéaires, SVM ...). Les approches ont été utilisées pour discriminer entre 3 classes liées à une mauvaise gestion de l'eau et entre 7 classes intégrant l'empoisonnement au CO et des états de fonctionnement intermédiaires. Quant à la généralisation des résultats, l'auteur souligne la difficulté à les généraliser même pour un stack identique du même fabricant du fait de la production encore artisanale des piles à combustible.

On trouve aussi dans la littérature des travaux utilisant les réseaux bayésiens (discrimination probabiliste) pour le diagnostic. Les réseaux bayésiens sont des approches de discrimination probabiliste qui s'appuient sur des graphes traduisant par leurs nœuds les variables dans l'espace de représentation choisi et par leurs arcs l'existence de liaisons de causalité directes entre ces variables. Ils s'appuient aussi sur la théorie des probabilités qui permet d'introduire une information purement quantitative.

Dans [Riascos et al., 2007] [Riascos et al., 2006] [Riascos et al., 2008], les auteurs utilisent les réseaux bayésiens pour le diagnostic d'un système pile à combustible. Ils étudient les effets de certains défauts sur un modèle mathématique. Le modèle mathématique comporte deux sous-modèles : un sous-modèle électrochimique, qui permet de décrire la tension au niveau d'une cellule, et un sous-modèle thermodynamique, qui décrit la température de la cellule et l'humidité relative de l'air à la sortie de la pile permettant d'avoir une idée de l'état d'hydratation de la membrane. Puis, une base de données de 10000 cas a été construite à l'aide de ce modèle pour différentes conditions opératoires et pour différents types de défauts simulés. Ces défauts sont : défaillance du circuit d'alimentation en air, défaillance du circuit de refroidissement, rupture physique de la membrane, défaillance du circuit d'alimentation en hydrogène. Le diagnostic de ces défauts consiste à trouver des relations logiques de cause à effet contenues dans cette base de données entre des variables définies. C'est une méthode graphique et probabiliste à la fois. Au pied de la structure, on trouve les

causes, au milieu, les variables intermédiaires comme par exemples assèchement de la membrane et noyage des électrodes, et enfin au sommet, on trouve les conséquences sur les variables mesurables et qui sont les entrées pour le système de diagnostic (tension, courant, puissance électrique, température, pression de l'hydrogène en amont de la pile).

Plusieurs travaux de la littérature qui utilisent la SIE ont démontré l'existence de zones fréquentielles permettant d'isoler plusieurs défauts sans pour autant donner une méthode analytique permettant de le faire. Dans ses travaux [Wasterlain, thèse 2010] utilise aussi les réseaux bayésiens pour le diagnostic. L'approche consiste à trouver des relations de causes à effets entre les mesures (partie réelle et imaginaire de la mesure de la spectroscopie d'impédance électrochimique) et les variables traduisant l'état de la pile contenue dans une base de données. L'approche a été utilisée pour différencier entre 7 modes de fonctionnement dont six modes de défaillance (différents niveaux d'assèchement et de noyage). Il a obtenu un taux de classification de 98.53% en mesurant l'impédance de la pile pour quatre fréquences (500 Hz, 50 Hz, 5 Hz, 775 mHz). Cependant l'auteur souligne la difficulté à définir des classes pour les variables. Une autre difficulté est la généralisation des résultats, elle ne peut pas être appliquée à d'autres piles de technologies différentes ni pour deux piles identiques issues d'un même processus de fabrication.

Un autre facteur pouvant influencer l'état d'une pile à combustible est l'influence de son historique [Wasterlain, thèse 2010]. Lors d'une campagne d'expériences pour la constitution d'une base de données (base d'apprentissage), l'état de la pile à un instant t peut provoquer une influence sur l'état du système à l'instant $t+1$. Pour se prémunir de l'influence de ce facteur supplémentaire, la construction d'une base de données fiable nécessite un protocole de test qui doit être appliqué pour chacune des expériences. Cependant, durant le fonctionnement d'une pile à combustible, des états intermédiaires peuvent exister. L'état de la pile ne dépend pas que des conditions opératoires, mais aussi de son historique. Ce facteur n'est généralement pas pris en considération par ces méthodes.

8.2.2. Traitement du signal

Ces approches ont été largement mises en œuvre pour le diagnostic des piles à combustible du fait que le développement de modèles s'avère une tâche difficile, fastidieuse et coûteuse en terme de temps de développement. Il s'agit de trouver une ou plusieurs mesures spécifiques (impédance, tension, débit, pression...) et de les analyser.

Dans [Yousfi Steiner et al., 2011a], les auteurs utilisent uniquement la mesure de la tension du stack, la méthode utilisée est basée sur la transformée en ondelettes couplée avec un algorithme d'identification et de classification. La méthode nécessite une base de données pour les deux situations que l'on veut détecter (noyage et non noyage) ce qui veut dire que les performances sont directement liées aux données expérimentales considérées. Les auteurs ont démontré la faisabilité de la méthode pour distinguer les deux fonctionnements étudiés, cependant, la classification et la réduction des caractéristiques ne sont pas faites de façon automatique.

Dans [Hernandez et al., 2006], une approche stochastique a été présentée pour le diagnostic de défauts liée à la gestion de l'eau (noyage et assèchement) d'une pile à combustible. Plus précisément, la méthode proposée est fondée sur l'analyse des paramètres statistiques des tensions des cellules individuelles (la distribution des tensions des cellules unitaires constitutives du stack pile à combustible) et sur la définition de zones de fonctionnement dans un espace vectoriel défini à

partir des différents paramètres étudiés. La disparité entre les tensions cellules est liée à la distribution non uniforme de la pression dans certaines zones des canaux et celle de la distribution de l'eau liquide et du courant à l'intérieur de la pile à combustible.

Dans [Mériada et al., 2006],[Mériada, 2002], les défauts de noyage et d'assèchement ont été détectés et isolés pour différentes bandes de fréquences en utilisant la SIE. L'effet de l'assèchement étant visible sur le spectre d'impédance dans la bande de fréquence 100 kHz-0,5 Hz et l'effet du noyage étant quant à lui visible sur une plage de basse fréquence allant de 100 Hz à 0,5 Hz. L'identification de zones fréquentielles a permis le diagnostic des défauts. Dans le travail de [Le Canut et al., 2006], en plus des deux défauts précédents, les auteurs ont également isolé le défaut d'empoisonnement au monoxyde de carbone à l'électrode anodique.

8.2.3. Arbre de décision et logique

En général, ces méthodes sont couplées à d'autres méthodes pour le diagnostic. Dans [Niroumand et al., 2011], une approche basée sur la génération de résidus à partir de modèles semi-empiriques a été couplée à un circuit logique de décision.

Dans [Yousfi Steiner et al., 2008], trois arbres de décision qui visent à synthétiser les différentes causes possibles d'une dégradation donnée ont été construits : un arbre pour le noyage, un arbre pour assèchement et un autre pour la dégradation du catalyseur.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que les systèmes pile à combustibles sont des systèmes multi-physiques et multi-échelles dont la maîtrise du fonctionnement fait appel à plusieurs disciplines. De ce fait, de nombreuses stratégies de diagnostic ont été développées et chacune apporte sa contribution pour l'amélioration des performances, durabilité et fiabilité des systèmes pile à combustible.

Les outils de diagnostic existants actuellement permettent la détection de défauts au niveau du stack (noyage, assèchement...) mais ne permettent pas d'attribuer le défaut à un sous-système (origine). De plus, une difficulté importante pouvant influencer l'état d'une pile à combustible est l'influence de son historique : l'état de la pile à un instant t influe sur son état à l'instant $t+1$. Pour se prémunir de ce facteur, la construction d'une base de données fiable nécessite un protocole de test qui doit être suivi pour chacune des expériences. Ce facteur n'est généralement pas pris en compte par les méthodes de diagnostic [Wasterlain, thèse 2010]. De plus, les résultats des méthodes présentées sont difficilement généralisables à d'autres piles de technologies différentes et même pour deux piles identiques issues d'un même processus de fabrication [Yousfi Steiner, thèse 2009]. Cela fait partie des défis scientifiques à relever.

Lorsqu'un défaut se manifeste sur une pile à combustible, ses performances électriques se détériorent. Cette dégradation des performances globales est la conséquence d'une dégradation des performances locales. Les méthodes de diagnostic actuellement établies pour les piles à combustible utilisent des mesures globales de la pile à combustible ainsi que des procédures de test (spectroscopie d'impédance par exemple).

Or il existe des moyens de recueillir des informations sur les performances locales par la mesure de la distribution de la densité de courant. Elle peut être déterminée de façon directe ou indirecte en mesurant le champ magnétique induit à l'extérieur de la pile. En s'intéressant à la répartition de la densité de courant, nous nous intéressons aussi indirectement aux problèmes de gestion de l'eau (noyage et assèchement) du fait que la répartition de l'eau à l'intérieur de la pile est corrélée à la répartition du courant à l'intérieur de celle-ci.

Nous utilisons dans ce travail la mesure du champ magnétique car elle fournit une information locale sans perturber le fonctionnement de la pile à combustible et ne nécessite pas de signal d'excitation externe. Par contre, il est nécessaire d'installer une instrumentation supplémentaire.

Le problème de diagnostic se pose alors de manière entièrement nouvelle, et une méthode adaptée devra être établie. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle façon de voir le diagnostic des PEMFC basée sur la dégradation des performances locales. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation directe du champ magnétique externe qui est corrélé à l'état local de la pile à combustible.

Les techniques de diagnostic interne sont très utilisées dans le domaine des piles à combustibles, mais elles ne peuvent cependant pas être appliquées à notre problème. En effet, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu, on ne dispose pas d'un modèle décrivant les entrées (conditions opératoires) en fonction des sorties (champ magnétique induit). Néanmoins, des méthodes internes qualitatives pourraient être envisagées. Du fait que l'on ne dispose pas de modèle, on s'orientera plutôt vers des méthodes externes.

Le chapitre III suivant met en lien le champ magnétique avec la répartition de la densité de courant dans la pile et établit un modèle caractérisant le fonctionnement indésirable de la pile.

III. Etablissement du modèle caractérisant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible

1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'établissement du modèle caractérisant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible pour l'analyse des signatures magnétiques externes. Pour cela, il est important de connaître l'origine des signatures magnétiques qui sont dues aux distributions de courant au sein de la pile. Ce modèle permettra d'établir par la suite une démarche de diagnostic par analyse des signaux magnétiques.

Le paragraphe 2 propose une étude bibliographique qui met en évidence l'existence d'interactions entre les conditions opératoires de la PAC et les distributions de courant non uniformes. Ensuite, nous présentons le modèle électrique qui donne la distribution de courant et de tension en fonction d'une distribution de paramètres électriques (conductivités et forces électromotrices). Puis nous présentons le modèle magnétique direct qui permet de calculer le champ magnétique à partir d'une distribution de courant donnée. Le modèle magnétique direct est utilisé pour mettre en évidence l'existence de signatures externes spécifiques pour certaines familles de distributions de courant non uniformes. Enfin, nous établissons le modèle caractérisant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible.

2. Interactions entre les conditions opératoires et les distributions de courant non uniforme à l'intérieur d'une pile à combustible

Des études ont été menées pour comprendre les effets des conditions de fonctionnement (conditions opératoires) sur les distributions de courant au sein de la PAC. Gerteisen et co-auteurs [Gerteisen et al., 2012] ont étudié les effets de certaines conditions opératoires sur la distribution de densité de courant circulant dans une pile à combustible PEM segmentée. Dans leurs travaux, il a été montré que la distribution de courant est différente en fonction des effets de la tension cellule, des humidités relatives et de la sur-stœchiométrie des gaz, mais également en fonction de l'orientation des circuits d'alimentation en air et en Hydrogène (H_2) (co ou contre- courant ou croisé). Hakenjos et co-auteurs [Hakenjos et al., 2004] ont mis au point un dispositif expérimental qui permet l'évaluation simultanée de la distribution de courant, de la température et de l'eau dans une pile à combustible PEM en fonctionnement. Ils ont montré qu'à faible débit d'air, une grande surface a été remplie d'eau et que seule la zone où se situe l'entrée des gaz est active (fait passer le courant), ce qui engendre une forte densité de courant (localisée dans cette zone). A débit moyen, la zone inondée (noyée) est limitée uniquement à une petite zone située au milieu de la cellule et la densité de courant est plus élevée à l'entrée de l'air. A débit d'air élevé, il n'y a pas d'eau visible et la densité de courant au milieu de la cellule est élevée. Dans [Fraunhofer, 2012], le facteur de stœchiométrie de l'air a été diminué de $\lambda = 1,72$ à $\lambda = 1,34$ pour induire un appauvrissement en air. Il a été montré que cela a pour conséquence d'engendrer une distribution de courant non uniforme. La densité de courant est plus élevée à l'entrée de l'air et elle diminue progressivement de l'entrée vers la sortie de l'air. Dans [Gerteisen et al., 2011], les auteurs ont fait varier le point de fonctionnement électrique

(tension) et ont fixé les autres conditions opératoires ; ils ont constaté différentes non homogénéités de la distribution de courant en se déplaçant sur la courbe de polarisation. Ces études ont été menées en utilisant une mesure invasive de la distribution de la densité de courant.

Hauer et co-auteurs [Hauer et al., 2005] ont également étudié l'effet de l'humidité relative et le facteur de stœchiométrie de l'air sur la distribution de courant. Les expériences ont été menées dans un fonctionnement à courant total constant (contrôle galvano statique). Les canaux d'alimentation des gaz ont une configuration à co-courant (Figure III-1). L'effet d'une augmentation du facteur de la stœchiométrie de l'air $\lambda_{air} = 2$ à 4 sur la densité de courant a été étudié (Figure III-1). Les zones bleues indiquent une diminution de la densité de courant, tandis que les zones rouges indiquent une augmentation de celle-ci. Alors que la densité de courant diminue dans la moitié supérieure de la cellule (entrée des gaz), la moitié inférieure de la cellule indique une augmentation de la densité de courant (sortie de l'air). Ensuite, lorsque l'humidité relative est réduite de 100% à 15 %, la densité de courant a diminué à l'entrée des gaz et a augmenté dans les autres régions. Les auteurs expliquent cette évolution de la densité de courant par le fait que la réaction est moins active à l'entrée en raison d'un manque d'eau.

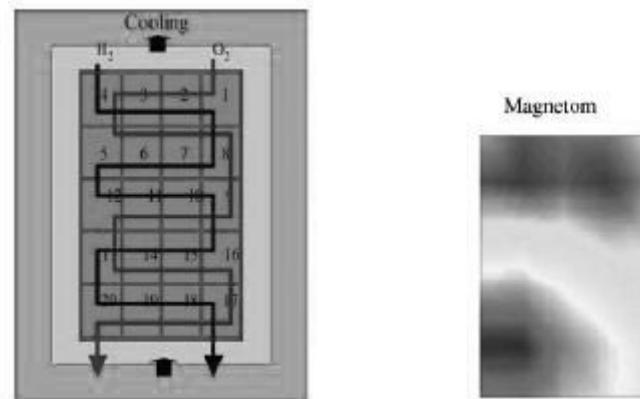


Figure III-1 : A gauche, La cellule d'essai avec des canaux d'écoulement à co-courant. A droite, variation de la distribution de la densité de courant entre $\lambda_{air} = 2$ et $\lambda_{air} = 4$ sur la distribution de la densité de courant [Hauer et al., 2005]

Le Ny [Le Ny, thèse 2012] a également effectué des expériences en utilisant une carte de mesure directe de la distribution de la densité de courant. Parmi les expériences, nous pouvons citer l'influence d'une diminution de la stœchiométrie de l'air de $\lambda_{air} = 2$ à 1.2 (Figure III-2). Alors que la densité de courant diminue dans les zones situées à la sortie de l'air de la cellule, elle augmente dans les zones situées à l'entrée de l'air de la cellule du fait que la pile à combustible fonctionne à courant total constant. Cette variation est de $\pm 0,15 \text{ A.cm}^{-2}$. Il a également étudié l'influence d'un changement de l'humidité des gaz de 50 % à 30 % (diminution). L'évolution des densités de courant indique une réduction de la densité de courant dans les zones situées à l'entrée de l'air et une augmentation de la densité de courant à la sortie de l'air. Cette variation est expliquée par une réaction moins active en raison d'un manque d'eau à l'entrée de la pile. La variation de la densité de courant est de $\pm 0,1 \text{ A.cm}^{-2}$. D'après ce que nous venons de voir, il existe bien un lien étroit entre les distributions de courant non homogènes et les conditions opératoires de la PAC. Dans la mesure où

les conditions opératoires influent de façon distincte sur la distribution de courant, il y aurait alors un moyen de détecter ces changements via la caractérisation de la distribution de courant.

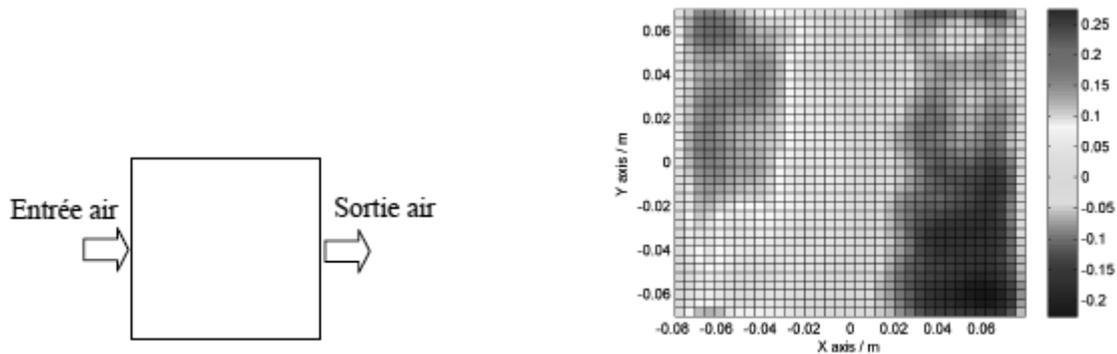


Figure III-2 : A gauche, le sens de l'écoulement de l'air. A droite, variation temporelle (de $\lambda_{\text{air}} = 2$ à 1.2) des densités de courants au niveau d'une cellule (en A.cm⁻²) obtenue avec une carte S++ [Le Ny, thèse 2012]

3. Modèle électrocinétique de la pile à combustible

Pour reproduire et créer des distributions de courant, un modèle électrocinétique permettant de prendre en considération les phénomènes d'interactions entre les différentes cellules d'un même stack est utilisé. Le comportement électrique d'une pile est régi par les équations de Maxwell. Ici, seul le régime stationnaire est considéré. Généralement, l'équation de conservation de la charge et la loi d'Ohm locale sont utilisées en supposant que le champ électrique dérive d'un potentiel :

$$\begin{aligned} \text{div } j &= 0 \\ j &= \sigma E \end{aligned} \tag{Eq III.1}$$

$$E = E_m - \text{grad} V$$

Où : **J** : Densité de courant (A/m²),

E: Le champ électrique (V/m),

V: Le potentiel (V)

σ : La conductivité électrique (S/m) pouvant varier selon la région de la pile considérée

E_m : Le champ électromoteur (V.m⁻¹) qui permet de modéliser la force qui peut entrainer les charges électriques à travers un milieu (source d'énergie à l'intérieur d'un volume).

Dans la pile à combustible, E_m modélise le couplage entre les phénomènes électriques et chimiques se produisant au niveau des AME. Au niveau macroscopique, ce champ électromoteur se traduit par l'existence d'une force électromotrice U_m (en Volt). Le lien entre les deux grandeurs est donné par les relations suivantes :

$$U_m = \int_0^{L_{AME}} E_m dl \tag{Eq III.2}$$

$$\langle U_m \rangle = \frac{U_m}{L_{AME}} e_n \quad (\text{Eq III.3})$$

Où $\langle E_m \rangle$ est le champ électromoteur moyen, L_{AME} est l'épaisseur d'un AME et e_n est le vecteur normal à un AME. La première grandeur décrit un phénomène physique local, la deuxième un phénomène global.

En combinant les équations décrites dans (Eq III.1) on obtient :

$$\text{div } \sigma \text{ grad } V - \text{div } \sigma E_m \quad (\text{Eq III.4})$$

Le comportement électrique de la pile à combustible peut être modélisé avec une seule équation et deux distributions de paramètres (conductivité et champ électromoteur). Pour résoudre cette équation aux dérivées partielles, il est nécessaire d'ajouter des conditions aux limites. Plusieurs choix sont possibles :

$$\begin{aligned} V &= V_S \\ j \cdot n &= j_S \\ j \cdot n &= h(V - V_S) \end{aligned} \quad (\text{Eq III.5})$$

La première équation correspond à une condition de Dirichlet et V_S au potentiel imposé, elle permet de commander la tension du stack. La seconde équation correspond à une condition de Neumann et j_S à la densité de courant imposée, elle permet de commander le stack en courant. La troisième équation correspond à une condition de Robin et h à une conductivité surfacique (en $S \cdot m^{-2}$), elle permet de commander la charge appliquée au stack.

Dans un mode de fonctionnement idéal, les paramètres électriques, tels que les conductivités et les forces électromotrices, sont homogènes, par conséquent les densités de courant et de potentiel générés le sont aussi. Cependant, les conductivités et les forces électromotrices dans les AME dépendent des conditions locales hydriques, thermiques, fluidiques et électrochimiques. Cela revient à dire que le comportement électrique de la pile décrit par les répartitions des courants et des potentiels (Eq III.6) dépend des conditions opératoires sous lesquelles on fait fonctionner la pile à combustible telles que : la température, l'humidité des réactifs, les pressions partielles des gaz d'alimentation ainsi que la structure des canaux d'alimentation en combinaison avec l'ensemble membrane-électrodes (MEA). La pile à combustible étant un système non stationnaire, ces paramètres électriques sont amenés à changer avec le temps sous des conditions opératoires fixes.

$$F(j(x, y, z), V, E_m, \sigma, u) = 0 \quad (\text{Eq III.6})$$

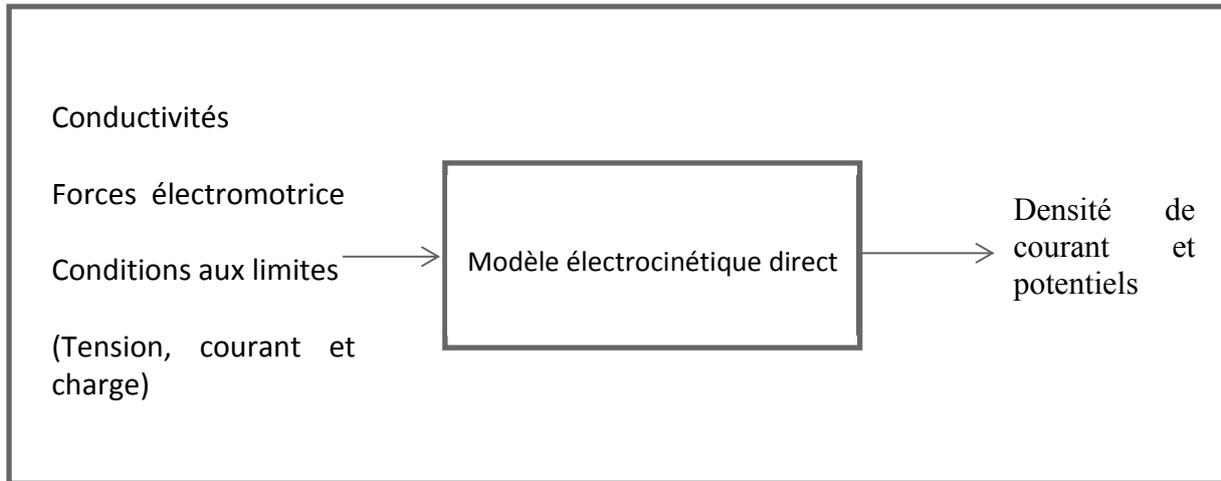


Figure III-3 : Entrées et sorties du modèle électrocinétique direct

Ce modèle électrocinétique permet de faire le lien entre les distributions des paramètres électriques et les distributions de courants et de potentiels. Dans la pratique, les paramètres électriques, entrées de ce modèle, ne sont pas accessibles et le lien entre les conditions opératoires de la pile à combustibles et ces paramètres électriques n'est pas facile à établir vue le caractère complexe et multi-physique du système.

4. Le comportement magnétique d'une pile à combustible

Dans cette partie, on décrit comment calculer le champ magnétique généré par une distribution de courant donnée ainsi que le système de mesure permettant d'acquérir le champ magnétique généré par la pile à combustible.

4.1. Modèle magnétique direct

Le modèle magnétique direct est le modèle qui permet de calculer le champ magnétique généré par une distribution de courant. En plus des équations mathématiques reliant la distribution de courant au champ magnétique en tout point de l'espace, une méthode de discrétisation est nécessaire pour évaluer le champ magnétique.

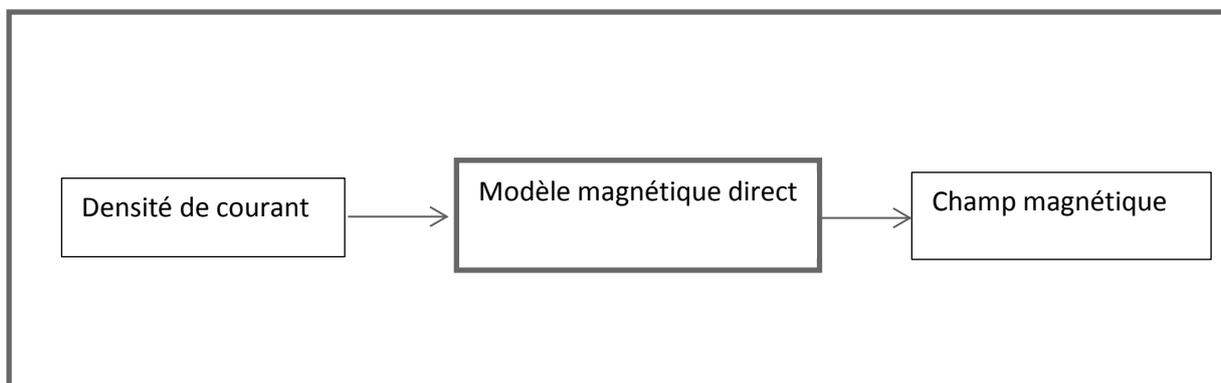


Figure III-4 : Entrées et sorties du modèle magnétique direct

La loi de BIOT et SAVART [Durand, 1968] permet de déterminer en chaque point r de l'espace le champ magnétique B créé par les éléments de courant $j(r')$ distribués dans tout l'espace. Le champ total est ensuite obtenu en effectuant par intégration la somme des champs créés par une distribution de courant donnée.

$$B(r) = \iiint G(r, r') \wedge j(r') dr' \quad (\text{Eq III.7})$$

$$G(r, r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(r' - r)}{|r' - r|^3} \quad (\text{Eq III.8})$$

où :

B : le flux magnétique à la position r

J : la densité de courant à la position r'

μ_0 : la perméabilité du vide

G : la fonction de Green

Le champ magnétique peut être évalué numériquement à l'aide de la relation (III-7) si celle-ci est discrétisée. L'objectif principal est de coupler ce calcul avec le modèle électrocinétique présenté précédemment. Ce modèle utilise la méthode des Volumes Finis et les densités de courant sont donc portées par les facettes du maillage. Le maillage Volumes Finis est utilisé pour découper l'intégrale volumique comme indiqué dans l'équation suivante :

$$B(r) = \sum_{p=1}^{Nb \text{ Volumes}} \iiint G(r, r') \wedge j(r') dr' \quad (\text{Eq III.9})$$

La densité de courant sur chaque volume peut être interpolée en tout point à partir des valeurs portées par les facettes adjacentes au volume. Enfin, l'intégrale sur chaque volume est approximée de manière classique par discrétisation numérique.

Les fils d'alimentation partant de la pile et se rebouclant au niveau de la charge ne seront pas pris en compte. Il est important de se rappeler que le champ magnétique calculé à partir des courants internes à la pile n'est pas complet et qu'il faudra toujours en dernier lieu rajouter l'influence des fils de retour pour avoir le champ magnétique réel (connectique). Des considérations pratiques seront traitées au dernier chapitre.

Il existe une version algébrique de la loi de Biot et Savart [Hauer et al., 2005], [Le Ny, thèse 2012]. Il s'agit d'une autre version du modèle magnétique direct qui possède l'avantage d'être plus simple à manipuler que la version analytique. Cette relation algébrique peut aussi s'écrire de manière plus compacte en utilisant la notation matricielle suivante :

$$B = S j \quad (\text{Eq III.10})$$

Où : S est la matrice de sensibilité spécifiant la relation entre la densité de courant et le champ magnétique (Nombre de capteurs x Nombre de discrétisation de la densité de courant), le vecteur j correspond aux densités de courant inconnues, et B est un vecteur de dimension égale au nombre de capteurs.

Nous avons établi précédemment que les distributions de courant non uniformes sont indésirables. Pour voir leurs effets sur le champ magnétique, il serait intéressant de décomposer une distribution de courant donnée en :

- une distribution de courant homogène (mode commun correspondant au mode de fonctionnement idéal),
- une distribution de courant hétérogène (mode différentiel correspondant au mode de fonctionnement indésirable) dont la moyenne est nulle.

L'étude menée précédemment par [Le Ny, thèse 2012] a permis de mettre en évidence la principale caractéristique des champs magnétiques générés par une pile à combustible (en couplant le modèle magnétique avec le modèle électrocinétique) : le champ magnétique généré par les inhomogénéités de courant est très faible comparé aux champs magnétiques générés par un courant homogène. Pour des courants de mode commun et différentiel du même ordre de grandeur, le champ magnétique de mode commun est près de 15 fois plus intense que le champ de mode différentiel. La variation relative du champ magnétique est très faible en présence d'une distribution de courant non uniforme. Or le courant homogène peut être facilement mesuré par un ampèremètre (placé dans le circuit d'alimentation) sans aucune mesure du champ magnétique. Cela pose donc deux contraintes antagonistes pour les magnétomètres : être en mesure de ne pas saturer avec le champ de mode commun (quelques centaines de μT) et être suffisamment précis pour déceler les faibles variations de quelques μT correspondant aux non homogénéités de courant (champs différentiels). Une solution a été adoptée pour diminuer l'importance de ces contraintes. Elle sera décrite dans la prochaine section.

4.2. Emplacements et orientations des capteurs magnétiques

Le système de mesure utilisé dans notre travail est celui développé lors des travaux de thèse de M. Le Ny [Le Ny, thèse 2012]. Nous donnerons une brève description de ce dernier. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à sa thèse. Dans cette partie, nous nous intéressons aux choix de la structure des capteurs (nombre, emplacements, orientations) permettant de caractériser au mieux les champs magnétiques générés par les distributions de courants non uniformes. Dans notre travail, nous avons repris directement le système de mesure. Même si celui-ci a été conçu dans une optique de reconstruction de la densité de courant, nous nous proposons de l'utiliser dans notre approche de diagnostic.

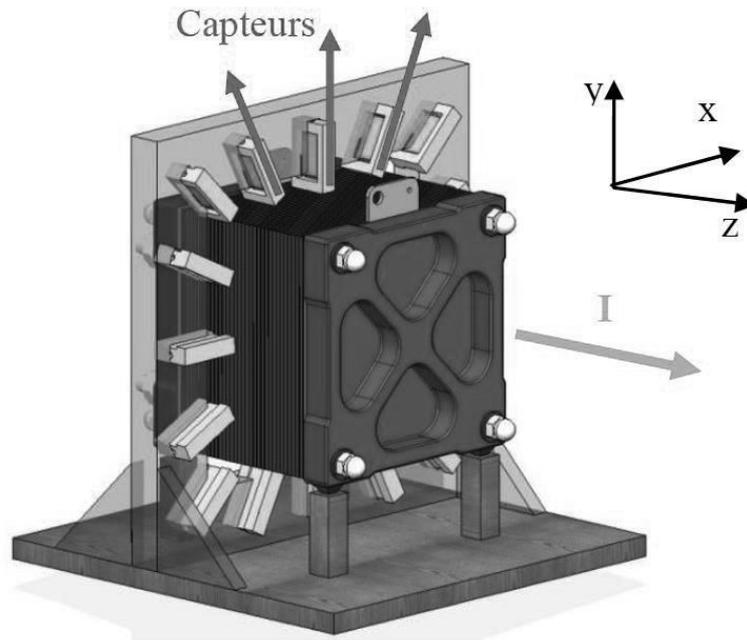


Figure III-5 : Pile à combustible et système de capteurs fixés autour de celle-ci

4.2.1. Emplacements des capteurs

Nous avons vu au chapitre précédent dans la section mesures qu'il existe dans la littérature des systèmes de mesure pour lesquels l'acquisition du champ magnétique rayonné par un stack peut prendre jusqu'à quinze minutes. Cependant, la pile à combustible peut voir son comportement (distribution de courant) évoluer entre le début et la fin de l'acquisition. Pour éviter cela, le choix d'une structure fixe supportant des capteurs autour de la pile permet d'acquérir simultanément les signaux magnétiques. Cela permet d'obtenir de manière quasi-instantanée le champ magnétique généré par la pile. La seule limitation peut provenir de la fréquence de coupure des capteurs (800 Hz avec la technologie fluxgate employée) et/ou du temps de traitement pour obtenir la moyenne temporelle des mesures pour filtrer le bruit. Malgré la perte d'information occasionnée par ce choix, l'instrumentation du système magnétique s'en trouve simplifiée.

4.2.2. Orientations

Nous avons vu précédemment que les courants du mode différentiel signent moins sur les capteurs (modifient peu le champ magnétique). M. Le Ny a choisi d'orienter les capteurs mono-axes de manière à ce qu'ils soient insensibles au champ magnétique de mode commun. La contrainte sur la gamme minimale de 750 μT disparaît et peut être réduite à 200 μT . Il devient alors possible d'utiliser des capteurs plus conventionnels présentant une précision accrue sur cette gamme de 200 μT .

Pour rendre le système insensible au courant de mode commun, il faut choisir les orientations des capteurs mono-axes (Figure III-6, flèche rouge) de manière à ce que le champ magnétique soit égal à zéro pour une distribution de courant uniforme et invariante suivant l'axe Z (même distribution de courant pour toutes les cellules). Pour cela, il faut d'abord calculer le champ magnétique pour une distribution uniforme numériquement. Les orientations des capteurs sont ensuite choisies de manière à ce que celles-ci soient perpendiculaires au champ magnétique calculé. Le principe est illustré sur la Figure III-6.

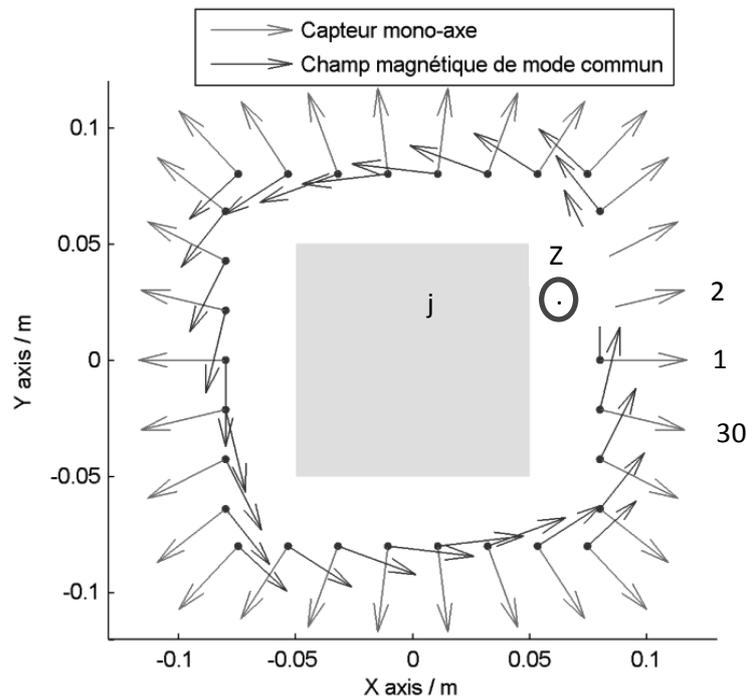


Figure III-6 : Champ magnétique du mode commun (bleu) et orientation des capteurs mono-axes (rouge) pour le stack GENEPAC [Le Ny, thèse 2012]

4.2.3. Nombre et localisations

La conception du système de mesures nécessite encore de choisir les emplacements des capteurs mono-axes. Les capteurs ont été placés le plus près possible des bords de la pile en raison de la décroissance très rapides du champ magnétique avec l'éloignement des sources. Une étude de sensibilité [Le Ny, thèse 2012] a été faite pour observer les emplacements où les capteurs sont les plus sensibles aux variations de courant. Il a constaté que les capteurs situés au milieu de chaque arête sont beaucoup plus sensibles que ceux situés sur les coins de la pile. Il a donc placé plus de capteurs au milieu des arêtes. Au final, il a défini l'emplacement des capteurs de manière à privilégier la sensibilité du système de mesure dans une optique de reconstruction des densités de courant. Le réseau de capteurs choisi est illustré sur la figure (Figure III-7).

Le nombre de capteurs a été choisi en fonction de la place disponible autour de la pile, de l'encombrement des capteurs et du nombre de mesures suffisantes pour pouvoir résoudre le problème inverse lors des travaux de thèse de Le Ny [Le Ny, thèse 2012]. Ce nombre est de 24 pour le stack GESI et de 30 pour le stack GENEPAC (PSA).

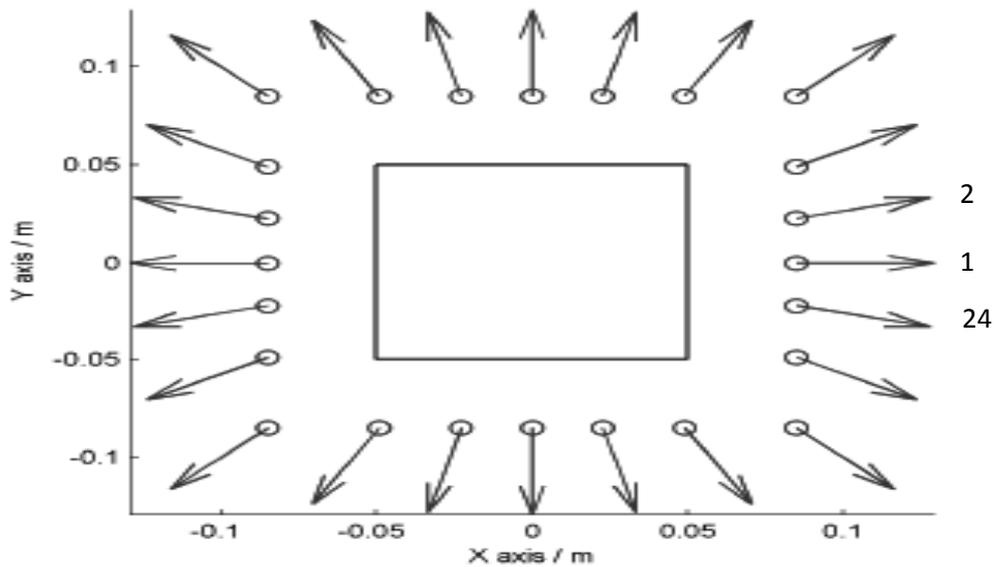


Figure III-7 : Contour de la zone active de la pile (en noir) et réseau de capteur utilisé pour le stack GESI numérotés de 1 à 24 [Le Ny, thèse 2012] (en bleu : orientation des capteurs).

4.3. La composante suivant l'axe z

Dans ces travaux [Le Ny, thèse 2012] fait l'hypothèse que les densités de courant sont invariantes suivant l'axe z. Cependant, certains types de modes de fonctionnement vont induire des densités de courant qui ne sont pas similaires au niveau des cellules du stack en raison des conditions thermiques, fluidiques et hydriques qui peuvent être différentes. L'invariance selon z n'est donc pas toujours respectée même à l'intérieur du stack. Dans le cas où les densités de courant sont invariantes suivant z, le champ magnétique perçu par la composante z (composante B2 sur la Figure III-8) est nul. Cela s'explique par le fait que le réseau de capteur est placé au milieu du stack : la composante générée par les cellules situées à gauche du réseau de capteur (Figure III-8) est compensée par celle générée par les cellules situées à droite. Dans le cas contraire, le champ magnétique n'est pas nul. Dans notre travail, nous prendrons aussi en considérations cette composante.

Dans la suite de ce travail, nous appellerons B1 la composante insensible au mode commun, et B2 la composante sensible aux variations de la densité de courant suivant z .

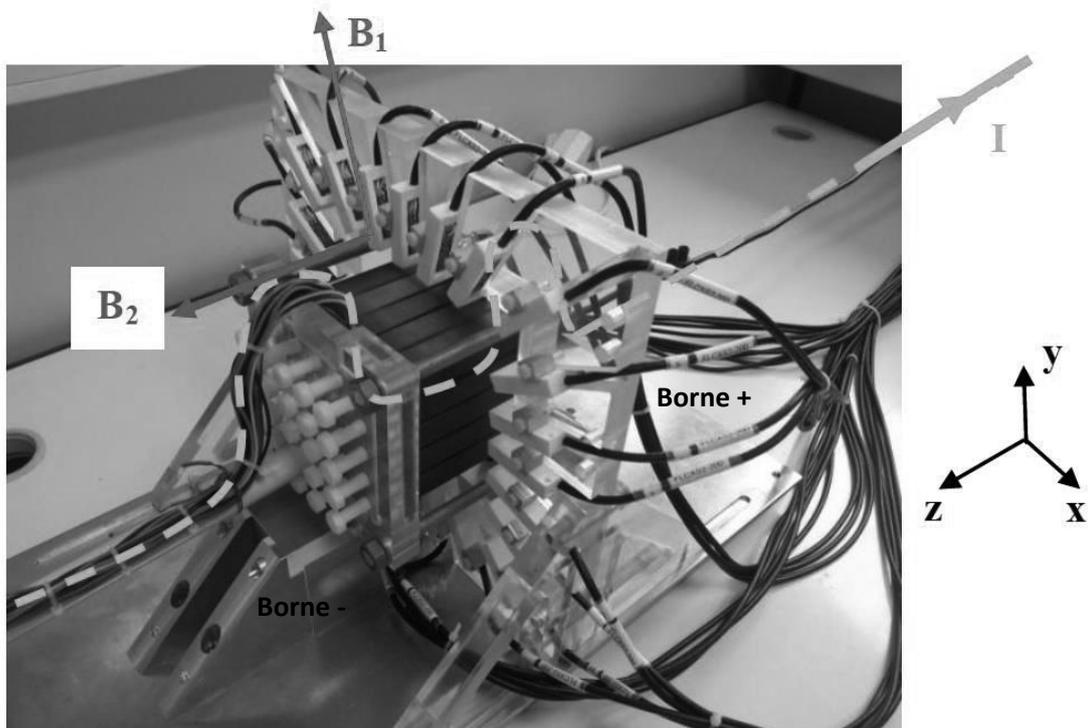


Figure III-8 : Pile étalon, magnétomètres et leurs supports. Le trajet du courant principal est représenté en vert. Des capteurs bi-axes (composantes rouge et bleue) sont fixés sur le support transparent. Les deux composantes (rouge et bleue) seront utilisées pour détecter des hétérogénéités le long du stack [Le Ny, thèse 2012]

5. Signatures magnétiques

Nous avons mis en évidence au paragraphe 2 que des modes de fonctionnement induisaient des distributions de courant non uniformes spécifiques. A l'aide du modèle magnétique direct, nous montrons dans cette section l'existence de signatures magnétiques caractéristiques à des distributions de courant non uniformes particulières. En s'inspirant des distributions de courant non uniformes trouvées dans la littérature [Hauer et al., 2005], [Le Ny, thèse 2012], nous générons des familles de distributions de courant non uniformes et nous montrons l'existence de signatures magnétiques externes caractérisant ces familles.

Les simulations ont été effectuées sur une pile ayant les dimensions du stack GESI (stack constitué de 16 cellules, la section de chaque cellule est de $0,1 \times 0,1 \text{ m}^2$). Pour ce faire, on utilise le modèle magnétique direct discrétisé pour évaluer le champ magnétique aux emplacements des capteurs. Pour générer des distributions de courant représentatives d'une même famille, nous avons fait le choix de décrire chaque famille avec seulement deux valeurs de densités de courant : une valeur élevée et une autre faible. De plus nous faisons l'hypothèse que pour un même type de distribution de courant ces configurations appartiennent à la même famille quelles que soient l'étendue de la surface à faible densité de courant et l'amplitude entre les deux valeurs de densité de courant. Pour illustrer cela, nous prenons une distribution de courant à deux régions avec trois étendues de surface différentes :

Cas 1 : la densité de courant faible est contenue par 80 % de la surface de la cellule

Cas 2 : la densité de courant faible est contenue par 60 % de la surface de la cellule

Cas 3 : la densité de courant faible est contenue par 40 % de la surface de la cellule

Il est inutile de créer des amplitudes différentes car les données de champs magnétiques sont proportionnelles aux amplitudes des densités de courant. Ces cas sont simulés et une normalisation de ces mesures par rapport au maximum en valeur absolue du champ magnétique permet d'extraire une signature magnétique correspondant à une famille de distribution de courant.

5.1. Forte densité de courant à l'entrée de l'air

La première simulation effectuée porte sur les distributions de courants qui pourraient être induites par une diminution de la stœchiométrie de l'air [Le Ny, thèse 2012]. La diminution de la stœchiométrie de l'air induit une augmentation de la densité de courant à l'entrée des gaz (zone en jaune de la Figure III-9). Nous avons repris la même valeur de l'évolution de la densité de courant qui est de l'ordre de $0,15 \text{ A.cm}^{-2}$. Les orientations de champ magnétique illustrées sur la Figure III-9, sont à peu près similaires pour les trois cas étudiés. La longueur des flèches représente l'amplitude.

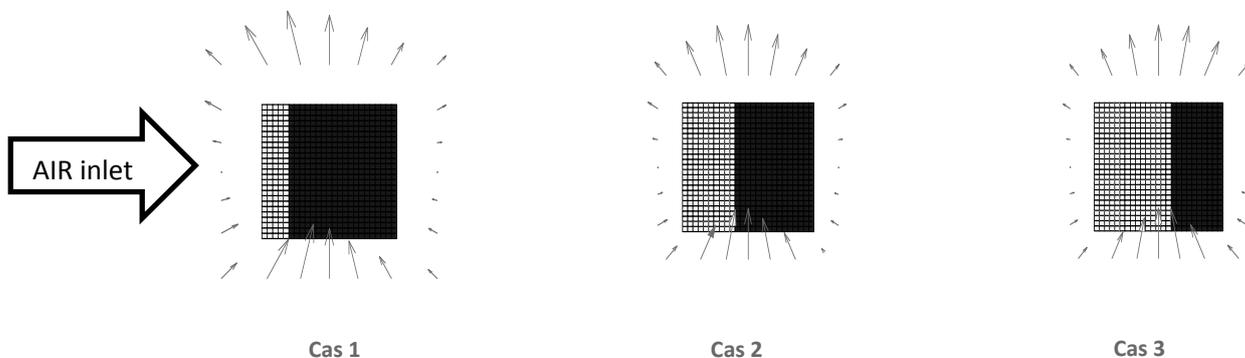


Figure III-9 : Configurations de la densité de courant (jaune : densité de courant élevée, bleu : densité de courant faible)

La Figure III-10 illustre le champ magnétique généré par les trois cas étudiés : sans normalisation (figure de gauche), les données de champ magnétique représentées ont la même forme avec quelques différences ; en normalisant (figure de droite), on peut dire que la signature est la même pour les trois cas. Cette signature magnétique qui caractérise cette famille pourrait correspondre à une diminution de la stœchiométrie de l'air.

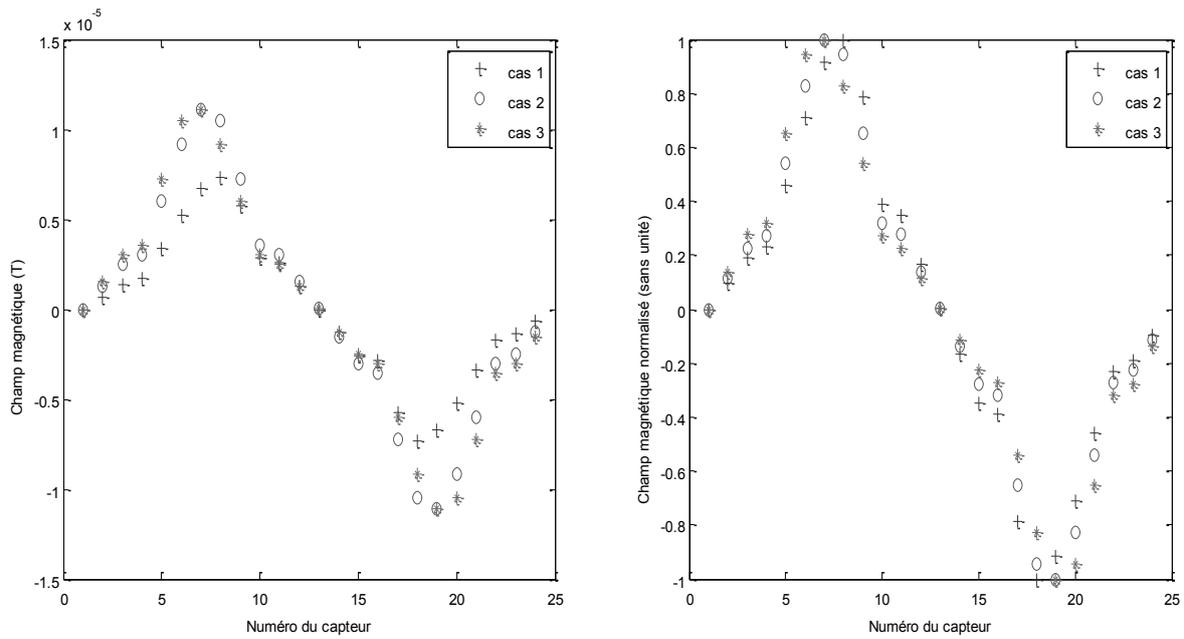


Figure III-10 : Champ magnétique perçu par les capteurs. A gauche : sans normalisation, à droite : avec normalisation

5.2. Faible densité de courant à l'entrée de l'air

La seconde simulation porte sur une distribution de courant induite par une augmentation de la stœchiométrie de l'air [Hauer et al., 2005]. L'augmentation de la stœchiométrie de l'air induit une augmentation de la densité de courant à la sortie des gaz (zone en bleu Figure III-9). Pour les simulations, nous reprenons la même configuration donnée dans la Figure III-9, par contre ici la densité de courant élevée se trouve à la sortie des gaz. Nous avons aussi repris la même valeur de l'évolution de la densité de courant évaluée à $0,1 \text{ A.cm}^{-2}$.

La Figure III-11 illustre les données de champ magnétique pour les trois cas simulés. Nous constatons là aussi que l'allure décrite par les données de champ magnétique est identique. Cette signature magnétique qui caractérise cette famille pourrait correspondre à une augmentation de la stœchiométrie de l'air.

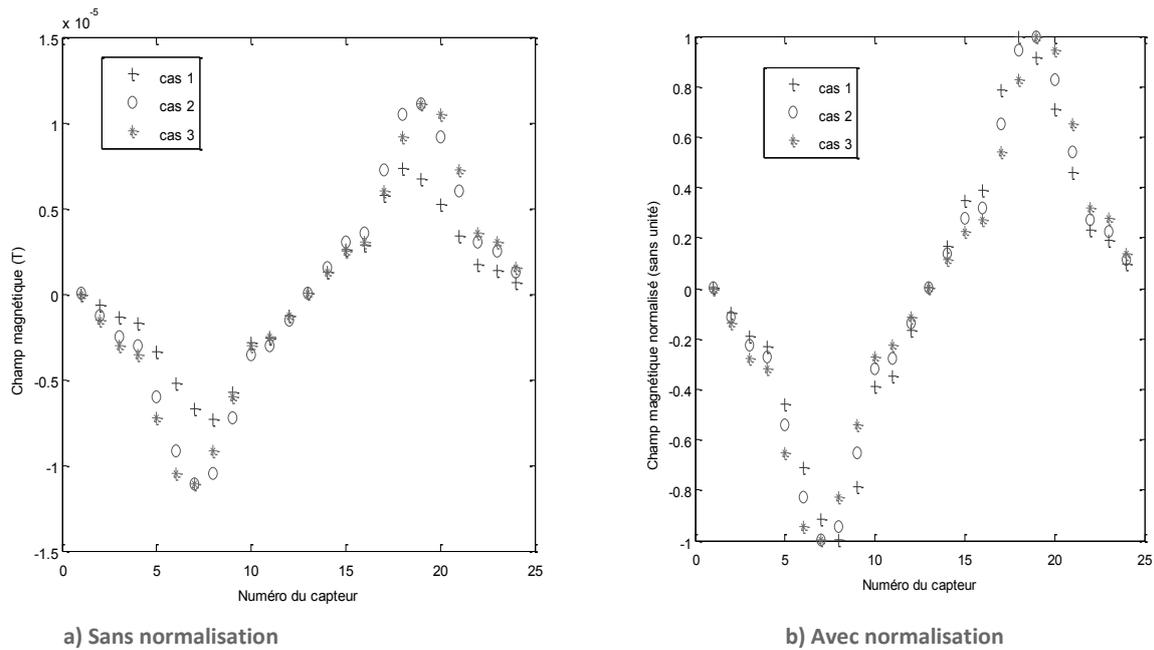


Figure III-11 : Champ magnétique perçu par les capteurs

5.3. Faible densité de courant au niveau d'un quadrant

La troisième simulation porte sur les distributions de courants qui pourraient être induites par exemple par une diminution de l'humidité relative de l'hydrogène [Hauer et al., 2005]. L'entrée de l'hydrogène de la pile à combustible étudiée se situe au coin inférieur gauche correspondant à la région bleue de la Figure III-12. Trois configurations ont été choisies pour décrire l'effet de la diminution de l'humidité de l'hydrogène comme l'illustre la Figure III-12. Nous avons aussi repris la même valeur de l'évolution de la densité de courant qui est de l'ordre de $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$.

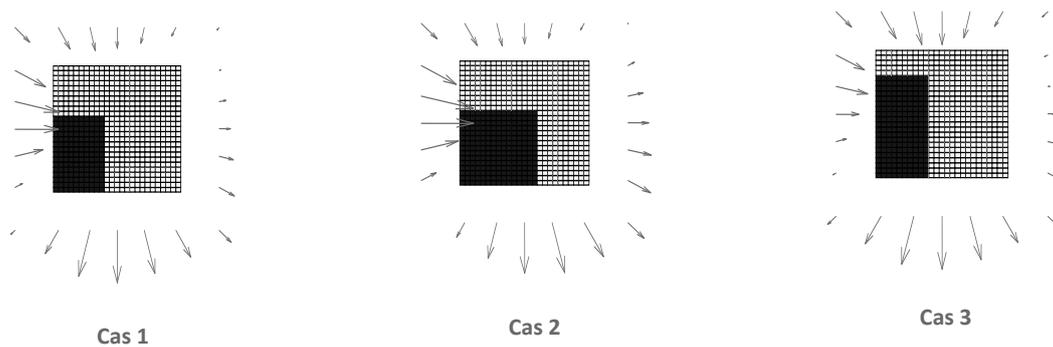


Figure III-12 : Configurations à faible densité de courant à l'entrée de l'hydrogène d'une pile à combustible

La Figure III-13 illustre les données de champ magnétique pour les trois cas simulés. Nous constatons, là aussi, que l'allure décrite par les données de champ magnétique est identique. Cette signature magnétique qui caractérise cette famille pourrait correspondre à une diminution de l'humidité relative de l'hydrogène.

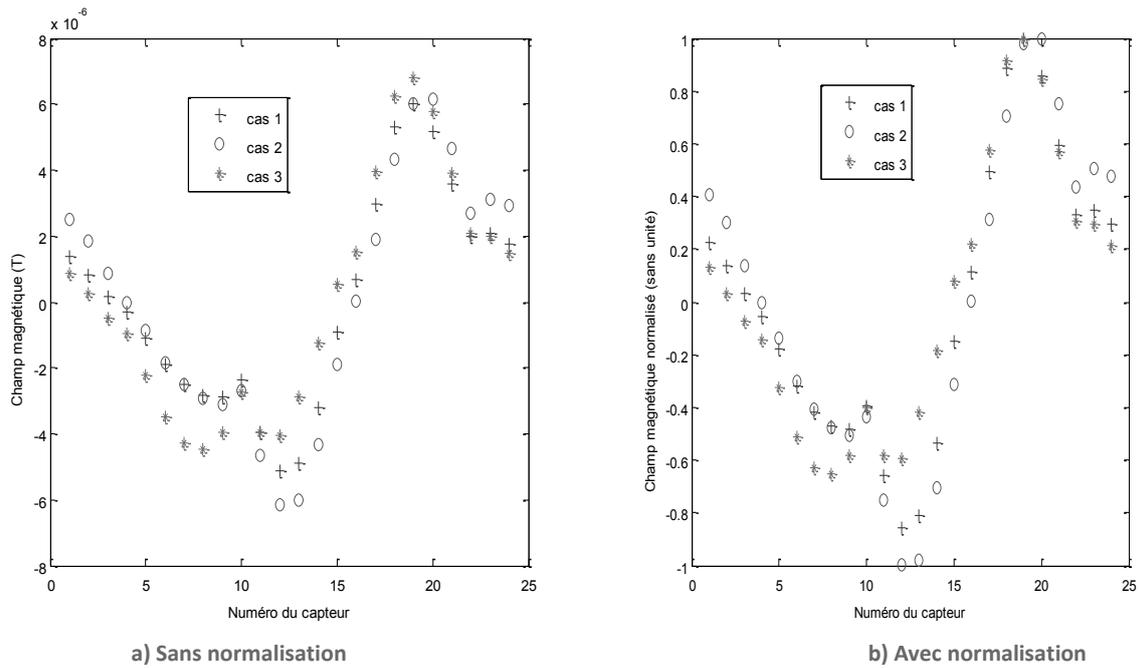


Figure III-13 : Champ magnétique perçu par les capteurs

Dans les trois cas étudiés, nous voyons clairement qu'une seule signature peut caractériser chaque famille de distributions de courant. En réalité, la distribution de courant est une variable distribuée qui peut prendre une infinité de configurations. Dans le cas où les différents modes de fonctionnement et/ou les changements dans les conditions opératoires se manifestent de façons distinctes sur la distribution de courant, la signature magnétique peut être un bon moyen de diagnostic en plus de la capacité de remonter aux performances locales. Bien entendu, les données de champ magnétique présentent la même allure mais numériquement ces données sont différentes et peuvent être également exploitées dans le cas où cela est nécessaire.

6. Espace de représentation du fonctionnement indésirable de la PAC

Nous avons vu précédemment la pertinence des signatures magnétiques correspondant à certaines familles de distributions de courant. Pour faire du diagnostic via la distribution de courant, deux options s'offrent à nous. La première consiste à reconstruire la densité de courant pour réaliser le diagnostic. Si cette reconstruction est réalisée par l'inversion du modèle magnétique, cela passe par la résolution d'un système mal conditionné (inversion d'une matrice mal conditionnée) et ne correspond pas à nos objectifs. Ce problème, déjà mentionné au chapitre II, a fait l'objet des travaux de M. Le Ny [Le Ny, thèse 2012]. La deuxième option consiste à faire du diagnostic en traitant directement les mesures de champ magnétique récupérées au niveau du réseau de capteur. Ceci peut être réalisé en utilisant la propriété de signature magnétique externe présentée au paragraphe précédent.

Dans ce paragraphe, nous allons construire des signatures magnétiques spécifiques (prototypes ou individus) mais qui ne représentent pas forcément des signatures correspondant à tel ou tel défaut. Dans ce qui suit, une base correspond à un prototype. Les bases construites constituent un espace de représentation du fonctionnement indésirable de la pile à combustible. Chaque base contenant des données de champ magnétiques est une image d'une distribution de courant spécifique, ce qui

facilitera énormément l'interprétation des résultats qui seront obtenus par nos outils de diagnostic qui seront établis dans les chapitres suivants. Dans ce qui suit, nous montrons comment construire ces bases.

6.1. Formulation du problème

Nous avons vu dans la section précédente qu'il existe des signatures magnétiques correspondant à certaines familles de distribution de courant. Or ces signatures magnétiques sont l'image de signature de distribution de courant, cela revient à dire que nous pouvons caractériser les signatures magnétiques à travers la caractérisation de la distribution de courant. L'information disponible au niveau des capteurs magnétiques pourra alors être traitée directement tout en ayant une idée de la distribution de courant à l'intérieur de la pile, ce qui facilite énormément l'interprétation des résultats. Dans ce qui suit, nous cherchons un espace de représentation du champ magnétique qui servira par la suite de modèle de référence du fonctionnement indésirable de la pile à combustible (distribution de courant non homogène).

Les bases représentant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible vont contenir des données de champs magnétiques, générés par des distributions de courant particulières prédéfinies. Pour cela, nous avons besoin de quelques définitions :

- Zone : un espace délimité de la section de la pile,
- Région : une zone ou ensemble de zones,
- Région hétérogène : une zone ou ensemble de zones qui possède des densités de courants plus faibles que les autres régions,
- Région homogène : une zone ou ensemble de zones qui possède une seule densité de courant pour toute la région,
- Degré d'hétérogénéité : la différence entre la densité de courant la plus élevée et la plus faible. En raison de la linéarité du champ magnétique, les données de champ magnétique perçues par le réseau de capteurs sont proportionnelles au degré d'hétérogénéité pour un cas donné.

La prochaine étape consiste à construire les bases à travers une représentation de la distribution de courant

6.2. Construction des bases

Pour construire les bases, on considère que la section de la pile peut être divisée en deux régions, et que chacune des deux régions étant homogène, cela revient à dire que deux valeurs de densité de courant sont considérées : une seule densité de courant faible pour une région qu'on notera (L) et une seule valeur de densité de courant élevée pour l'autre région qu'on notera (H).

Pour construire les bases, nous considérerons aussi que la densité de courant est invariante suivant l'axe z dans le repère (x, y, z) . Ce qui revient à dire que la composante B_2 (voir la Figure III-8) est nulle. Par conséquent la représentation du champ magnétique se fera avec la composante B_1 uniquement.

Pour chaque stack, il faut construire ses propres bases en fonction du nombre des cellules qui le constitue et de ses dimensions. Dans cette section, nous caractériserons le stack du LEPMI (stack GESI). Le nombre de capteurs placés autour de la pile est de 24.

L'objectif est de choisir un nombre optimal de zones principales de tel sorte que le champ magnétique généré par chaque zone soit décorrélié de celui généré par les autres.

6.2.1. Bases à partir de six zones principales

D'un point de vue de la distribution de courant, plus le nombre de zones est important, plus la caractérisation et l'analyse des performances locales de conversion sera fine. L'utilisation d'une méthode invasive rendrait facile et réalisable une telle analyse. La première tentative sur laquelle nous sommes partis est la subdivision de la section de la pile à combustible en six (Figure III-14).

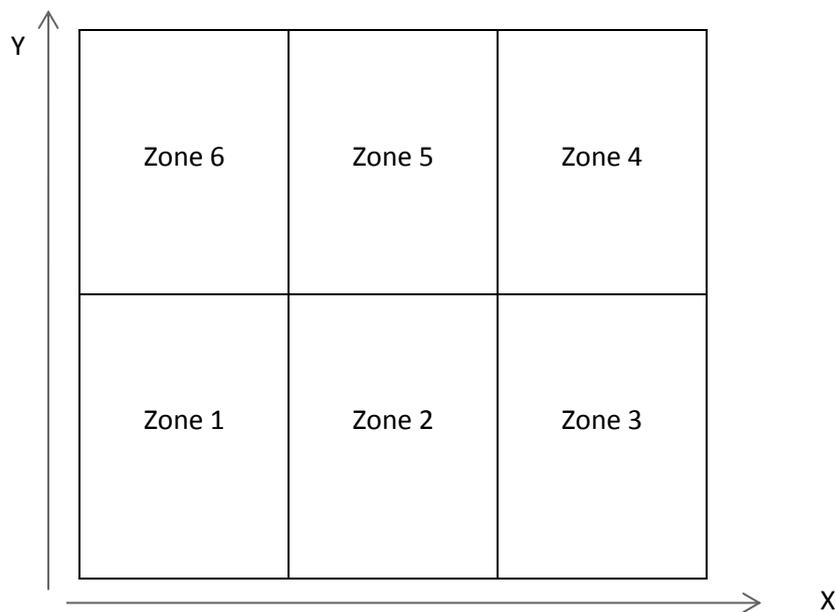


Figure III-14 : Subdivision de la section de la pile en 6 zones principales

Or nous avons constaté que les densités de courant situées dans les zones au milieu de la section de la pile à combustible signifient beaucoup moins que les zones situées aux extrémités de la pile à combustible du fait de la décroissance rapide des champs magnétiques.

Il est aussi important de souligner le fait qu'il existe des corrélations entre le champ magnétique généré par la zone 2 et celui généré par la zone 1 ou 3, ou bien entre le champ magnétique généré par la zone 5 et celui généré par la zone voisine 4 ou 6. Ces corrélations rendent difficile l'exploitation et l'interprétation des résultats issus des six bases. A cela s'ajoute le fait que des combinaisons de ces zones seront nécessaires pour la construction de nouvelles bases pour mieux caractériser la distribution de courant. La combinaison de zones est nécessaire pour prendre en considération le fait qu'il puisse exister plus de deux régions à densité de courant différentes.

6.2.2. Bases à partir de quatre zones principales et de trois zones principales

En se basant sur les observations précédentes (existence de corrélations, nombre important de combinaisons), nous proposons de subdiviser la section de la pile à combustible en quatre zones principales (Figure III-15). En pratique, chaque zone correspond à une entrée ou à une sortie d'un gaz suivant les différentes technologies des piles à combustible. Par conséquent, cela facilitera énormément l'interprétation des paramètres qui vont être extraits à partir des bases, en particulier, pour l'interprétation et la caractérisation de l'effet des conditions opératoires sur la distribution de courant. Cependant nous verrons plus loin qu'il est intéressant de compléter ces subdivisions par une subdivision en trois zones.

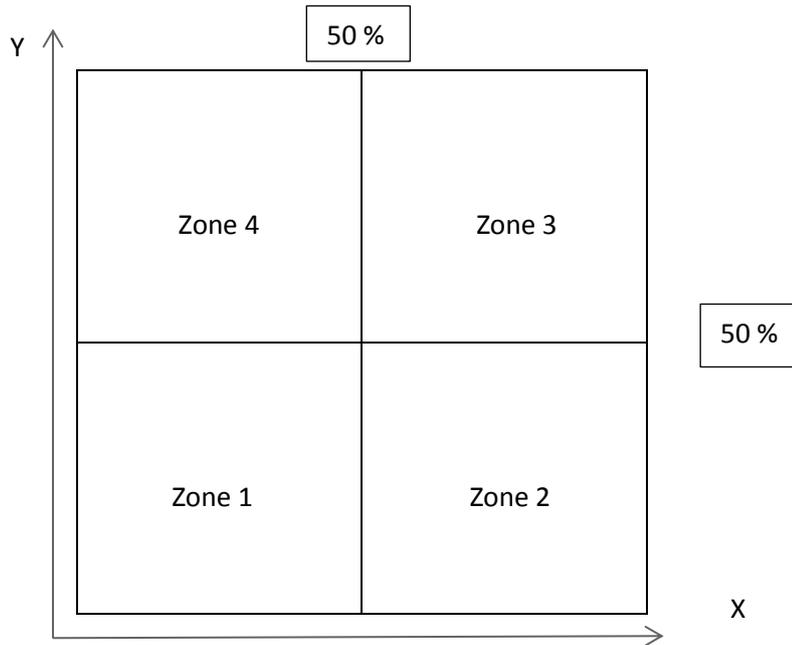


Figure III-15 : Définition des zones principales au niveau de la section de la pile à combustible

A partir de la définition des zones principales, nous pouvons procéder à la construction des bases. Le Tableau III-1 donne la configuration des quatre premières bases construites en se basant sur des distributions de courant ayant une seule zone à faible densité de courant homogène (notée L pour Low), les autres zones ayant une seule valeur de densité de courant élevée (notée H pour High) et une répartition homogène.

Tableau III-1 : Les quatre bases principales

Numéro de la base	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
1	L	H	H	H
2	H	L	H	H
3	H	H	L	H
4	H	H	H	L

Les bases sont des vecteurs colonnes ($X(j) \in \mathcal{R}^{N_{bs}}$) définis comme suit :

$$X_j = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_{N_{bs}}]^T \quad j=1 : N \quad (\text{Eq III-11})$$

Tel que x_i représente la composante B1 du champ magnétique du capteur numéro i , j représente le numéro de la base, N le nombre de bases et N_{bs} représente le nombre de capteurs installés autour de la pile à combustible ($N_{bs}=24$).

Pour obtenir la base finale qui ne dépend pas du degré d'hétérogénéité, les données du champ magnétique doivent être normalisées comme suit :

$$\bar{X}_j = \frac{X_j}{\max|x_i|} \quad (\text{Eq III-12})$$

Avec cette normalisation, toutes les données vont être comprises entre -1 et 1. La Figure III-16 illustre les quatre premières bases construites pour le stack GESI.

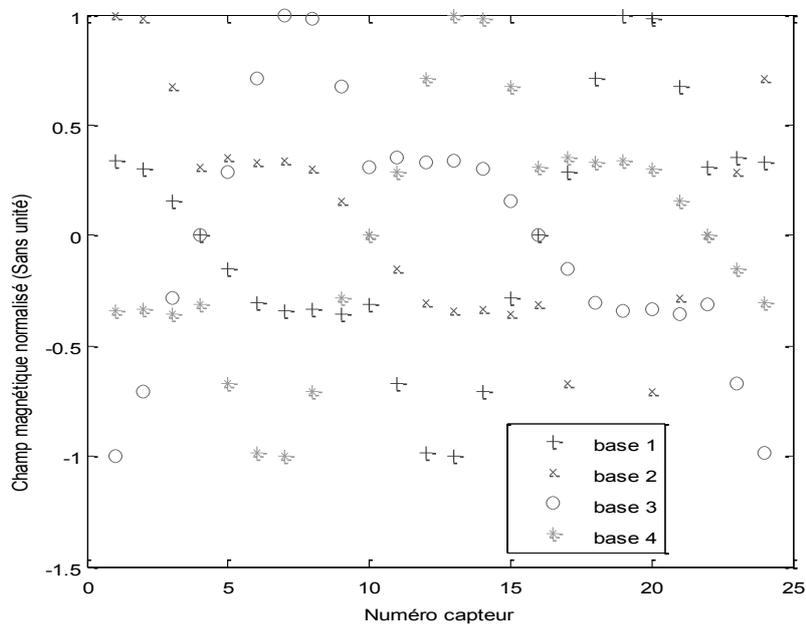


Figure III-16 : Les données de champ magnétiques pour les quatre bases principales après normalisation

Maintenant, si on part de l'idée que chaque zone peut avoir une densité de courant homogène, il va y avoir plusieurs niveaux d'hétérogénéités (plusieurs régions de densité de courant). Un moyen de représenter ces types de répartition d'hétérogénéités est de rajouter deux autres types de bases. Le premier type comprend deux zones voisines ayant une densité de courant homogène faible, et les deux autres zones voisines avec une densité de courant homogène élevée comme l'illustre le Tableau III-2

Tableau III-2 : Bases avec deux zones adjacentes

Numéro de la base	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
5	L	H	H	L
6	H	L	L	H
7	L	L	H	H
8	H	H	L	L

Le deuxième type comprend trois zones de densité de courant homogène faible, et l'autre zone avec une densité de courant homogène élevée. La Figure III-3 illustre ce type de bases.

Tableau III-3 : Bases avec deux trois zones adjacentes

Numéro de la base	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
9	H	L	L	L
10	L	H	L	L
11	L	L	H	L
12	L	L	L	H

Les douze bases ainsi construites sont de bonnes candidates pour représenter les distributions de courant qui peuvent se produire au niveau de la pile. Cependant, s'il existe des régions hétérogènes aux extrémités de la pile, les douze bases représentent mal ces configurations. C'est pourquoi nous avons rajouté quatre autres bases pour compléter les précédentes. Les deux premières bases concernent des régions d'hétérogénéités suivant l'axe Y (Figure III-17).

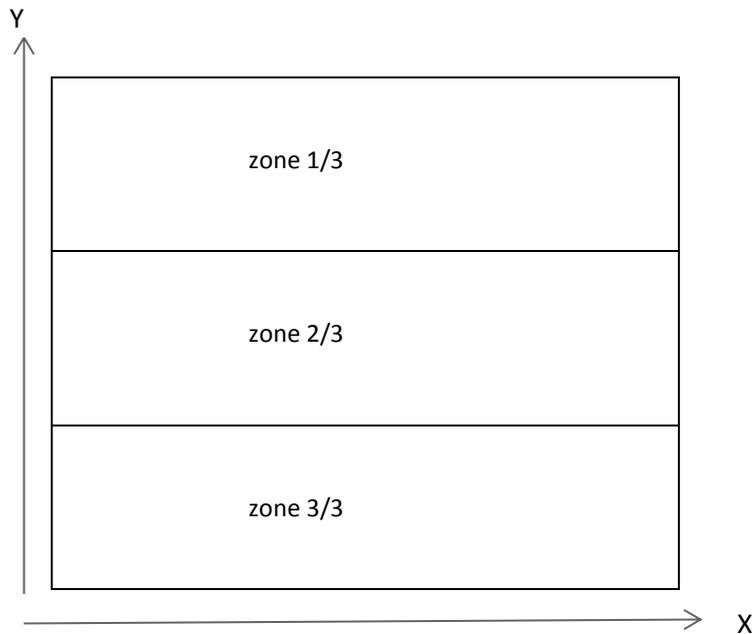


Figure III-17 : Définition des zones pour les régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe Y

Les hétérogénéités suivant l'axe Y sont illustrées dans le Tableau III-4 :

Tableau III-4 : Régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe x

Numéro de la base	zone 1/3	zone 2/3	zone 3/3
13	L	H	L
14	H	L	H

On peut également rajouter d'autres régions d'hétérogénéités suivant l'axe X comme l'illustre la Figure III-18.

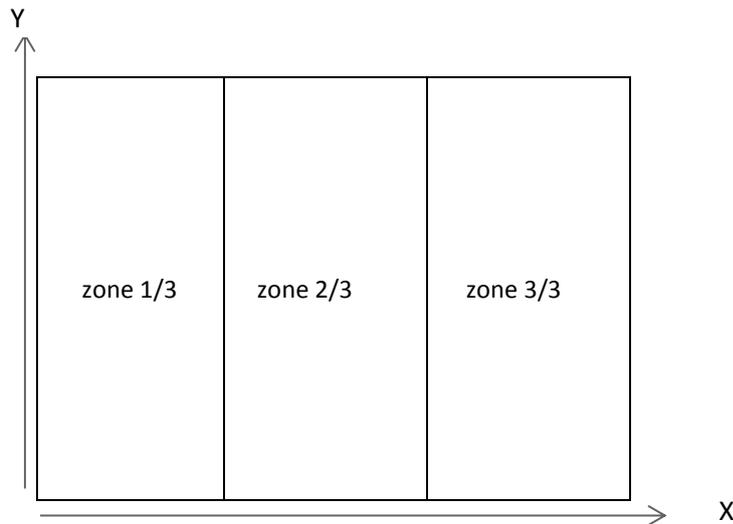


Figure III-18 : Définition des zones pour les régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe X

Les hétérogénéités suivant l'axe X sont illustrées dans le Tableau III-5 :

Tableau III-5 : Régions d'hétérogénéités aux extrémités suivant l'axe Y

Numéro de la base	zone 1/3	zone 2/3	zone 3/3
15	L	H	L
16	H	L	H

Dans cette section, nous avons construit des bases qui peuvent être utilisées pour caractériser le fonctionnement indésirable de la pile à combustible au niveau du champ magnétique. Bien entendu, la caractérisation proposée n'est valable que pour des distributions de courant à basses fréquences spatiales, mais en se basant sur les distributions de courant que nous trouvons dans la littérature cela est acceptable.

Dans cette caractérisation, nous avons utilisé uniquement les composantes B1 pour caractériser le fonctionnement indésirable de la pile à combustible en considérant les densités de courant invariantes suivant l'axe z (les composantes B2 sont nulles dans ce cas). Dans le chapitre suivant, on définira u comme étant le vecteur comportant toutes les composantes B₁, et w le vecteur comportant toutes les composantes B₂. Nous montrerons comment on peut utiliser les bases construites avec la composante u pour traiter la composante w.

7. Formulation du problème de diagnostic à partir des bases construites

Nous disposons maintenant de tous les outils nécessaires pour poser le problème de diagnostic. Le fonctionnement indésirable peut être défini comme étant un fonctionnement à densité de courant hétérogène. Dans la réalité, la distribution de courant ne peut pas être parfaitement homogène même en fonctionnant à conditions opératoires optimales du fait de la construction de la pile à combustible et de la distribution non uniforme des gaz au niveau des cellules. Il faudra donc en tenir compte dans l'élaboration de la méthode de diagnostic.

Au niveau du stack, les défauts sont définis comme étant toute évolution de la densité de courant par rapport à une densité de courant de référence prédéfinie, d'une autre manière, c'est toute évolution du champ magnétique rayonné par la pile par rapport à un champ magnétique de référence prédéfini. Au niveau des sous-systèmes, les défauts sont définis comme étant toutes évolutions des conditions opératoires par rapport aux conditions de fonctionnement nominales.

L'outil de diagnostic consiste à :

Détecter des défauts :

Elle est assurée par le système de mesure (réseau de capteurs magnétiques) qui est sensible uniquement aux densités de courant non uniformes. Nous pouvons dire en quelque sorte qu'un résidu (vectoriel) a été conçu : lorsqu'il est nul, la distribution de courant est homogène, et lorsqu'il devient non nul, cela veut dire qu'on a une distribution de courant hétérogène. Or comme cela a été dit précédemment, même dans les conditions opératoires optimales, ce champ magnétique ne peut pas être nul. Nous définissons un résidu comme étant la différence entre le champ magnétique à un instant t , et le champ magnétique de référence correspondant au champ magnétique généré par la pile à combustible dans les conditions opératoires optimales définies par le constructeur.

$$R_B = B(t) - B_{référence} \quad (\text{Eq III-13})$$

Lorsque ce résidu (vectoriel) n'est pas nul, un défaut d'hétérogénéité est présent. Pour détecter les régions hétérogènes, nous nous intéresserons à leurs répartitions selon :

- La section du stack : on s'intéressera à la répartition de la densité de courant au niveau des régions étudiées. L'objectif est de localiser les régions qui possèdent les densités de courant hétérogènes au niveau de la section de la pile à combustible.
- La longueur du stack : l'intégration de plusieurs cellules provoque l'apparition de nouveaux phénomènes encore mal maîtrisés. Des états de fonctionnement différents peuvent alors apparaître suivant la position des cellules dans le stack : les cellules les plus proches de l'entrée des gaz, les dernières cellules (c'est-à-dire, les cellules proches de la sortie) et les cellules intermédiaires par exemple.

Dans notre travail, on s'intéressera à deux types de localisation :

1) Proche de la borne (-) (Figure III-8).

2) Proche de la borne (+) (Figure III-8).

Localiser des défauts :

Pour tenir compte des interactions entre le stack et les sous-systèmes alimentant le stack, pouvoir se prononcer sur l'origine de l'évolution de la distribution de courant peut être très intéressant pour l'outil de diagnostic et la compréhension des phénomènes mis en jeu :

- 1) Evolution liée au fonctionnement inhérent du système du fait que le système est non stationnaire,

- 2) Evolution liée au changement de l'une des conditions opératoires au niveau des sous-systèmes.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord montré l'existence de liens entre la distribution de courant non uniforme et les conditions opératoires sous lesquelles on fait fonctionner la pile à combustible. Nous avons aussi présenté le modèle électrocinétique qui permet de calculer les distributions de courants et de potentiels à partir de distributions de paramètres caractérisant le stack (conductivités, forces électromotrices, conditions aux limites). Le modèle magnétique direct qui permet de calculer le champ magnétique généré par une distribution de courant a été présenté. Le couplage de ces deux modèles permettra par la suite de simuler des distributions de courant non uniformes au niveau des cellules tout en prenant en compte les interactions électriques intervenant entre les cellules d'un même stack.

Nous avons montré l'existence de signatures magnétiques externes pour certaines familles de distributions de courant non uniformes. Ensuite, nous avons proposé un moyen permettant de caractériser le champ magnétique généré (bases) en subdivisant la distribution de courant en un ensemble de zones gérables. Ceci permet de caractériser le fonctionnement indésirable de la pile à combustible. La construction de l'ensemble de ces bases s'appuie uniquement sur les dimensions du stack (sans aucun paramètre électrique ou physique de la pile à combustible) et sur le modèle magnétique direct, ce qui rend cette méthode générique. Ensuite, nous avons formulé le problème de diagnostic qui sera développé dans les chapitres suivants.

IV. Caractérisation et diagnostic par génération de résidus

1. Introduction

A ce stade, les connaissances que l'on a de la pile à combustible sont sous forme de bases contenant des données de champ magnétique générées par des distributions de courant particulières. Ce modèle permet de représenter le fonctionnement indésirable de la pile à combustible.

Dans ce chapitre, à partir des bases construites, nous proposons d'établir un outil qui s'inspire des méthodes de diagnostic à base de modèles pour remonter à l'état interne de la pile à combustible, ou plus précisément aux performances de conversion énergétiques locales qui sont données par la distribution de courant. Cet outil basé sur la génération de résidus permet la détection des distributions de courant non uniformes sous forme de symptômes.

Une classification des hétérogénéités à partir des symptômes, s'affranchissant de la connaissance a priori des dysfonctionnements, est proposée. Les signatures de référence sont prédéfinies a priori pour caractériser le fonctionnement de la pile à combustible indépendamment de l'origine du fonctionnement indésirable.

Concernant la partie diagnostic des dysfonctionnements, nous montrerons comment les signatures de référence peuvent être utilisées comme un outil efficace dans le contexte de la détection et de l'isolation des défauts. Nous montrerons également qu'il est possible, à partir des symptômes extraits des composantes u et w du champ magnétique, de se prononcer sur la localisation des hétérogénéités le long du stack. Enfin, l'outil de diagnostic par génération de résidus est testé en simulation sur plusieurs exemples.

2. Principe de détection et de caractérisation de distribution de courant hétérogène par génération de résidus

Au chapitre II, nous avons présenté les méthodes de diagnostic à base de modèles qui s'appuient sur la notion de la redondance analytique en comparant le comportement attendu du système prédit par un modèle à celui observé par des capteurs. Toute différence entre les observations et les prédictions est interprétée comme la présence d'un ou de plusieurs défauts.

Dans ce travail, nous allons utiliser le principe d'établissement des résidus, mais l'interprétation va être différente. Le comportement du système observé par le réseau de capteurs est comparé aux différentes bases construites précédemment. Toute ressemblance entre une observation et une base donnée peut être interprétée comme la présence d'une hétérogénéité (faible densité de courant) dans la région décrite par cette base. Dans notre outil, les bases construites au chapitre III, en utilisant le modèle magnétique direct, ne représentent pas les classes d'un problème de reconnaissances de formes. Contrairement à ces méthodes, une observation peut appartenir à plusieurs bases.

Une fois les bases construites, la procédure de détection des hétérogénéités se fait en plusieurs étapes (Figure IV-1) :

- La génération des résidus : cette étape permet de comparer le fonctionnement réel du système aux fonctionnements indésirables du système en vue de déterminer la ressemblance entre le comportement du système et le comportement indésirable (les bases construites). Les résidus générés ne sont pas de type scalaire mais de type vectoriel.
- L'évaluation des résidus : ces derniers sont évalués à l'aide de seuils afin de générer des symptômes pour l'étape de décision.
- L'étape de décision a été conçue afin de ne pas nécessiter une connaissance a priori sur les types de dysfonctionnements pouvant affecter le système. A partir des symptômes, des signatures seront générées et comparées à des signatures de référence prédéfinies.

Ces étapes sont développées dans le reste du chapitre.

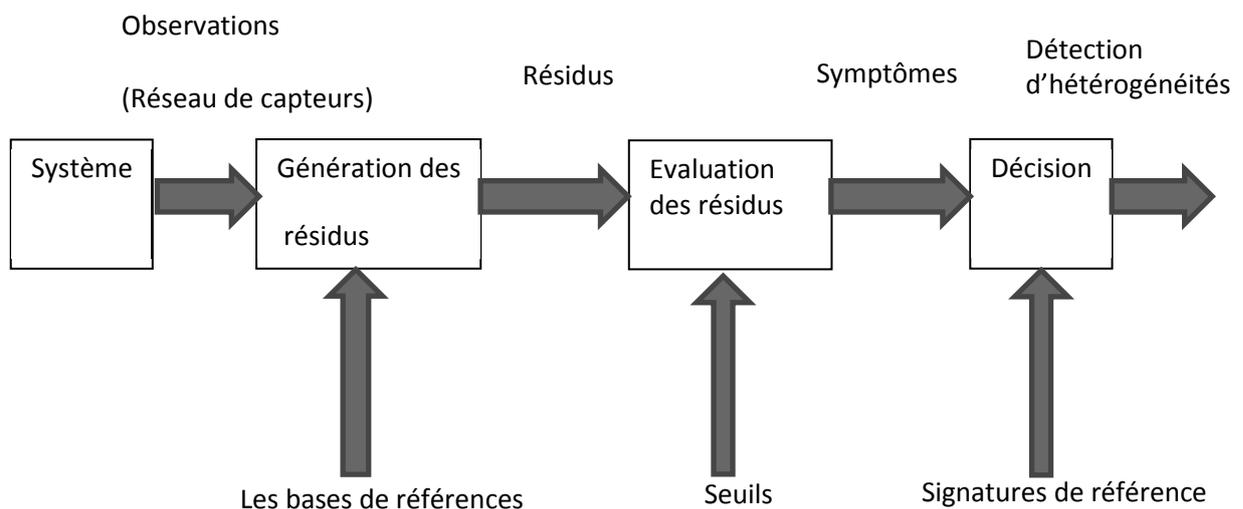


Figure IV-1 : Principe de la détection et de la caractérisation de distributions de densités de courant hétérogènes à partir des bases

2.1. Génération des résidus

Les bases construites au chapitre précédent vont être utilisées pour construire un modèle du fonctionnement indésirable de la pile à combustible. Ce modèle peut être représenté sous forme d'une matrice A (Eq IV.1) dans laquelle les vecteurs colonnes représentent les bases construites précédemment (Eq III-12). Les vecteurs colonnes (les bases) ne doivent pas être confondus avec les signatures des défauts que l'on veut détecter, ces vecteurs représentent un moyen de caractériser les distributions de courant hétérogènes.

$$A = [\bar{X}_1 \quad \bar{X}_2 \quad \dots \quad \bar{X}_j \quad \dots \quad \bar{X}_N]_{Nbs \times N} \quad j=1:N \quad (\text{Eq IV.1})$$

Considérons le vecteur Y des mesures acquises avec le réseau de capteur magnétique qui représentent les champs magnétiques perçus par les capteurs tel que y_i représente le champ magnétique (composante u) perçu par le capteur numéro i .

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_i \ \dots \ y_{Nbs}]^T \quad (\text{Eq IV.2})$$

Avant d'être comparées aux bases, les données doivent d'abord être normalisées :

$$\bar{Y} = \frac{Y}{\|Y\|_\infty} \quad \text{Avec } \|Y\|_\infty = \max_{i=1}^{i=Nbs} |y_i| \quad (\text{Eq IV.3})$$

Les résidus sont construits en faisant la différence entre les bases construites et les mesures disponibles sur le réseau de capteurs magnétiques (Eq IV.2) :

$$\mathbf{Mresidus} = [\bar{X}_1 - \bar{Y} \ \bar{X}_2 - \bar{Y} \ \dots \ \bar{X}_j - \bar{Y} \ \dots \ \bar{X}_N - \bar{Y}]_{Nbs \times N} \quad (\text{Eq IV.4})$$

Il faut noter que chaque résidu (Eq IV-5) est de type vectoriel. Les éléments de chaque résidu j vont être proches de zéro lorsque le vecteur mesure est proche de la base ayant servi à le construire et ils s'écartent de zéro lorsque le vecteur mesure s'éloigne de la base correspondante.

$$\mathbf{résidu}_j = [\bar{X}_j - \bar{Y}]_{Nbs \times 1}, j=1 : N \quad (\text{Eq IV.5})$$

2.2. Evaluation des résidus

Une fois les résidus générés, la deuxième étape consiste à les évaluer pour générer l'ensemble des symptômes nécessaires à la prise d'une décision. Dans un cas réel, il est évident qu'aucun résidu ne peut être nul car une mesure quelconque ne peut pas correspondre à l'une des bases construites. La principale difficulté de l'évaluation des résidus réside donc dans le calcul des seuils de détection. L'étape d'évaluation des résidus pour détecter les hétérogénéités de densité de courant (défauts d'hétérogénéité) est un problème de seuillage. Nous avons choisi de définir le seuil en fonction des dimensions du stack.

Afin de définir un seuil, nous nous sommes basés sur le cas de forte densité de courant à l'entrée des gaz (paragraphe III-5.1). Les cas suivant avaient été définis (Figure III-9) :

- Cas 1 : la densité de courant faible est contenue par 80 % de la surface de la cellule (pour les bases à 4 zones : toute la surface des deux zones 2 et 3 et une partie de la surface des zones 1 et 4).
- Cas 2 : la densité de courant faible est contenue par 60 % de la surface de la cellule (pour les bases à 4 zones : toute la surface des deux zones 2 et 3 et une partie de la surface des zones 1 et 4).
- Cas 3 : la densité de courant faible est contenue par 40 % de la surface de la cellule (pour les bases à 4 zones : une partie de la surface des zones 2 et 3).

Nous voulons définir la valeur du seuil de telle sorte que toutes les données de champ magnétique générées à partir de ces cas (Figure III-10) se trouvent dans une même enveloppe. Cette enveloppe peut-être définie à partir de la base 6, qui a une construction similaire : densité de courant faible

dans les zones 2 et 3 (50 % de la surface d'une cellule) et une densité de courant élevée dans la zone 1 et 4 (50 % de la surface d'une cellule).

La Figure IV-2 représente la base 6 et l'enveloppe qui est formée par les données représentées en rouge (o) et les données représentées en vert (*). Les données représentées en rouge sont obtenues par soustraction du seuil aux données de la base 6 et les données représentées en vert sont obtenues par addition du seuil aux données de la base 6. Le seuil qui permet de contenir toutes les données a été fixé à une valeur de $\tau=0.2$.

Le raisonnement effectué à partir de la base 6 est aussi transposable aux bases 5, 7 et 8 où l'on trouve le même seuil. Nous avons fait le choix d'étendre cette valeur à tous les résidus, ce qui simplifiera énormément le calcul par la suite.

L'étape d'évaluation des résidus consiste à transformer les éléments de chaque résidu en une série de 0 et de 1 en fonction de l'appartenance ou non des éléments d'un résidu à l'enveloppe définie par le seuil τ (Figure IV-2). Si l'élément i d'un résidu j est dans l'intervalle $[base\ j - \tau, base\ j + \tau]$, l'élément i du résidu j est remplacé par un 1, dans le cas contraire, l'élément est remplacé par un zéro (Eq IV.6).

$$M_{residu}[i,j] = \begin{cases} 1 & \text{si } |M_{residu}[i,j]| \leq \tau \\ 0 & \text{si } |M_{residu}[i,j]| > \tau \end{cases} \quad (\text{Eq IV.6})$$

Où $\tau=0.2$

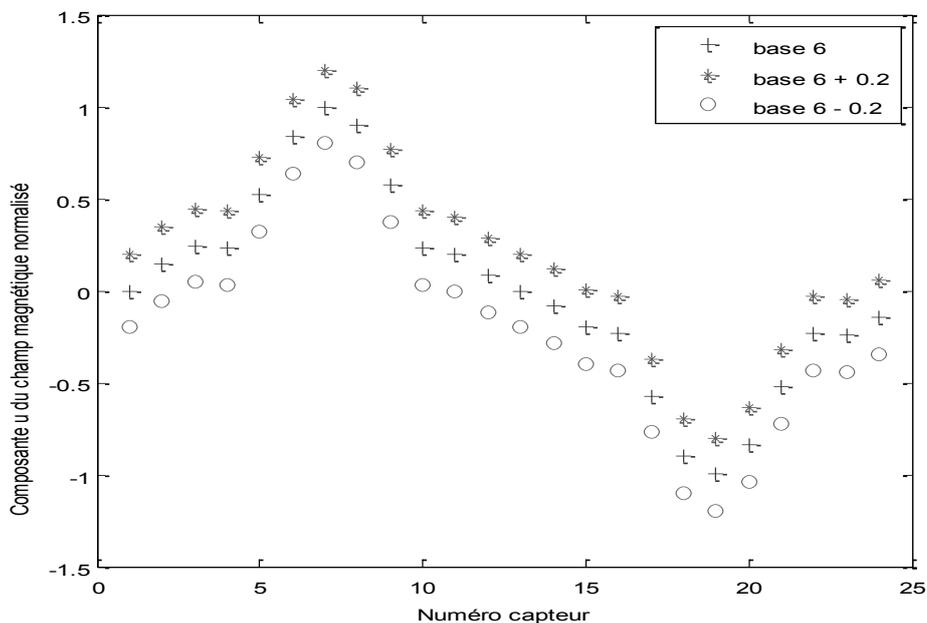


Figure IV-2 : Evaluation des résidus

Dans le but d'obtenir le symptôme j correspondant à base j , nous comptons le nombre de points qu'il y a à l'intérieur de l'enveloppe définie par le seuil. Nous effectuons la somme des éléments d'une colonne j correspondant au résidu j :

$$Symptome_j = \sum_{i=1}^{i=Nbs} M_{residu}[i,j] \quad j=1 : N \quad (\text{Eq IV.7})$$

Chaque symptôme a donc une valeur entre 0 et $Nbs=24$. Plus sa valeur est élevée, plus l'observation ressemble à la base.

2.3. Décision

A ce stade, pour une mesure donnée, nous disposons donc d'un ensemble de symptômes. La dernière étape est celle de la décision. Elle peut être divisée en deux sous-étapes :

- 1) La première sous-étape consiste à décider de la présence ou non d'une caractéristique (base) ou de plusieurs caractéristiques dans les mesures Y. Nous allons donc fixer un autre seuil, qui permet de décider de la présence ou non d'une base. Nous avons constaté qu'avec le seuil $\tau=0,2$, les symptômes qui représentent une seule zone à faible densité de courant ont une valeur supérieure à 9. Dans le cas précédent, les valeurs des symptômes 2 et 3 sont supérieures à 9 lorsque la zone correspondante (zone 2 et 3) ne comporte que des faibles densités de courant. Ce raisonnement se confirme avec des configurations proches des bases 5, 7 et 8. Pour le cas où la faible densité de courant est contenue par seulement 40 % de la surface des zones 2 et 3, les valeurs des symptômes 2 et 3 sont égaux à 7. De ce fait, nous avons choisi un autre seuil égal à 8 pour décider de la présence ou non d'une caractéristique (base) pour les douze premiers symptômes. Nous considérons qu'un symptôme est activé si sa valeur est supérieure à 8.

Ce seuil de 8 ne s'applique pas aux quatre derniers symptômes créés à partir de configurations particulières. C'est lorsque les douze premiers symptômes présentent des valeurs faibles que nous nous intéressons aux quatre derniers. Il est difficile de fixer un seuil pour les quatre derniers symptômes du fait de la complexité des zones. Après plusieurs essais, nous avons fixé leur seuil à 16.

- 2) La deuxième sous-étape consiste à définir des signatures de références et à faire correspondre à chaque mesure une des signatures de références. Les signatures de référence ont pour but de décrire qualitativement la répartition de la distribution de la densité de courant donnant les performances de conversion énergétique locales. Pour y arriver, des variables qualitatives sont définies :

- **G**: cette variable prend le numéro du symptôme ayant la valeur la plus élevée parmi les symptômes qui représentent trois zones à faibles densités de courant.

$$G = k: \max_k \left(\text{Symptome}_k \middle| \begin{matrix} k = 12 \\ k = 9 \end{matrix} \right) \quad (\text{Eq IV.8})$$

- **Half** : cette variable prend le numéro du symptôme ayant la valeur la plus élevée parmi les symptômes qui représentent deux zones à faibles densités de courant.

$$\text{Half} = k: \max_k \left(\text{Symptome}_k \middle| \begin{matrix} K = 8 \\ k = 5 \end{matrix} \right) \quad (\text{Eq IV.9})$$

- **H** : cette variable prend le numéro du symptôme ayant la valeur la plus élevée parmi les symptômes qui représentent une seule zone à faible densité de courant.

$$H = k: \max_k \left(\text{Symptome}_k \middle| \begin{matrix} k = 4 \\ k = 1 \end{matrix} \right) \quad (\text{Eq IV.10})$$

- **D** : hétérogénéité dominante qui dépend des variables G, Half et H. Cette variable prend le numéro du symptôme ayant la valeur la plus élevée parmi les douze symptômes.

$$D = k: \max_k \left(\text{Symptome}_j \left| \begin{matrix} k = 12 \\ k = 1 \end{matrix} \right. \right) \quad (\text{Eq IV.11})$$

Chacune des trois premières variables peut prendre cinq valeurs : elle peut prendre un numéro de symptôme, mais si aucun symptôme n'a une valeur supérieure à 8, la variable prend alors la valeur 0. Comme la variable D dépend des trois autres, elle ne peut prendre que 3 valeurs. En retranchant les cas redondants on trouve qu'il y a $(5^3 \times 3) - 8$ signatures de référence possibles.

Tableau IV-1 : Les signatures de références

Variable qualitative Signatures de références	G	Half	H	D
1	12	7	1	7
k	...	...	...	...
367	0	0	0	0

Le Tableau IV-1 donne la table des différentes signatures. Lorsqu'aucune case n'est activée, il faut regarder les symptômes des quatre dernières bases (13 à 16). Si aucune des quatre dernières bases n'est activée cela ne veut pas dire que cette distribution de courant est uniforme mais que ce type de distribution de courant ne peut pas être détecté par nos bases parce que les bases construites permettent la détection des distributions de courant à basse fréquence spatiales. Nous avons vu au chapitre précédent, que pour des fins de diagnostic, que ce qui nous intéresse le plus dans notre travail se sont les évolutions de la distribution de courant. Nous avons vu au chapitre III que les évolutions de la distribution de courant sont de type basse fréquence spatiales. Il est aussi important de souligner que tel que les symptômes sont construits, uniquement les hétérogénéités qui dominant (ont un poids important) pourront être détectées. Une des raisons à cela est le fait que le réseau de capteur est placé au milieu du stack.

3. Localisation des hétérogénéités le long du stack

Dans un cas idéal, toutes les cellules d'un même stack devraient avoir le même comportement et donc la même distribution de courant au niveau de toutes les cellules. Cependant, l'intégration de plusieurs cellules provoque l'apparition de nouveaux phénomènes encore mal maîtrisés. Des distributions de courants différentes peuvent alors apparaître suivant la position des cellules dans le stack.

Dans ce paragraphe, nous proposons un moyen de localiser un ensemble de cellules qui présentent telles ou telles distributions de courant hétérogènes. Pour ce faire, nous faisons l'hypothèse que les cellules peuvent être partagées en deux groupes : le groupe des cellules les plus proches de la borne (-) (figure III-8) et le groupe des cellules proches de la borne (+). Ce choix est étroitement lié au fait que le réseau de capteurs magnétiques soit placé au milieu du stack. Le champ magnétique perçu par la composante w est nul si toutes les cellules ont la même distribution de courant hétérogène le long

du stack (suivant l'axe z). Cela est dû au fait que le champ magnétique généré par la partie proche de la borne (-) est compensé par celui généré par la partie proche de la borne (+).

$$w(\text{partie proche de la borne } (-)) + w(\text{partie proche de la borne } (+)) = 0 \quad (\text{Eq IV.12})$$

Ce qui fait que :

$$w(\text{partie proche de la borne } (-)) = -w(\text{partie proche de la borne } (+)) \quad (\text{Eq IV.13})$$

En exploitant le modèle magnétique direct, nous observons l'allure des composants u et w :

- L'allure de la composante u lorsque toutes les cellules ont la même distribution de courant hétérogène le long du stack est similaire à l'allure de la composante u pour le cas où uniquement quelques cellules présentent cette même distribution de courant hétérogène et les autres cellules ont une distribution uniforme.
- Lorsque les cellules proches de la borne (-) ont la même distribution de courant hétérogène et celles proches de la borne (+) présentent une distribution de courant uniforme, l'allure de la composante u est similaire à celle de la composante w. Cette constatation est valable même pour le cas où une partie des cellules de la partie proches de la borne (+) présentent la même distribution de courant hétérogène que celle de la partie proche de borne (-).
- Lorsque les cellules proches de la borne (+) ont la même distribution de courant hétérogène et celles proches de la borne (-) présentent une distribution de courant uniforme, l'allure de la composante u est similaire non pas à celle de la composante de w mais à son opposé (-w). Cette constatation est valable même pour le cas où une partie des cellules de la partie proche de la borne (-) présentent la même distribution de courant hétérogène que celles proches de la borne (+).

D'après ces constatations basées sur les allures des deux composantes u et w du champ magnétique, des symptômes peuvent aussi être générés directement à partir de la composante w en utilisant les bases construites à partir de la composante u (Eq IV.1). Ces symptômes seront utilisés uniquement pour la localisation des hétérogénéités le long du stack. Le réseau de capteur est sensible uniquement à la distribution de courant hétérogène. De ce fait, si on prend deux distributions de courant hétérogènes dont la somme donne une distribution de courant homogène, la somme des deux champs magnétiques générés par ces deux distributions de courant hétérogènes donne un champ magnétique nul. Tel que les bases ont été construites, plusieurs bases possèdent cette propriété. Dans la suite, on dira que deux bases sont complémentaires si la somme de leurs champs magnétiques respectifs donne un champ magnétique nul. Le Tableau IV-2 donne les bases et leurs compléments.

Tableau IV-2 : Les bases et leurs compléments

Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément de la base	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15

En se basant sur les constatations mentionnées ci-dessus, nous pouvons déduire que :

- Si le symptôme j est activé pour les deux composantes u et w , alors l'hétérogénéité correspondante est proche de la borne (-).
- Si le symptôme j est activé pour la composante u et si le symptôme généré à partir du complément de la base j est activé pour la composante w , alors l'hétérogénéité correspondante est proche de la borne (+).
- Si le symptôme j est activé pour la composante u et si ni le symptôme j de la composante w ni le symptôme généré à partir du complément de la base j de la composante w n'est activé, alors l'hétérogénéité correspondante se situe le long du stack.
- Si le symptôme j de la composante w est activé et si ni le symptôme j de la composante u ni le symptôme généré à partir du complément de la base j pour la composante u n'est activé, alors l'hétérogénéité correspondante ne se présente pas le long du stack.

4. Les signatures de référence comme outil de diagnostic

A ce stade, l'approche proposée permet de détecter les zones à faibles densités de courant (défaut d'hétérogénéités) et de faire correspondre la distribution de la densité de courant hétérogène à l'une des signatures de références définies. Les signatures de références ont été définies indépendamment des causes (défauts) pouvant provoquer des distributions de courant hétérogènes. De ce fait, d'un côté nous pouvons avoir des informations locales sur les performances de conversion énergétique locales et d'un autre côté nous pouvons rendre l'approche facilement généralisable sur d'autres stack qu'ils soient identiques, d'une échelle de puissance différente ou bien d'un autre fabricant. Cela passe par la détermination des deux seuils adaptés au nouveau dimensionnement de la PAC. Un point important qui mérite d'être souligné à ce niveau par rapport à la généralisation, est que la caractérisation ne nécessite aucun protocole expérimental pour se prémunir de l'influence de l'historique de la pile à combustible sur son état présent. Quant à la question des performances locales, nous estimons qu'il est important de connaître les performances de conversion énergétique locales afin que par la suite une commande tolérante aux fautes puisse être utilisée afin d'entreprendre des actions dans le sens de diminution des hétérogénéités dans les régions concernées.

Comme cela a été dit précédemment, la distribution de courant n'est pas complètement homogène même sous les conditions opératoires optimales recommandées par le constructeur, ce qui donne un champ magnétique non nul. De ce fait, le champ magnétique de référence correspond au champ magnétique généré par la pile à combustible dans les conditions opératoires optimales définies par le constructeur. Cela revient à dire que ce champ magnétique de référence est utilisé pour décrire l'état de fonctionnement nominal (normal) de la pile à combustible. L'idée clé de la procédure de diagnostic à partir des signatures de références est de comparer le champ magnétique à un instant t au champ magnétique de référence. Toutes différences entre les deux champs magnétiques sont interprétées comme la présence d'un défaut d'hétérogénéité.

La détection des défauts d'hétérogénéités est réalisée par le fait d'appartenir à l'une des signatures de références excepté la signature nominale pour laquelle aucun des symptômes n'est activé. Nous considérons que le système se trouve toujours dans un état de fonctionnement nominal si aucun symptôme n'est activé.

L'évolution de la distribution de la densité de courant peut être liée au fonctionnement inhérent du système ou au changement de l'une des conditions opératoires au niveau des sous-systèmes pour une raison ou une autre : on définit donc différents modes de fonctionnement en fonction de l'origine de l'évolution. La méthode proposée devient un outil de diagnostic dans le cas où chaque mode de fonctionnement appartient à l'une ou à plusieurs des signatures de références prédéfinies d'une manière distinguable. C'est la propagation des défauts sous-systèmes dans le stack qui génère des défauts au niveau du stack tels que le noyage et l'assèchement. Ces défauts en cascade masquent la cause réelle du défaut empêchant toute action de correction et/ou de maintenance. Cependant, pour qu'une telle procédure de diagnostic puisse être adoptée, la dernière étape requiert nécessairement une connaissance a priori sur les différents modes de fonctionnement. Des conditions opératoires dégradantes (non nominales) doivent être appliquées pour simuler ces défauts au niveau des sous-systèmes, qui à leur tour vont faire évoluer la distribution de courant. Comme toute méthode qui n'est pas basée sur un modèle, l'un des inconvénients majeurs de cette méthode réside dans l'impossibilité de pouvoir se prononcer sur la capacité à isoler les défauts sans les expériences expérimentales.

5. Illustration de la pertinence des symptômes

L'objectif de cette section est de montrer la pertinence des symptômes générés pour la détection des hétérogénéités dans la distribution de la densité de courant dans la pile à combustible.

5.1. Illustration avec le modèle magnétique direct

La distribution de la densité de courant considérée est composée de trois régions à densités de courant différentes (Figure IV-3). Cette distribution de la densité de courant est invariante suivant l'axe z du stack. Le modèle magnétique direct est utilisé pour simuler le champ magnétique (flèche rouge) généré par la distribution de courant.

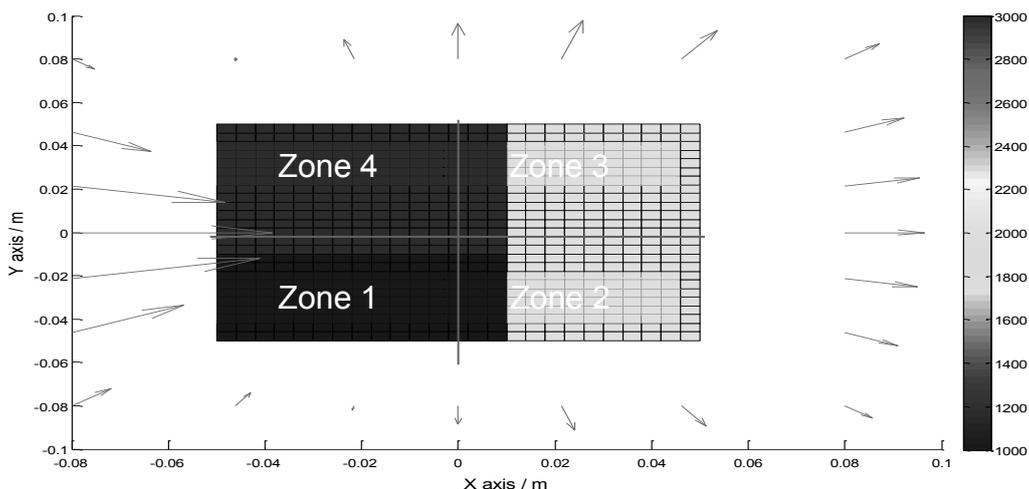


Figure IV-3 : Distribution de la densité de courant en $A.m^{-2}$ et le champ magnétique (flèche rouge) généré par cette distribution de courant

En appliquant la méthode décrite dans ce chapitre, nous obtenons les symptômes donnés dans le Tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Symptômes obtenus pour la configuration donnée dans la Figure IV-3.

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	9	10	2	5	3	4	16	3	4	4	7	13	6	5	5	4

Nous pouvons voir sur le Tableau IV-3 que seuls les symptômes 1, 2, 7 et 12 sont activés. Pour les symptômes qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, seul le symptôme n°12, correspondant à la base 12 (L pour zone1, zone 2 et zone 3, H pour zone 4), prend une valeur supérieure au seuil 8. Pour les symptômes qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, la valeur du septième symptôme est supérieure à 8, correspondant à la base 7 (L pour zones 1 et 2, H pour zones 3 et 4). Pour les symptômes qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, les symptômes 1 et 2 ont une valeur supérieure à 8 (L pour zone 1, L pour zone 2).

Pour les zones 1 et 2, le symptôme dont la valeur est la plus élevée est celui correspondant à la base 2 (zone 2), la zone 2 est celle qui présente que de faibles densités de courant sur toute sa surface alors que la zone 1 est celle qui présente les plus faibles densités de courant, mais une partie de sa surface présente les densités de courant les plus élevées. Le symptôme le plus élevé des 16 symptômes construits est le 7, ce qui veut dire que les zones 1 et 2 constituent la région où se situent les plus faibles densités de courant. Ces hétérogénéités peuvent être automatiquement détectées et classées comme l'illustre le Tableau IV-4.

Tableau IV-4 : Classe attribuée à la distribution de la densité de courant étudiée

Variables qualitatives	G	Half	H	D
Signature k	12	7	2	7

Cet exemple avec trois niveaux de densités de courant montre comment la démarche proposée est bien applicable pour des distributions de densités de courant qui sortent des hypothèses de construction des bases à savoir qu'il existe deux régions à deux densités de courants différentes.

5.2. Exemple d'illustration d'hétérogénéités le long du stack avec le modèle électrocinétique

Dans l'exemple précédent, nous avons pris une configuration rude avec trois régions avec des densités de courants différentes sans continuité de la densité de courant. Pour prendre en considération cet aspect et les interactions entre les différentes cellules d'un même stack, nous

allons donner quelques illustrations avec des distributions de densités de courant générées avec le modèle électrocinétique. Les distributions de courant non uniformes sont générées en choisissant une distribution de conductivité non uniforme ; les régions à faibles conductivités vont induire de faibles densités de courant par rapport aux autres régions. Nous avons également pris des distributions de courant invariantes suivant l'axe z.

5.2.1. Exemple à faibles densités de courant dans deux zones

Nous avons choisi une configuration telle que les faibles conductivités se trouvent dans les zones 1 et 2. Les faibles conductivités sont contenues par la région (X : 0 à 100 % et Y : 0 à 40 %). La Figure IV-4 donne la distribution de courant non uniforme résultante ainsi que le champ magnétique généré (flèche rouge). Le courant I_{tot} représente le courant total qui traverse la pile à combustible.

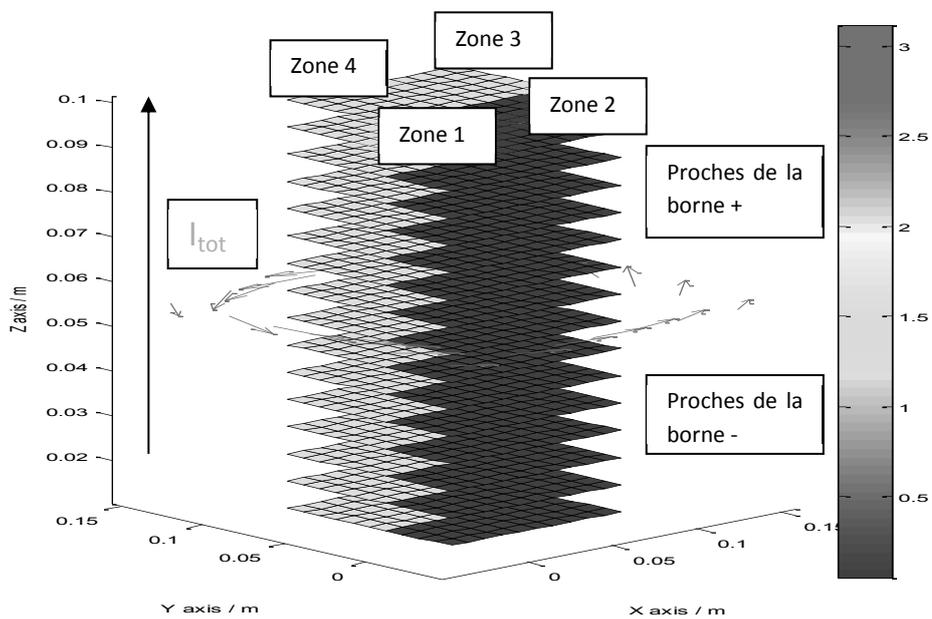


Figure IV-4 : Densités de courants ($A.cm^{-2}$) et le champ magnétique généré (flèche rouge)

La Figure IV-5 donne les données de champs magnétiques perçus par les capteurs magnétiques suivant la composante u et le Tableau IV-5 donne les symptômes obtenus en appliquant la méthode des résidus.

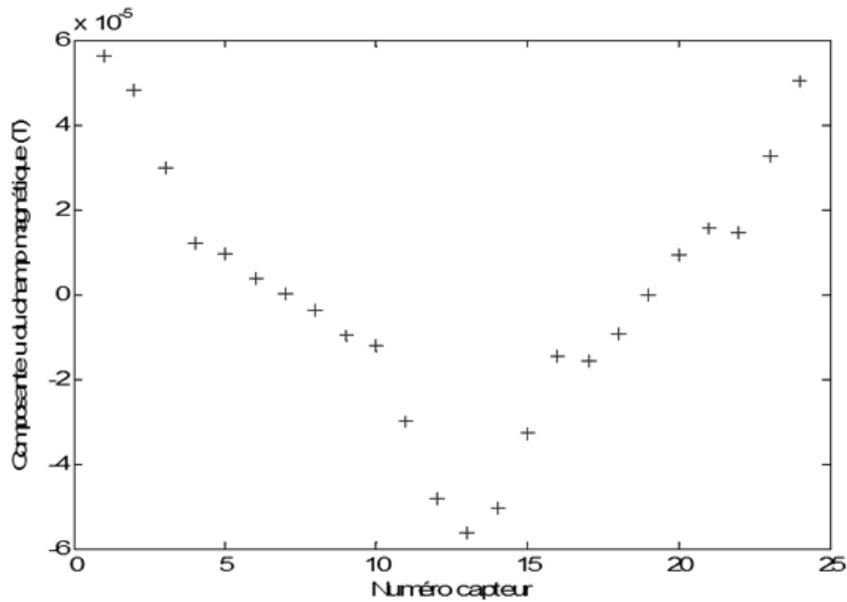


Figure IV-5 : Champs magnétiques de la composante u générée par la configuration de la Figure IV-4

Tableau IV-5 : Symptômes obtenus pour la distribution de courant donnée dans la Figure IV-4

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	7	7	3	3	2	2	24	2	3	3	8	8	10	12	6	4

Sur le Tableau IV-5, nous pouvons voir que la base 7 est activée. Le fait qu'aucun des symptômes représentant une seule zone à faibles densités de courant (1 à 4) n'est activé veut dire qu'il n'y a aucune zone ne contenant que de faibles densités de courant. Le symptôme 7 est à 24 et comme aucun des quatre premiers symptômes n'est activé, cela signifie que seulement une partie des zones 1 et 2 contiennent les faibles densités de courant.

5.2.2. Exemple à faibles densités de courant dans quatre zones

Nous avons choisi une configuration telle que les faibles conductivités se trouvent dans les quatre zones. Les faibles conductivités sont contenues par la région (X : 0 à 100 % et Y : 0 à 70 %). La Figure IV-4 donne la distribution de courant non uniforme résultante ainsi que le champ magnétique généré (flèche rouge).

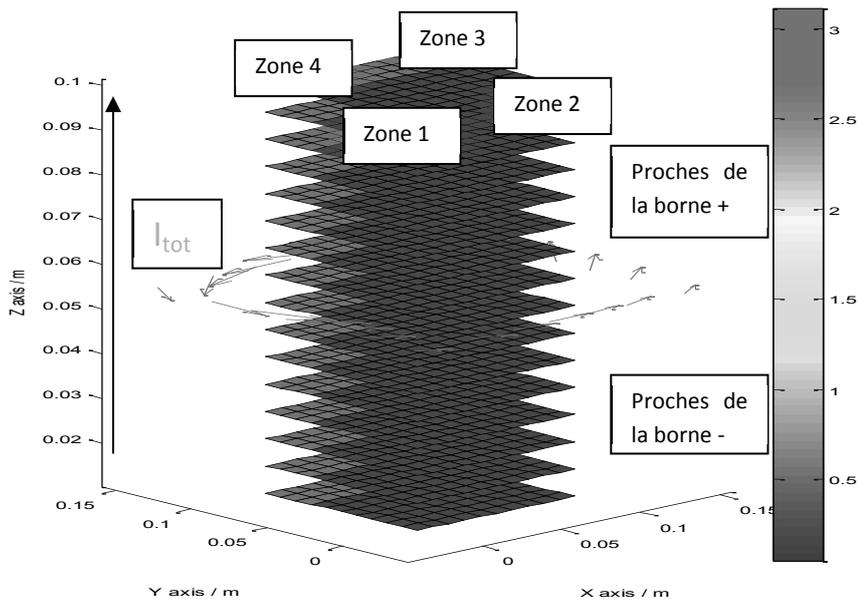


Figure IV-6 : Densités de courant ($A.cm^{-2}$) et le champ magnétique généré (flèche rouge)

Le Tableau IV-6 donne les symptômes obtenus avec la distribution de courant donnée dans la Figure IV-6.

Sur le Tableau IV-6, nous pouvons voir que les bases 1,2, et 7 sont activées. Le fait que les symptômes 1 et 2 représentant une seule zone à faibles densités de courant soient activés veut dire que les zones 1 et 2 ne contiennent que de faibles densités de courant. Le symptôme 7 est à 24 et les deux premiers symptômes sont activés, ce qui veut dire que ce sont les zones 1 et 2 qui contiennent les faibles densités de courant avec une partie des zones 3 et 4.

Tableau IV-6 : Symptômes obtenus pour la distribution de courant donnée dans la Figure IV-6

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	10	10	4	4	2	2	24	2	4	4	7	7	6	12	4	4

5.3. Exemple d'illustration d'hétérogénéités de quelques cellules du stack avec le modèle électrocinétique

Jusqu'à présent, nous n'avons vu que des distributions de courant invariantes suivant l'axe z. Dans cette partie, nous allons voir l'utilité de la composante suivant z (composante w) pour détecter les hétérogénéités suivant l'axe z.

5.3.1. Exemple 1

Dans ce premier exemple, nous avons repris la configuration précédente (figure IV-8) telle que les faibles conductivités se trouvent dans les quatre zones uniquement pour les douze premières cellules et nous avons pris une configuration à distribution de conductivité uniforme pour les quatre dernières cellules (Proches de la borne +). La Figure IV-7 donne la distribution de courant non uniforme résultante ainsi que le champ magnétique généré (flèche).

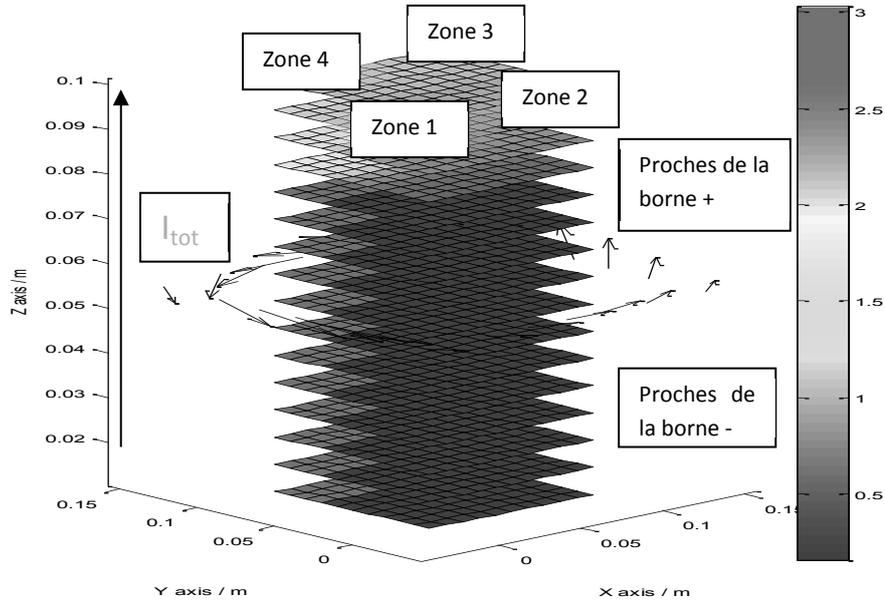


Figure IV-7 : Densités de courant($A.cm^{-2}$) et le champ magnétique généré (flèche rouge)

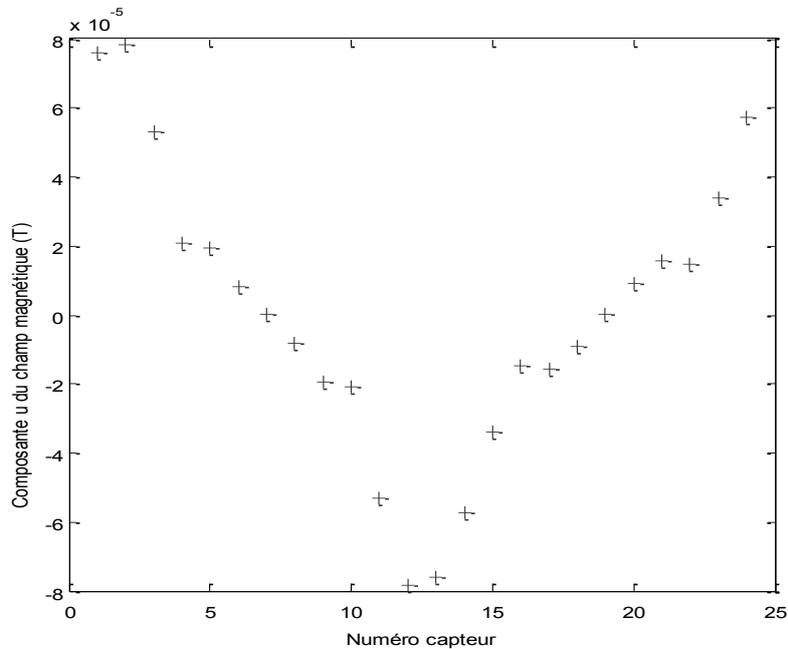


Figure IV-8 : Champs magnétiques de la composante u généré par la configuration de la Figure IV-7

La Figure IV-8 donne le champ magnétique perçus par les capteurs de la composante u. Nous pouvons constater que l'allure formée par les données de champs magnétique de la Figure IV-8 est similaire à celle de la Figure IV-5. Le Tableau IV-7 donne les symptômes obtenus.

Tableau IV-7 : Symptômes obtenus avec la distribution de courant de la Figure IV-7 pour la composante u

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	10	10	4	4	2	2	24	4	4	4	6	6	4	12	4	6

Nous pouvons constater que nous obtenons quasiment les mêmes symptômes que dans l'exemple précédent. Nous aboutissons à la même conclusion que ce sont les zones 1 et 2 qui contiennent les faibles densités de courant avec une partie des zones 3 et 4.

La Figure IV-9 montre que l'allure formée par les données de champ magnétique de la composante w est similaire à l'allure formée par les données de la composante u.

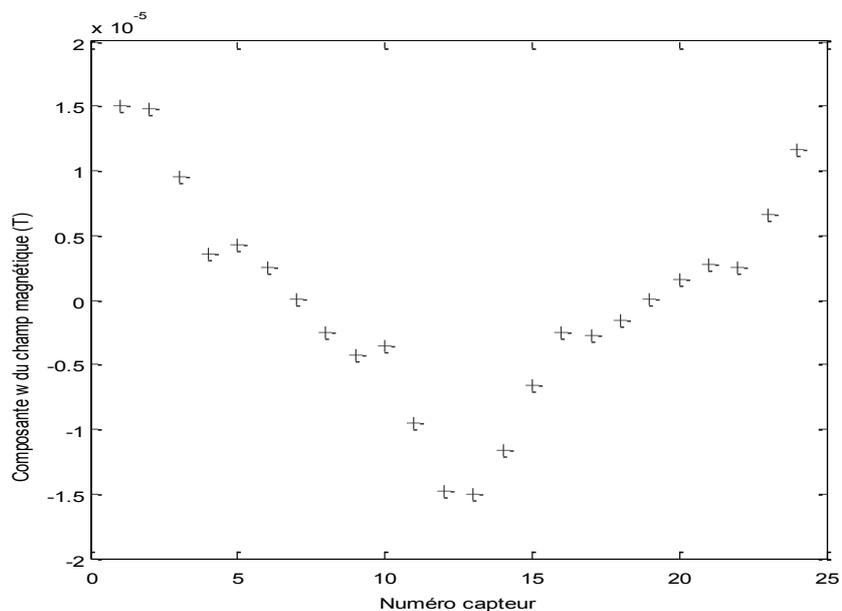


Figure IV-9 : Champs magnétiques de la composante w perçus par les capteurs

Nous avons au Tableau IV-8, les symptômes obtenus pour la composante w.

Tableau IV-8 : Symptômes obtenus avec la distribution de courant de la Figure IV-7 pour la composante w

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la Composante (w)	11	11	3	3	2	2	24	4	4	4	6	6	4	12	6	6

Le Tableau IV-9 résume l'ensemble des symptômes activés pour les deux composantes u et w.

Tableau IV-9 : Synthèse des symptômes activés pour les deux composantes u et w de la distribution de courant de la Figure IV-7

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n	n	n	n	n	n
Activation (w)	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n	n	n	n	n	n

Les symptômes activés pour la composante u le sont aussi pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les zones à faibles densités de courant détectées avec la composante u sont proches de la borne (-). Cependant, la démarche adoptée n'est pas en mesure de dire que l'on a aussi des zones à faibles densités de courant dans quelques cellules proches de la borne (+).

5.3.2. Exemple 2

Nous avons choisi une distribution de conductivité non uniforme le long du stack suivant l'axe z. La distribution de la densité de courant résultante ainsi que le champ magnétique généré sont donnés par la Figure IV-10.

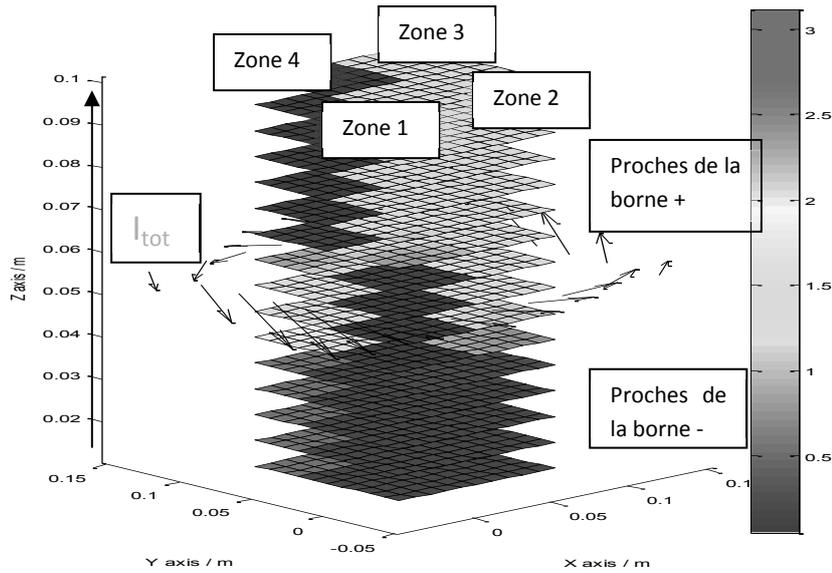


Figure IV-10 : Densités de courants en A.cm-2 et le champ magnétique généré (flèche)

La Figure IV-11 nous montre les données de champ magnétique perçus par les capteurs de la composante u.

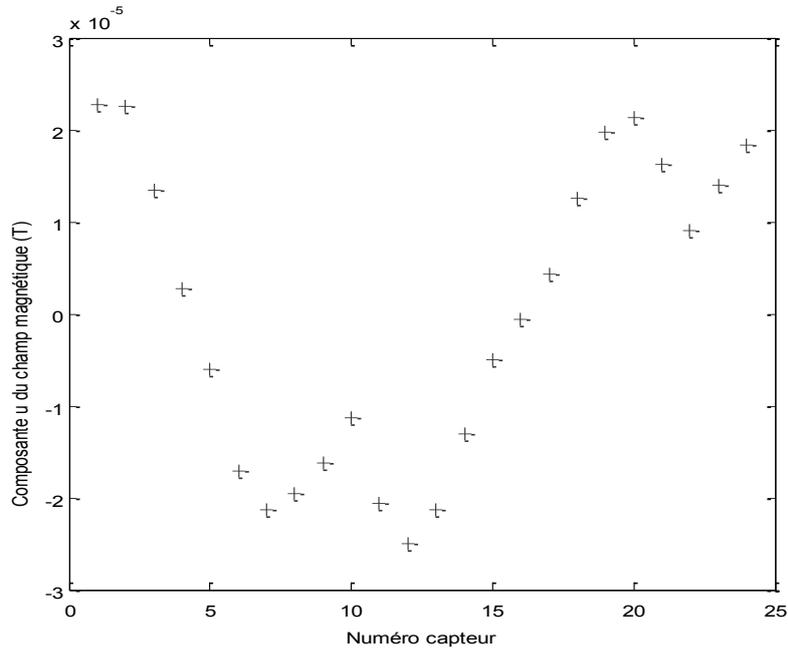


Figure IV-11 : Composante u du champ magnétique pour la distribution de courant de la Figure IV-10

Le Tableau IV-10 donne les symptômes obtenus avec la composante u du champ magnétique.

Tableau IV-10 : Symptômes obtenus pour la composante u de la distribution de courant de la Figure IV-10

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	13	7	2	4	6	2	9	2	2	2	15	3	2	5	2	3

Nous pouvons voir sur le Tableau IV-10 que les symptômes 1, 7 et 11 sont actifs. Pour les symptômes qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, seul le symptôme 11 correspondant à la base 11 (L pour zone1, zone 2 et zone 4, H pour zone 3) a une valeur supérieure au seuil 8. Sur la Figure IV-10, nous pouvons voir que la zone 4 des premières cellules (en rouge) présente des densités de courant élevées par rapport aux autres zones. Cependant, ces densités de courant élevées n'ont pas été détectées d'une part parce que le poids (la sensibilité) de ces cellules est faible par rapport au poids de celles qui sont proches du réseau de capteur et d'autre part parce que nous avons de très faibles densités de courants dans la zone 4 pour les cellules proches de la borne (+). Pour les symptômes qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième symptôme est supérieur à 8, correspondant à la base 7 (L pour zone 1 et zone 2, H pour zone 3 et zone 4). Pour les symptômes qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, seul le symptôme 1 est activé (L pour zone 1). Le symptôme le plus élevé des 16 symptômes construits est le 11, ce qui veut dire que globalement ce sont les zones 1 et 2 et 4 qui contiennent les plus de faibles densités de courant.

La Figure IV-12 montre l'allure formée par les données de champ magnétique de la composante w. Nous pouvons constater que l'allure n'est similaire, ni à celle de la composante u, ni à celle de l'opposé de u (-u). Cela est lié au fait que nous retrouvons des hétérogénéités des deux côtés du réseau de capteur et ce sont celles qui dominent qui vont être détectées.

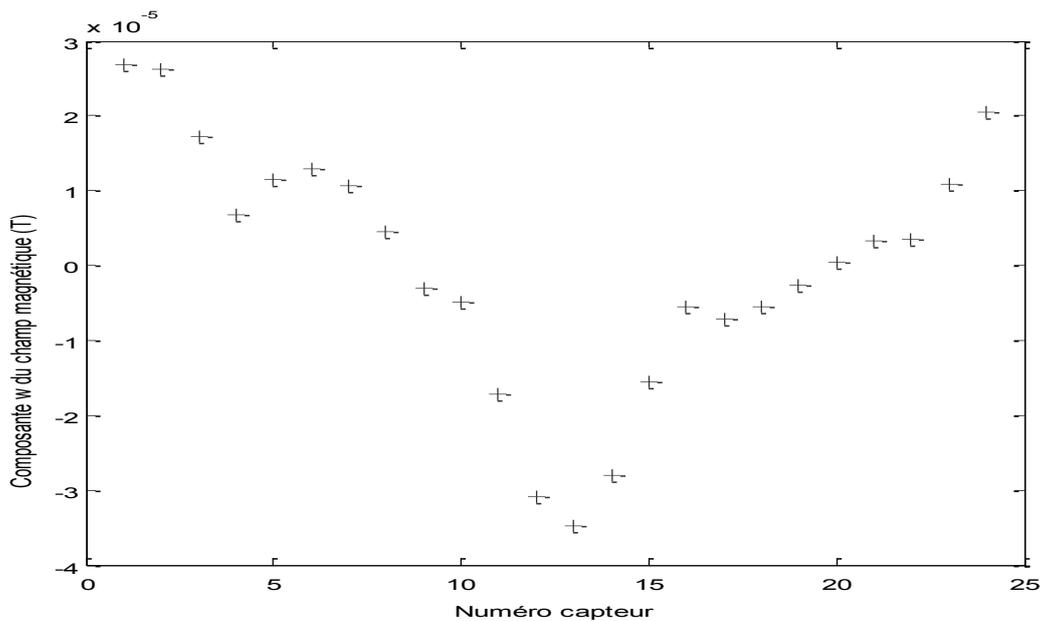


Figure IV-12 : Composante w du champ magnétique pour la distribution de courant de la Figure IV-12

Les symptômes obtenus avec la composante w du champ magnétique sont donnés au Tableau IV-11. Nous pouvons constater que deux des trois symptômes (1 et 7) activés pour la composante u le sont également pour la composante w et que deux nouveaux symptômes sont activés à savoir les symptômes 2 et 12.

Tableau IV-11 : Symptômes obtenus pour la composante w de la distribution de courant de la Figure IV-12

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme Sur la composante (w)	9	12	5	3	3	3	18	3	5	3	6	11	4	9	3	3

Le Tableau IV-12 résume les symptômes activés pour les deux composantes u et w. Pour les distributions de courant qui ne sont pas homogènes suivant l'axe z, seul le symptôme 12 (L pour zone 1, zone 2 et zone 3 et H pour zones 4) est activé pour les symptômes représentant trois zones à faibles densités de courant. Ce symptôme nous dit qu'il existe des cellules le long du stack où la zone 4 présente de fortes densités de courant sans nous renseigner pour autant sur sa localisation. Pour les symptômes représentant deux zones à faibles densités de courant le symptôme 7 (L pour zone 1 et 2 et H pour zone 3 et 4) est activé pour les deux composante u et w, ce qui signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans les zones 1 et 2 sont proches de la borne (-). Pour confirmer cette information, on voit sur la Table IV-11 que les symptômes 1 et 2 sont activés avec une valeur plus importante pour la zone 2. L'hétérogénéité la plus dominante le long de l'axe z se situe au niveau des zones 1 et 2 (symptôme₇=18).

Tableau IV-12 : Synthèse des symptômes activés pour les deux composantes u et w de la distribution de courant de la Figure IV-10

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	n	n	n	n	n	ok	n	n	n	ok	n	n	n	n	n
Activation (w)	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n

5.3.3. Exemple 3

Nous avons choisi une autre distribution de conductivité non uniforme le long du stack (suivant l'axe z). La distribution de la densité de courant résultante ainsi que le champ magnétique généré sont donnés par la Figure IV-13.

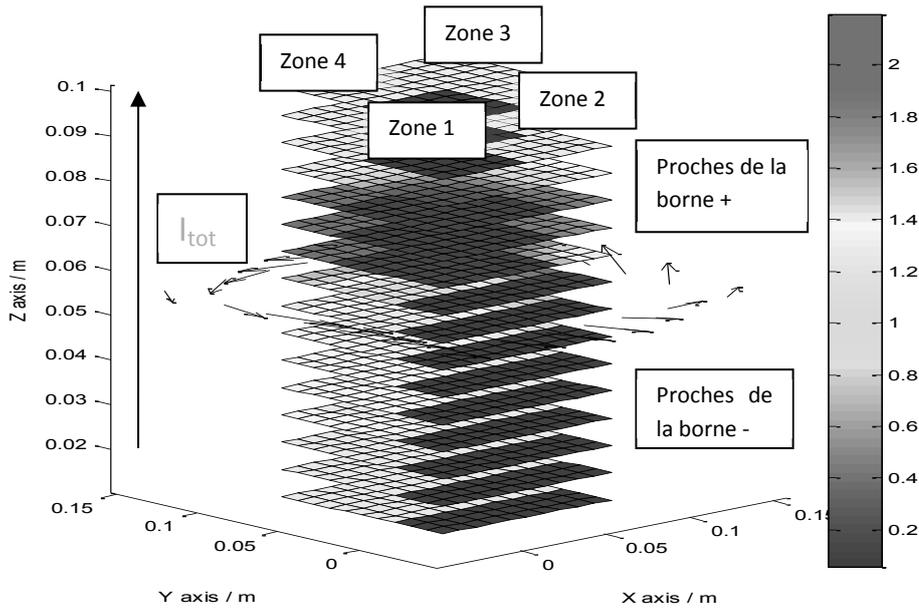


Figure IV-13 : Densités de courants en A.cm-2 et le champ magnétique généré (flèche)

Les symptômes obtenus avec la composante u du champ magnétique sont donnés dans le Tableau IV-13.

Tableau IV-13 : Symptômes obtenus avec la composante u du champ magnétique pour la distribution de courant de la Figure IV-15

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (u)	15	5	3	3	3	3	17	2	3	4	14	7	4	5	3	2

Nous pouvons voir sur le Tableau IV-13, que les symptômes 1, 7 et 11 sont actifs. Pour les symptômes qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, le symptôme 11 correspondant à la base 11 (L pour zone1, zone 2 et zone 4, H pour zone 3) prend une valeur supérieure au seuil de 8,. Sur la Figure IV-13, nous pouvons voir que sur l'ensemble de toutes les cellules, que c'est bien cette configuration qui prédomine, bien que quelques cellules présentent de fortes densités dans les zones 2 et 4. Pour les symptômes qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième symptôme prend une valeur supérieure à 8, correspondant à la base 7 (L pour zones 1 et 2, H pour zones 3 et 4). Pour les symptômes qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, le symptôme 1 est activé (L pour zone 1). Le symptôme le plus élevé des 16 symptômes construits est le 7, ce qui veut dire que ce sont les zones 1 et 2 qui dominent les zones à faibles densités de courant.

Le Tableau IV-14 donne les valeurs des symptômes obtenues en utilisant la composante w du champ magnétique. Les symptômes activés sont : 2, 6, 9 et 12. Nous pouvons constater qu'aucun des symptômes activés pour la composante u n'est activé pour la composante w.

Tableau IV-14 : Symptômes obtenus pour la composante w du champ magnétique généré par la distribution de courant de la Figure IV-13

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du symptôme sur la composante (w)	5	18	5	3	2	13	4	3	10	4	3	9	4	4	3	7

Le Tableau IV-15 résume les symptômes activés pour les deux composantes u et w. Pour les distributions de courant qui ne sont pas homogènes suivant l'axe z, pour les symptômes représentant trois zones à faibles densités de courant c'est le symptôme 12 (L pour zone 1, zone 2 et zone 3 et H pour zones 4) qui est activé pour la composante w uniquement. Ce symptôme nous dit qu'il existe des cellules le long du stack où la zone 4 présente de fortes densités de courant sans nous renseigner pour autant sur sa localisation. Le symptôme 11 est activé uniquement pour la composante u, ce qui signifie que globalement le long du stack, les faibles densités de courant se trouvent dans les zone 1, 2 et 4. Pour les symptômes représentant deux zones à faibles densités de courant ce sont les symptômes 7 (L pour zone 1 et 2 et H pour zone 3 et 4) et 6 (L pour zone 2 et 3 et H pour zone 1 et 4) qui sont activés. Ces deux symptômes nous renseignent sur la présence de ces deux configurations pour quelques cellules du stack.

Pour les symptômes représentant une seule zone à faibles densités de courant, le symptôme 2 présente la valeur la plus élevée pour la composante w mais il n'est pas activé pour la composante u, ce qui signifie qu'il existe quelques cellules pour lesquelles de faibles densités de courant se trouvent dans la zone 2 sans pouvoir pour autant les localiser par rapport au réseau de capteurs. Le symptôme 1 est activé pour la composante u et son complément le symptôme 9 est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par ces faibles densités de courant sont proches de la borne (+). L'hétérogénéité la plus dominante (les plus faibles densités de courant) le long de l'axe z se situe au niveau de la zone 2.

Tableau IV-15 : Synthèse des symptômes activés pour les deux composantes u et w de la distribution de courant de la Figure IV-13

Symptôme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	n	n	n	n	n	ok	n	n	n	ok	n	n	n	n	n
Activation (w)	n	ok	n	n	n	ok	n	n	ok	n	n	ok	n	n	n	n

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de détection des distributions de courant hétérogènes liées au fonctionnement indésirable des piles à combustible. Cette méthode s'appuie sur les bases construites au chapitre III et qui sont utilisées comme une sorte de modèle représentant le fonctionnement indésirable de la pile à combustible. Des résidus sont générés en

comparant ces bases aux champs magnétiques issus des capteurs (mesure) de la composante u . La procédure de détection des hétérogénéités permet d'évaluer les symptômes afin de décider de la présence ou non d'une hétérogénéité. Cette procédure passe par la détermination de deux seuils qui dépendent seulement des dimensions du stack.

Afin de caractériser le fonctionnement indésirable, quatre variables qualitatives ont été calculées à partir des symptômes générés. Une classification qui ne requiert pas de connaissance a priori sur les dysfonctionnements pouvant affecter la pile à combustible est proposée. Les signatures de référence utilisées pour cette classification ont été prédéfinies a priori en se basant sur les hétérogénéités dominantes.

Concernant la partie diagnostic des défauts, si chaque défaut appartient à une ou plusieurs classes de façon distincte, l'origine de l'évolution de la distribution de courant peut être localisée.

Nous avons aussi vu comment il est possible, à partir des symptômes extraits des deux composantes u et w , de se prononcer sur la localisation des hétérogénéités par rapport au réseau de capteurs installé au milieu de la pile à combustible.

La démarche proposée permet la détection des zones d'hétérogénéités, cependant, elle nécessite de fixer deux seuils, ce qui engendre une perte d'informations. La démarche montre des limitations quant à la détection de zones qui présentent les plus faibles densités de courant. De plus, elle ne nous renseigne pas sur la valeur des densités de courant au niveau des zones. Nous proposons dans le chapitre suivant une alternative qui ne nécessite pas de seuils et qui nous renseigne sur les densités de courant.

V. Caractérisation et diagnostic par projection dans la direction des bases

Nous avons développé dans le chapitre précédent une procédure de caractérisation et diagnostic, basée sur la génération de résidus, qui nécessite le choix de deux seuils pour la détection d'hétérogénéités. Une classification qualitative des distributions de densité de courant indépendamment des défauts de fonctionnement a été utilisée.

Nous nous proposons d'établir une nouvelle méthode afin de ne plus avoir de seuils à fixer. Au lieu d'utiliser des résidus, nous proposons d'utiliser à présent une méthode basée sur la projection du vecteur des mesures dans les directions des bases construites.

Pour extraire les paramètres caractérisant l'hétérogénéité des densités de courant, on considère les bases comme des vecteurs dans l'espace \mathcal{R}^{Nbs} qui peuvent être définis par leurs directions. L'angle formé entre le vecteur mesure et une base donnée peut alors être utilisée comme un moyen de détection d'hétérogénéités, cet angle permet de quantifier le rapprochement ou l'éloignement d'une mesure par rapport aux bases (caractéristiques).

Dans ce chapitre, la pertinence des paramètres extraits par projection est évaluée afin d'approximer la distribution de la densité de courant dans la pile à combustible. Ensuite, deux classifications de type non supervisée qui permettent de caractériser le fonctionnement de la pile à combustible indépendamment de l'origine du fonctionnement indésirable de la pile à combustible sont proposées. Concernant la classification supervisée, nous proposons la séparation de données étiquetées dans le plan bidimensionnel en utilisant plusieurs sous classifieurs.

1. Extraction des paramètres pour la détection des hétérogénéités

Nous souhaitons dans cette partie exploiter les directions des bases dans l'espace multi dimensionnel \mathcal{R}^{Nbs} dans le but d'extraire les hétérogénéités de densités de courant. Les angles formés entre les bases et une mesure donnée sont utilisés pour l'extraction des paramètres pour la détection des hétérogénéités. Chaque angle est une quantification du rapprochement ou de l'éloignement d'une mesure de la base correspondante.

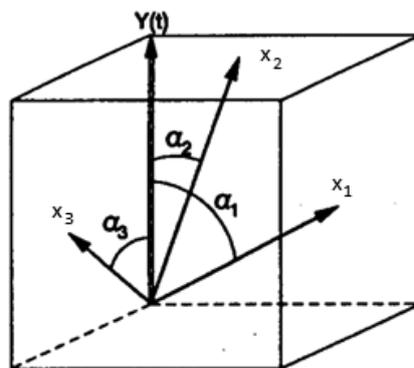


Figure V-1 : Schéma du raisonnement permettant d'extraire des paramètres, illustré dans un espace à trois dimensions.

Des paramètres peuvent être extraits à travers ces angles. Le schéma du raisonnement permettant l'extraction des paramètres est illustré dans l'espace à trois dimensions sur la Figure V-1.

Dans cette approche, chaque base doit avoir une norme égale 1. De ce fait, une nouvelle normalisation s'impose à nous :

$$\bar{X}_j = \frac{X_j}{\|X_j\|_2} = \frac{X_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^{Nbs} x_{ij}^2}} \quad \text{Eq (V.1)}$$

Ce qui nous donne la nouvelle matrice A :

$$A = [\bar{X}_1 \quad \bar{X}_2 \quad \cdots \quad \bar{X}_j \quad \cdots \quad \bar{X}_N]_{Nbs \times N} \quad j=1: N \quad \text{Eq (V.2)}$$

Le comportement indésirable du système est maintenant représenté par les colonnes $\bar{X}_j \in \mathfrak{R}^{Nbs}$ de la matrice A. Le vecteur des paramètres (espace des caractéristiques) est obtenu par la projection du vecteur mesure dans la direction des \bar{X}_j :

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_j \quad \cdots \quad p_N]^T \quad \text{Eq (V.3)}$$

$$= \cos[\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_j \quad \cdots \quad \alpha_N]^T$$

Où p_j représentent les paramètres qui décrivent la nature de la distribution de courant, et les α_j représentent les angles formés entre le vecteur mesure Y et les vecteurs \bar{X}_j .

Les bases \bar{X}_j et le vecteur mesure \bar{Y} sont normalisés, l'angle α_j peut être défini par la fonction trigonométrique cosinus :

$$p_j = \cos \alpha_j = \bar{X}_j^T \bar{Y} \quad \text{Eq (V.4)}$$

Où \bar{Y} représente le vecteur mesure normalisé :

$$\bar{Y} = \frac{Y}{\|Y\|_2} = \frac{Y}{\sqrt{\sum_{i=1}^{Nbs} y_i^2}}$$

Contrairement à la méthode proposée au chapitre IV, l'extraction des paramètres se résume à une simple opération entre les informations représentant le fonctionnement indésirable du système et les mesures prélevées sur ce dernier :

$$P = A^T \bar{Y} \quad \text{Eq (V.5)}$$

Il est aussi important de noter que chaque paramètre extrait p_j est une fonction de la forme :

$$p_j = f_j(Y) = \sum_{i=1}^{Nbs} \bar{x}_{ij} \bar{y}_i \quad \text{Eq (V.6)}$$

Où \bar{y}_i représente la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur mesure normalisé, et les \bar{x}_{ij} représentent les composantes de la base \bar{X}_j .

Le paramètre p_j est une fonction discriminante linéaire qui permet de séparer la mesure Y en deux classes par rapport à la base \bar{X}_j , la décision étant le signe de p_j . Si p_j est positif, la caractéristique (base) est présente dans la mesure Y et si p_j est négatif, alors la caractéristique (base) n'est pas présente dans la mesure Y. Plus le paramètre est proche de 1, plus la caractéristique est dominante, ce qui n'empêche pas que plusieurs paramètres puissent s'approcher de 1 si plusieurs caractéristiques sont présentes dans la mesure Y.

Cette première étape d'extraction des paramètres dans le but de caractériser une distribution de courant hétérogène est facile à mettre en œuvre et permet une extraction rapide. L'angle entre les bases et les mesures permet d'évaluer la pertinence des paramètres : un paramètre positif indique la présence de la caractéristique (base) et un paramètre négatif indique la non présence (ou absence).

2. Illustration de la pertinence des paramètres

L'objectif de cette section est de bien illustrer l'utilisation des paramètres extraits dans la détection des hétérogénéités de la distribution de courant dans une pile à combustible. En guise de comparaison, nous avons repris les mêmes configurations de distributions de densités de courant que celles utilisées au chapitre précédent.

2.1. Exemple avec le modèle magnétique direct

Le premier exemple ayant été étudié au chapitre précédent est celui du modèle magnétique direct (Figure V-2). La distribution de courant est invariante suivant l'axe z.

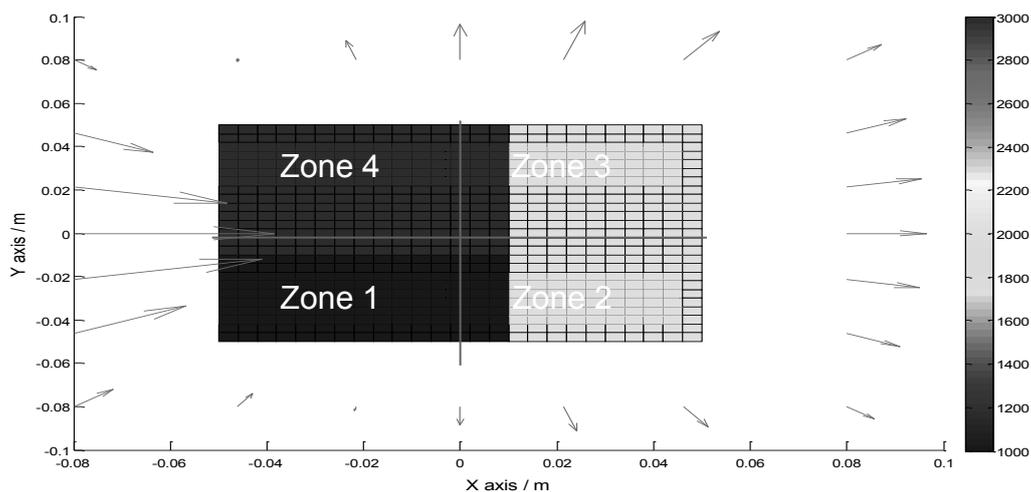


Figure V-2 : Densités de courant en $A.m^{-2}$ et champ magnétique généré (flèches rouges)

Les paramètres obtenus en projetant le champ magnétique de la composante u suivant les différentes directions des bases sont donnés au Tableau V-1. Sur ce tableau, les paramètres

présentant des valeurs positives trop faibles ou des valeurs négatives ne sont pas considérés. Seules les valeurs grisées sont considérées.

Tableau V-1 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique généré par la distribution de courant de la Figure V-2

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur sur u	0.65	0.49	-0.32	-0.83	-0.13	0.13	0.88	-0.88	-0.65	-0.49	0.32	0.83	0.05	-0.05	-0.02	0.02

Pour les paramètres qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, ce sont les paramètres 11 et 12 qui sont positifs. La valeur la plus élevée est celle correspondant à la base 12 (L pour les zones 1, 2 et 3, H pour la zone 4), la base 11 est activée avec une valeur plus faible, ce qui signifie que l'on a bien de fortes densités de courant dans la zone 3 mais elles ne sont pas dominantes. Pour les paramètres qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième paramètre correspondant à la base 7 (L pour les zones 1 et 2, H pour les zones 3 et 4) est activé, ce qui confirme les résultats fournis par les paramètres 11 et 12.

Pour les paramètres qui représentent une seule zone à faible densité de courant, $j = 1:4$, les paramètres 1 et 2 sont positifs (L pour zone 1, L pour zone 2). Le paramètre le plus élevé est celui correspondant à la base 1 (zone 1) : la zone 1 est celle qui présente de faibles densités de courant avec quelques fortes densités de courant tandis que la zone 2 ne présente que de faibles densités de courant mais qui sont globalement plus élevées que celles de la zone 1. Le paramètre qui prend la valeur la plus élevée des 16 paramètres construits est le 7, ce qui signifie que les zones 1 et 2 forment la région où les densités de courant sont les plus faibles. Cet exemple nous montre que cette méthode par projection nous donne plus d'informations sur les densités de courant que la méthode des résidus. En effet, elle permet de dire que la zone 1 présente les plus faibles densités de courant et qu'il y a aussi de fortes densités de courant dans la zone 3, ce qui correspond bien aux densités de courant données dans la Figure V-2.

2.2. Exemple d'hétérogénéités le long du stack en utilisant le modèle électrocinétique

Pour prendre en considération les interactions pouvant exister entre les différentes cellules d'un même stack, des distributions de courant non uniformes sont générées en choisissant une distribution de conductivité non uniforme. Ainsi, les régions à faibles conductivités vont induire des densités de courant qui seront faibles par rapport à celles des autres régions. Nous avons pris des distributions de courant invariantes suivant l'axe z.

2.2.1. Exemple à faibles densités de courant dans deux zones

Nous avons repris le même exemple que dans le chapitre précédent dans lequel nous avons choisi une configuration telle que les faibles conductivités se trouvent dans les zones 1 et 2. Les faibles conductivités sont contenues par la région (X : 0 à 100 % et Y : 0 à 40 %). La Figure V-3 donne la distribution de courant non uniforme résultante ainsi que le champ magnétique généré (flèche rouge).

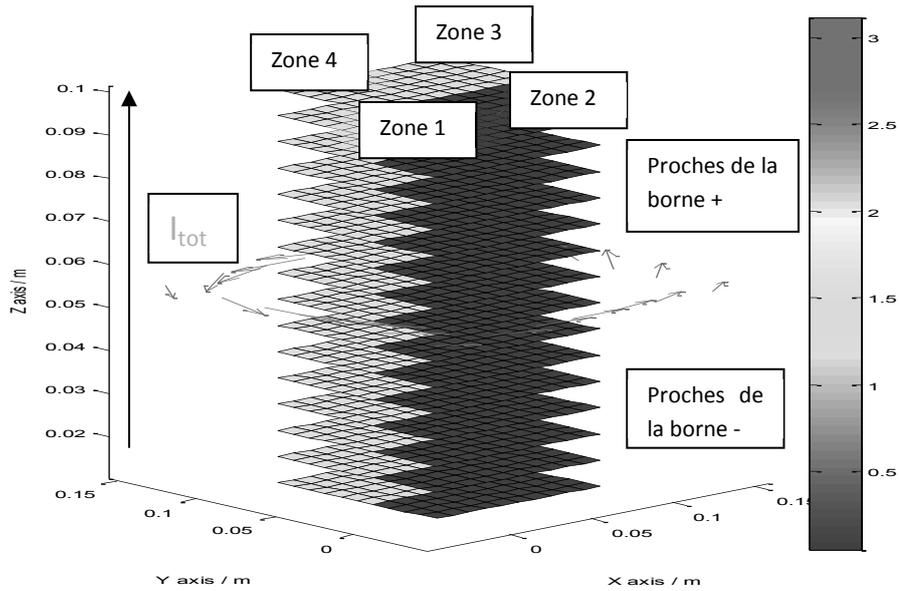


Figure V-3 : Densités de courant en $A.cm^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche)

Les paramètres obtenus en projetant le champ magnétique de la composante u suivant les différentes directions des bases sont donnés au Tableau V-2.

Tableau V-2 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique de la Figure V-3

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (u)	0.64	0.64	-0.64	-0.64	0.00	0.00	0.99	-0.99	-0.64	-0.64	0.64	0.64	0.04	-0.04	-0.06	0.06

Pour les paramètres qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, ce sont les paramètres 11 et 12 qui sont positifs et de valeurs égales, ce qui s'explique par le fait que l'on a les mêmes densités de courant dans les zones 3 et 4. Pour les paramètres qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième paramètre a une valeur presque égale à 1, correspondant à la base 7 (L pour les zones 1 et 2, H pour les zones 3 et 4). Pour les paramètres qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, les paramètres 1 et 2 sont positifs (L pour zone 1, L pour zone 2) et égaux du fait que les deux zones présentent les mêmes densités de courant.

2.2.2. Exemple à faibles densités de courant dans quatre zones

Nous avons pris la configuration précédente en étendant les faibles densités de courant aux zones 3 et 4. Nous avons choisi une configuration telle que les faibles conductivités se trouvent dans les quatre zones. Les faibles conductivités sont contenues par la région ($X : 0 \text{ à } 100 \%$ et $Y : 0 \text{ à } 70 \%$). Le Tableau V-3 donne les paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique.

Tableau V-3 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (u)	0.64	0.64	-0.63	-0.63	0.0	0.0	0.99	-0.99	-0.64	-0.64	0.63	0.63	-0.13	0.13	0.06	-0.06

En comparant ces résultats avec ceux précédents (Tableau V-2), on constate qu'ils sont similaires malgré le fait que la surface contenant les faibles densités de courant ait changé (quatre zones au lieu de deux). Contrairement à la méthode des projections, la méthode des résidus permet de distinguer le cas où toute la surface d'une zone donnée ne contient que de faibles densités de courant de celui où il n'y a qu'une portion de la surface de la zone qui contient de faibles densités de courant. La méthode des résidus dispose sur ce point d'un degré de discrimination que n'a pas la méthode par projection.

2.3. Exemple d'hétérogénéités de quelques cellules du stack avec le modèle électrocinétique

Dans cette partie, nous allons reprendre les distributions de courant qui sont variantes suivant l'axe z. Nous allons voir l'utilité de la composante du champ magnétique suivant z (composante w) pour détecter les hétérogénéités suivant z.

2.3.1. Exemple 1

Nous avons repris la configuration du chapitre précédent (Chapitre IV, paragraphe 5.3.1) où les faibles conductivités se trouvent dans les quatre zones uniquement pour les douze premières cellules et nous avons pris une configuration à distribution de conductivité uniforme pour les quatre cellules proches de la borne +. La Figure V-4 donne la distribution de courant non uniforme résultante ainsi que le champ magnétique généré.

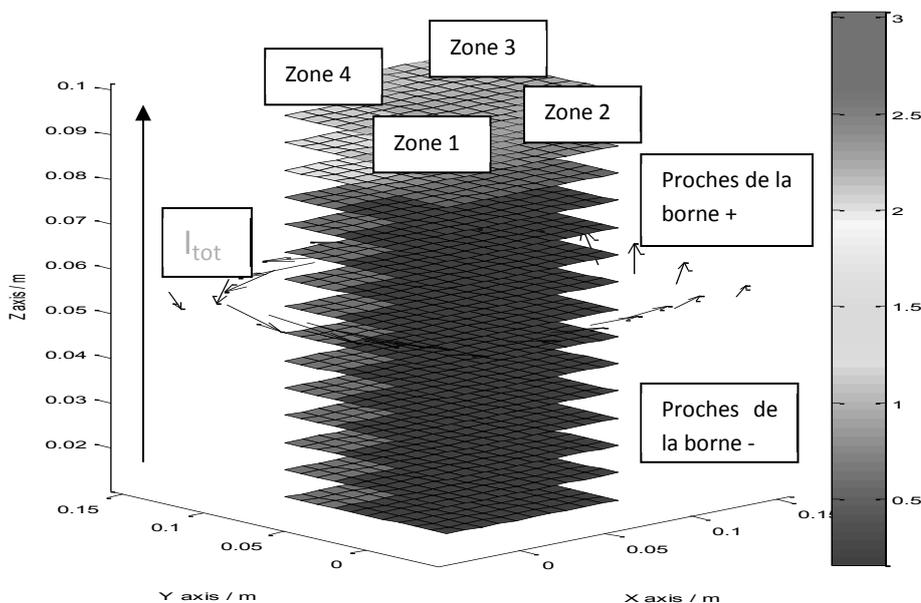


Figure V-4 : Densités de courant en $A.cm^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche rouge)

Le Tableau V-4 donne les paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique. Nous voyons sur ce tableau que nous obtenons les mêmes valeurs de paramètres que dans les deux exemples précédents, ce qui veut dire que la composante u ne nous renseigne pas sur la nature de la distribution de courant suivant l'axe z.

Tableau V-4 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique générée par la distribution de courant de la Figure V-4

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (u)	0.64	0.64	-0.63	-0.63	0.00	0.00	0.99	-0.99	-0.64	-0.64	0.63	0.63	0.14	0.14	0.06	-0.06

Nous avons au Tableau V-5 les paramètres obtenus pour la composante w. Nous pouvons constater que ces paramètres sont similaires à ceux extraits avec la composante u.

Tableau V-5 : Paramètres obtenus pour la composante w du champ magnétique générée par la distribution de courant de la Figure V-4

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (w)	0.64	0.64	-0.63	-0.63	0.00	0.00	0.99	-0.99	-0.64	-0.64	0.63	0.63	-0.12	0.12	0.08	-0.08

Le Tableau V-6 donne une synthèse des paramètres ayant des valeurs positives. Les paramètres positifs pour la composante u le sont aussi pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les zones à faibles densités de courant et détectées avec la composante u, sont proches de la borne (-). Cependant, comme pour la méthode des résidus, cette méthode n'est pas en mesure de détecter s'il existe également des zones à faibles densités de courant dans quelques cellules proches de la borne +.

Tableau V-6 : Synthèse des paramètres positifs pour les deux composante u et w

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	ok	ok	n	n	n	n
Activation (w)	ok	ok	n	n	n	ok	ok	n	on	n	ok	ok	n	n	n	n

2.3.2. Exemple 2

Nous avons repris le deuxième exemple du chapitre précédent (Chapitre IV, paragraphe 5.3.2) avec une distribution de conductivité non uniforme le long du stack (suivant l'axe z). La distribution de la densité de courant résultante ainsi que le champ magnétique généré sont donnés par la Figure V-5.

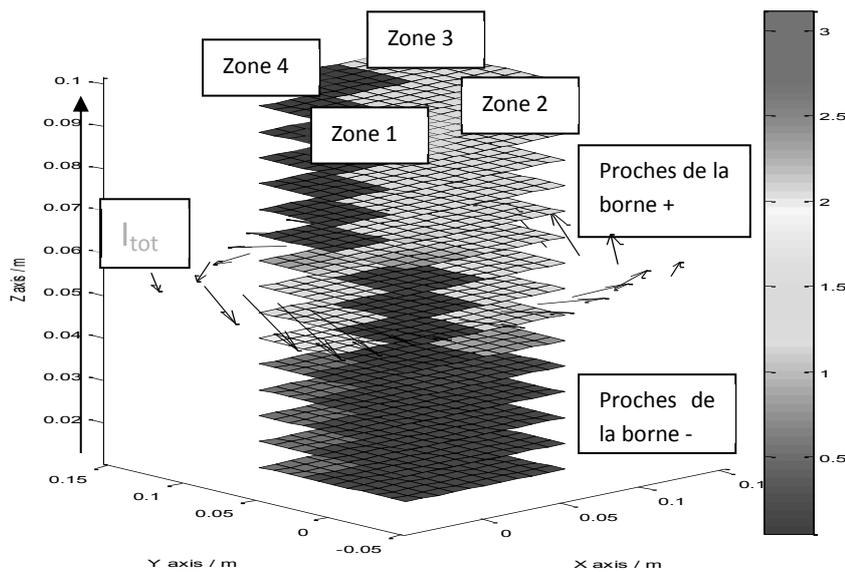


Figure V-5 : Densités de courant au sein de la PAC et champ magnétique à l'extérieur (flèche)

Le Tableau V-7 donne les paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique.

Tableau V-7 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique généré par la distribution de courant de la Figure V-5

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (u)	0.90	0.08	-0.90	-0.03	0.65	-0.65	0.74	-0.74	-0.90	-0.08	0.90	0.03	-0.12	0.12	0.01	-0.01

Pour les paramètres qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, seul le paramètre 11 correspondant à la base 11 (L pour les zone1, 2 et 4, H pour la zone 3) est positif et a une valeur élevée. Sur la Figure V-5, nous pouvons voir que les cellules proches de la borne - (en rouge) présentent sur la zone 4 des densités de courant élevées par rapport à celles des autres zones. Cependant, ces densités de courant élevées n'ont pas été détectées parce que d'une part le poids (la sensibilité) de ces cellules est faible par rapport à celles qui sont proches du réseau de capteur et, d'autre part parce que nous avons de très faibles densités de courants dans la zone 4 des cellules proches de la borne +.

Pour les paramètres qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième et le cinquième paramètre sont positifs avec une plus grande valeur pour le septième, qui signifie que les zones 1 et 2 présentent les plus faibles densités de courant. Le fait que ces deux paramètres 5 (zones 1 et 4) et 7 (zones 1 et 2) soient positifs est en concordance avec le paramètre 11 (zone 1, 2 et 4).

Pour les paramètres qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, c'est le paramètre 1 qui est positif (L pour zone 1) avec une grande valeur, ce qui signifie que c'est la zone 1 qui possède les plus faibles densités de courant. Les symptômes les plus élevés des 16 paramètres

construits sont le 1 et le 11. Cela veut dire que globalement ce sont les zones 1, 2 et 4 qui contiennent les plus de faibles densités de courant avec la zone 1 comme étant la plus touchée.

Le Tableau V-8 donne les paramètres obtenus avec la composante w du champ magnétique. En plus des paramètres positifs pour la composante u, nous retrouvons aussi les paramètres 2, 6 et 12 pour la composante w.

Tableau V-8 : Paramètres obtenus avec la composante w du champ magnétique générée par la distribution de courant de la Figure V-5

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (w)	0.55	0.69	-0.42	-0.81	-0.20	0.20	0.96	-0.96	-0.55	-0.69	0.42	0.81	-0.08	0.08	0.05	-0.05

Le Tableau V-9 résume les paramètres positifs pour les deux composantes u et w. Pour les distributions de courant qui ne sont pas homogènes suivant l'axe z, on trouve que le paramètre 12 (L pour les zones 1, 2 et 3 et H pour la zone 4) est positif (valeur élevée) pour les paramètres représentant trois zones à faibles densités de courant (j=9 :12), ce qui veut dire qu'il existe des cellules le long du stack où la zone 4 présentent de fortes densités de courant sans nous renseigner pour autant sur sa localisation par rapport aux bornes. Le paramètre 11 est positif pour les deux composantes, ce qui veut dire que les cellules concernées par les fortes densités de courant dans la zone 3 sont proches de la borne (-).

Pour les paramètres représentant deux zones à faibles densités de courant (j=5 :8), le paramètre 7 (L pour les zones 1 et 2 et H pour les zones 3 et 4) est activé pour les deux composantes u et w, ce qui signifie que les cellules concernées par ces faibles densités de courant dans la zone 1 et 2 sont proches de la borne (-) ($p_7=0.96$ pour w). Nous avons aussi le paramètre 5 qui est activé pour u et son complément, le paramètre 6, est activé pour w ; ce qui signifie que les cellules concernées par de faibles densités de courant dans les zones 1 et 4 sont proches de la borne (+). Pour confirmer le fait que les faibles densités de courant se trouvent dans les zones 1 et 2, les paramètres 1 et 2 sont activés avec une valeur plus importante pour la zone 2. L'hétérogénéité la plus dominante (densités de courant les plus faibles) le long de l'axe z se situe au niveau des zones 1 et 2 ($p_7=0.96$).

Tableau V-9 : Synthèse des paramètres positifs pour les deux composante u et w

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	n	n	n	ok	n	ok	n	n	n	ok	n	n	n	n	n
Activation (w)	ok	ok	n	n	n	ok	ok	n	ok	n	ok	ok	n	n	n	n

2.3.3. Exemple 3

Nous avons repris le troisième exemple du chapitre précédent (Chapitre IV, paragraphe 5.3.3). La distribution de la densité de courant résultante ainsi que le champ magnétique généré sont donnés par la Figure V-6.

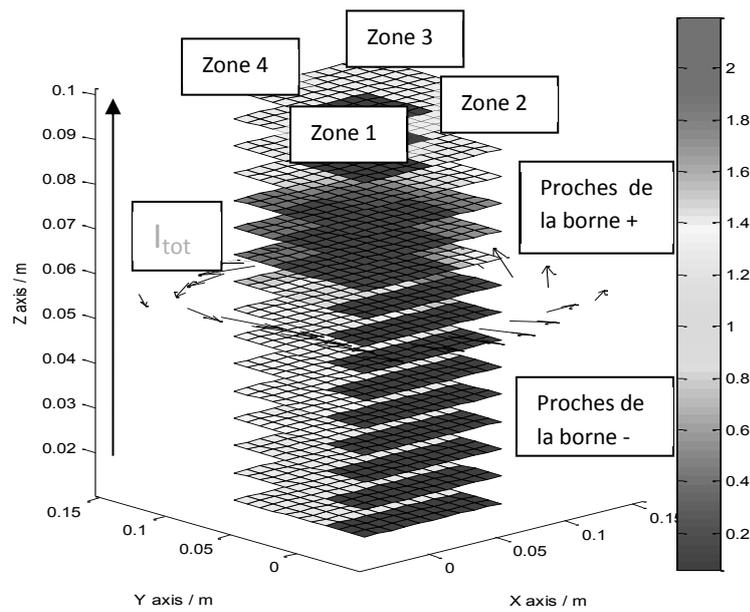


Figure V-6 : Densités de courant en $A.m^{-2}$ et champ magnétique généré (flèche)

Le Tableau V-10 donne les paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique.

Tableau V-10 : Paramètres obtenus avec la composante u du champ magnétique de la distribution de courant de la Figure V-6

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur du paramètre sur la composante (u)	0.86	0.35	-0.76	-0.43	0.32	-0.32	0.93	-0.93	-0.86	-0.35	0.76	0.43	0.01	-0.01	-0.10	0.10

D'après ces résultats, pour les paramètres qui représentent trois zones à faibles densités de courants, $j = 9:12$, on trouve que le paramètre 11 correspondant à la base 11 (L pour zone 1, zone 2 et zone 4, H pour zone 3) possède la plus forte valeur. Contrairement à la méthode des résidus, le paramètre 12 (L pour les zones 1, 2 et 3, H pour zone 4) est activé mais avec une valeur plus faible.

Pour les paramètres qui représentent deux zones à faibles densités de courant, $j = 5:8$, le septième paramètre, correspondant à la base 7 (L pour zone 1 et zone 2, H pour zone 3 et zone 4) est positif avec une grande valeur. Nous constatons aussi que le paramètre 5 (L pour zone 1 et 4 et H pour la zone 2 et 3) est positif avec valeur moins élevée.

Pour les paramètres qui représentent une seule zone à faibles densités de courant, $j = 1:4$, on retrouve le paramètre 1 (L pour zone 1) avec une valeur positive élevée et le paramètre 2 avec une valeur positive plus faible, ce qui veut dire que la zone 1 est la plus touchée. Les paramètres les plus élevés sont le 7 et le 1, ce qui signifie que les zones 1 et 2 sont les zones où les faibles densités de courant dominant, en particulier la zone 1.

Le Tableau V-11 donne les symptômes obtenus avec la composante w du champ magnétique. Nous pouvons constater que les paramètres activés pour cette composante w sont : 2, 6, 7, 9 et 12.

Tableau V-11 : Paramètres obtenus avec la composante w du champ magnétique générée par la distribution de la densité de courant de la Figure V-6

Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur paramètre sur la composante (w)	-0.43	0.92	0.09	-0.62	-0.80	0.80	0.39	-0.39	0.43	-0.92	-0.09	0.62	0.01	-0.01	-0.08	0.08

Le Tableau V-12 résume les paramètres activés pour les deux composantes u et w. Pour les paramètres représentant trois zones à faibles densités de courant, j=9 :12, le paramètre 12 (L pour les zones 1, 2 et 3 et H pour la zone 4) est activé pour les deux composantes u et w, ce qui signifie que les cellules concernées par cette configuration sont proches de la borne (-). Le paramètre 11 est activé uniquement pour la composante u, ce qui signifie que globalement les faibles densités de courant dans les zones 1, 2 et 4 se trouvent tout au long du stack.

Pour les paramètres représentant deux zones à faibles densités de courant, j=5 :8, le paramètre 7 (L pour les zones 1 et 2 et H pour les zones 3 et 4) est activé pour les deux composante u et w, ce qui signifie que les cellules concernées par cette configuration sont proches de la borne (-). Le paramètre 5 (L pour les zones 1 et 4 et H pour les zones 2 et 3) est activé pour les composantes u et son complément, le paramètre 6, est activé pour la composante w, cela signifie que les cellules concernées par cette configuration sont proches de la borne (+).

Pour les paramètres représentant une seule zone à faible densité de courant, j=1 :4, le paramètre 2 présente la valeur la plus élevée pour la composante w et il est également activé pour la composante u, ce qui signifie qu'il existe des cellules proches de la borne (-) pour lesquelles de faibles densités de courant se trouvent dans la zone 2. Le paramètre 1 est activé pour la composante u et son complément, le paramètre 9, est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 1 sont proches de la borne (+). L'hétérogénéité la plus dominante le long de l'axe z se situe au niveau de la zone 1.

Contrairement à la méthode des résidus, la méthode par projection localise presque toutes les zones à faible densité de courant par rapport à l'emplacement du réseau de capteurs.

Tableau V-12 : Synthèse des paramètres activés pour les deux composantes u et w

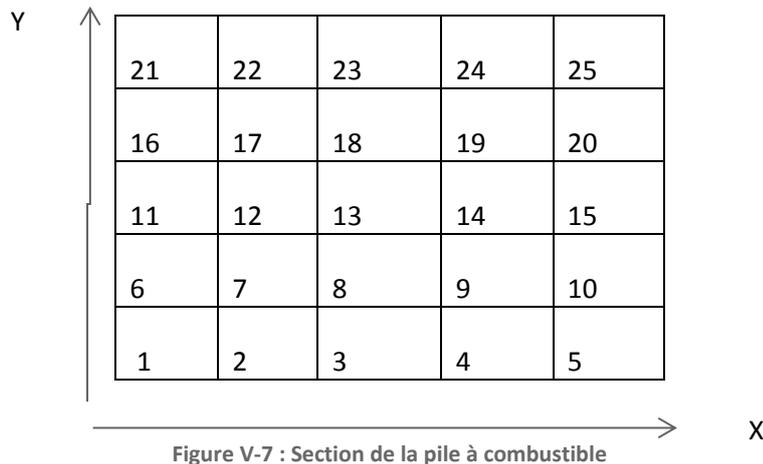
Paramètre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	ok	ok	n	n	ok	n	ok	n	N	n	ok	ok	n	n	n	n
Activation (w)	n	ok	n	n	n	ok	ok	n	ok	n	n	ok	n	n	n	n

3. Approximation de la distribution de la densité de courant à partir des paramètres

Nous venons de voir que les paramètres extraits par projection sont sensibles au degré d'hétérogénéités (valeur de la densité de courant) aux niveaux des zones. Dans ce qui suit, nous

donnons le raisonnement qui conduit à proposer une solution pour estimer la distribution de la densité de courant.

Pour voir l'influence de la résolution de la distribution de la densité de courant, nous divisons la section de la pile en 25 sous sections ($section_k$, $k=1:25$) ayant la même surface comme l'illustre la figure ci-dessous (Figure V-7). Nous considérons toujours que la densité de courant est invariante suivant l'axe z dans le repère (x, y, z).



Nous allons utiliser le modèle magnétique direct sous sa forme matricielle pour décrire le champ magnétique. Nous rappelons que la matrice S comprend les données géométriques qui relient la distribution de courant j au champ magnétique B (Eq.III.10) :

$$B = Sj \tag{Eq (V.7)}$$

Pour chaque sous-section section k ($k=1:25$), on utilise le modèle magnétique direct pour générer le champ magnétique B_k créé par le courant j_k traversant la sous-section $section_k$ tout en mettant tous les autres courants traversant les autres sections à zéro. Du fait de la linéarité du modèle (champ magnétique), j_k peut être choisi arbitrairement.

$$B_k = Sj_k \quad j_k = 1000 Am^{-2} \quad j_l = 0 \text{ si } l \neq k \quad k=1:25, \dim(B_k)=Nbs \times 1$$

$$j_1 = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad j_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad j_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1000 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad j_{24} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 1000 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad j_{25} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1000 \end{bmatrix} \tag{Eq (V.8)}$$

Maintenant, nous allons faire un changement de base pour faire apparaître les vecteurs B_k dans le modèle. Nous allons paramétrer la densité de courant au niveau de la section de la pile. Le choix de définition de cette paramétrisation est très important, car il modifie l'espace de représentation de ce problème et définit la résolution du problème.

$$j = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_k & \dots & j_{24} & j_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \\ \dots \\ \beta_{24} \\ \beta_{25} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.9)}$$

L'équation (Eq V.7) devient obtient alors :

$$B = S \cdot \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_k & \dots & j_{24} & j_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \\ \dots \\ \beta_{24} \\ \beta_{25} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.10)}$$

$$B = \begin{bmatrix} S_{j_1} & S_{j_2} & \dots & S_{j_k} & \dots & S_{j_{24}} & S_{j_{25}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \\ \dots \\ \beta_{24} \\ \beta_{25} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.11)}$$

$$B = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_k \quad \dots \quad B_{24} \quad B_{25}] \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \\ \dots \\ \beta_{24} \\ \beta_{25} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.12)}$$

$$B = [norm(B_1)\overline{B_1} \quad norm(B_2)\overline{B_2} \quad \dots \quad norm(B_k)\overline{B_k} \quad \dots \quad norm(B_{24})\overline{B_{24}} \quad norm(B_{25})\overline{B_{25}}] \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \\ \dots \\ \beta_{24} \\ \beta_{25} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.13)}$$

$$norm(\overline{B_k}) = 1$$

Alors

$$B = C\beta \quad \text{Eq (V.14)}$$

Où C est une matrice connue et β un vecteur à estimer. La matrice C n'est pas de rang plein, mais de rang égal à 24, elle n'est donc pas inversible. Si on choisit 24 vecteurs linéairement indépendants en négligeant un vecteur correspondant à un j_k situé au milieu de la section de la pile dont le champ magnétique est le moins sensible du fait de l'éloignement (loi de la décroissance rapide du champ magnétique), le résultat d'inversion est totalement aberrant dans le cas où le j_k correspondant n'est pas nul. Cela était attendu du fait que le problème est mal conditionné : le facteur de conditionnement de cette matrice est de 2.1371e+010.

Nous proposons donc une autre façon de résoudre le problème. Nous écrivons maintenant le champ magnétique comme étant une combinaison linéaire des bases B_k :

$$B = \beta_1 norm(B_1)\overline{B_1} + \beta_2 norm(B_2)\overline{B_2} + \dots + \beta_k norm(B_k)\overline{B_k} + \dots + \beta_{25} norm(B_{25})\overline{B_{25}} \quad \text{Eq (V.15)}$$

Nous proposons par conséquent de revenir à l'expression du champ magnétique uniquement en fonction de quatre bases (Figure III-15). La résolution du problème est ainsi diminuée. Ce choix est en partie justifié par le fait que le modèle magnétique direct est un filtre passe bas [Le Ny, thèse 2012] :

les fréquences spatiales élevées de la densité de courant ne sont quasiment pas transmises au champ magnétique. A cela s'ajoute le fait que plus on augmente la précision, plus on aura un facteur de conditionnement très élevé. En faisant cela, nous nous intéressons aux densités de courant de très basses fréquences spatiales. Cela correspond à une approximation, les incertitudes vont se répercuter sur les paramètres β à estimer. Nous cherchons à approximer une valeur moyenne des densités de courant pour chacune des quatre zones principales :

$$B = \beta_{11} \text{norm}(X_9) \bar{X}_9 + \beta_{22} \text{norm}(X_{10}) \bar{X}_{10} + \beta_{33} \text{norm}(X_{11}) \bar{X}_{11} + \beta_{44} \text{norm}(X_{12}) \bar{X}_{12} \quad \text{Eq (V.16)}$$

Où β_{11} , β_{22} , β_{33} et β_{44} sont les nouveaux paramètres à estimer

Toutes les bases ayant été créées avec $j= 1000 \text{ A.m}^{-2}$, les normes des quatre bases sont donc égales et nous pouvons alors écrire le champ magnétique B sous la forme suivante:

$$B = 7.7066e^{-6} (\beta_{11} \bar{X}_9 + \beta_{22} \bar{X}_{10} + \beta_{33} \bar{X}_{11} + \beta_{44} \bar{X}_{12}) \quad \text{Eq (V.17)}$$

La valeur $7.7066e^{-6}$ correspond à la norme du champ magnétique de chaque base (X_j) construite avec un $j=1000 \text{ A.m}^{-2}$. De ce fait, les valeurs des densités de courant approximées sont égales aux coefficients de l'équation (Eq V.17) multiplié par $j=1000 \text{ A.m}^{-2}$:

$$j_k = \beta_{kk} * 1000 \text{ A.m}^{-2} \quad k=1:4 \quad \text{Eq (V.18)}$$

J_k correspond à la densité de courant approximée pour la zone k.

Pour simplifier, nous optons pour cette écriture :

$$B = \beta_1 \bar{X}_9 + \beta_2 \bar{X}_{10} + \beta_3 \bar{X}_{11} + \beta_4 \bar{X}_{12} \quad \text{Eq (V.19)}$$

Lorsque l'on récupère une mesure, on la normalise :

$$\frac{B}{\text{norm}(B)} = \frac{\beta_1}{\text{norm}(B)} \bar{X}_9 + \frac{\beta_2}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{10} + \frac{\beta_3}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{11} + \frac{\beta_4}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{12} \quad \text{Eq (V.20)}$$

Lorsqu'on projette sur les quatre directions, on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{X}_9^T \frac{B}{\text{norm}(B)} = \\ \frac{\beta_1}{\text{norm}(B)} \bar{X}_9^T \bar{X}_9 + \frac{\beta_2}{\text{norm}(B)} \bar{X}_9^T \bar{X}_{10} + \frac{\beta_3}{\text{norm}(B)} \bar{X}_9^T \bar{X}_{11} + \frac{\beta_4}{\text{norm}(B)} \bar{X}_9^T \bar{X}_{12} \end{aligned} \quad \text{Eq (V.21)}$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_{10}^T \frac{B}{\text{norm}(B)} = \frac{\beta_1}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{10}^T \bar{X}_9 + \frac{\beta_2}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{10} + \frac{\beta_3}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{11} + \\ \frac{\beta_4}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{12} \end{aligned} \quad \text{Eq (V.22)}$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_{11}^T \frac{B}{\text{norm}(B)} = \frac{\beta_1}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{11}^T \bar{X}_9 + \frac{\beta_2}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{10} + \frac{\beta_3}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{11} + \\ \frac{\beta_4}{\text{norm}(B)} \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{12} \end{aligned} \quad \text{Eq (V.23)}$$

$$\frac{\beta_4}{norm(B)} \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{12}$$

$$\bar{X}_{12}^T \frac{B}{norm(B)} = \frac{\beta_1}{norm(B)} \bar{X}_{12}^T \bar{X}_9 + \frac{\beta_2}{norm(B)} \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{10} + \frac{\beta_3}{norm(B)} \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{11} + \frac{\beta_4}{norm(B)} \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{12} \quad \text{Eq (V.24)}$$

On obtient ainsi le système d'équation linéaire suivant :

$$\begin{bmatrix} p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{norm(B)} \begin{bmatrix} \bar{X}_9^T \bar{X}_9 & \bar{X}_9^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_9^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_9^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{10}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{11}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{12}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.25)}$$

Cette matrice est de rang plein, et son facteur de conditionnement est de 64.

D'où :

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = norm(B) \begin{bmatrix} \bar{X}_9^T \bar{X}_9 & \bar{X}_9^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_9^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_9^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{10}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{10}^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{11}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{11}^T \bar{X}_{12} \\ \bar{X}_{12}^T \bar{X}_9 & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{10} & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{11} & \bar{X}_{12}^T \bar{X}_{12} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.26)}$$

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = norm(B) \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.1457 & -0.6823 & -0.1457 \\ -0.1457 & 1.0000 & -0.1457 & -0.6823 \\ -0.6823 & -0.1457 & 1.0000 & -0.1457 \\ -0.1457 & -0.6823 & -0.1457 & 1.0000 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.27)}$$

En divisant les derniers paramètres approximés par la valeur $7.7066e^{-6}$, nous retrouvons les paramètres β_{kk} recherchés.

3.1. Exemple 1

Pour illustrer cette méthode, nous avons repris l'exemple à trois régions de densités de courant différentes (Figure V-8).

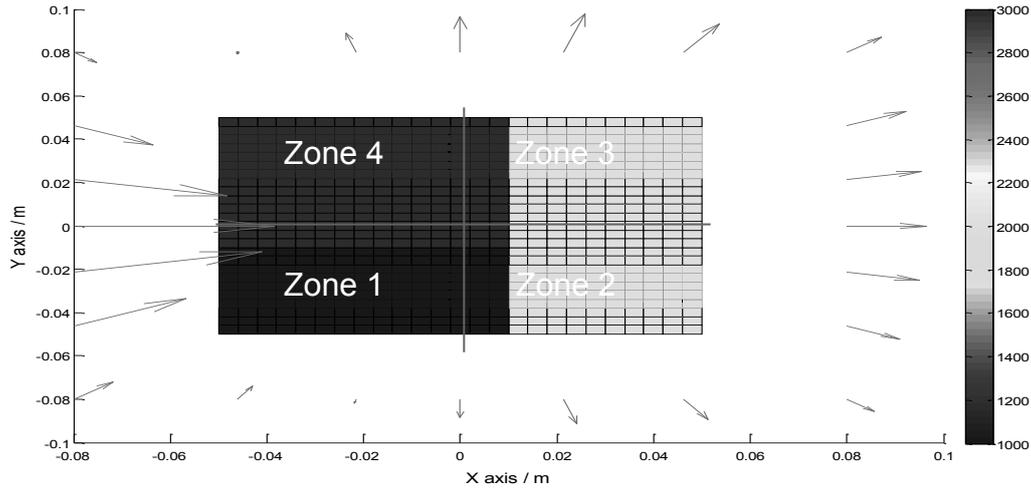


Figure V-8 : Cas avec 3 densités de courant différentes

Nous rappelons les paramètres extraits par projection de la mesure (champ magnétique) dans la direction des bases :

$$\begin{bmatrix} p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.6541 \\ -0.4918 \\ 0.3220 \\ 0.8317 \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.28)}$$

Les coefficients obtenus sont :

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9705 \\ -0.2017 \\ 0.0245 \\ 1.1474 \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.29)}$$

Ainsi les densités de courants estimées par zone sont :

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_3 \\ j_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -970.9 \\ -201.7 \\ 24.5 \\ 1147.2 \end{bmatrix} \text{A.m}^{-2} \quad \text{Eq (V.30)}$$

Il faut rappeler que le réseau de capteurs n'est sensible qu'au champ magnétique généré par les distributions de densités de courants hétérogènes, ce qui explique la valeur moyenne nulle des densités de courant estimées pour les quatre zones. La valeur moyenne de la densité de courant de la Figure V-8 est d'environ 2100 A.m⁻². D'après ces estimations, les zones 1 et 2 sont celles qui présentent des densités de courant les plus faibles par rapport à cette valeur et les zones 3 et 4 sont celles qui présentent les densités de courant les plus élevées. Cela correspondant bien aux densités de courant décrites dans la Figure V-8. Nous pouvons constater que les densités de courant sont légèrement surestimées, mais globalement les estimations restent acceptables.

3.2. Exemple 2

Pour voir l'évolution des densités de courant estimées, nous avons repris l'exemple précédent en apportant quelques modifications : remplacement de densités de courant élevées par des densités de courant faibles dans la zone 4 et remplacement de quelques densités de courant faibles par des densités de courant élevées dans la zone 1 et 2 comme l'illustre la Figure V-9.

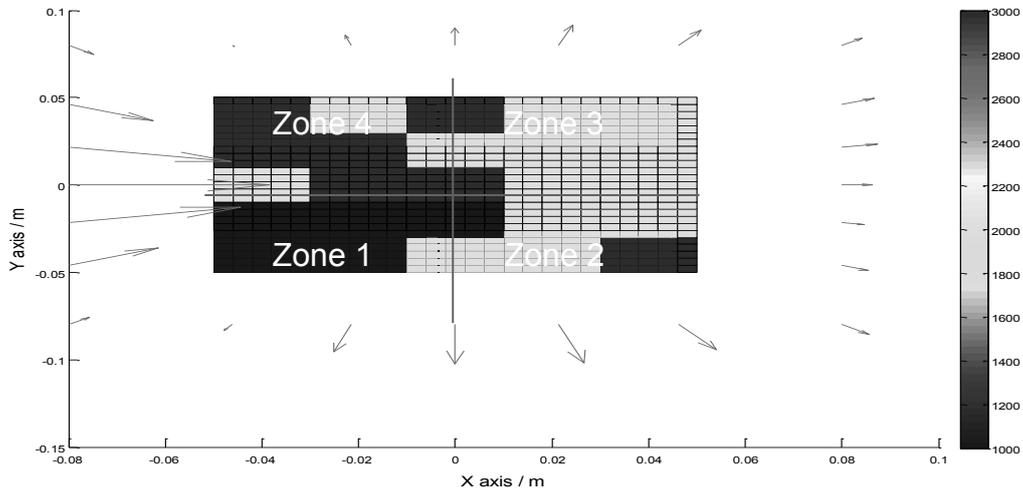


Figure V-9 : Densités de courant en $A.m^{-2}$ sur la section de la pile

Les paramètres extraits sont :

$$\begin{bmatrix} p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8437 \\ -0.1296 \\ 0.3438 \\ 0.6294 \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.31)}$$

Nous pouvons constater que le paramètre 12 qui représente les fortes densités de courant dans la zone 4 a considérablement diminué. Les coefficients obtenus sont désormais :

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9674 \\ 0.2341 \\ -0.0727 \\ 0.8060 \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.32)}$$

Les densités de courant estimées sont alors :

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_3 \\ j_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -967.4 \\ 234.1 \\ -72.7 \\ 806 \end{bmatrix} A.m^{-2} \quad \text{Eq (V.33)}$$

Nous constatons une diminution de la densité de courant moyenne dans la zone 4 et une augmentation de la densité de courant dans la zone 2, ce qui est totalement attendu. Cet exemple montre que l'approche qui consiste à attribuer une valeur moyenne pour seulement quatre zones peut s'avérer très efficace pour avoir une bonne estimation de la distribution de la densité de courant.

4. Diagnostic

Dans les sections précédentes, nous avons vu l'étape de détection des régions à faibles densités de courant au niveau de la section de la pile, leurs localisations le long du stack et l'étape d'estimation des densités de courant hétérogènes. Nous allons voir maintenant l'étape de localisation qui consiste à déterminer l'origine (les défauts) ayant conduit à l'évolution de la distribution de courant. Ces évolutions peuvent être liées au fonctionnement inhérent du système ou au changement de l'une des conditions opératoires au niveau des sous-systèmes. De ce fait, l'information utilisée pour extraire les paramètres est le résidu R_b (Eq III-13) et non plus le vecteur des mesures $Y(t)$.

4.1. Classification non supervisée

La première démarche proposée vise à donner deux moyens d'aboutir à une table de signature dans un cadre non supervisé. La première est basée sur le signe des paramètres et la deuxième sur la création de variables qualitatives.

4.1.1. Signe des paramètres

Nous avons vu précédemment que l'étape d'extraction des paramètres est à la fois facile à mettre en œuvre et rapide. Nous avons vu aussi que les paramètres extraits représentent des fonctions linéaires discriminantes : un paramètre positif indique la présence de la caractéristique (base) et un paramètre négatif indique l'absence de la caractéristique. Il est inutile d'utiliser les paramètres extraits à partir des compléments des bases du fait que ces derniers n'apportent pas d'informations supplémentaires.

$$s_i = \begin{cases} 0, & \text{si } p_i < 0 \\ 1, & \text{si } p_i > 0 \end{cases} \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 7, 13, 15 \quad \text{Eq (V.34)}$$

Nous construisons une variable booléenne s_i traduisant le signe du paramètre. Cette propriété de chaque paramètre va permettre de séparer chaque mesure en deux classes qui pourrait être utilisée pour construire une table de signature traduisant l'influence de chaque défaut à partir du signe des paramètres. En supposant qu'il existe Z défauts f_i (cause de l'évolution de la distribution de courant) qui sont localisés à partir des $N/2$ signes des paramètres, on peut construire une table de signature booléenne, qui est une matrice de $N/2$ lignes et Z colonnes. Un exemple est donné dans le Tableau V-13.

Pour construire cette table de signature, nous devons disposer d'un minimum d'expériences permettant d'observer l'influence des défauts sur les signes. À l'aide d'opérations logiques, les signatures contenues dans la table peuvent être ensuite comparées à de nouvelles observations qui pourront être classées.

Tableau V-13 : Table de signature

	f_1	...	...	f_Z
s_1	1			
s_2	0	0		
s_3	1			
s_4	1		1	
s_5				
s_7		0		
s_{13}				
s_{15}				

4.1.2. Variables qualitatives

Comme dans le chapitre précédent, nous pouvons envisager le diagnostic à travers des signatures de références prédéfinies. Ces signatures de référence ont pour but de décrire qualitativement les performances de conversion énergétique locales. Nous pouvons utiliser les variables qualitatives créées au chapitre précédent comme suit :

- **G**: cette variable prend le numéro du paramètre ayant la valeur la plus élevée parmi les paramètres qui représentent trois zones à faibles densités de courant :

$$G = k: \max_k (p_k |_{k=9}^{k=12}) \quad \text{Eq (V.35)}$$

- **Half** : cette variable prend le numéro du paramètre ayant la valeur la plus élevée parmi les paramètres qui représentent deux zones à faibles densités de courant :

$$Half = k: \max_k (p_k |_{k=5}^{K=8}) \quad \text{Eq (V.36)}$$

- **H** : cette variable prend le numéro du paramètre ayant la valeur la plus élevée parmi les paramètres qui représentent une seule zone à faibles densités de courant :

$$H = k: \max_k (p_k |_{k=1}^{k=4}) \quad \text{Eq (V.37)}$$

- **D** : un autre indicateur D (hétérogénéité dominante) qui dépendra des variables définies ci-dessus peut être défini. Cette variable prend le numéro du paramètre ayant la valeur la plus élevée parmi les douze paramètres :

$$D = k: \max_k (p_j |_{k=1}^{k=12}) \quad \text{Eq (V.38)}$$

Comme au chapitre précédent, l'idée clé de la procédure de diagnostic à partir de ces signatures de références est la suivante : si chaque défaut de la pile à combustible appartient à l'une ou à plusieurs des signatures de référence prédéfinies et est distinguable, cette démarche devient un outil remarquable qui peut être utilisé dans le cadre de l'isolation des défauts sous-systèmes et du défaut liée au fonctionnement inhérent du stack.

4.2. Classification supervisée

Nous proposons ici un moyen de localiser les défauts qui permet d'utiliser les données exactes (paramètres) sans perte d'informations. Ici, nous voulons utiliser le fait que si pour un mode de fonctionnement donné (défaut), la distribution de la densité de courant évolue de la même façon, alors, les paramètres P calculés par projection pour ce mode de fonctionnement seront également similaires.

Considérons que la PAC possède Z modes de fonctionnement éventuels. Supposons qu'une série d'expériences $E(f_i)$ (mode de fonctionnement i) soit effectuée pour chaque mode de fonctionnement (soit en modifiant l'une des conditions opératoires optimales, soit par le maintien des conditions optimales de fonctionnement initiales du système). Considérons les Z sous-ensembles $\{\mathcal{P}_i\}_{i=1}^Z$ de l'ensemble des paramètres extraits avec les expériences effectuées $E(f_i)$. Ces expériences donnent ce qu'on appelle les données d'apprentissage.

La méthodologie adoptée repose sur la construction de plusieurs classifieurs et sur la combinaison de leurs décisions respectives pour produire une décision finale sur la présence et la localisation des défauts. Comme l'illustre la Figure V-10, le champ magnétique mesuré est comparé au champ magnétique nominal (comportement nominal), ensuite ce résidu est utilisé pour extraire les paramètres P .

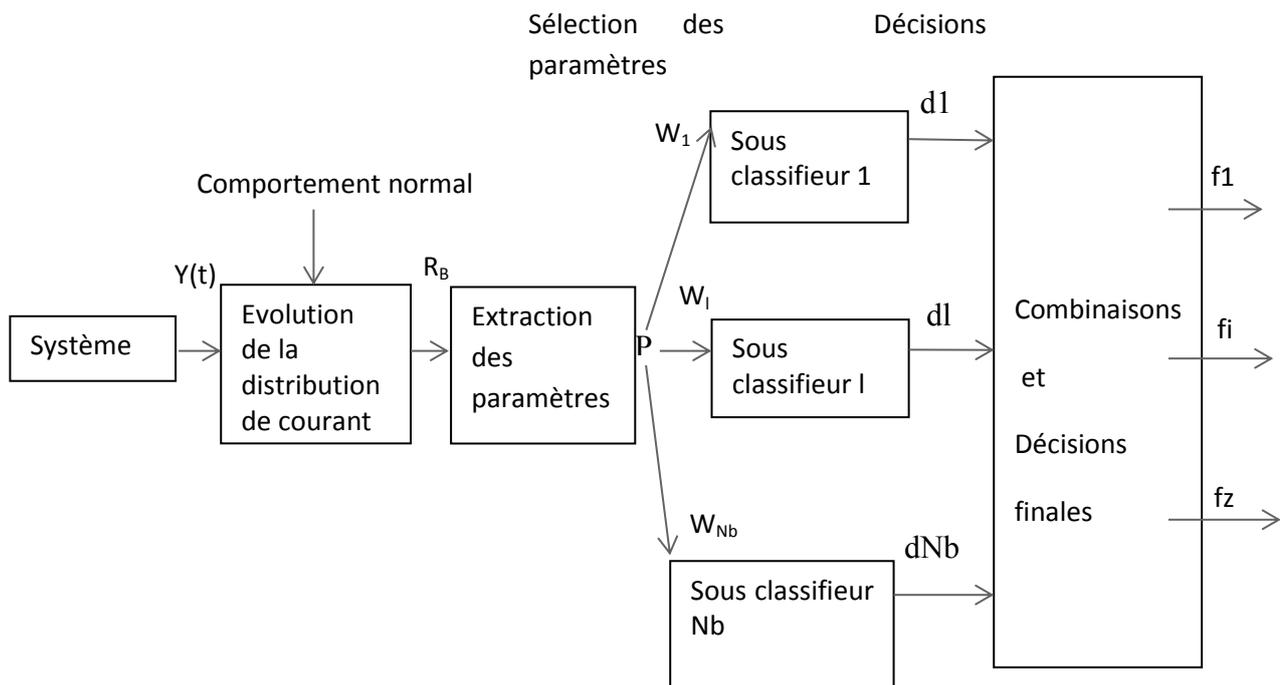


Figure V-10 : Schéma de principe de la classification

L'utilisation de tous les paramètres peut induire une perte d'informations (données inséparables) et une séparation complexe à cause de la difficulté à décrire les frontières entre les classes. C'est pour cette raison que la tâche de classification sera fractionnée en plusieurs classifieurs. Dans cette

structure, les sous classifieurs ne sont pas obligatoirement dédiés chacun à la séparation d'un défaut des autres défauts.

Le problème de classification est défini comme suit : trouver Nb jeux de paramètres $W_i \subset P$ de telle sorte que pour tous les indices $i, j \in \{1, \dots, Z\}$, il existe des jeux de paramètres W_i (un sous ensemble de P), de telle sorte que f_i et f_j soient séparés pour tout $j \neq i$.

4.2.1. Résolution du problème de classification

Dans ce travail, compte tenu du manque de données expérimentales, nous n'allons pas résoudre complètement le problème de classification. Nous proposons une procédure simple à tester pour la séparation des groupes de données étiquetés (base d'apprentissage) disponibles. Cette base de données étant faible, elle ne peut pas constituer une base d'apprentissage. Nous n'allons donc pas définir mathématiquement des frontières de décision permettant de classer une nouvelle observation, mais nous allons en donner les éléments nécessaires.

Le point de départ de la procédure proposée s'appuie sur le fait que l'œil humain, par l'activité fondamentale du cerveau, est capable d'effectuer des tâches de classification très complexes. Cette capacité de classification est plus facile à exercer dans un espace à deux dimensions (le plan 2D).

Une simple représentation dans le plan 2D constituée de deux paramètres parmi les N paramètres peut s'avérer intéressante pour la séparation d'une ou de plusieurs classes. Un autre moyen de représenter l'ensemble des paramètres dans le plan 2D est l'utilisation de combinaisons linéaires des paramètres extraits.

La projection de données de type vectoriel (vecteurs contenant les paramètres) dans l'espace bidimensionnel \mathcal{R}^2 permet de mieux visualiser les corrélations qui peuvent exister entre les données de l'espace de départ. C'est ce que nous allons utiliser dans la suite.

4.2.1.a. Construction d'un nouvel espace de représentation

Pour la construction de l'espace de représentation bidimensionnel (plan 2D), une application appelée Stylo ("Pencil" en anglais) établie par [Youssef et al., 2003] sera utilisée dans notre travail mais dans un objectif différent. Cette application Stylo est représentée par une fonction $\mathcal{R}^K \rightarrow \mathcal{R}^2$ associée à chaque vecteur dont les éléments sont compris entre -1 et 1 un point (une coordonnée) dans l'espace bidimensionnel \mathcal{R}^2 . Cela se fait à travers une séquence de définitions comme suit :

Etape 1. Considérons les K sommets d'un polygone régulier de dimension K, dénommés par S_i (Figure V.11) :

$$S_i = \left(\cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{K}\right) \quad \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{K}\right) \right)^T \quad i=1:K \quad \text{Eq (V.39)}$$

Etape 2. Considérons une fonction ψ qui associe à chaque vecteur W, K points dans l'espace bidimensionnel :

$$\psi: [-1 \quad 1]^K \rightarrow \mathcal{R}^2 \times \dots \times \mathcal{R}^2 = (\mathcal{R}^2)^K$$

$$\psi(W) = (\psi_1(W) \quad \dots \quad \psi_K(W)); \psi_i(W) \in \mathcal{R}^2 \quad \text{Eq (V.40)}$$

La $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur W , w_i , est utilisée pour la définition du point noté $\psi_i(W)$ (Figure V.11) sur le $i^{\text{ème}}$ segment noté $S_i S_{i+1}$ du polygone régulier défini ci-dessus comme suit :

$$\psi_i(W) = \frac{1}{2} [(1 + w_i)S_{(i+1|K)} - (w_i - 1)S_i] \quad \text{Eq (V.41)}$$

Avec les définitions précédentes, nous aurons pour ces trois cas particuliers les résultats suivants :

$$\begin{cases} \text{Si } w_i = 0 \text{ Alors } \psi_i(W) \text{ est au milieu du segment } S_i S_{i+1} \\ \text{Si } w_i = -1 \text{ Alors } \psi_i(W) \text{ coïncide avec } S_i \\ \text{Si } w_i = 1 \text{ Alors } \psi_i(W) \text{ coïncide avec } S_{i+1} \end{cases}$$

Etape 3. En utilisant la fonction ψ définie précédemment, on peut définir par exemple deux points $\varphi_0(W)$ et $\varphi_1(W)$ suivant les deux relations suivantes :

$$\varphi_0(W) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{i=K} \psi_i(W) \quad \text{Eq (V.42)}$$

$$\varphi_1(W) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{i=K} w_i \psi_i(W) \quad \text{Eq (V.43)}$$

$\varphi_0(W)$ et $\varphi_1(W)$ représentent respectivement le centre de gravité des $\psi_i(W)$ et le centre de gravité de $\psi_i(W)$ pondéré avec la composante w_i . Les deux points se trouvent à l'intérieur du polygone. Le facteur $\frac{1}{K}$, utilisé dans les deux expressions, représente un facteur qui peut être interprété graphiquement comme un zoom que nous n'avons pas besoin d'utiliser ici. Sur la Figure V.11, nous avons représenté le point $\varphi_0(F)$ pour un exemple de vecteur F .

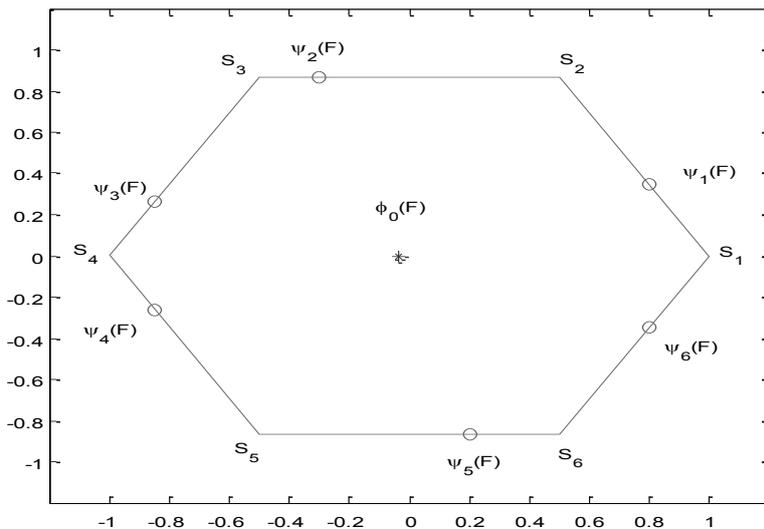


Figure V-11 : Représentation des coordonnées S_i , $\psi_i(F)$ et $\varphi_0(F)$ pour $k=6$ et $F= (-0.2, 0.6, 0.4, -0.4, 0.4, 0.2)^T$

4.2.1.b. Sélection des paramètres

L'objectif de cette partie est de proposer un moyen de sélectionner le jeu de paramètres à projeter dans l'espace 2D afin de séparer les différents défauts. L'idéal serait de trouver un seul jeu de paramètres qui séparerait tous les défauts dans un seul plan 2D. Dans le cas contraire, il s'agirait de trouver plusieurs jeux de paramètres tels que chacun de ces derniers permettrait d'isoler un certain nombre de défauts.

Dans un cadre supervisé (les données sont étiquetées), la séparation idéale serait de retrouver les coordonnées des paramètres projetés pour un même défaut linéairement séparables par rapport aux autres défauts afin de faciliter la définition de la surface de décision. Une autre séparation intéressante est que ces coordonnées se trouvent dans un quadrant du plan (par exemple : abscisse positive et ordonnée négative) et les autres ailleurs.

Il est important de noter également qu'il existe des méthodes de sélection des paramètres pertinents selon le critère de Fisher [Kittler, 1986] pour discriminer deux classes différentes. Ces méthodes partent du principe que les observations d'une même classe doivent être les plus proches possibles et les observations appartenant à des classes différentes le plus éloignées possibles. Le critère pour la sélection des paramètres peut être défini comme :

Maximiser la variance intra classe pour avoir des classes le plus éloignées les unes des autres et minimiser la variance inter classe.

Soient la moyenne m_i , l'écart-type σ_i et n_i ($i=1$ ou 2) le nombre d'échantillons des deux classes 1 et 2. Le poids de Fisher pour un paramètre p_i est défini comme étant la mesure de l'éloignement entre les échantillons (intra classes) des deux classes rapporté au rapprochement d'échantillons au sein de la même classe (variance inter classe) :

$$F_{1,2}(p_i) = \frac{(m_i(\omega_1) - m_i(\omega_2))^2}{n_1 \sigma_i^2(\omega_1) + n_2 \sigma_i^2(\omega_2)} \quad \text{Eq (V.44)}$$

Ce poids mesure le pouvoir de discrimination permettant d'évaluer la pertinence des paramètres p_i à séparer deux classes distinctes. Chaque poids est calculé individuellement en supposant l'indépendance entre les paramètres. Il en résulte que les paramètres sélectionnés comme étant pertinents peuvent être corrélés entre eux. D'autres méthodes comme celle de [Kittler, 1986] dont le but est de chercher des sous-ensembles de paramètres par adjonction ou élimination séquentielle existent.

L'application de cette méthode de sélection de paramètres par le critère de Fisher nécessite de se ramener à problème de classification binaire, chaque classe sera séparée de toutes les autres qui sont alors considérées comme une seule classe. Pour Z classes différentes, Z jeux de valeurs du critère de Fisher sont nécessaires. Chaque jeu de valeurs permet de séparer une classe des $Z-1$ autres.

En se servant du fait que les paramètres extraits aient un sens physique pertinent, nous proposons une autre alternative simple et intéressante qui pourraient nécessiter moins de sous classifieurs pour résoudre en plusieurs étape le problème de classification des Z modes de fonctionnement. La

méthodologie utilisée pour le choix des paramètres s'inscrit dans une suite logique liée à la construction même des bases ayant servis à extraire les paramètres.

Nous supposons l'existence de Nb sous-ensembles de jeu de paramètres $W=V_j$ (sélection des paramètres pertinents) permettant de résoudre le problème de classification des Z défauts dans l'espace 2D en utilisant les coordonnées $\varphi_0(W)$ et/ou $\varphi_1(W)$ à travers l'utilisation de (Eq V.42) et/ou (Eq V. 43).

Dans un premier temps, il convient de projeter dans le plan 2D des sous-ensembles V_j contenant quatre paramètres.

Pour choisir les sous-ensembles V_j avec quatre paramètres, le raisonnement est basé sur la construction des bases à savoir :

- les paramètres extraits à partir des bases représentant une seule zone à faible densité de courant: $V_1 = (p_1, p_2, p_3, p_4)^T$,
- les paramètres extraits à partir des bases représentant deux zones à faible densité de courant : $V_2 = (p_5, p_6, p_7, p_8)^T$,
- les paramètres extraits à partir des bases représentant trois zones à faible densité de courant : $V_3 = (p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12})^T$
- les paramètres extraits à partir des bases représentant des faibles densités aux extrémités de la surface de la pile à combustible : $V_4 = (p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16})^T$.

L'étape suivante correspond à tester des sous-ensembles avec huit paramètres et enfin tous les paramètres en combinant V_1, V_2, V_3 et V_4 .

La recherche doit être suivie jusqu'à trouver Nb sous-ensembles de paramètres de sorte que tous les défauts soient séparés dans Nb plan 2D. L'étape de définition des surfaces de décision n'a pas été faite dans le présent document du fait que la base d'apprentissage est très faible, le but est de montrer un moyen simple et rapide afin d'aider à la construction de plusieurs sous classifieurs dans l'espace 2D à partir des sous-ensembles de paramètres.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode d'extraction de paramètres rapide et facile à mettre en œuvre. Ces paramètres sont directement exploitables pour la détection d'hétérogénéités. Nous avons vu que les paramètres extraits représentent des fonctions linéaires discriminantes : un paramètre positif indique la présence de la caractéristique (base) et un paramètre négatif indique la non présence. Cette approche ne nécessite pas l'utilisation d'un seuil pour décider de la présence ou non d'une caractéristique : plus la valeur du paramètre est proche de 1 plus la caractéristique est dominante.

Nous avons aussi vu que les paramètres extraits sont très sensibles à la valeur moyenne des densités de courant aux niveaux des différentes zones. Les paramètres correspondant aux zones qui contiennent les plus faibles densités de courant ont les valeurs les plus élevées. Nous avons aussi constaté que les paramètres extraits à partir des deux composantes u et w arrivent à mieux localiser l'emplacement des hétérogénéités le long du stack que la méthode des résidus.

Dans ce chapitre, l'extension de cette méthode de détection des hétérogénéités au problème de l'estimation de la distribution de la densité de courant (problème inverse) est illustrée sur deux exemples. Nous avons choisi de diminuer la résolution du problème (une seule valeur moyenne par zone principale) afin d'exprimer les densités de courant uniquement en fonction des paramètres extraits et des bases 9, 10, 11 et 12. Ce choix est justifié par le fait que les densités de courant de fréquences spatiales élevées ne sont pas transmises au réseau de capteur. De plus le facteur de conditionnement de la matrice à inverser est faible, ce qui permet de s'affranchir des outils de régularisation tout en ayant une bonne approximation par zone.

Plusieurs voies permettant la classification des défauts ont été proposées : comme dans la méthode des résidus, dans une optique de caractérisation non supervisée, quatre variables qualitatives ont été calculées à partir des paramètres générés. Ensuite, une classification des distributions de courant non uniformes qui ne requiert pas une connaissance a priori sur les dysfonctionnements pouvant affecter la pile à combustible est proposée. Les signatures de référence ont été prédéfinies a priori en se basant sur les hétérogénéités dominantes. Une autre table de signature booléenne cette fois-ci basée sur les signes des paramètres extraits a été proposée pour caractériser chaque distribution de courant non uniforme.

Concernant la partie diagnostic des défauts, l'origine de l'évolution de la distribution de courant peut être localisée si chaque défaut appartient à une ou plusieurs signatures de référence prédéfinies dans les deux tables de signature de façon distincte.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la problématique de classification supervisée. Nous avons proposé de fractionner la tâche de classification en plusieurs sous-classifications. Nous avons montré comment il est possible à partir d'un jeu de paramètres d'obtenir des nuages de points dans l'espace 2D. Pour la sélection des paramètres à projeter, on pourrait utiliser le critère de Fisher pour construire Z sous classifieurs binaires. Nous avons proposé une autre solution qui est liée à la construction même des bases suivant le nombre de zones à faibles densités de courant. Cette deuxième possibilité pourrait conduire à construire moins de classifieurs, ce qui réduirait probablement la complexité de la classification.

Les deux méthodes (chapitres IV et V) peuvent maintenant être appliquées sur des mesures réelles.

VI. Application sur un stack industriel

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer les méthodes développées sur le stack industriel GENEPAC pour différents cas de fonctionnement. Les mesures sont exploitées de deux manières : mesures moyennées et mesures instantanées. Nous disposons de données issues de six expériences menées lors des travaux de thèse de M. Le Ny [Le Ny, thèse 2012] dans le cadre du projet OMNISCIENTS. Cependant, nous nous sommes particulièrement focalisés sur deux d'entre elles pour suffisamment interpréter les résultats et permettre ainsi au lecteur d'appréhender au mieux leur pertinence.

2. Présentation du système expérimental

Les expériences ont été menées sur un stack PEMFC de technologie GENEPAC développé par le CEA et PSA (Figure VI-1). Le stack est composé de 40 cellules dont les dimensions sont données dans le Tableau VI-1.

Tableau VI-1 : Dimensions géométriques du stack GENEPAC

Section	160 x 140 mm ²
Epaisseur des AME et des plaques bipolaires du stack	2 mm
Epaisseur d'une plaque terminale	62 mm
Nombre de cellules	40

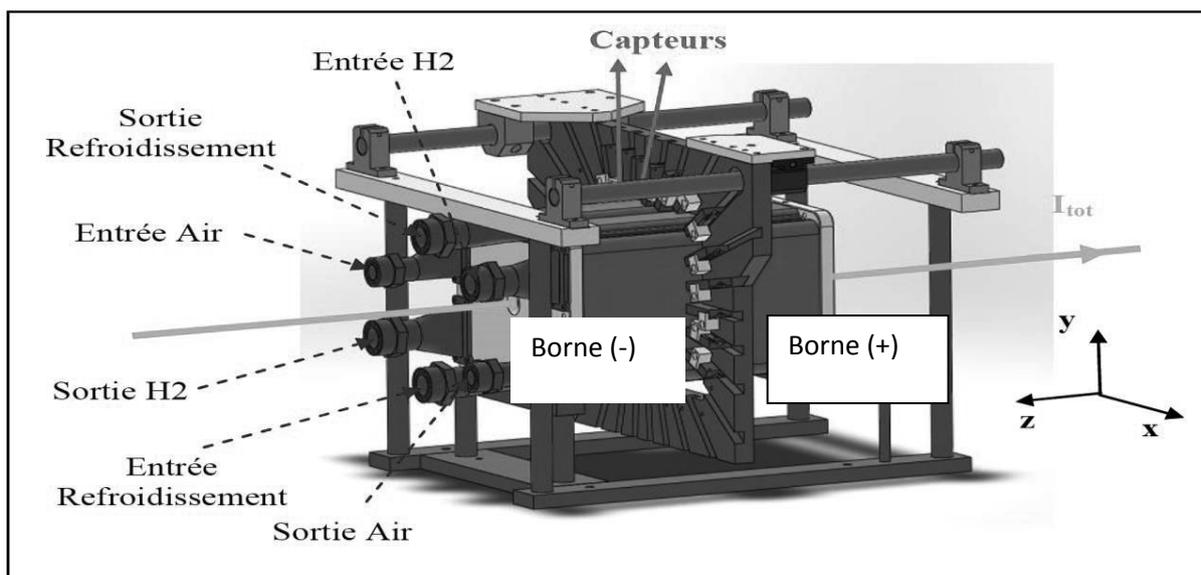


Figure VI-1 : Stack GENEPAC et le système de positionnement mécanique [LE NY, thèse 2012]

Le stack étant alimenté en hydrogène et en air, l'humidité relative peut donc être réglée. Les localisations des Entrées/Sorties des gaz ainsi que le circuit de refroidissement sont indiquées sur la Figure VI-1. Les capteurs magnétiques utilisés sont de technologie fluxgate avec une étendue de mesure de $\pm 200 \mu T$. Ils sont au nombre de 30. L'installation réelle du stack GENEPAC et de son système de positionnement des capteurs est donnée sur la Figure VI-2.

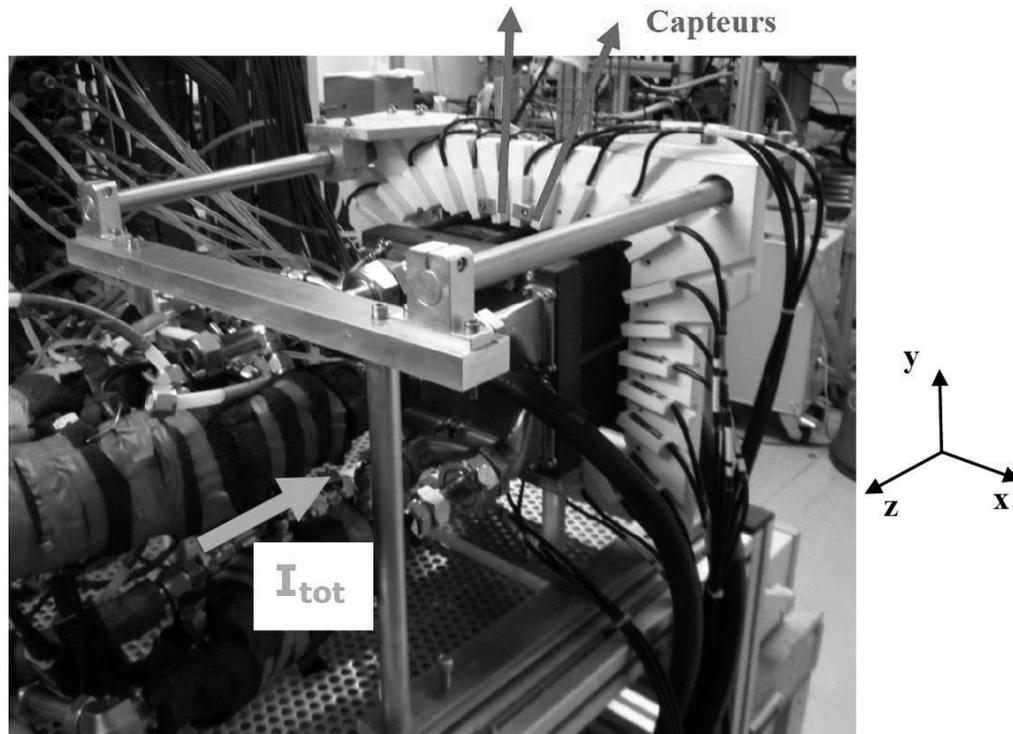


Figure VI-2 : Photo du stack GENEPAC et le système de positionnement mécanique [LE-NY, thèse 2012]

Le tableau ci-dessous résume les conditions opératoires nominales données par le constructeur :

Tableau VI-2 : Conditions opératoires nominales du stack

Courant (I_{tot})	110 A
Densité de courant moyenne	0.5 A/cm ²
Humidité relative (air and H ₂)	50 %
Pression (Anode /Cathode)	1.5 bar
Stœchiométrie (Air/H ₂)	2.2 / 1.5
Température du stack	80 °C

Afin de vérifier la validité des résultats fournis par les méthodes discutées dans ce chapitre, le stack GENEPAC a été instrumenté à l'aide d'une plaque de mesure de densité de courant de la société S++ (Figure VI-3). Cette carte S++ s'insère entre deux plaques bipolaires à la place d'un assemblage membrane électrode [S++]. Elle a été insérée au milieu du stack. Elle possède l'avantage de disposer d'une bonne résolution spatiale. Cependant, elle est très sensible aux variations de températures et présente une bande passante plus faible que le système de mesure magnétique utilisé. De plus, cette plaque de mesure, comme cela a été dit précédemment, induit des perturbations sur le fonctionnement du stack qui sont encore mal maîtrisées, elle est invasive.



Figure VI-3 : Plaque invasive de mesure de la distribution de courant [Le Ny, thèse 2012]

3. Mode de fonctionnement de la pile à combustible

On fait fonctionner la pile en maintenant le courant total constant. Afin de tester la capacité de l'outil de diagnostic à détecter des défauts de fonctionnement, plusieurs expériences consistant à modifier les différentes conditions opératoires susceptibles d'avoir un effet sur l'apparition de distributions de courant hétérogènes ont été réalisées. Cinq conditions opératoires seront étudiées :

- L'humidité relative du combustible, HR_a , définie par le point de rosée et la température d'entrée de l'hydrogène dans la PAC.
- L'humidité relative du comburant, HR_c , définie par le point de rosée et la température d'entrée de l'air dans la PAC.
- La stœchiométrie cathodique, λ_c , définie comme le rapport entre le débit molaire d'oxygène entrant et celui nécessaire à la réaction électrochimique.
- La stœchiométrie en combustible λ_a , définie comme le rapport entre le débit molaire d'hydrogène entrant et celui nécessaire à la réaction électrochimique.
- La pression absolue de fonctionnement.

De plus, pour estimer l'impact de la durée de fonctionnement, une autre expérience a été réalisée. Elle consiste à faire fonctionner la pile à combustible sur une période de 60 heures tout en gardant les conditions opératoires optimales résumées dans le Tableau VI-2. La dégradation des performances du stack au cours du temps est alors suivie. Le Tableau VI-3 résume les expériences qui ont été menées sur le stack GENEPAC.

Les valeurs du courant électrique et de la température de fonctionnement du stack n'ont pas été considérées dans cette étude. Elles ont donc été fixées aux valeurs nominales recommandées par le constructeur.

Tableau VI-3 : Modes de fonctionnement de la pile à combustible

Mode de fonctionnement	Type	Description
f_1	Diminution de la stœchiométrie de l'air	Diminution en créneau
f_2	Augmentation de la stœchiométrie de l'air	Augmentation en créneau
f_3	impact durée fonctionnement	60 heures de fonctionnement
f_4	Diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène	Diminution en créneau
f_5	Diminution de la pression	Diminution en créneau
f_6	Augmentation de l'humidité relative des gaz (hydrogène et air)	Augmentation en créneau

Nous avons vu dans le chapitre 3 que le modèle magnétique direct permet de calculer le champ magnétique perçu par les capteurs placés autour d'un stack à partir d'une distribution de courant. Cependant, dans un environnement réel, au champ magnétique émis par la distribution de courant dans la PAC s'ajoute le champ magnétique terrestre ainsi que le champ magnétique généré non seulement par la boucle de courant externe à la PAC mais aussi celui dû aux différents équipements au voisinage de la PAC :

$$B(t) = B(t)_{terre} + B(t)_{cables} + B(t)_{stack} \quad (\text{Eq VI.1})$$

Nous définissons le résidu R_B (Eq III-13) comme étant la différence entre le champ magnétique à un instant t_2 et le champ magnétique à l'instant t_1 correspondant au champ magnétique de référence. Celui-ci est généré par la pile à combustible dans les conditions opératoires optimales définies par le constructeur et il correspond au fonctionnement normal de la pile à combustible.

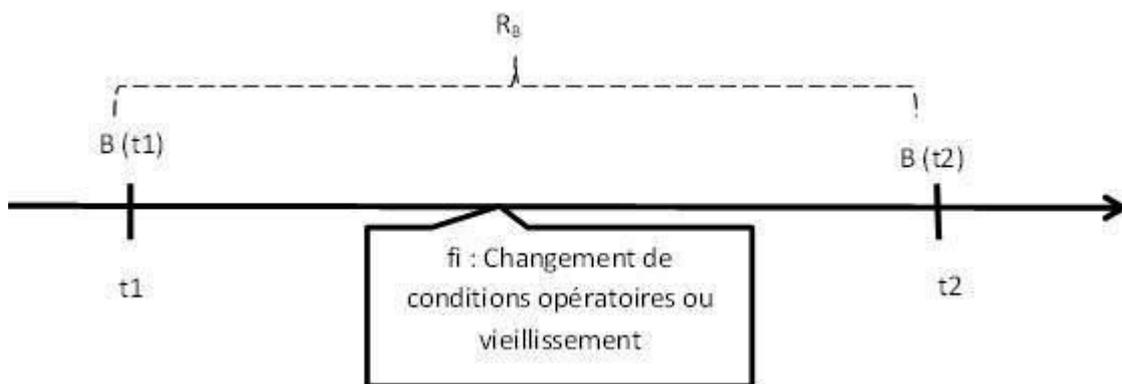


Figure VI-4 : Evaluation du résidu R_B entre les instants t_1 et t_2

Cette différence indique un changement de la densité de courant hétérogène dans la pile à combustible (puisque les capteurs ne détectent que le champ magnétique généré par la distribution

de courant hétérogène) due à un changement du mode de fonctionnement de la pile à combustible. Comme le montre l'équation (VI-2), le champ magnétique terrestre et celui généré par les câbles s'annulent dans le calcul de R_B puisque les mesures ont été effectuées dans un environnement fixe et que la pile à combustible fonctionne à courant constant (mode galvano-statique). Dans ce cas où la pile à combustible délivre un courant constant, aucun blindage n'est nécessaire pour éliminer le champ magnétique terrestre, ni celui des câbles et celui des matériaux ferromagnétiques avoisinant la PAC puisque ces derniers n'ont pas d'influence sur R_B .

$$\begin{aligned} B(t1) &= B(t1)_{terre} + B(t1)_{cables} + B(t1)_{stack} \\ B(t2) &= B(t2)_{terre} + B(t2)_{cables} + B(t2)_{stack} \\ R_B &= B(t2) - B(t1) = B(t2)_{stack} - B(t1)_{stack} \end{aligned} \quad \text{Eq (VI.2)}$$

4. Exploitation des mesures réalisées sur la PAC – Illustration sur deux cas.

Nous allons appliquer les deux méthodes proposées dans les chapitres précédents à deux types de mesures afin de voir et tester leurs sensibilités aux bruits de mesures : une mesure instantanée choisie arbitrairement et des mesures moyennées sur un horizon d'environ 20 secondes (soit environ 160 000 mesures). L'intérêt d'utiliser une mesure moyennée est de pouvoir diminuer le niveau de bruit des mesures.

4.1. Variation de stœchiométrie de l'air

Nous présentons ici l'expérience «f1 : Diminution de la stœchiométrie de l'air » afin de montrer comment les mesures ont été effectuées et exploitées. Durant cette expérience, les conditions opératoires sont gardées constantes, sauf la stœchiométrie de l'air que l'on fait varier par palier de 2 à 1.2 (Figure VI-5). La stœchiométrie de l'air a progressivement été diminuée (appauvrissement en air dans la PAC), puis ramenée au niveau initial.

A courant constant, le débit d'air diminue par paliers successifs et la mesure de champ magnétique (composante u) sur un capteur (n°10) est représentée sur la Figure VI-5. Aux instants t1 à t7 correspondent différentes valeurs de stœchiométrie. Les données de champ magnétique sont prélevées sur les capteurs avec une fréquence d'échantillonnage égale à 8 kHz et les densités de courant sont prélevées avec une fréquence de 2 Hz. Les barres en bleu représentent les instants de mesures du champ magnétique lorsque la carte S++ est éteinte. Comme la Figure VI-5 l'indique, la carte S++ génère un bruit magnétique de l'ordre de 2 μ T lorsqu'elle est allumée. Par conséquent, pour pouvoir faire une comparaison entre les informations fournies par les différentes méthodes (carte S++, inversion du modèle magnétique direct [Le Ny, thèse 2012] et nos deux méthodes), les mesures S++ sont réalisées en premier et ensuite la carte S++ est éteinte (barres bleu) pour pouvoir effectuer les mesures des champs magnétiques sans être tributaire du bruit généré par la carte S++.

Les méthodes sont appliquées sur une mesure instantanée, choisie arbitrairement à l'intérieur de chaque barre bleu, et sur des mesures moyennées. Les mesures des densités de courant sont aussi moyennées sur un horizon représenté avec des barres vertes.

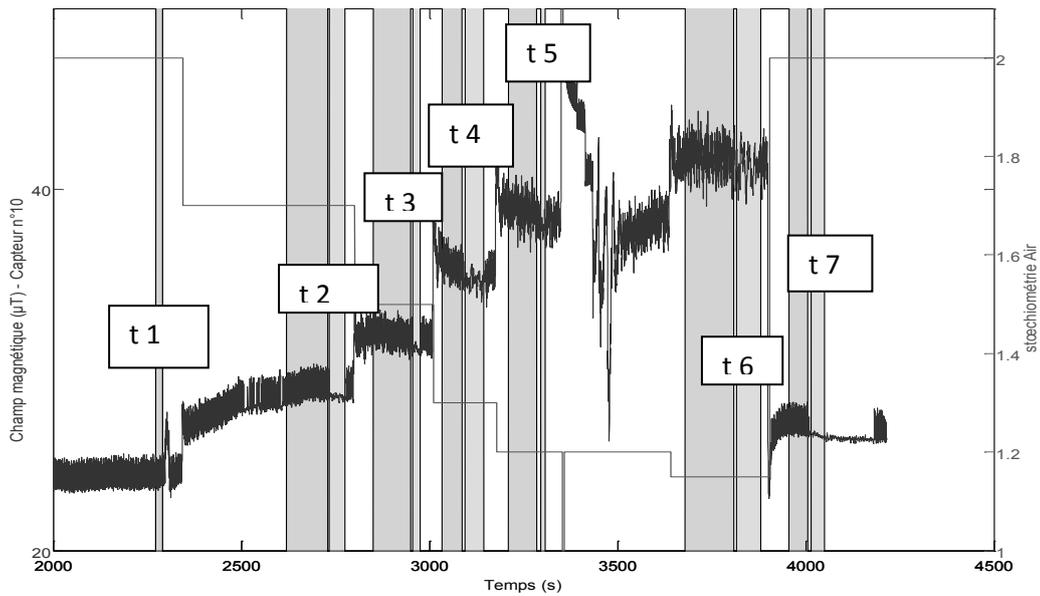


Figure VI-5 : Variations de la stœchiométrie de l'air et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur

4.2. Expérience de l'impact de la durée de fonctionnement

La deuxième expérience illustre le suivi de la dégradation des performances globales du stack (f3) sur une période d'environ soixante heures (Figure VI-6).

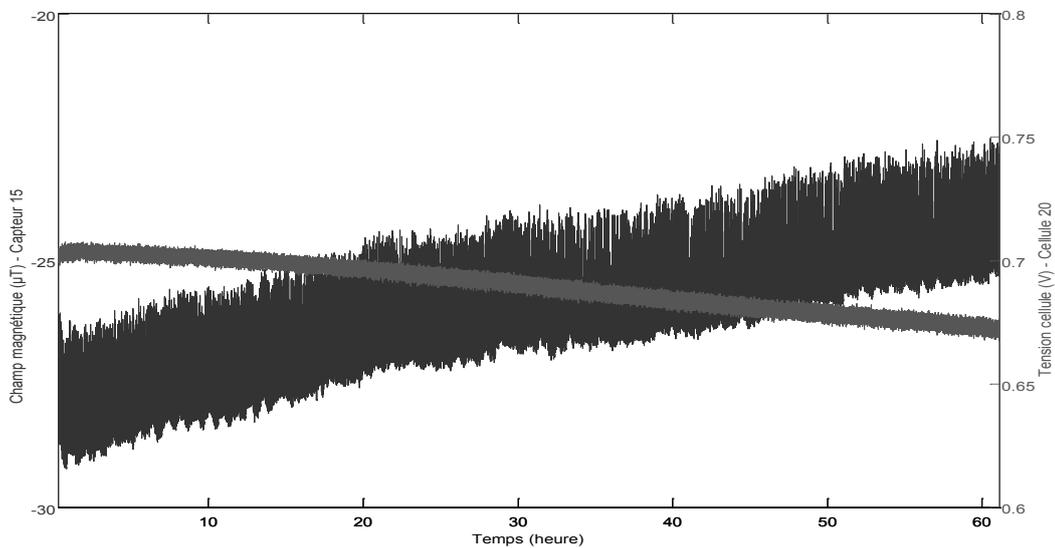


Figure VI-6 : Evolution de la tension d'une cellule et du champ magnétique (composante u) au cours du temps (Capteur 15/ Cellule 20)

Cette figure donne l'évolution de la tension de la cellule numéro 20 (proche de carte S++) ainsi que l'évolution du champ magnétique perçu par un capteur pendant ce temps. Nous observons à la fois une dérive de la tension et du champ magnétique. Les deux méthodes ont été appliquées aux instants : [t1, t2, t3, t4, t5] = [0.3h, 14h, 28h, 42h, 61h].

5. Localisation des hétérogénéités sur la section de la pile à combustible

Dans cette partie, on s'intéressera à la localisation des hétérogénéités de densité de courant au niveau de la section de la pile en utilisant les symptômes ou les paramètres. Pour y arriver, seule la composante u du champ magnétique est utilisée. Pour pouvoir générer les symptômes et les paramètres décrits dans le chapitre IV et V respectivement, de nouvelles bases doivent être générées pour le stack GENEPAC. La procédure suivie est la même que celle précédemment utilisée pour la construction des bases du stack GESI avec une modification de la section de la PAC et du nombre de cellules. Pour la méthode de résidus qui nécessitent la détermination de deux seuils, la procédure suivie nous a amené aux mêmes seuils que ceux fixés précédemment pour le stack GESI.

5.1. Symptômes générés avec la méthode des résidus

Nous rappelons qu'un symptôme supérieur à 8 indique la présence de faibles densités de courant dans les zones représentées par ce symptôme. Dans cette partie, nous allons utiliser les symptômes générés à partir de la composante u du champ magnétique pour la détection des distributions de courant non uniformes, ensuite nous comparerons ces résultats aux résultats de la carte invasive S++ et aux résultats obtenus par inversion du modèle direct.

5.1.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air

Durant cette première expérience, tout en gardant toutes les autres conditions opératoires constantes, la stœchiométrie de l'air varie comme indiqué dans la Figure VI-5. La stœchiométrie de l'air a progressivement été diminuée (appauvrissement en air dans la PAC), puis ramenée au niveau initial. Nous constatons bien une corrélation entre l'évolution du champ magnétique et la variation de la stœchiométrie de l'air.

Sur la Figure VI-7, nous avons tracé l'évolution du résidu R_b de la composante u du champ magnétique par rapport au champ magnétique de référence (au temps t_1) rayonné pour des conditions opératoires optimales. Il est intéressant de noter la corrélation entre le champ magnétique et la diminution de la stœchiométrie. Elle se généralise à tous les capteurs, ce qui conduit à une seule signature externe pour l'expérience «diminution de la stœchiométrie de l'air». Nous pouvons également constater que le maximum du champ magnétique est un bon candidat pour détecter le niveau de variation de la stœchiométrie de l'air. Nous pouvons aussi observer que même si au temps t_7 les conditions opératoires (Figure VI-5) sont identiques aux conditions initiales optimales (au temps t_1), le champ magnétique n'est pas nul et suit la même signature qu'au temps t_2 à t_6 avec un degré d'hétérogénéité plus faible. Cela est dû à l'influence de l'historique de la pile à combustible sur son état actuel. La variation significative du champ magnétique qui atteint une valeur de l'ordre de $17 \mu\text{T}$ signifie que la répartition des courants est significativement modifiée à l'intérieur de la pile à combustible.

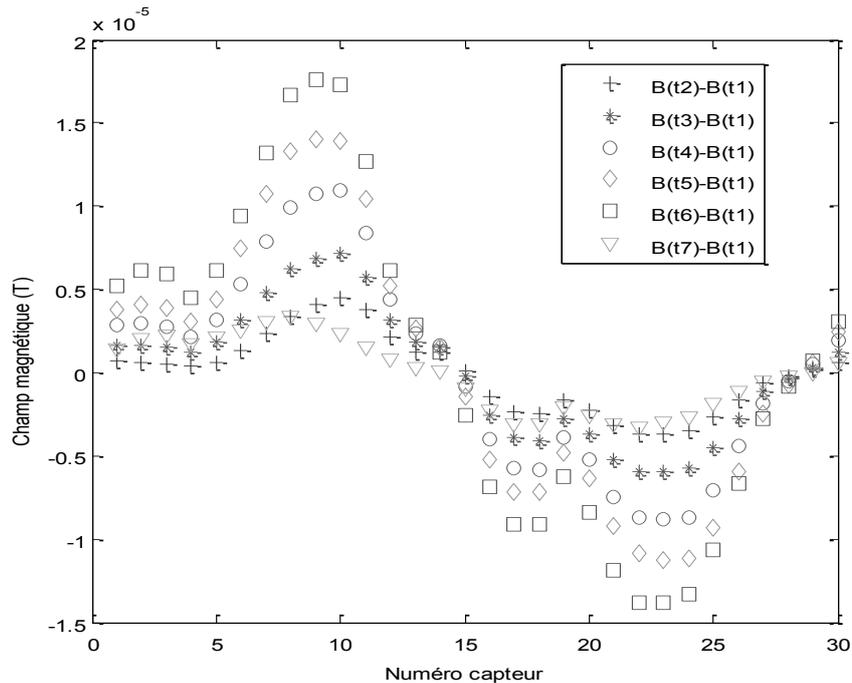


Figure VI-7 : Signature externe du champ magnétique (composante u) correspondant à la diminution de la stœchiométrie de l'air pour les différents paliers aux temps t1 à t7

Pour voir la pertinence des paramètres extraits avec les deux méthodes, l'évolution de la distribution de courant entre les instants t1 et t6, obtenue avec la plaque de mesure S++ et celle obtenue par inversion du modèle magnétique direct [Le Ny, thèse 2012], est donnée sur la Figure VI-8. Les deux outils permettent d'observer le même phénomène : lorsque le stack est appauvri en air, les densités de courant sont plus élevées près des entrées des canaux d'air (Zone 4 sur la Figure VI.8).

Cependant, il existe des écarts entre les résultats fournis par les deux outils, que ce soit au niveau de la répartition énergétique ou au niveau du degré d'hétérogénéités. Par exemple, la densité de courant la plus élevée obtenue avec la carte S++ est de 0.8 A.cm^{-2} , contrairement à celle obtenue par la méthode d'inversion 0.5 A.cm^{-2} . [Le Ny, thèse 2012] explique cet écart par le fait que les outils ne mesurent pas exactement les mêmes courants. La carte S++ mesure la densité de courant au niveau des deux plaques bipolaires entre lesquelles elle est insérée (milieu du stack). Par contre, son outil d'inversion mesure une moyenne pondérée des densités de courant sur l'ensemble des cellules du stack. D'autre part, le réseau de capteurs se situe au centre du stack, les densités de courant des AME proches du centre ont donc un poids plus important sur le champ magnétique que les densités de courant des AME éloignées des capteurs (extrémités du stack).

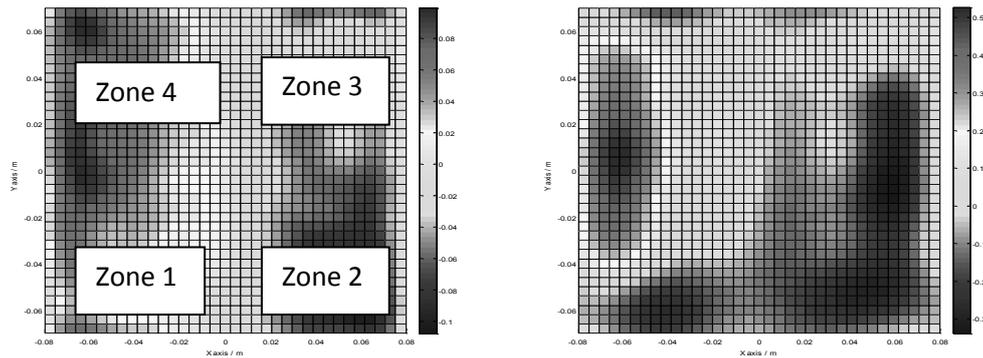


Figure VI-8 : Variation temporelle (entre t_1 et t_6) des densités de courants en $A.cm^{-2}$. A gauche, courants obtenus avec la carte S++. A droite, courants calculés par méthode inverse à partir du champ magnétique (carte S++ éteinte) [Le Ny, thèse 2012]

Le Tableau VI.4 représente les symptômes j obtenus en appliquant la méthode par génération de résidus sur les mesures instantanées et moyennées. L'ordre des symptômes (colonne de gauche) a été volontairement modifié afin de faire apparaître les compléments des quatre premières bases immédiatement après celles-ci. Les symptômes activés dans ce scénario sont 2, 3, 6, 9 et 12, comme on peut le voir dans le Tableau VI.4 ci-dessous. Les symptômes 13, 14, 15 et 16 n'étant pas importants (inférieurs à 16) ne seront pas pris en compte dans notre analyse.

Pour l'interprétation des régions présentant de faibles densités de courant, nous commençons par le symptôme représentant trois zones à faibles densités de courants (pour $j=9$ à 12). C'est le symptôme 12 généré à partir de la base 12 (L pour les zones 1, 2 et 3, H pour la zone 4) qui est activé, cela veut dire que c'est la zone 4 qui présente la densité de courant la plus élevée par rapport aux autres zones. Pour le symptôme représentant deux zones à faibles densités de courants (pour $j=5$ à 8), c'est le symptôme 6 qui est activé. Comme le symptôme 6 présente l'indicateur le plus élevé, les zones 2 et 3 sont celles qui présentent les plus faibles densités de courant et les zones 1 et 4 sont celles qui présentent les densités de courant les plus élevées. Enfin, pour les symptômes représentant une seule zone à faibles densités de courant (pour $j=1$ à 4), on trouve le symptôme 3 aux instants t_2 et t_3 et le symptôme 2 pour tous les instants. Le symptôme 6 nous donne l'information concernant les zones 2 et 3 qui présentent de faibles densités de courant, cependant, le symptôme 3 n'est plus activé à partir de l'instant t_4 du fait que les symptômes ne détectent que les hétérogénéités dominantes. Nous remarquons que même si la pile à combustible est ramenée aux conditions de fonctionnement optimales initiales (t_7), la distribution de courant présente la même tendance que pour le cas où la pile est appauvrie en air, cela est sans doute dû à l'effet de l'historique de la pile à combustible sur son état. Nous constatons que notre méthode permet de détecter les mêmes tendances des densités de courant que celles données par la carte S++ (Figure VI.8) entre t_1 et t_6 .

Il est intéressant de remarquer que le fait d'avoir moyenné les mesures a conduit à une légère augmentation des symptômes. La différence est liée au fait que la mesure moyennée permet de filtrer les bruits de mesures, elle est aussi due à l'utilisation d'un seuil pour la détermination des symptômes.

Tableau VI-4 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour une diminution de la stœchiométrie de l'air pour une mesure instantanée et moyennée

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	5	7	7	8	7	7	8	8	8	8	7	3
Symptôme 2	10	11	9	11	10	13	9	11	9	12	11	13
Symptôme 3	12	12	10	10	8	9	7	7	7	7	3	5
Symptôme 4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Symptôme 9	10	9	6	9	6	7	7	8	7	7	9	5
Symptôme 10	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
Symptôme 11	3	2	2	3	2	3	2	3	2	3	3	2
Symptôme 12	11	14	16	15	16	15	15	15	15	15	16	12
Symptôme 5	5	6	5	3	2	2	2	3	2	3	4	2
Symptôme 6	18	22	22	22	23	23	24	23	24	21	13	14
Symptôme 7	5	3	4	3	3	2	2	2	2	3	5	3
Symptôme 8	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2	2
Symptôme 13	3	2	1	1	2	1	2	2	2	2	4	3
Symptôme 14	4	3	1	1	1	2	2	2	2	2	5	4
Symptôme 15	7	8	8	7	7	7	7	7	7	7	6	6
Symptôme 16	9	11	8	9	7	8	8	7	8	7	4	7

La Figure VI-9 résume les zones concernées par les faibles densités de courant pour l'évolution de la distribution de la densité de courant par rapport à celle obtenue sous les conditions opératoires optimales.

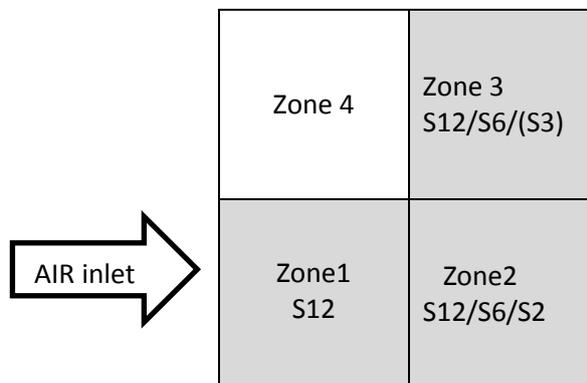


Figure VI-9 : Représentation des zones de la PAC présentant une faible densité de courant (en gris) d'après les symptômes (Sj) obtenus.

5.1.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement

Sur la Figure VI-10, nous avons tracé l'évolution du résidu R_B de la composante u du champ magnétique par rapport au champ magnétique enregistré au début de l'expérience. Il est aussi intéressant de noter qu'il existe une corrélation entre l'évolution du champ magnétique et la dégradation des performances au cours du temps sous les mêmes conditions opératoires optimales, ce qui conduit à une seule signature externe caractéristique pour la dégradation des performances au cours des 60 heures de fonctionnement.

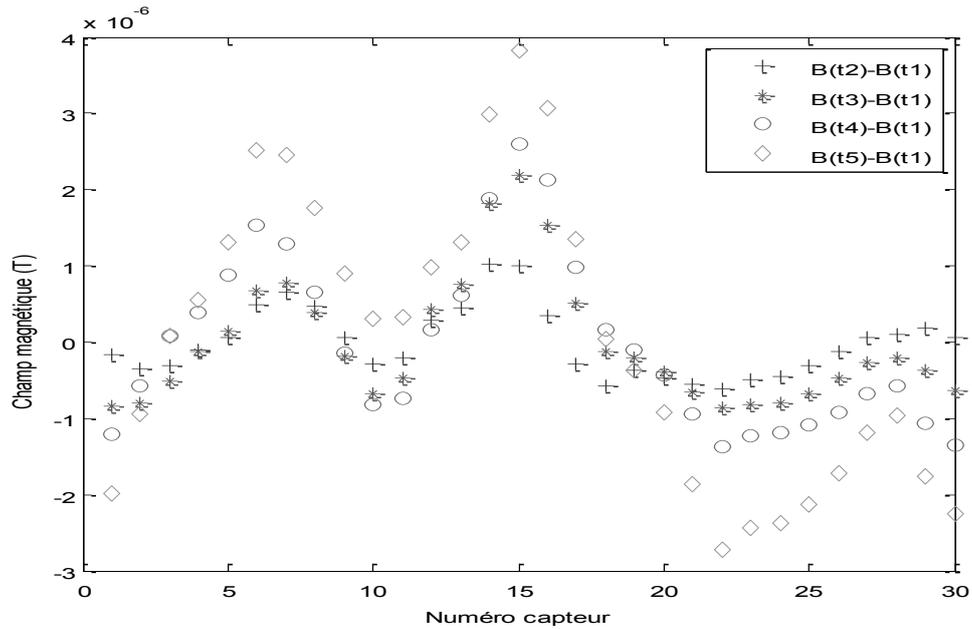


Figure VI-10 : Signature externe du champ magnétique (composante u) correspondant à la dégradation des performances au cours du temps dans les mêmes conditionnements opératoires

Dans ce cas aussi, nous pouvons constater que la valeur maximale du champ magnétique est un bon indicateur pour détecter le niveau de dégradation des performances. La variation significative du champ magnétique, qui atteint une valeur de l'ordre de $3.7 \mu\text{T}$, signifie que la répartition des courants est significativement modifiée à l'intérieur de la pile à combustible.

La variation du champ magnétique est due à l'évolution de la répartition des courants à l'intérieur de la pile. L'évolution de la distribution de courant entre les instants t_1 et t_5 obtenue avec la plaque de mesure invasive est celle obtenue par inversion du modèle magnétique direct [Le Ny, thèse 2012] et sont données sur la Figure VI.11. Les deux outils permettent d'observer le même phénomène : au cours du temps, les densités de courant se concentrent près des entrées des canaux d'air (Région rouge).

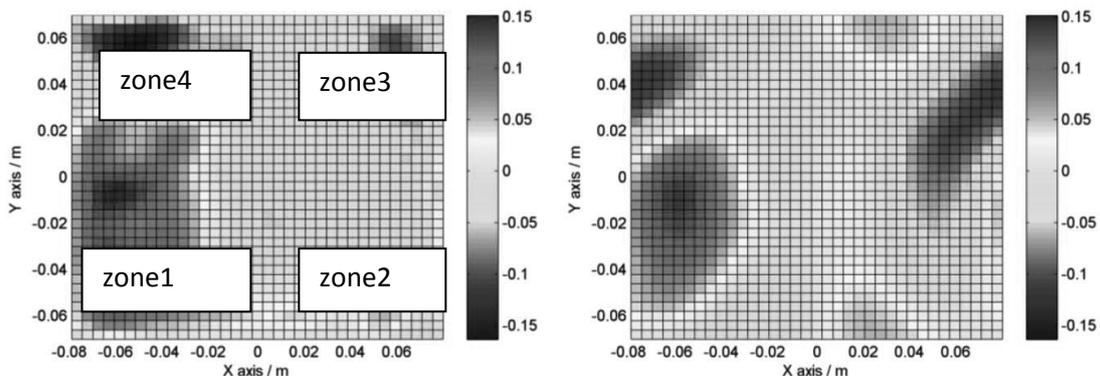


Figure VI-11 : Variation temporelle (entre t_1 et t_5) des densités de courants en $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. A gauche, courants obtenus avec la carte S++. A droite, courants obtenus avec le système magnétique non invasif [Le Ny, thèse 2012]

Dans le Tableau VI.5 les symptômes obtenus en appliquant la méthode par génération de résidus sont présentés (sur des mesures instantanées et moyennées). Les symptômes activés de valeur supérieure à 8 sont :

- les symptômes 9 et 12 pour $j = 9$ à 12
- le symptôme 6 pour $j = 5$ à 8
- pour $j = 1$ à 4, on trouve soit le symptôme 3, soit le symptôme 4, soit les symptômes 3 et 4 au même temps, soit aucun symptôme pour l'instant t_5 par exemple,
- les symptômes 13, 14, 15 et 16 étant de valeur faible ne seront pas pris en compte dans notre analyse.

Pour l'interprétation des régions présentant de faibles densités de courant, nous commençons par le symptôme représentant trois zones à faibles densités de courants ($j=9:12$). Pour l'instant t_2 , on trouve le symptôme 12 généré à partir de la base 12 qui est activé, cela veut dire qu'au début c'est la zone 4 qui présente la densité de courant la plus élevée par rapport aux autres zones. A partir de t_3 , on trouve que le symptôme 9 généré à partir de la base 9 (L pour les zones 2, 3 et 4, H pour la zone 1) est activé, cela veut dire que c'est la zone 1 qui présente la densité de courant la plus élevée par rapport aux autres zones. Comme le symptôme 9 présente l'indicateur le plus élevé, la zone 1 est celle qui présente les densités de courants les plus élevées par rapport aux autres régions. Pour le symptôme représentant deux zones à faibles densités de courants ($j=5\text{à}8$), aucun symptôme n'est activé aux instants t_2 et t_3 , c'est à partir de t_4 que le symptôme 6 est activé (L pour les zones 2 et 3, H pour les zones 1 et 4). Enfin, pour les symptômes représentant une seule zone à faibles densités de courant ($j=1:4$), le symptôme 3 est activé à tous les instants sauf pour le dernier t_5 . On retrouve la même chose que précédemment, le symptôme 6 nous donne l'information que les zones 2 et 3 présentent de faible densité de courant, cependant, les symptômes 2 et 3 ne sont pas toujours activés. Cela est dû au fait que cette méthode ne permet la détection que des zones qui dominent. Nous constatons que notre méthode permet de détecter les mêmes tendances des densités de courant que celles données par la carte S++ (Figure VI.11) entre t_1 et t_5 .

Sur le Tableau VI-5, il est aisé de constater que les symptômes obtenus en utilisant des mesures moyennées suivent la même tendance que ceux obtenus avec des mesures instantanées, sauf pour l'instant t_4 où aucun des quatre premiers symptômes n'est activé. Cependant, pour les quatre premiers symptômes, le résultat est globalement le même pour les deux mesures : soit nous avons le symptôme 3, soit nous avons le symptôme 4 ou encore nous n'avons aucun symptôme. La différence est certes liée au fait que la mesure moyennée permet de filtrer les bruits de mesures, mais surtout elle est due à l'utilisation d'un seuil pour la détermination des symptômes.

Tableau VI-5 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour un vieillissement (mesure instantanée et moyennée)

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	7	5	4	4	5	4	4	4
Symptôme 2	8	8	8	8	6	6	7	7
Symptôme 3	13	9	13	14	9	8	6	6
Symptôme 4	7	6	10	9	9	8	6	6
Symptôme 9	8	11	16	17	16	16	17	20
Symptôme 10	2	4	5	5	8	7	3	3
Symptôme 11	3	2	2	2	3	3	3	3
Symptôme 12	14	10	11	10	8	7	6	6
Symptôme 5	5	5	4	3	2	2	2	2
Symptôme 6	6	6	8	8	10	10	12	12
Symptôme 7	6	5	5	4	4	4	4	3
Symptôme 8	6	6	5	5	8	7	8	9
Symptôme 13	7	8	6	6	3	3	6	5
Symptôme 14	4	4	7	6	6	6	5	5
Symptôme 15	5	3	5	5	8	7	6	6
Symptôme 16	7	7	8	8	5	6	6	6

La Figure VI-12 résume les zones concernées par les faibles densités de courant pour l'évolution de la distribution de la densité de courant entre les instants t1 et t5.

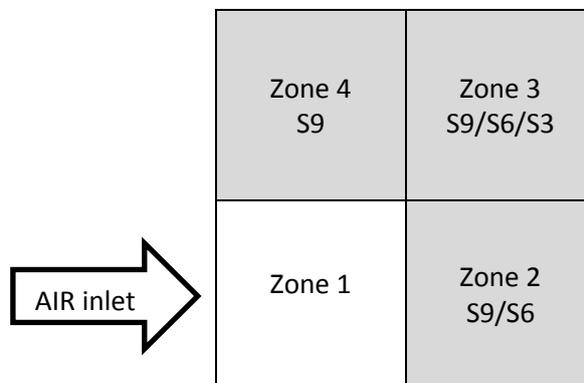


Figure VI-12 : Représentation des zones de la PAC présentant une faible densité de courant (en gris) d'après les symptômes obtenus.

5.1.3. Conclusion

Nous avons vu que dans les deux cas étudiés, la méthode par génération de résidus est en accord avec les résultats obtenus avec la carte S++ et le modèle inverse. Les deux scénarios étudiés, faible stœchiométrie et vieillissement, donnent bien des signatures distinctes exploitables.

Les valeurs des symptômes obtenus avec des mesures instantanées ou moyennées donnent les mêmes résultats. Nous constatons aussi une évolution de la dégradation dans le cas l'impact de la durée de fonctionnement. Nous avons vu aussi que pour l'estimation du degré du défaut d'hétérogénéités, la valeur maximale du champ magnétique est bien corrélée avec l'amplitude du défaut.

5.2. Hétérogénéités obtenues par la méthode par projection

Nous allons maintenant appliquer à ces mêmes expériences, la méthode par projection décrite au chapitre V pour l'obtention des paramètres pour la détection des hétérogénéités des densités de courant au niveau de la section de la pile à combustible. Nous rappelons qu'un signe positif signifie la présence de la caractéristique (base).

5.2.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air

5.2.1.a. Paramètres générés par la méthode par projection

Le Tableau VI-6 représente les paramètres obtenus en utilisant des mesures instantanées et moyennées. Les paramètres négatifs ne sont pas considérés et sont représentés par un tiret (-). Les paramètres positifs sont :

- les paramètres p_9 et p_{12} pour $j = 9$ à 12 ,
- le paramètre p_6 avec une valeur élevée et le paramètre p_7 avec une valeur faible, pour $j = 5$ à 8
- pour $j = 1$ à 4 , on trouve les paramètres p_2 et p_3 .

Nous constatons que les paramètres extraits avec cette méthode permettent de détecter des zones à faibles densités à plusieurs niveaux d'hétérogénéités, et non pas uniquement celles qui dominent comme cela a été le cas avec la méthode des résidus (activation du paramètres p_2 et p_3 pour tous les instants). Les valeurs des paramètres p_{13} , p_{14} , p_{15} et p_{16} étant faibles, ces derniers ne seront pas pris en compte dans notre analyse.

Pour la détection des régions présentant de faibles densités de courant, nous commençons par les paramètres représentant trois zones à faibles densités de courants ($j=9 :12$). C'est le paramètre p_{12} généré à partir de la base 12 (L pour les zones 1, 2 et 3, H pour la zone 4) qui a la valeur positive la plus grande, cela veut dire que c'est la zone 4 qui présente la densité de courant la plus élevée par rapport aux autres zones. Pour le paramètre représentant deux zones à faibles densités de courants ($j=5 :8$), c'est le paramètre p_6 qui a la valeur positive la plus grande. Pour les paramètres représentant une seule zone à faibles densités de courants, on trouve les paramètres relatifs aux zones 2 et 3 pour tous les instants.

Nous remarquons qu'il y'a une faible disparité entre les paramètres extraits pour tous les instants à l'image de la signature externe du champ magnétique. Nous remarquons aussi l'effet de l'historique de la pile à combustible sur son état entre les instants t_1 et t_7 : les paramètres obtenus sont quasiment identiques à ceux obtenus pour de faibles stœchiométries de l'air. Nous constatons que cette méthode permet de bien détecter les tendances des densités de courant données par la carte S++ (Figure VI.6) entre t_1 et t_6 : p_6 est proche de 1 permet d'identifier les zones 2 et 3 comme des zones qui présentent les plus faibles densités de courant et les zones 1 et 4 comme celles qui présentent les plus fortes densités de courant. Le paramètre p_{12} est positif de valeur proche de 0.8, ce qui signifie que la zone 4 est celle qui présente les densités de courant les plus élevées. Les deux paramètres p_2 et p_3 sont positifs, ce qui est attendu du fait que le paramètre p_6 est positif. La valeur de p_2 est plus grande que celle de p_3 ce qui signifie que les densités de courant dans la zone 2 sont

plus faibles que celles qu'on trouve dans la zone 3. Cette description correspond exactement à celle donnée par la carte S++.

Il est aisé de constater que les paramètres obtenus en utilisant des mesures moyennées gardent la même tendance que ceux obtenus avec des mesures instantanées avec une légère augmentation des valeurs qui se répercute sur un paramètre donné à tout instant. Nous pouvons dire que les paramètres obtenus avec cette méthode sont moins sensibles aux bruits de mesure.

Tableau VI-6 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une diminution de la stœchiométrie de l'air (mesure instantanée et instantanée).

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
p1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p2	0.68	0.66	0.71	0.68	0.71	0.69	0.70	0.69	0.72	0.71	0.73	0.74
p3	0.42	0.49	0.42	0.45	0.41	0.44	0.42	0.44	0.41	0.42	0.15	0.25
p4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p9	0.26	0.35	0.29	0.34	0.29	0.33	0.30	0.33	0.28	0.30	0.06	0.16
p10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p12	0.65	0.64	0.71	0.69	0.74	0.72	0.74	0.73	0.75	0.74	0.78	0.79
p5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p6	0.82	0.88	0.88	0.90	0.89	0.91	0.90	0.91	0.89	0.90	0.72	0.81
p7	0.29	0.20	0.30	0.25	0.31	0.27	0.30	0.27	0.33	0.31	0.54	0.46
p8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p13	0.18	0.20	0.14	0.15	0.11	0.12	0.09	0.09	0.06	0.07	0.01	0.05
p14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p16	0.27	0.26	0.19	0.19	0.15	0.15	0.12	0.11	0.11	0.12	0.04	0.06

La Figure VI-13 résume les zones concernées par les faibles densités de courant pour l'évolution de la distribution de la densité de courant entre les instants t1 et t6.

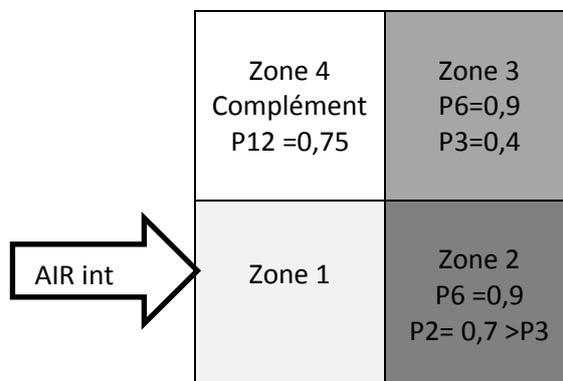


Figure VI-13 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une diminution de la stœchiométrie de l'air pour une mesure moyennée

5.2.1.b. Approximation de la valeur de la distribution de courant

Nous avons utilisé les quatre paramètres (p9, p10, p11 et p12) pour approximer l'évolution de la distribution de courant entre les instants t1 et t6. Afin de pouvoir comparer la distribution de la densité de courant approximée avec celle obtenue avec la carte S++ donnée à la Figure VI-6, nous avons utilisé les mesures moyennées. En appliquant l'équation (Eq V.26) décrite au chapitre précédent, nous obtenons :

$$Z = [zone1, zone2, zone3, zone4] = [1.5600, -3.3529, -2.2251, 4.0179] \times 1000 \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$$

Soit :

$$Z = [0.15600, -0.33529, -0.22251, 0.40179] \text{ (A.cm}^{-2}\text{)}$$

La Figure VI-14 résume les valeurs de densités de courant attribuées à chaque zone pour l'évolution de la distribution de la densité de courant entre les instants t1 et t6.

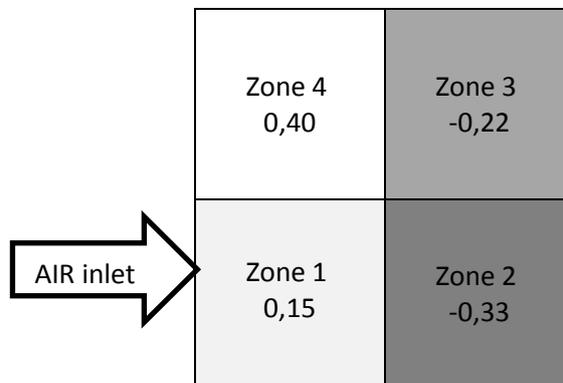


Figure VI-14 : Approximation de l'évolution de la densité de courant en A.cm⁻² entre les instants t1 et t6.

Nous observons que les densités de courant au niveau des quatre zones sont en bonne concordance avec celles données avec la carte S++. L'hétérogénéité entre les zones est identique et le signe de la densité de courant est respecté : les zones 1 et 4 ont bien des variations de densité positives contrairement aux zones 2 et 3. La zone 4 présente la densité de courant la plus élevée et la zone 2 la densité de courant la plus faible. Cependant l'amplitude d'hétérogénéités est surestimée et ne correspond plus aux résultats obtenus par la méthode d'inversion [Le Ny, thèse 1012]. Cela peut s'expliquer par le fait que la distribution de courant n'est pas invariante suivant l'axe z (le long du stack) ; de fortes densités de courant peuvent se retrouver à gauche ou à droite du réseau de capteur.

5.2.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement

5.2.2.a. Paramètres générés par la méthode par projection

Nous avons aussi appliqué la méthode de projection au suivi de dégradation des performances au cours du temps. Le Tableau VI-7 représente les paramètres obtenus. Ce qui est remarquable est la détection du caractère évolutif de la dégradation des performances au cours du temps à travers les deux paramètres p3 et p9 ; l'évolution du paramètre p3 indique que la mesure se rapproche de la caractéristique (base 3 : faible densité de courant dans la zone 3) et l'évolution du paramètre p9 indique que la mesure se rapproche de la caractéristique (base 9 : forte densité de courant dans la

zone 1). En d'autre terme, la zone 1 contient de plus en plus de fortes densités de courant, et la zone 3 de plus en plus de faibles densités de courant.

Les paramètres 6 (zone, 2 et 3) et 8 (zone, 3 et 4) sont positifs, cela est tout à fait cohérent du fait que le paramètre 9 (H pour R1, L pour R2, R3 et R4) représentant trois zones à faibles densités de courant est positif.

Tableau VI-7 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour un vieillissement (mesure instantanée et moyennée)

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	Inst	moy
p1	-	-	-	-	-	-	-	-
p2	0.03	0.15	-	-	-	0.02	0.08	0.10
p3	0.23	0.26	0.33	0.39	0.42	0.48	0.59	0.60
p4	-	-	0.23	0.23	0.15	0.11	0.00	-
p9	0.60	0.62	0.82	0.84	0.86	0.88	0.88	0.88
p10	-	-	0.12	0.11	0.02	-	-	-
p11	-	-	-	-	-	-	-	-
p12	0.12	0.15	-	-	-	-	-	0.01
p5	-	-	-	-	-	-	-	-
p6	0.48	0.55	0.38	0.41	0.50	0.57	0.67	0.69
p7	-	-	-	-	-	-	-	-
p8	0.34	0.29	0.67	0.69	0.64	0.63	0.60	0.58
p13		0.57	0.28	0.30	0.02	0.04	0.04	0.05
p14	-	-	-	-	-	-	-	-
p15	0.05	0.04	0.14	0.12	0.24	0.19	0.14	0.11
p16	-	-	-	-	-	-	-	-

Comme dans le cas précédent, nous constatons que les paramètres obtenus avec les mesures instantanées sont quasiment similaires à ceux obtenus avec les mesures moyennées. La Figure VI-15 résume les zones à faibles densités de courant pour l'évolution de la distribution de la densité de courant par rapport à la celle obtenue sous les conditions opératoires optimales.

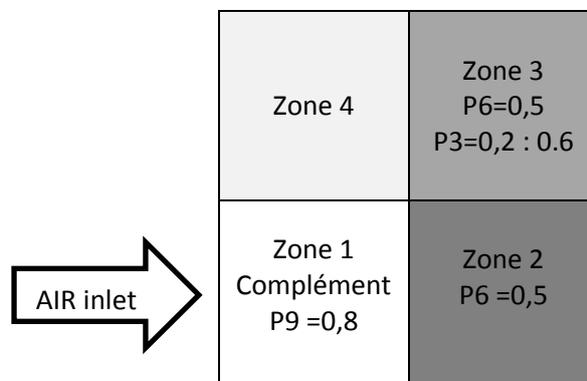


Figure VI-15 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour un suivi de dégradation des performances avec une mesure moyennée

5.2.2.b. Approximation de la distribution de courant pour l'impact de la durée de fonctionnement

Nous avons aussi approximé l'évolution de la distribution de courant entre t5 et t1 pour le suivi de dégradation. Afin de comparer la distribution de courant avec celle obtenue avec la carte S++ donnée à la Figure VI-9, nous avons utilisé les mesures moyennées. Les densités de courant obtenues sont :

$$Z = [zone1, zone2, zone3, zone4]$$

$$Z = [0.875, -0.2274, -0.5683, -0.0799] \text{ (A.cm}^{-2}\text{)}$$

Nous observons que les densités de courant au niveau des quatre zones sont en bonne concordance avec celles données avec la carte S++ ; la zone 1 est celle qui présente les densités de courant positives, et la zone 3 est celle qui présente les densités de courant négatives. Contrairement au cas précédent, le degré d'hétérogénéité n'est pas surestimé. Dans la section suivante, nous apporterons des éléments d'explication à ces résultats par la localisation des différentes densités de courant par rapport au réseau de capteur. La Figure VI-16 résume les valeurs de densités de courant attribuées à chaque zone pour l'évolution de la distribution de la densité de courant entre les instants t1 et t5.

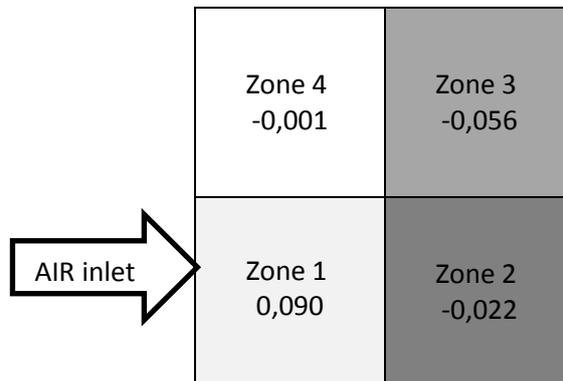


Figure VI-16 : Approximation de l'évolution de la densité de courant en A.cm⁻² entre t1 et t5

5.2.3. Conclusion

Les paramètres extraits par projection permettent la détection de toutes les zones à faibles densités de courant, même si celles-ci ne sont pas les plus faibles au niveau de la section de la pile. La valeur des paramètres par zone permet de reconstruire la distribution de courant, et est proche des estimations données par la méthode du modèle inverse et de la carte invasive. L'approximation de la valeur de la distribution de courant pour une durée de fonctionnement de 60 h obtenue en utilisant les quatre paramètres extraits à partir des bases 9, 10, 11 et 12 montre une bonne concordance avec les mesures données avec la carte S++. Cependant, nos résultats d'approximation de la distribution de courant pour une diminution de la stœchiométrie de l'air concordent bien avec ceux obtenus par la méthode d'inversion (degré d'hétérogénéités) [Le Ny, Thèse 2012]. Des éléments d'explication des deux observations seront donnés dans la section suivante

6. Localisation des hétérogénéités le long du stack

Dans cette partie, nous allons utiliser les deux composantes du champ magnétique (composantes u et w) afin de localiser les hétérogénéités par rapport aux bornes de la PAC (borne -/borne +). La borne - est celle qui se situe à l'entrée de l'alimentation en gaz, et la borne + est celle qui se situe à

l'autre extrémité du stack. Nous rappelons au Tableau VI-8 les bases construites ainsi que leurs compléments. Dans cette partie nous ne travaillons qu'avec des mesures instantanées.

Tableau VI-8 : Bases générées ainsi que leurs compléments

Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément de la base	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15

6.1. Symptômes générés avec la méthode des résidus

6.1.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air

Dans cette partie, nous allons reprendre l'expérience consistant à appauvrir la pile à combustible en air afin de localiser les hétérogénéités par rapport bornes de la PAC. Le Tableau VI-9 représente les symptômes obtenus avec les deux composantes u et w.

Tableau VI-9 : Symptômes obtenus avec les composantes u et w en utilisant la méthode des résidus pour une diminution de la stœchiométrie de l'air

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	u	w	u	w	u	w	u	w	u	w	u	w
Symptôme 1	5	13	7	13	7	9	8	10	8	9	7	11
Symptôme 2	10	6	9	6	10	5	9	4	9	3	11	4
Symptôme 3	12	10	10	10	8	8	7	5	7	4	3	6
Symptôme 4	4	7	2	8	2	11	2	10	2	14	2	11
Symptôme 9	10	8	6	6	6	7	7	8	7	8	9	10
Symptôme 10	3	11	3	12	3	11	3	16	3	16	3	12
Symptôme 11	3	10	2	7	2	5	2	3	2	5	3	5
Symptôme 12	11	10	16	8	16	7	15	4	15	3	16	5
Symptôme 5	5	9	5	11	2	9	2	12	2	10	4	10
Symptôme 6	18	8	22	7	23	7	24	6	24	4	13	3
Symptôme 7	5	9	4	10	3	8	2	7	2	4	5	10
Symptôme 8	2	8	2	5	2	6	2	5	2	7	2	11
Symptôme 13	3	8	1	10	2	8	2	6	2	4	4	12
Symptôme 14	4	10	1	9	1	10	2	9	2	7	5	13
Symptôme 15	7	11	8	11	7	10	7	10	7	7	6	7
Symptôme 16	9	9	8	9	7	8	8	10	8	8	4	7

Le Tableau VI-10 synthétise les symptômes activés pour la composante u et la composante w respectivement. Nous pouvons constater que :

- le symptôme 3 est activé pour les deux composantes u et w, cela signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 3 sont proches de la borne (-).
- Le symptôme 12 est activé pour la composante u et son complément, le symptôme 4, est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les fortes densités de courant dans la zone 4 sont majoritairement proches de la borne (+).

- Le symptôme 2 est activé pour la composante u et son complément, le symptôme 10, est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 2 sont majoritairement proche de la borne (+).
- Enfin, le symptôme 6 est activé pour la composante u et son complément, le symptôme 5, est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans les zones 2 et 3 (fortes densités dans les zones 1 et 4) sont majoritairement proches de la borne (+).

Tableau VI-10 : Symptômes activés pour les composantes u et w pour une diminution de la stœchiométrie de l'air

Symptôme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	n	ok	ok	n	n	ok	n	n	n	n	n	ok	n	n	n	n
Activation (w)	ok	n	ok	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n	n	n

Ces résultats montrent que les cellules les plus proches de la borne (+) présentent les distributions de courant les plus hétérogènes. Pour le stack GENEPAC, cette configuration correspond aux cellules les plus lointaines de l'entrée des gaz. Ce résultat peut être corrélé avec une mauvaise distribution des gaz le long du stack, voire à un appauvrissement en gaz sur les dernières cellules.

6.1.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement

Dans cette partie, nous allons reprendre l'expérience de suivi de la dégradation des performances afin de localiser les hétérogénéités par rapport aux bornes de la PAC. Le Tableau VI-11 représente les symptômes obtenus avec les deux composantes u et w.

Tableau VI-11 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour les composantes u et w pour l'impact de la durée de fonctionnement

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	u	w	u	w	U	w	u	w
Symptôme 1	7	6	4	7	5	5	4	5
Symptôme 2	8	7	8	4	6	5	7	3
Symptôme 3	13	8	13	16	9	15	6	16
Symptôme 4	7	7	10	11	9	9	6	11
Symptôme 9	8	9	16	10	16	5	17	4
Symptôme 10	2	9	5	9	8	7	3	10
Symptôme 11	3	7	2	7	3	4	3	4
Symptôme 12	14	9	11	7	8	9	6	8
Symptôme 5	5	7	4	9	2	9	2	10
Symptôme 6	6	7	8	10	10	11	12	9
Symptôme 7	6	6	5	3	4	6	4	5
Symptôme 8	6	11	5	9	8	12	8	12
Symptôme 13	7	6	6	10	3	11	6	10
Symptôme 14	4	5	7	8	6	8	5	8
Symptôme 15	5	7	5	8	8	8	6	7
Symptôme 16	7	9	8	10	5	14	6	14

Le Tableau VI-12 synthétise les symptômes activés pour la composante u et la composante w respectivement. Pour le suivi de dégradation des performances, nous pouvons constater que :

- les symptômes 3 et 4, lorsqu'ils sont activés, le sont pour les deux composantes u et w, cela signifie que les cellules concernées par de faibles densités de courant dans les zones 3 et 4 sont majoritairement proches de la borne (-).
- Le symptôme 8 n'est pas activé pour u mais les deux symptômes 3 et 4 le sont. Le fait que le symptôme 8 de la composante w soit activé vient étayer le fait que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 2 et 3 sont proches de la borne (-).
- Le symptôme 9 est activé pour les deux composantes u et w, d'où la présence de fortes densités de courant dans la zone 1 pour les cellules proches de la borne (-).
- Le symptôme 6 est activé pour les deux composantes u et w, d'où la présence de faibles densités de courant dans les zones 2 et 3 pour les cellules proches de la borne (-).

Tableau VI-12 : Symptômes activés pour les composantes u et w pour le vieillissement

Symptôme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	n	n	ok	ok	n	ok	n	n	ok	n	n	ok	n	n	n	n
Activation (w)	n	n	ok	ok	n	ok	n	ok	ok	ok	n	n	n	n	n	n

Nous pouvons dire qu'au cours du temps, ce sont les cellules les plus proches des entrées des gaz qui présentent les distributions de courant les plus hétérogènes. Ce résultat n'a pas encore été expliqué, les causes pouvant être : accumulation de l'eau, apparition de point chaud, mauvaise répartition des contraintes de serrage.

6.2. Hétérogénéités obtenues par la Méthode par projection

Nous allons maintenant procéder de la même manière avec les paramètres extraits avec la méthode des projections.

6.2.1. Diminution de la stœchiométrie de l'air

Le Tableau VI-13 regroupe les paramètres extraits avec les deux composantes u et w pour l'expérience consistant à appauvrir la pile à combustible en air.

Le Tableau VI-14 synthétise les symptômes activés pour la composante u et la composante w respectivement. Nous pouvons constater que :

- le paramètre p3 n'est activé que pour la composante u et que ni le paramètre p3 ni son complément le paramètre p11 n'est activé pour la composante w, cela signifie que les faibles densités de courant dans la zone 3 sont situées le long du stack.
- Le paramètre p12 est activé pour la composante u et son complément, le paramètre p4, est activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les fortes densités de courant, dans la zone 4, sont majoritairement proches de la borne (+). Nous remarquons que le paramètre p4 de la composante w augmente progressivement, ce qui

signifie que les fortes densités de courant dans la zone 4 augmentent progressivement avec la diminution de la stœchiométrie de l'air.

- Le paramètre p2 est activé pour la composante u et son complément le paramètre p10 est également activé pour la composante w, ce qui signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 2 sont majoritairement proches de la borne (+). Là aussi nous remarquons le caractère progressif avec l'augmentation du paramètre p10 de la composante w au cours du temps.
- le paramètre p6 est activé pour la composante u et son complément le paramètre p5 est activé pour la composante w, d'où la présence de faibles densités de courant dans les zones 2 et 3 (fortes densités de courant pour les zones 1 et 4) pour les cellules les plus proches de la borne (+).

La seule différence entre les résultats prédits par les paramètres et les symptômes réside dans le fait que les symptômes prédisent que les faibles densités de courant dans la zone 3 sont majoritairement à gauche du réseau de capteur alors que les paramètres prédisent qu'elles sont situées le long du stack.

Tableau VI-13 : Paramètres obtenus avec les composantes u et w pour une diminution de la stœchiométrie de l'air

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	u	w	u	w	u	w	u	w	u	w	u	w
p1	-	0.14	-	0.21	-	0.21	-	0.26	-	0.19	-	0.11
p2	0.68	-	0.71	-	0.71	-	0.70	-	0.72	-	0.73	-
p3	0.42	-	0.42	-	0.41	-	0.42	-	0.41	-	0.15	-
p4	-	0.12	-	0.31	-	0.43	-	0.53	-	0.63	-	0.53
p9	0.26	-	0.29	-	0.29	-	0.30	-	0.28	-	0.06	-
p10	-	0.18	-	0.36	-	0.46	-	0.54	-	0.65	-	0.44
p11	-	0.14	-	0.22	-	0.22	-	0.28	-	0.28	-	0.10
p12	-	-	0.71	-	0.74	-	0.74	-	0.75	-	0.78	-
p5	-	-	-	0.45	-	0.55	-	0.67	-	0.72	-	0.51
p6	-	-	0.88	-	0.89	-	0.90	-	0.89	-	0.72	-
p7	0.29	-	0.30	-	-	-	0.30	-	0.33	-	0.54	-
p8	-	0.01	-	0.10	-	0.19	-	0.22	-	0.35	-	0.30
p13	0.18	-	0.14	-	0.11	-	0.09	-	0.06	-	0.01	-
p14	-	0.36	-	0.37	-	0.36	-	0.31	-	0.22	-	0.16
p15	-	0.28	-	0.28	-	0.27	-	0.22	-	0.24	-	0.01
p16	0.27	-	0.19	-	0.15	-	0.12	-	0.11	-	0.04	-

Tableau VI-14 : Paramètres actifs pour les composantes u et w pour une diminution de la stœchiométrie de l'air

Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	n	ok	ok	n	n	ok	n	n	n	n	n	ok	n	n	n	n
Activation (w)	n	n	n	ok	ok	n	n	n	n	ok	n	n	n	n	n	n

6.2.2. Analyse de l'impact de la durée de fonctionnement

Le Tableau VI-15 donne les paramètres extraits avec les deux composantes u et w pour l'expérience consistant à suivre la dégradation des performances au cours du temps.

Tableau VI-15 : Paramètres obtenus avec les deux composantes u et w pour un vieillissement

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	u	w	u	w	u	w	u	w
p1	-	-	-	-	-	-	-	-
p2	0.03	-	-	0.06	-	0.04	0.08	0.01
p3	0.23	0.42	0.33	0.61	0.42	0.55	0.59	0.38
p4	-	0.50	0.23	0.19	0.15	0.14	0.00	0.25
p9	0.60	0.31	0.82	0.22	0.86	0.21	0.88	0.10
p10	-	0.19	0.12	-	0.02	-	-	-
p11	0.23	-	-	-	-	-	-	-
p12	0.12	-	-	-	-	-	-	0.25
p5	-	0.04	-	-	-	-	-	-
p6	0.48	-	0.38	0.20	0.50	0.20	0.67	0.02
p7	-	-	-	-	-	-	-	-
p8	0.34	0.53	0.67	0.30	0.64	0.28	0.60	0.22
p13	-	-	0.28	-	0.02	0.29	0.04	0.26
p14	-	0.52	-	0.18	-	-	-	-
p15	-	-	0.14	-	0.24	-	0.14	-
p16	-	0.04	-	0.43	-	0.64	-	0.63

En analysant le Tableau VI-16, nous remarquons :

- que le paramètre p3 est activé pour les deux composantes u et w, cela signifie que les cellules concernées par les faibles densités de courant dans la zone 3 sont majoritairement proches de la borne (-). Le caractère progressif se confirme par l'augmentation progressive du paramètre p3 pour les deux composantes.
- le paramètre p8 est activé pour les composantes u et w, ce qui signifie que les cellules concernées par les deux zones (zone 3 et 4) à faibles densités de courant sont proches de la borne (-).
- Enfin, le paramètre p9 est activé pour les deux composantes u et w d'où la présence de fortes densités de courant dans la zone 1 pour les cellules proches de la borne (-).

Tableau VI-16 : Paramètres actifs pour les composantes u et w pour un vieillissement

Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Complément	9	10	11	12	6	5	8	7	1	2	3	4	14	13	16	15
Activation (u)	n	n	ok	n	n	ok	n	ok	ok	n	n	n	n	n	n	n
Activation (w)	n	n	ok	n	n	n	n	ok	ok	n	n	n	n	n	n	n

7. Localisations des défauts au niveau des sous-systèmes

7.1. Signatures obtenues avec la méthode des résidus

A ce stade, nous avons vu la capacité de détection des hétérogénéités de la distribution de courant au niveau de la section de la pile et tout au long du stack. Au chapitre V, nous avons proposé un moyen de classifier la distribution de courant à l'aide de variables qualitatives. Les classes sont construites sans l'utilisation d'une base d'apprentissage représentant tel ou tel défaut, ces classes traduisent les performances de conversion énergétiques locales (par exemple : fonctionnement à forte densité de courant à l'entrée de l'air).

Dans notre étude, une fois fixées les conditions opératoires optimales recommandées par le constructeur, l'évolution de la distribution de courant est soit une conséquence du fonctionnement inhérent de la pile à combustible (impact de fonctionnement), soit une conséquence d'un défaut au niveau des sous-systèmes alimentant la pile. Pour pouvoir utiliser cet outil pour la détection et l'isolation des défauts, nous allons vérifier que chaque évolution de la distribution de courant appartient à une ou plusieurs classes prédéfinies d'une manière distinguable, de façon à différencier les origines de cette évolution.

L'objectif de l'outil de diagnostic est d'attribuer le changement de la densité de courant hétérogène à :

- un changement dans l'une des conditions opératoires,
- une durée de fonctionnement à long terme sans aucun changement dans les conditions opératoires nominales (processus).

Nous avons appliqué la démarche pour toutes les expériences énumérées dans le Tableau VI-3. Le Tableau VI-17 nous donne les classes obtenues. Par exemple, nous avons besoin de deux classes pour la diminution de la stœchiométrie de l'air : (G=12, D=6, H=2 et Half=6) ou (G=12, D=6, H=3 et Half=6). De même, il faut quatre classes pour définir l'impact de la durée de fonctionnement, deux classes pour la diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène et une seule classe pour chacune des autres expériences.

La présence de plusieurs classes pour certaines expériences réside dans le fait que la définition des classes n'est pas basée sur un critère de séparation de ces expériences mais sur un critère de caractérisation de la distribution de courant (zone de faibles densités) pour d'un côté remonter aux performances locales et d'un autre côté pour avoir un caractère générique.

Il est important de noter que la signature obtenue avec la composante u est suffisante pour isoler les conditions opératoires ayant fait évoluer la distribution de courant. Les signatures ainsi définies peuvent aussi être considérées comme une caractérisation de l'effet des conditions opératoires sur la distribution de courant. Cela permet d'anticiper l'impact d'une modification de l'une des conditions opératoires sur les performances locales.

Nous avons fait la même chose avec les symptômes obtenus à partir des mesures instantanées. Nous obtenons également les mêmes types de signature. L'obtention d'une même signature pour chaque expérience avec les mesures moyennées et les mesures instantanées s'explique par le fait que nous

utilisons des variables qualitatives qui peuvent prendre la même valeur (numéro de symptôme) pour des valeurs de symptôme différentes. Cependant cet avantage peut devenir une entrave dans le cas où deux modes de fonctionnement différents ayant des valeurs de symptômes distinguables présentent les mêmes variables qualitatives et donc une même signature. Dans ce cas, définir d'autres critères pour l'élaboration des signatures devient nécessaire.

Tableau VI-17 : Signatures obtenues avec des mesures moyennées

Variable qualitative Expériences f_i	G (trois zones)	D (max(G, H, Half))	H (une zone)	Half (deux zones)
f1 : Diminution de la stœchiométrie de l'air	12	6	2 ou 3	6
f2 : Augmentation de la stœchiométrie de l'air	10	10	4	5
f3 : Impact durée de fonctionnement	9	9	3 ou 0	6 ou 0
f4 : Diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène	10 ou 11	5	4	5
f5 : Diminution de la pression	0	4	4	0
f6 : Augmentation de l'humidité relative des gaz (hydrogène et air)	12	12	2	6 ou 7

7.2. Classification non supervisée

Dans cette section, nous appliquons les deux méthodes de classification non supervisées décrites au chapitre précédent.

7.2.1. Table des signatures

Nous avons utilisé les signes des paramètres extraits par projection afin de construire une table des signatures. Le Tableau VI-18 représente la table des signatures obtenues avec les six expériences décrites dans le Tableau VI-3. Les cases en gris correspondent aux paramètres dont les signes ne sont pas toujours les mêmes pour la même expérience.

Nous pouvons constater qu'il est possible d'isoler tous les défauts sauf la diminution de la stœchiométrie de l'air (f_1) et l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f_6) qui peuvent être confondus. Nous voyons donc qu'avec une simple opération, il est possible d'isoler quatre des six défauts.

Tableau VI-18 : Table des signatures obtenues avec les signes des paramètres extraits par la méthode de projection

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
s_1	0	1	0	1	1	
s_2	1	0		0	0	1
s_3	1	0	1	0	1	
s_4	0	1		1	1	0
s_5	0	1	0	1	1	0
s_7	1	0	0		0	1
s_{13}	0	1		0	1	
s_{15}	1	1	1	1	0	

7.2.2. Variables qualitatives

En utilisant les variables qualitatives (G, H, Half et D) calculées à partir des paramètres extraits par projection, nous obtenons les classes données au Tableau VI-19.

Tableau VI-19 : Signatures obtenus avec les variables qualitatives en utilisant les paramètres extraits par la méthode de projection

Variable qualitative Expérience f_i	G (trois zones)	D(max(G, H, Half))	H (une zone)	Half (deux zones)
Diminution de la stœchiométrie de l'air (f_1)	12	6	2	6
Augmentation de la stœchiométrie de l'air (f_2)	10	5	4	5
Vieillessement (f_3)	9	9	3	6 ou 8
Diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f_4)	10 ou 11	5	1 ou 4	5
Diminution de la pression (f_5)	10	4	4	5 ou 8
Augmentation de l'humidité relative des gaz (hydrogène et air) (f_6)	12	12 ou 6	2	6 ou 7

Nous pouvons constater que seul l'impact de la durée de fonctionnement (f3) et la diminution de la pression (f5) peuvent être isolés avec cette méthode. La diminution de la stœchiométrie de l'air (f1) et l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f6) peuvent être confondues ainsi que l'augmentation de la stœchiométrie de l'air (f2) et la diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f4).

7.2.3. Classification supervisée

Dans cette section, la démarche décrite dans le chapitre V, permettant de séparer des groupes de données étiquetées est appliquée aux expériences énumérées dans le Tableau VI-3. A partir d'une base de données, nous allons séparer les données dans des espaces 2D. Par la suite, il est montré comment les sous-ensembles décrits dans le chapitre précédent peuvent être utilisés pour isoler les groupes représentant les différents modes de fonctionnement.

7.2.3.a. Séparation des données en utilisant $V_1 = (p_1, p_2, p_3, p_4)^T$

Les premiers paramètres qui peuvent être utilisés sont ceux extraits de la première à la quatrième base. La Figure VI-17 montre que ce sous-ensemble permet de séparer le plan en trois groupes : un groupe « impact de la durée de fonctionnement » (f3), un groupe « diminution de la stœchiométrie de l'air » (f1) et « augmentation de l'humidité » (f6) et un autre groupe comprenant les autres modes de fonctionnement.

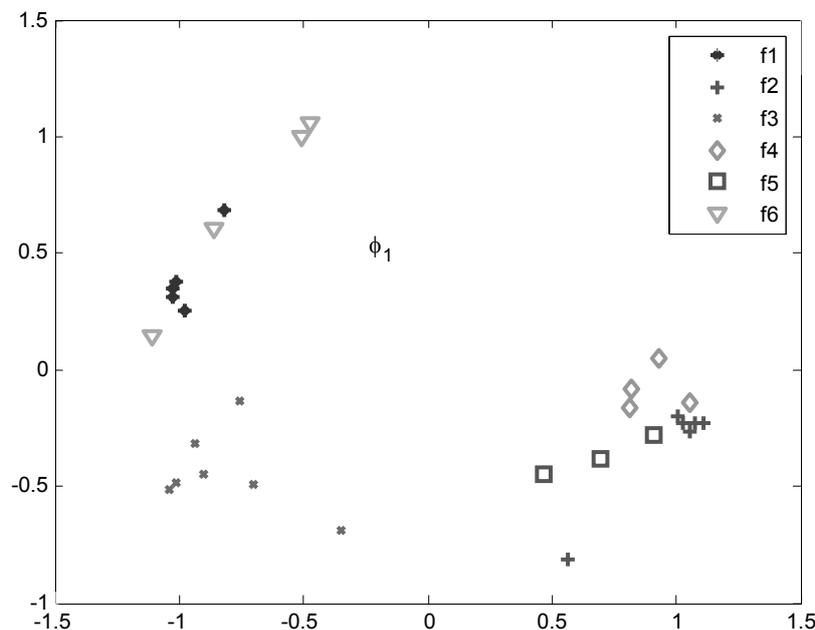


Figure VI-17 : Projection des quatre premiers paramètres avec $\phi_1(V_1)$

La Figure VI-18 montre qu'en plus de l'impact de la durée de fonctionnement (f3), le groupe diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène peut aussi être séparé (f4).

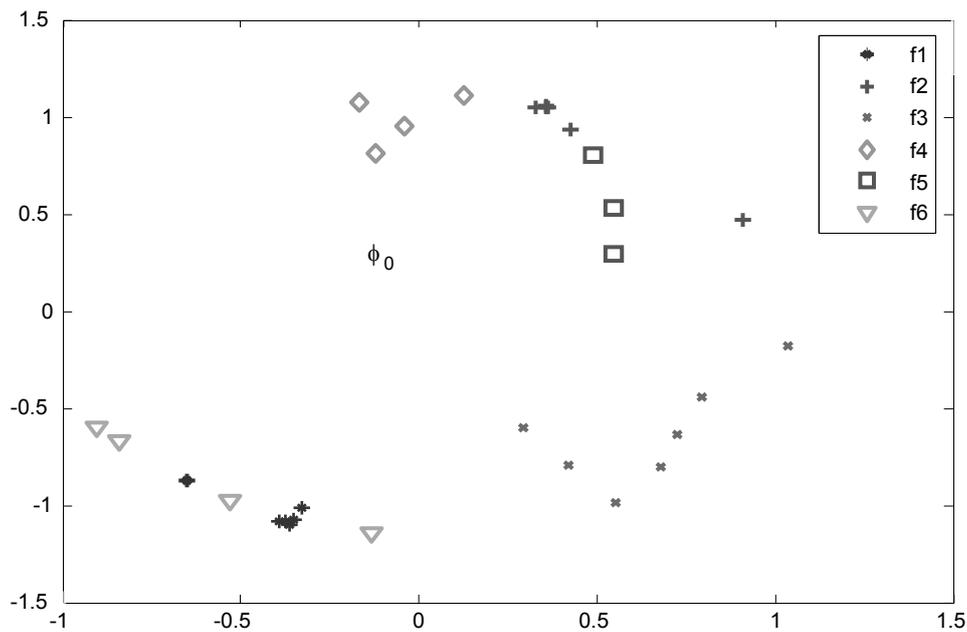


Figure VI-18 : Projection des quatre premiers paramètres avec $\phi_0(V_1)$

7.2.3.b. Séparation des données en utilisant $V_2 = (p_5, p_6, p_7, p_8)^T$

Il est aisé de remarquer sur la Figure VI-19, que ce sous-ensemble de paramètres, permet la séparation du groupe diminution de pression (f5), du groupe augmentation de la stœchiométrie de l'air (f2), du groupe augmentation de l'humidité (f6) et du groupe diminution de la stœchiométrie de l'air (f1).

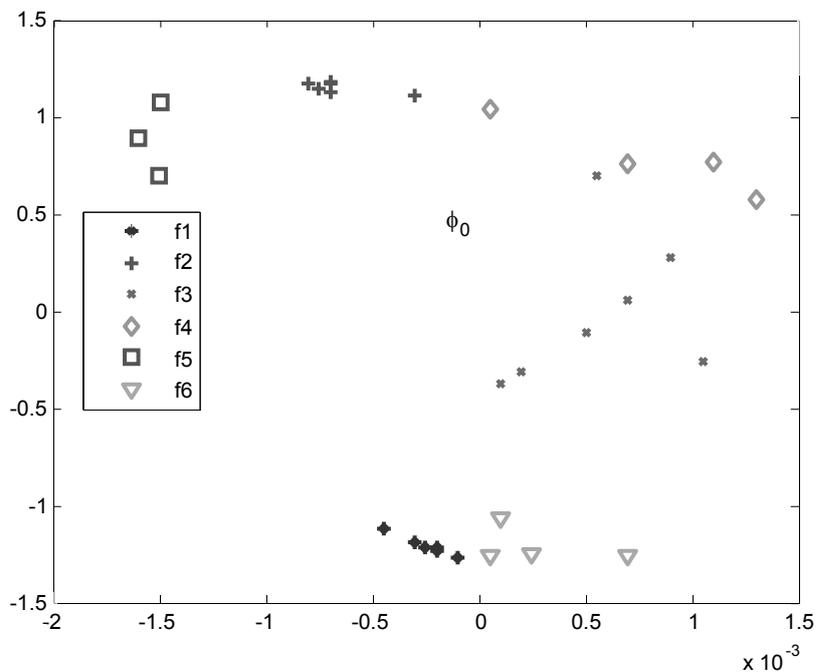


Figure VI-19 : Projection du cinquième jusqu'au huitième paramètre avec $\phi_0(V_2)$

Cependant ce sous ensemble de paramètres ne semble pas pertinent pour extraire l'impact de la durée de fonctionnement (f3) et la diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f4). Nous remarquons que les groupes « diminution de la stœchiométrie de l'air » (f1) et « augmentation de l'humidité relative » (f6) ne pouvaient auparavant pas être distingués en utilisant les quatre premiers paramètres, alors qu'ici ils sont séparables : une abscisse négative pour f1 et une abscisse positive pour f6.

7.2.3.c. Séparation des données en utilisant $V = (V1, V2, V3)$

Sur la Figure VI-20, les douze premiers paramètres sont utilisés. Nous pouvons observer que le groupe diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f4) peut être isolé par le quadrant ayant une abscisse et une ordonnée négatives.

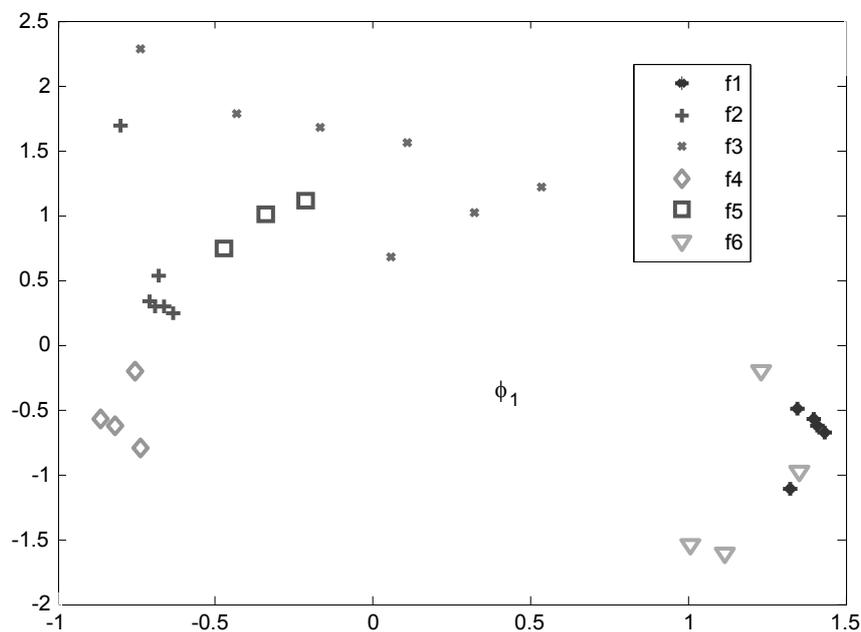


Figure VI-20 : Projection des douze premiers paramètres avec $\phi_1(P)$

Nous avons trouvé $Nb=3$ sous-ensembles ($V1 = (p1, p2, p3, p4) T$, $V2 = (p5, p6, p7, p8) T$, $V=P$) permettant une bonne séparation des six jeux de données représentant six modes de fonctionnement différents. Nous avons vu que certaines classes peuvent être isolées par une simple vérification d'une contrainte de positivité (nous remarquons des tendances). Cependant, l'étape de définition des frontières n'a pas été effectuée car nous ne disposons pas d'une base de donnée suffisamment importante qui nous permet de définir de façon fiable les frontières entre les classes.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué nos méthodes sur des données expérimentales. Nous avons montré la pertinence des symptômes et des paramètres obtenus avec la méthode des résidus et la méthode de projections respectivement pour approcher qualitativement la distribution de courant. Les résultats obtenus montrent que ces derniers sont en concordance avec les mesures fournies par une plaque de mesure invasive (S++).

Les paramètres extraits avec la méthode par projection présentent les avantages suivant :

(i) Nous avons vu que les symptômes ne permettent pas de remonter à toute les zones à faibles densités de courant, mais uniquement à celles qui dominant (ayant les plus faibles densités de courant), particulièrement pour les symptômes générés à partir des quatre bases principales. Contrairement aux symptômes, les paramètres extraits par projection permettent la détection de toutes les zones à faibles densités de courant même si celles-ci ne sont pas les plus faibles au niveau de la section de la pile.

(ii) La valeur des paramètres par zone permet de reconstruire les valeurs de la distribution des densités de courant. L'approximation de la distribution de courant pour l'impact de la durée de fonctionnement montre une bonne concordance avec les mesures données par la carte S++. Cependant, l'approximation de la distribution de courant pour une diminution de la stœchiométrie de l'air concorde avec la carte S++ en termes de répartition de courant (signes positifs et négatifs), mais les ordres de grandeurs sont plus proches de ceux obtenus avec la méthode d'inversion [Le Ny, thèse 2012]. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la distribution de courant donnée par la carte S++ est locale et située au milieu du stack, tandis que le réseau de capteurs mesure le champ magnétique généré par l'ensemble des cellules de la PAC. Avec la composante w , nous avons conclu que les densités de courant les plus faibles sont proches de la borne + (le plus éloigné des alimentations en gaz), la valeur mesurée par le champ magnétique prend donc en compte ces faibles valeurs, contrairement à la carte S++.

(iii) Les paramètres permettent aussi de voir comment la distribution de courant évolue au cours du temps. A titre d'exemple, pour un vieillissement, nous avons vu que les densités de courant de la zone 3 sont de plus en plus faibles, tandis que celles de la zone 1 sont de plus en plus importantes. Cette évolution ne peut pas être détectée avec la méthode des résidus.

(iv) Nous avons vu aussi que l'utilisation de mesures moyennées modifie peu la valeur des paramètres extraits contrairement à la méthode des résidus. Nous pouvons dire que la méthode de projection permet de filtrer une partie des bruits de mesure.

D'autre part, l'utilisation des deux composantes u et w du champ magnétique nous a permis de localiser les hétérogénéités de la distribution de courant le long du stack. Nous avons vu que les hétérogénéités de courant pour l'impact de la durée de fonctionnement se situent au niveau des cellules qui sont proches de l'entrée des gaz et que celles liées à une diminution de la stœchiométrie de l'air se situent majoritairement à l'autre extrémité de la pile à combustible (borne +).

Nous avons montré que les variables qualitatives (G, H, D, Half) calculées à partir des symptômes obtenus peuvent être utilisées dans le cadre de la détection et de l'isolation de défauts aux niveaux des sous-systèmes. En effet, nous avons vu que chaque défaut (modification d'une condition opératoire occasionnée par le sous-système correspondant) appartient à l'une ou à plusieurs des classes prédéfinies aux chapitre V d'une manière distinguable de façon à différencier les origines de l'évolution de distribution de courant. Contrairement à la méthode des résidus, les variables qualitatives calculées à partir des paramètres ne permettent la séparation que de deux défauts parmi les six défauts. Nous avons constaté que seuls les défauts « impact de la durée de fonctionnement » (f3) et « diminution de la pression » (f5) peuvent être isolés. La diminution de la stœchiométrie de l'air (f1) et l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f6) peuvent être confondues ainsi que

l'augmentation de la stœchiométrie de l'air (f2) et la diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f4).

Nous avons aussi constaté qu'avec la table booléenne, construite à partir des signes des paramètres, il est possible d'isoler tous les défauts à l'exception de la diminution de la stœchiométrie de l'air (f1) et de l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f6) qui peuvent être confondus. Avec une simple opération, il est donc possible d'isoler quatre des six défauts.

Appliquée à nos données, dans une optique de classification supervisée, la méthode consistant à projeter des paramètres sélectionnés dans un espace 2D a permis de séparer les groupes de données étiquetées. Nous avons montré que trois sous-ensembles de paramètres peuvent être utilisés pour isoler les données étiquetées. Chaque sous-ensemble permet de séparer un certain nombre de données étiquetées (défaut). Nous avons vu que certains défauts peuvent être séparés des autres défauts avec seulement une vérification d'une contrainte de positivité dans l'espace de représentation 2D. La séparation des données étiquetées est synonyme de la localisation de l'origine de l'évolution des performances de conversion énergétique locales.

VII. Conclusions et perspectives

L'objectif de cette thèse est de contribuer au développement de méthodes de diagnostic en utilisant une mesure permettant de remonter aux performances locales durant le fonctionnement de la pile. En l'occurrence, la mesure du champ magnétique rayonné par la pile à combustible permet de remonter aux performances de conversion énergétique locales. L'utilisation de cette mesure permet de s'affranchir de la synthèse d'un modèle qui est un exercice très difficile vu le caractère complexe et multi-physique de la pile à combustible. De plus, le nombre important de paramètres internes à identifier et leurs valeurs variant d'une pile à l'autre accentuent les difficultés.

Dans cet objectif, nous avons passé en revue les différentes méthodes de diagnostic ainsi que les mesures qui peuvent être effectuées sur une pile à combustible afin de recueillir des informations dans les différentes grandeurs. Ces mesures peuvent être de natures invasives ou non invasives, comme elles peuvent être de natures locales ou globales.

Les techniques de diagnostic internes sont très utilisées dans le domaine des piles à combustibles. Cependant, elles ne peuvent pas être appliquées à notre problème, étant donné que l'on ne dispose pas d'un modèle décrivant les entrées (conditions opératoires) en fonction des sorties (champ magnétique rayonné), néanmoins, des méthodes internes de types qualitatives peuvent être envisagées. Tel que le problème est posé, on se situe plutôt dans les méthodes externes du fait que l'on ne dispose pas de modèle.

Toutes les méthodes de diagnostic des piles à combustible de type PEM utilisent des mesures globales de la pile à combustible. En outre, les défauts relatifs à la gestion de l'eau sont provoqués par un changement de consigne de l'un des sous-systèmes qui alimentent la pile à combustible, en changeant ainsi les conditions opératoires optimales définies par le constructeur. A l'état actuel, les outils de diagnostic existant permettent de détecter les défauts au niveau de la PAC mais difficilement leur l'origine (défaillance d'un sous-système, vieillissement, ...).

Un autre facteur pouvant affecter l'état d'une pile à combustible est l'influence de son historique. Lors d'une campagne d'expérience pour la constitution d'une base de données (base d'apprentissage), l'état précédent de la pile à un instant t peut avoir un effet sur l'état du système à l'instant $t+1$. Pour se prémunir de l'influence de ce facteur supplémentaire, la construction d'une base de données fiable nécessite un protocole de test qui doit être appliqué pour chacune des expériences. Cependant, durant le fonctionnement d'une pile à combustible, des états intermédiaires peuvent exister. Cela veut dire que pour des conditions opératoires données, l'état de la pile dépend aussi de son historique.

Les dégradations des performances électriques globales ne sont qu'une conséquence des dégradations des performances locales. Une façon de recueillir des informations sur les performances locales et l'état de fonctionnement interne de la pile à combustible réside dans la mesure et l'analyse de la distribution de la densité de courant. Celles-ci traduisent les performances

de la répartition du courant à l'intérieur d'une pile à combustible. Elle peut être déterminée de façon directe, ou de façon indirecte, en mesurant par exemple le champ magnétique induit à l'extérieur de la pile. C'est le second moyen qui est utilisé car il fournit une information locale sans perturber le fonctionnement de la pile à combustible et il ne nécessite pas de signaux d'excitation extérieurs spécifiques. La mesure du champ magnétique nécessite l'installation d'une instrumentation supplémentaire pour une fin de diagnostic afin de mesurer une grandeur interne qui ne représente ni l'entrée ni la sortie du système.

Dans cette thèse, nous avons proposé une nouvelle façon de voir le diagnostic des PEMFC basée sur la dégradation des performances locales. Nous n'avons pas cherché à reconstruire la répartition de la densité de courant de façon exacte à travers la mesure du champ magnétique induit à l'extérieur de la pile (problème inverse). Le but est d'utiliser la mesure du champ magnétique qui est corrélée à l'état local de la pile à combustible afin de :

- 1) Construire des indicateurs de la répartition de la densité de courant (indicateurs de performances) à l'intérieur de la pile qui détectent les inhomogénéités de la densité de courant (paramètres qui ont un sens physique).
- 2) Caractériser les différents modes de fonctionnement en utilisant ces indicateurs.
- 3) Déterminer la cause des dégradations des performances locales (hétérogénéités de la distribution de la densité de courant) : soit le fonctionnement inhérent à la pile, soit les changements intervenus au niveau des sous-systèmes alimentant la pile à combustible.

En s'intéressant à la répartition de la densité de courant, nous nous intéressons aussi indirectement aux problèmes de gestion de l'eau (noyage et assèchement) du fait que la répartition de l'eau à l'intérieur de la pile est corrélée à la répartition du courant à l'intérieur de la PAC.

Nous avons tout d'abord montré l'existence de liens entre la distribution de courant non uniforme et les conditions opératoires sous lesquelles la pile à combustible fonctionne. Un modèle électrocinétique permet de calculer les distributions de courants et de potentiels à partir de distributions de paramètres caractérisant le stack (conductivités, forces électromotrices, conditions aux limites). Un modèle magnétique permet de calculer le champ magnétique généré par une distribution de courant. Le couplage de ces deux modèles permet de simuler des distributions de courant non uniformes au niveau des cellules tout en prenant en compte les interactions électriques intervenant entre les cellules d'un même stack. Nous avons montré l'existence de signatures externes pour une certaine famille de distributions de courant non uniforme. Ensuite, nous avons proposé une méthode permettant de caractériser la distribution de courant et le champ magnétique généré en la subdivisant en un ensemble de bases générables, permettant ainsi de caractériser le fonctionnement indésirable de la pile à combustible. La construction de l'ensemble des bases s'appuie uniquement sur les dimensions du stack et sur le modèle magnétique direct qui ne nécessitent aucun paramètre électrique ou physique de la pile à combustible. Cette démarche donne à notre méthode un caractère générique.

Disposant de ces bases caractérisant le fonctionnement indésirable, le problème de diagnostic a ensuite été développé dans les chapitres suivants.

Dans un premier temps, une méthode de détection de distribution de courant hétérogène, liée au fonctionnement indésirable des piles à combustibles, en utilisant les bases, a été présentée. En effet, les bases construites sont représentatives du fonctionnement indésirable de la pile à combustible. La procédure de détection des hétérogénéités génère alors des résidus en comparant les bases aux champs magnétiques issus des capteurs (mesures) puis décide de la présence ou non d'une hétérogénéité. Cette procédure passe par la détermination de deux seuils qui ne dépendent seulement que des dimensions du stack.

Dans une optique de caractérisation, quatre variables qualitatives ont été créées à partir des symptômes générés, puis une classification des distributions de courant non uniformes a été proposée. Cette classification traduit les performances de conversion énergétique locales et ne requiert pas de connaissance a priori sur les dysfonctionnements pouvant affecter la pile à combustible. Les signatures de référence ont été prédéfinies a priori en se basant sur les hétérogénéités dominantes. Cette étape permet de caractériser le fonctionnement de la pile à combustible indépendamment de l'origine du fonctionnement indésirable de la pile à combustible. Concernant la partie diagnostic des dysfonctionnements, l'origine de l'évolution de la distribution de courant peut être localisée si chaque mode de fonctionnement appartient à l'une ou à plusieurs des signatures de références prédéfinies d'une manière distinguable de façon à différencier les différents modes de fonctionnement de la pile à combustible. Nous avons aussi vu comment il est possible, à partir des symptômes extraits des deux composantes u et w , de se prononcer sur la localisation des hétérogénéités par rapport au réseau de capteur installé au milieu de la pile à combustible. Par contre cette méthode ne permet de localiser que les hétérogénéités dominantes.

Cette première méthode à base de résidus permet la détection des zones d'hétérogénéités, cependant elle nécessite de fixer deux seuils, ce qui engendre une perte d'informations. La démarche montre des limitations quant au degré d'hétérogénéité, elle ne nous renseigne pas sur les densités de courant aux niveaux des zones. Par la suite, une alternative qui ne nécessite pas de seuils et qui nous renseigne beaucoup plus sur les densités de courant a été proposée.

Dans un second temps, nous avons proposé une autre méthode basée sur la projection du champ magnétique dans les directions des bases. L'avantage de cette méthode par rapport la précédente est de ne nécessiter aucun seuillage ni traitement des résidus pour l'extraction des paramètres. De plus, dans cette approche, nous avons une mesure directe de l'évolution du champ magnétique par rapport aux bases (rapprochement ou éloignement par rapport à une base donnée).

Les paramètres extraits de cette méthode sont directement exploitables pour la détection d'hétérogénéités. Nous avons vu que les paramètres extraits représentent des fonctions linéaires discriminantes : un paramètre positif indique la présence de la caractéristique (base) et un paramètres négatif indique la non présence. Plus la valeur du paramètre est proche de 1 plus la caractéristique est dominante.

Nous avons aussi vu que les paramètres extraits sont très sensibles à la moyenne des densités de courant au niveau des différentes zones. Les paramètres correspondants aux zones qui contiennent les plus faibles densités de courant ont les valeurs les plus élevées. Nous avons aussi constaté que les paramètres extraits à partir des deux composantes u et w arrivent à mieux localiser les l'emplacement des hétérogénéités le long du stack par rapport à la méthode des résidus.

Dans ce chapitre, l'extension de cette méthode de détection des hétérogénéités au problème d'estimation de la distribution de la densité de courant (problème inverse) est bien montrée grâce à des exemples illustratifs.

Comme dans la méthode des résidus, dans une optique de caractérisation non supervisée, quatre variables qualitatives ont été créées à partir des symptômes générés. Puis une classification des distributions de courant non uniformes qui ne requiert pas une connaissance a priori sur les dysfonctionnements pouvant affecter la pile à combustible est proposée. Les signatures de référence ont été prédéfinies a priori en se basant sur les hétérogénéités dominantes. Une autre table de signature booléenne, cette fois-ci basée sur les signes des paramètres extraits, a été proposée pour caractériser chaque distribution de courant non uniforme. Ces étapes permettent de caractériser le fonctionnement de la pile à combustible indépendamment de l'origine du fonctionnement indésirable de la pile à combustible. Quant à l'origine de l'évolution de la distribution de courant, elle peut être localisée si chaque mode de fonctionnement (défaut) appartient à l'une ou à plusieurs des signatures de références prédéfinies dans les deux tables de signature d'une façon à différencier les différents modes de fonctionnement de la pile à combustible.

Nous nous sommes intéressés ensuite à la problématique de classification supervisée. Nous avons proposé de fractionner la tâche de classification en plusieurs sous-classifications. Afin d'utiliser au mieux les capacités de classification de l'être humain, nous avons montré comment il est possible à partir d'un jeu de paramètres d'obtenir des nuages de points dans l'espace 2D. Pour la sélection des paramètres à projeter, il est possible d'utiliser le critère de Fisher pour construire Z sous-classifieurs binaires ou bien une autre possibilité que nous avons proposée qui est liée à la construction des bases suivant le nombre de zones à faibles densités de courant. Cette deuxième possibilité pourrait conduire à la construction de moins de Z classifieurs, ce qui réduirait peut être la complexité de la classification.

Enfin les méthodologies de détection d'hétérogénéités et de diagnostic développées dans le cadre de cette thèse ont été implémentées sur un stack de dimensions industrielles (stack GENEPAC) conçu par PSA et le CEA. Cette étude nous a permis de montrer la pertinence des symptômes obtenus avec la méthode des résidus et des paramètres obtenus par la méthode de projections pour approcher qualitativement la distribution de courant. Les résultats obtenus montrent que ces derniers sont en concordances avec les mesures fournies par une plaque de mesure invasive.

Les paramètres extraits avec la méthode par projection présentent les avantages suivant :

- (i) Nous avons vu que les symptômes ne permettent pas de remonter à toute les zones à faibles densités de courant, mais uniquement à celles qui dominant (ayant les plus faibles densités de courant), particulièrement pour les symptômes générés à partir des quatre bases principales. Contrairement aux symptômes, les paramètres extraits par projection permettent la détection de toutes les zones à faibles densités de courant, même si celles-ci ne sont pas les plus faibles au niveau de la section de la pile.
- (ii) La valeur des paramètres par zone permet de reconstruire les valeurs de la distribution des densités de courant. L'approximation de la distribution de courant pour l'impact d'une durée de fonctionnement montre une bonne concordance avec les mesures données par la carte S++. Cependant, l'approximation de la distribution de courant pour une diminution de la

stœchiométrie de l'air concorde avec la carte S++ en termes de répartition de courant (signes positifs et négatifs), mais les ordres de grandeurs sont plus proches de ceux obtenus avec la méthode d'inversion [Le Ny, thèse 2012]. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la distribution de courant donnée par la carte S++ est locale et située au milieu du stack, tandis que le réseau de capteurs mesure le champ magnétique généré par l'ensemble des cellules. Avec la composante w , nous avons conclu que les densités de courant les plus faibles sont proches de la borne + (le plus éloigné des alimentations en gaz), la valeur mesurée par le champ magnétique prend donc en compte ces faibles valeurs, contrairement à la carte S++.

Cette reconstruction par zone de la densité de courant nous a permis d'obtenir une distribution cohérente sans avoir à inverser le modèle magnétique directe. Pour affiner cette approche, une attention particulière doit être apportée au lien existant entre les bases générées en fonction des dimensions de la pile et le facteur de conditionnement de la matrice à inverser pour estimer les densités de courant par zone. Une analyse approfondie serait probablement utile et intéressante.

- (iii) Les paramètres permettent aussi de voir comment la distribution de courant évolue au cours du temps. A titre d'exemple, nous avons vu comment la zone 3 présentait de plus en plus de faibles densités de courant et la zone 1 présentait de plus en plus de forte densités de courant. Cette évolution ne peut pas être détectée avec la méthode des résidus.
- (iv) Nous avons vu aussi que l'utilisation de mesures moyennées modifie peu la valeur des paramètres extraits contrairement à la méthode des résidus. Nous pouvons dire que la méthode de projection permet de filtrer une partie des bruits de mesures.

D'autre part, l'utilisation des deux composantes du champ magnétique u et w , nous a permis de localiser les hétérogénéités de la distribution de courant le long du stack. Nous avons vu que les hétérogénéités de courant pour l'impact de la durée de fonctionnement se situent plus aux niveaux des cellules qui sont proches de l'entrée des gaz et que celles liées à une diminution de la stœchiométrie de l'air se situent majoritairement à l'autre extrémité de la pile à combustible.

Ensuite, nous avons démontré que les variables qualitatives utilisées dans la méthode par génération de résidus peuvent être utilisées dans le cadre de la détection et de l'isolation de défauts au niveau des sous-systèmes. En effet pour la localisation de l'origine des évolutions de la distribution de courant, posée comme un problème de classification, nous avons vu que chaque défaut (modification d'une condition opératoire occasionnée par le sous-système correspondant) appartient à l'une ou à plusieurs des classes prédéfinies aux chapitre V d'une manière distinguable de façon à différencier les origines de l'évolution de la distribution de la densité de courant. Contrairement à la méthode des résidus, les variables qualitatives utilisées avec les paramètres extraits par projection des données dans la direction des bases ne permettent la séparation que de deux défauts parmi les six défauts. Nous avons constaté que seuls les défauts « impact de la durée de fonctionnement » (f3) et « pression » (f5) peuvent être isolés avec cette méthode. La diminution de la stœchiométrie de l'air (f1) et l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f6) peuvent être confondues ainsi que l'augmentation de la stœchiométrie de l'air (f2) et la diminution de la stœchiométrie de l'hydrogène (f4).

Nous avons constaté aussi qu'avec la table booléenne construite à partir des signes des paramètres, il est possible d'isoler tous les défauts sauf la diminution de la stœchiométrie de l'air (f1) et l'augmentation de l'humidité relative des gaz (f6) qui peuvent être confondus.

Appliquée à nos données, dans une optique de classification supervisée, la méthode consistant à projeter des paramètres sélectionnés dans un espace 2D a permis de voir des tendances quant à la séparation des groupes de données étiquetées. Nous avons vu que trois sous-ensembles de paramètres peuvent être utilisés pour isoler les données étiquetées. Chaque sous-ensemble permet de séparer un certain nombre de données étiquetées (défaut). Nous avons aussi vu qu'il existe des tendances, certains défauts peuvent être séparés des autres défauts avec seulement une vérification d'une contrainte de positivité dans l'espace de représentation 2D. La séparation des données étiquetées est synonyme de la localisation de l'origine de l'évolution des performances de conversion énergétiques locales.

Cependant l'outil de diagnostic proposé est perfectible pour une meilleure localisation des défauts. D'une part, il serait notamment intéressant de trouver et tester d'autres signatures de référence autres que celles obtenues avec les quatre variables qualitatives (G, Half, H, D). D'autre part la méthode de classification par projection dans plusieurs plans 2D a certes fait apparaître de très satisfaisantes capacités de classification des défauts aux niveaux sous-systèmes. Cependant, il serait utile et intéressant d'automatiser l'étape de décision et d'étudier les performances de classification :

- en utilisant une base de données beaucoup plus importante
- en utilisant les critères de sélection de paramètres pertinents existants qui permettent de séparer un défaut des autres défauts dans le cadre d'une séparation binaire (chaque plan sera dédié à un défaut).

Il est important de noter qu'une fois les paramètres extraits, toutes les méthodes de classification existantes citées dans la thèse telles que réseaux de neurones et les Machines à Vecteurs Supports (SVM) peuvent être appliquées.

En conclusion, les deux méthodes de diagnostic proposées ont été validées sur des mesures prélevées sur un stack de dimensions industrielles. De ce fait, d'un côté nous pouvons avoir des informations locales sur les performances des conversions énergétiques locales et, d'un autre côté nous pouvons remonter aux origines de l'évolution des performances locales. Les résultats montrent que ces méthodes sont complémentaires et peuvent être utilisées comme outil de diagnostic.

L'intérêt de ces méthodes est que nous pouvons rendre l'approche facilement généralisable sur d'autres stacks, qu'ils soient du même constructeur mais de puissance différente ou bien d'un autre fabricant. Seule l'étape d'interprétation devra être revue. Un point important et qui mérite d'être souligné, est que la caractérisation ne nécessite aucun protocole expérimental pour se prémunir de l'influence de l'historique de la pile à combustible sur son état présent. La détermination des bases du problème et des seuils est adaptée pour chaque stack en fonction de ses dimensions. Cette détermination est réalisée en utilisant le modèle magnétique direct en simulation.

L'utilisation de cet outil peut être beaucoup plus large. Par exemple, il peut être utilisé pendant la phase de conception des piles comme un outil de caractérisation de l'effet des conditions

opérateurs sur la distribution de la densité de courant dans un but de compréhension des interactions entre les sous-systèmes et la pile à combustible, ou encore pendant des phases de maintenance des piles à combustible.

Enfin, dans une vision plus large de développement du diagnostic par champ magnétique, Il serait intéressant d'utiliser les résultats obtenues pour optimiser le système de mesurer et pour vérifier l'impact de la précision de ces derniers sur la qualité du diagnostic. Il serait également intéressant de compléter l'étape de diagnostic par une étape corrective du défaut en proposant notamment des actions correctives en fonction du résultat de diagnostic et des paramètres extraits par projection pour éliminer l'effet du défaut sur l'état de la PAC. La Figure VII-1 montre comment cet outil de diagnostic peut être intégré dans un schéma global. Le champ magnétique de référence correspond à la densité de courant de référence, qui doit être la plus uniforme possible.

Nous pensons que cela passe par une modification des conditions opératoires, qui ne sont plus adaptées à l'état de santé de la pile à combustible tout en respectant certaines contraintes (par exemple des variations des conditions opératoires pour ralentir le vieillissement de la pile à combustible).

Les principaux inconvénients de notre approche sont liés au prix et l'encombrement dû au nombre relativement important de capteurs et de l'environnement de mesure. Le réseau de capteur conçu pour l'inversion du modèle magnétique direct a permis de démontrer la faisabilité de notre approche. Il n'est cependant pas optimisé pour l'outil de diagnostic proposé ici. Il en résulte qu'un des verrous technologiques à surmonter lors des travaux futurs résidera dans la réduction de ces coûts et le placement optimal de ces capteurs.

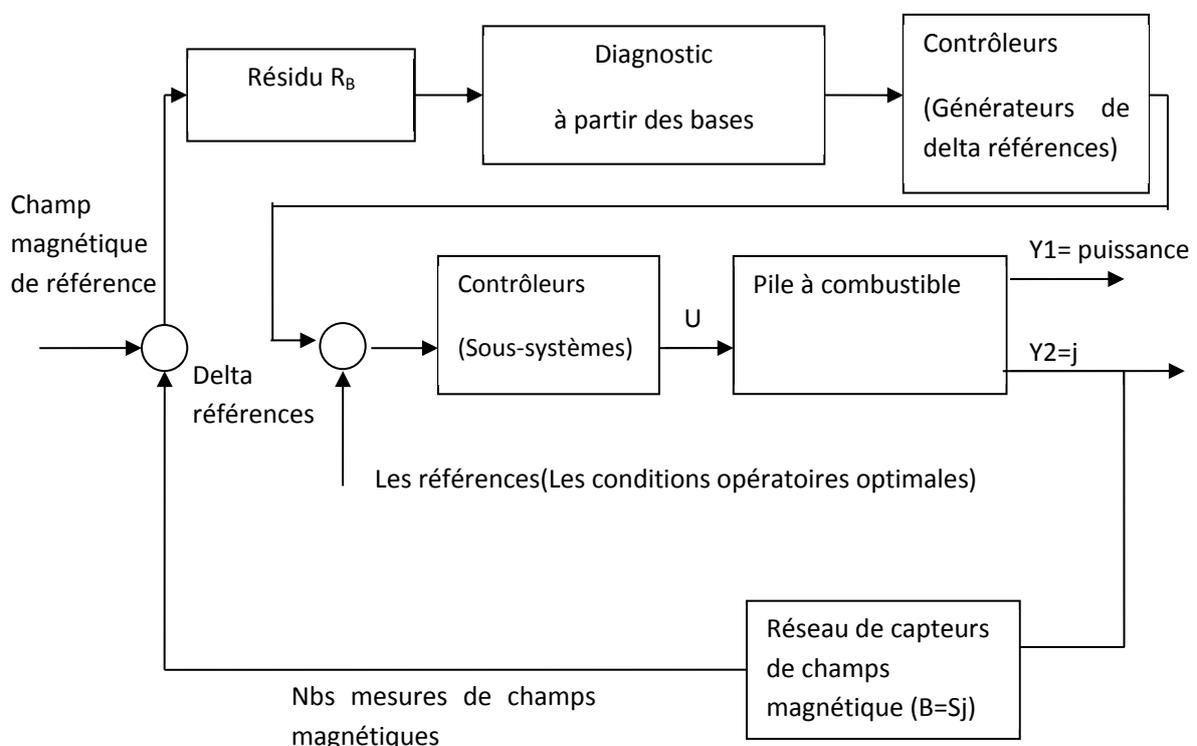


Figure VII-1 : Schéma global de diagnostic correctif pour uniformiser la distribution de courant

Malgré ses inconvénients, cette approche est prometteuse et les résultats sont suffisants pour pouvoir envisager une transposition sur d'autres piles.

De plus la multiplication d'essais expérimentaux ouvrirait d'autres perspectives

Les résultats expérimentaux supplémentaires permettront de vérifier la pertinence des choix effectués comme la nature et le nombre de bases générées. Ces résultats sont également indispensables pour développer les méthodes de classification.

Cela permettra d'approfondir les liens existants entre mode de fonctionnement, forme de signature et évolution des paramètres.

Bibliographie

- [Aitouche et al., 2001] A. Aitouche, Q. Yang & B. Ould Bouamama. Fault Detection and Isolation of PEM Fuel Cell System based on Nonlinear Analytical Redundancy: An application via Parity Space Approach. The European Physical Journal Applied Physics. Volume 54 / Issue 02, pp. 23408-23418, 2011
- [Antoni et al., 2007] L. Antoni, J-P. Poirot-Crouvezier, F. Roy, X. Glipa. Pile à combustible GENEPAC. Techniques de l'Ingénieur, in52, 2007
- [Arcak et al., 2004] M. Arcak, H. Gorgun, L.M. Pedersen & S. Varigonda . A nonlinear observer design for fuel cell hydrogen estimation. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol 12, no 1, pp. 101–110, 2004
- [Basseville, 1988] M. Basseville. Detecting changes in signals and systems - a survey. Automatica. Vol. 24(3), pp. 309–326, 1988
- [Benallouch et al., 2007] M. Benallouch, R. Outbib, M. Boutayeb & A. Hernandez. State Estimation for a Class of Time-Varying Linear Systems: Application to Fuel Cell Systems. 3rd IFAC Symposium on System, Structure and Control SSSC07, pp. 500-505, 2007.
- [Benallouch et al., 2008] M. Benallouch, R. Outbib, M. Boutayeb & L. Laroche. A result on state estimation of nonlinear systems with application to fuel cell stacks. 17th IFAC World Congress, pp. 2774-2778, Seoul, Korea, 2008.
- [Brunet et al., 1990] J. Brunet, D. Jaume, M. Labarrère, A. Rault & M. Verge. Détection et diagnostic de pannes : approche par modélisation. ISBN : 2-86601-241-0, Hermès science publications, 1990.
- [Candusso, Thèse 2002] D. Candusso. Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique. thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2002
- [Casimir, 1971] R. Casimir. Diagnostic des défauts des machines synchrones par reconnaissance des formes, thèse, Ecole centrale de Lyon, 1971
- [Charniak, 1991] J. Charniak. 'Bayesian networks without tears', AI Magazine 12(4), 50–63, 1991
- [Chiang et al., 2001] L. H. Chiang, E. L. Russell & R. D. Braatz. Fault detection and diagnosis in industrial systems. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer, 2001
- [Chikahisa et al., 2009] T. Chikahisa, Y. Tabe, K. Kikuta, N. Nohara. Measurement of water production phenomena, temperature, and current density distributions in a polymer electrolyte fuel cell. Proceeding of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structure and Intelligent Systems. Vol. 19, pp. 456-462, 2009

- [Chin & Danai, 1991] H. Chin & K. Danai. A Method of Fault Signature Extraction for Improved Diagnosis. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 113, No. 4, pp. 634-638, 1991
- [Comtet-Varga et al., 2000] G. Comtet-Varga, C. Christophe, V. Cocquempot & M. Staroswiecki, M. Robust fault detection and isolation via a diagnostic observer. International Journal of Robust Nonlinear Control. Vol. 10 (14), pp. 1175–1192, 2000
- [Danai & Chin, 1991] K. Danai & H. Chin. Fault Diagnosis with Process Uncertainty. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol. 113. No. 3, pp. 339-343, 1991
- [Deckert et al., 1977] J.C. Deckert, M.N. Desai & A.S. Willsky. Sensor failure identification using analytical redundancy. IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 22 (5), pp. 795–803, 1977
- [De Lira et al., 2010] S. De Lira, V. Puig & J. Quevedo, Robust LPV Model-Based Sensor Fault Diagnosis and Estimation for a PEM Fuel Cell System, 2010 Conference on Control and Fault Tolerant Systems Nice, France, October 6-8, pp. 819-824, 2010.
- [Devroye et al., 1996] L. Devroye, L. Györfi & G. Lugosi. A probabilistic theory of pattern recognition. Springer, 1996
- [Dubuisson, 1990] B. Dubuisson. Diagnostic et reconnaissance des formes. Hermès Science Publications, 1990.
- [Dubuisson, 2001a] B. Dubuisson. Automatique et statistiques pour le diagnostic. Hermès Science Publications, 2001.
- [Dubuisson, 2001b] B. Dubuisson. Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance des formes. Hermès Science Publications, 2001.
- [Durand, 1968] E. Durand, Tome Magnétostatique. Edition MASSON, 1968
- [Forrai et al., 2005] A. Forrai, H. Funato, Y. Yanagita, and Y. Kato. Fuel-Cell Parameter Estimation and Diagnostics, IEEE Transactions On Energy Conversion. Vol. 20 (3), pp. 668 - 675 , 2005.
- [Fouquet Et al., 2006] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillan, G. Dauphin-Tanguy, B. Ould-Bouamama. Model based PEM Fuel Cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements. J Power Sources. Vol. 159, pp. 905-913, 2006
- [Fraunhofer, 2012] Fraunhofer ISE, www.fraunhofer.de/en.html
- [Freunberger et al., 2008] S.A. Freunberger, I.A. Schneider, P.C. Sui, A. Wokaun, N. Djilali & F.N. Büchi. Cell interaction phenomena in polymer electrolyte fuel cell stacks. Journal of The Electrochemical Society, 155(7), B704 – B714, 2008
- [Gerteisen et al., 2011] D. Gerteisen, W. Merida, T. Kurz, P. Lupotto, M. Schwager & C. Hebling. Spatially resolved voltage, current and electrochemical impedance spectroscopy measurements. Fuel Cells 11. No. 2, pp. 339-49, 2011

- [Gerteisen et al., 2012] D. Gerteisen, N. Zamel, C. Sadeler, F. Geiger, V. Ludwig, C. Hebling. Effect of operating conditions on current density distribution and high frequency resistance in a segmented PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37, pp.7736-7744
- [Gertler, 1998] J. Gertler. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, New York, 1998
- [Gertler & Singer, 1990] J. Gertler & D. Singer. A new structural framework for parity equations based failure detection and isolation. *Automatica* 26(2), 381–388, 1990
- [Görgün et al., 2005] H. Görgün, M. Arcak & F. Barbir. A Voltage-Based Observer Design for Membrane Water Content in PEM Fuel Cells. *American Control Conference*, June 8-10, Portland, OR, USA, pp. 4796-4801, 2005.
- [Hakenjos et al., 2004] A. Hakenjos, H. Muentert, U. Wittstadt & C. Hebling. A PEM fuel cell for combined measurement of current and temperature distribution and flow field flooding. *Journal of Power Sources* 131, pp. 213-216, 2004
- [Hamaz et al., 2012] T. Hamaz, C. Cadet, F. Druart. Détection de dysfonctionnements d'une pile à combustible PEMFC à partir de sauts de courant. *CIFA 2012*, Grenoble, France, 2012
- [Hauer et al., 2005] K.-H. Hauer, R. Potthast, T. Wuster & D. Stolten, D. Magnetotomography - a new method for analysing fuel cell performance and quality. *Journal of Power Sources*, 143, pp. 67 – 74, 2005
- [Hernandez et al., 2006] A. Hernandez, D. Hissel, R. Outbib. Fuel cell fault diagnosis: A stochastic approach, *Industrial Electronics, IEEE International Symposium*. Vol.3, pp.1984-1989, 2006
- [Hernandez et al., 2010] A. Hernandez, D. Hissel, R. Outbib. Modeling and Fault Diagnosis of a Polymer Electrolyte Fuel Cell Using Electrical Equivalent Analysis. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 25, NO. 1, pp. 148- 160, 2010
- [Hissel et al., 2004] D. Hissel, M. C. Péra, J. M. Kauffmann, Diagnosis of automotive fuel cell power generators. *J Power Sources*. Vol. 128, pp. 239-246, 2004
- [Isermann, 1993] R. Isermann. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing: tutorial paper. *Automatica* 29(4), pp. 815–835, 1993
- [Isermann, 1997] R. Isermann. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods: an introduction. *Control Engineering Practice* 5(5), pp. 639–652, 1997
- [Kittler, 1986] J. Kittler. Feature selection and extraction (Eds). *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing*, Academic Press. 1986
- [Larminie & Dicks, 2000] J. Larminie & A. Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons, 2000.
- [Latham, 2001] R.A Latham. Algorithm Development for Electrochemical Impedance spectroscopy diagnostics in PEM Fuel Cells. thèse, University of Victoria, Canada, 2001.

Bibliographie

- [Le Canut et al., 2006] J.-M. Le Canut, R.M. Abouatallah, D.A. Harrington. Detection of Membrane Drying, Fuel Cell Flooding and Anode Catalyst Poisoning on PEMFC Stacks by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *J. Electrochem. Soc.* Vol. 153, pp. A857-A864, 2006
- [Le Ny, thèse 2012] M. Le Ny. "Diagnostic non invasif de piles à combustible par mesure du champ magnétique proche". Thèse, Université de Grenoble, France, 2012
- [Li et al., 2008] H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi et co-auteurs. A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* Vol. 178, 103–117, 2008
- [Maquin & Ragot, 2000] D. Maquin & J. Ragot. Diagnostic des systèmes linéaires. ISBN : 2-7462-0133-X, Hermès science publications, 2000.
- [Maranzana et al., 2010] G. Maranzana, C. Moyne, J. Dillet, S. Didierjean & O. Lottin. About internal currents during start-up in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 195(18), pp. 5990 – 5995, 2010
- [Masson et al., 1996] M. Masson, B. Dubuisson & C. Frélicot. 'Conception d'un module de reconnaissance des formes floues pour le diagnostic', *Journal Européen des systèmes automatisés (JESA)* 30(2-3), pp. 319–341, 1996
- [Mechraoui et al., 2008] A. Mechraoui, K. Medjaher & N. Zerhouni. Bayesian based fault diagnosis: application to an electrical motor, in 'Proc. of the 17th IFAC World Congress', Seoul, Korea, 2008
- [Mérida, 2002] W.R. Mérida. Diagnosis of PEMFC stack failures via electrochemical impedance spectroscopy, thèse, University of Victoria, Canada , 2002.
- [Mérida et al., 2006] W. Mérida, D.A Harrington, J.M Le canut, G. Mclean. Characterisation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) failures via electrochemical impedance spectroscopy. *J Power Sources*, (2006), Vol. 161, pp. 264-274, 2006
- [Miller & Bazylak, 2011] M. Miller & A. Bazylak. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell stack testing. *Journal of Power Sources*, 196(2), pp. 601 – 613, 2011
- [Niroumand et al., 2011] A. M. Niroumand, W. Merida, M. Saif . PEM fuel cell low flow FDI. *Journal of Process Control* Vol. 21, pp. 602-612, 2011
- [Park et al., 2008] J. Park, X. Li, D. Tran, T. Abdel-Baset, D. Hussey, D. Jacobson & M. Arif. Neutron imaging investigation of liquid water distribution and the performance of a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(13), pp. 3373 –3384, 2008
- [Petrone et al., 2013] R. Petrone, Z. Zheng, D. Hissel, M.C. Péra, C. Pianese, M. Sorrentino, et al., A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*;Vol 38, pp. 7077-91, 2013
- [Randall, 1987] R. B. Randall. Frequency Analysis, Copenhagen : Bruel Kjaer, 1987
- [Riascos et al., 2006] L.A.M Riascos, F.G. Cozman, P.E. Miyagi, M.G. Simoes. Bayesian Network Supervision on Fault Tolerant Fuel Cells. *Industry Applications Conference*, Vol. 2,pp. 1059-1066, 2006

- [Riascos et al., 2007] L.A.M. Riascos, M G. Simoesb & P E. Miyagic. A Bayesian network fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 165, Issue 1, (2007) pp.267-278, 2007
- [Riascos et al., 2008] L.A.M. Riascos, M.G. Simoes, P.E. Miyagi. On-line fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells, *J Power Sources*, Vol. 175, pp. 419-429, 2008
- [Rubio et al., 2007] M.A Rubio, A. Urquia, S. Dormido. Diagnosis of PEM fuel cells through current interruption, *J Power Sources*, 171, 670-677, 2007
- [Sailler, thèse 2007] S. Sailler. Générateur Electrochimique et Stockage Isolé, thèse de doctorat de l'INPG, France, 2007
- [Sankir et al., 2007] M. Sankir, Yu Seung Kim, Bryan S. Pivovar, James E. McGrath, Proton exchange membrane for DMFC and H₂/air fuel cells: Synthesis and characterization of partially fluorinated disulfonated poly(arylene ether benzonitrile) copolymers, *J. Membrane Science*, Vol. 299, pp. 8-18, 2007
- [Saporta, 1990] G. Saporta. Probabilités, analyse de données et statistique. Technip, 1990.
- [Schmittinger & Vahidi, 2008] W. Schmittinger, A. Vahidi. A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* no 180, pp. 1-14, 2008
- [Schulze et al., 2007] M. Schulze, E. Gulzow, S. Schonbauer, T. Knori & R. Reissner. Segmented cells as tool for development of fuel cells and error prevention/prediagnostic in fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*, 173(1), pp. 19 – 27, 2007
- [Springer et al., 1991] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, S. Gottsfeld. Polymer electrolyte fuel cell model. *J. Electrochem. Soc.* 138. pp.2334–2341, 1991
- [Stumper et al., 1998] J. Stumper, S.A. Campbell, D.P. Wilkinson, M.C. Johnson & M. Davis, M. In-situ methods for the determination of current distributions in pem fuel cells. *Electrochimica Acta*, 43(24), pp. 3773 – 3783, 1998
- [Stumper et al., 2005] J. Stumper, M. Lohr & S. Hamada. Diagnostic tools for liquid water in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 143, pp.150-157, 2005
- [Sugiura et al., 2006] K. Sugiura, M. Yamamoto, Y. Yoshitani, K. Tanimoto, A. Daigo, T. Murakami, Performance diagnostics of PEFC by current-pulse method, *J Power Sources*, (2006), Vol.157, pp. 695-702, 2006
- [Taniguchi et al., 2008] A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda & Y. Miyazaki. Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol.33, pp. 2323-2329, 2008
- [Tant, thèse 2013] S. Tant. Contribution au diagnostic d'empilements PEMFC par spectroscopie d'impédance électrochimique et méthodes acoustique. Université de Grenoble, France, 2013
- [Tenenhaus, 1998] M. Tenenhaus. La régression PLS théorie et pratique. Technip, France, 1998.

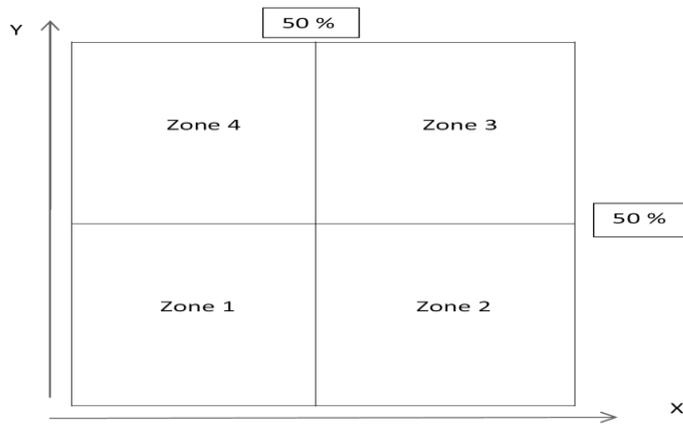
Bibliographie

- [Toscano, 2004] R. Toscano. Commande et diagnostic des systèmes dynamiques, modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état, diagnostic. ISBN : 2-7298-2038-8, Ellipses, 2004.
- [Varigonada & Kamet, 2006] S. Varigonada, M. Kamat. Control of stationary and transportation fuel cell systems: progress and opportunities. *Comp. Chem. Eng.* 30,pp. 1735–1748, 2006
- [Venkatasubramanian et al., 1990] V. Venkatasubramanian, R. Vaidyanathan & Y. Yamamoto. 'Process fault detection and diagnosis using neuronal networks: steady state processes', *Computer and Chemical Engineering* 14(7),pp. 699–712, 1990
- [Wasterlain, Thèse 2010] S. Wasterlain (2010). Approches expérimentales et analyse probabiliste pour le diagnostic de pile à combustible de type PEM. Thèse UFC / FEMTO-ST/ENISYS, le 4 février 2010. 298 pages, 2010
- [Widodo & Yang , 2007] A. Widodo & B.S. Yang. 'Support vector machine in machine monitoring and fault diagnosis', *Mechanical Systems and Signal Processing* 21,pp. 2560–2574, 2007
- [Yousfi Steiner, Thèse 2009] N. Steiner. Diagnostic non intrusif de groupes électrogènes à piles à combustible de type PEMFC. Thèse UFC / FEMTO-ST/ENISYS / Eifer-EDF, France,2009.
- [Yousfi Steiner et al., 2010] N. Yousfi Steiner, D. Candusso, D. Hissel, P. Moçotéguy. Model-based diagnosis for proton exchange membrane fuel cells Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Mathematics and Computers in Simulation*, 81,pp. 158-170, 2010
- [Yousfi Steiner et al., 2011a] N. Yousfi Steiner, D. Hissel, P. Moçotéguy, D. Candusso. Non intrusive diagnosis of polymer electrolyte fuel cell by wavelet packet transform. *International. Journal. of hydrogen energy*, 36,pp. 740-746, 2011
- [Yousfi Steiner et al., 2011b]N. Yousfi Steiner, D. Hissel, Ph. Moçotéguy, D. Candusso. Diagnosis of Polymer Electrolyte Fuel Cells Failure Modes (Flooding & Drying out) by Neural Networks Modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36, n°4, pp. 3067-3075. Ed. Elsevier, 2011
- [Youssef & Alamir, 2003] B. Youssef, M. Alamir. Generic signature generation tool for diagnosis and parametric estimation of multi-variable dynamical nonlinear systems. *Proceedings of the 42th Conference on Decision and Control, Hawai, USA, 2003*
- [Youssef, 2005] .B. Youssef. Diagnostic par signatures graphiques des systèmes non linéaires. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, France, 2005

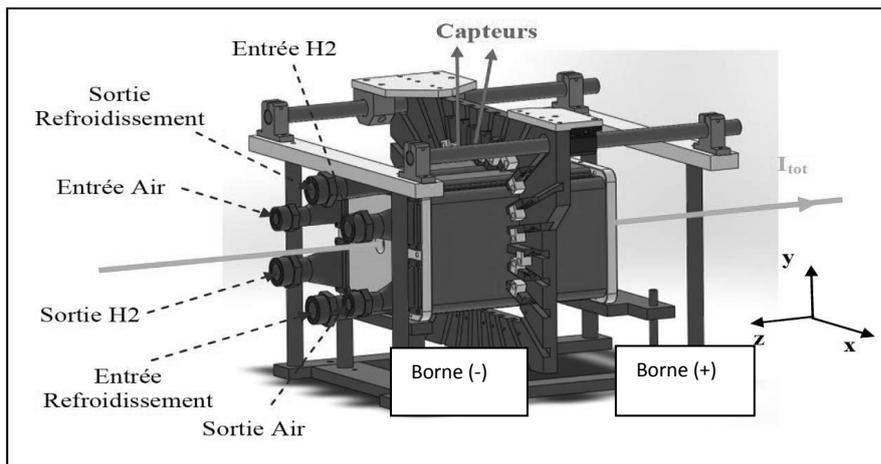
Annexe

Annexe A : Localisations des zones et des cellules d'un stack

Les quatre zones principales utilisées dans la thèse (Figure III-15) :



Localisation de la borne (-) et de la borne (+) dans la partie validation sur le stack GENEPAC au chapitre VI (Figure VI-1) :



Annexe B : Description des quatre autres expériences menées sur le stack GENEPAC

Augmentation de l'humidité relative des gaz

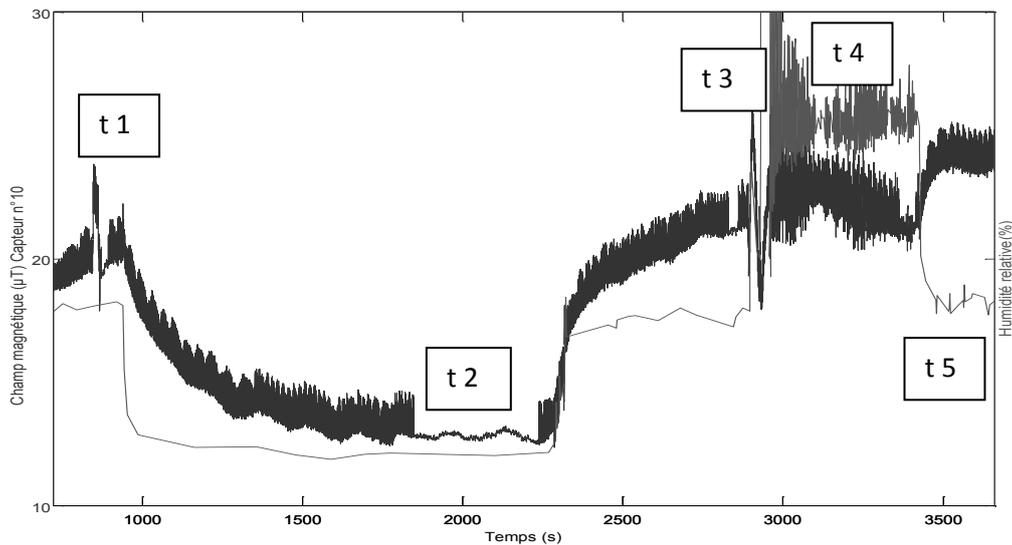


Figure B-1 : Variations de l'humidité relative des gaz et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur

Tableau B-1 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour une augmentation de l'humidité relative des gaz (mesure instantanée et moyennée)

Symptôme j	B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t3)-B(t2)		B(t4)-B(t3)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	7	7	7	7	8	8	7	7
Symptôme 2	10	10	13	13	9	9	12	12
Symptôme 3	9	9	5	6	8	8	6	6
Symptôme 4	3	3	2	2	3	3	3	3
Symptôme 9	5	5	4	4	9	9	2	2
Symptôme 10	4	4	3	3	2	2	3	3
Symptôme 11	5	5	2	2	2	2	4	4
Symptôme 12	15	15	18	18	14	14	15	14
Symptôme 5	2	2	2	2	6	6	4	4
Symptôme 6	8	8	12	12	11	11	2	2
Symptôme 7	11	11	4	3	3	3	9	10
Symptôme 8	5	5	2	2	2	2	2	2
Symptôme 13	7	7	3	4	3	3	3	3
Symptôme 14	7	7	2	2	2	2	6	6
Symptôme 15	4	4	4	4	9	9	4	6
Symptôme 16	6	6	7	7	10	10	3	3

Tableau B - 2 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une augmentation de l'humidité relative des gaz (mesure instantanée et moyennée)

Paramètre j	B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t3)-B(t2)		B(t4)-B(t3)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
p1	0.20	0.20	-	-	-	-	0.06	0.05
p2	0.65	0.65	0.69	0.68	0.62	0.62	0.65	0.64
p3	-	-	0.26	0.26	0.51	0.51	-	-
p4	-	-	-	-	-	-	-	-
p9	-	-	0.14	0.14	0.50	0.48	-	-
p10	-	-	-	-	-	-	-	-
p11	0.10	0.10	-	-	-	-	0.10	0.09
p12	0.84	0.84	0.82	0.82	0.65	0.65	0.86	0.86
p5	-	-	-	-	-	-	-	-
p6	0.51	0.51	0.81	0.81	0.75	0.75	0.60	0.61
p7	0.73	0.73	0.45	0.45	0.10	0.11	0.65	0.64
p8	-	-	-	-	-	-	-	-
p13	0.25	0.24	0.21	0.21	0.13	0.13	-	-
p14	-	-	-	-	-	-	0.02	0.03
p15	-	-	-	-	-	-	0.24	0.25
p16	0.08	0.07	0.12	0.11	0.07	0.07	-	-

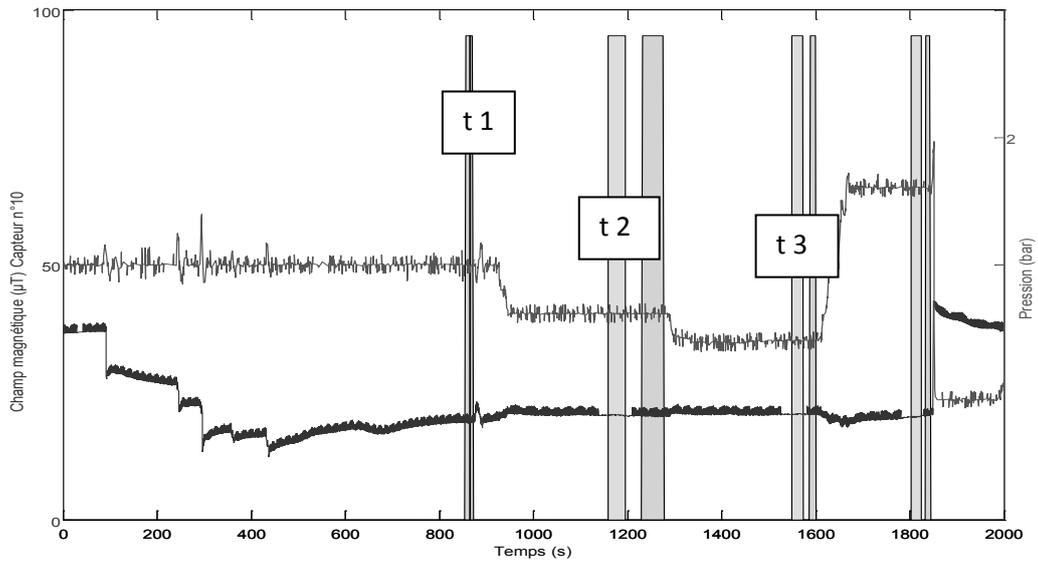
Diminution de la pression

Figure B- 2 : Variations la pression et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur

Tableau B - 3 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour une diminution de la pression (mesure instantanée et moyennée)

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t3)-B(t2)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	4	4	5	5	8	8
Symptôme 2	4	3	4	4	2	3
Symptôme 3	10	7	7	8	9	9
Symptôme 4	11	13	15	16	15	15
Symptôme 9	6	6	8	8	6	8
Symptôme 10	6	7	8	9	13	13
Symptôme 11	6	8	5	5	6	7
Symptôme 12	6	6	4	4	2	3
Symptôme 5	7	7	7	7	10	10
Symptôme 6	7	6	5	5	3	4
Symptôme 7	7	7	4	4	3	2
Symptôme 8	8	9	8	8	6	6
Symptôme 13	8	8	7	7	7	6
Symptôme 14	6	6	6	4	6	5
Symptôme 15	5	5	4	4	3	3
Symptôme 16	13	13	9	9	7	7

Tableau B - 4 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une diminution de la pression (mesure instantanée et moyennée)

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t3)-B(t2)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy
p1	0.01	0.01	0.14	0.14	0.31	0.31
p2	-	-	-	-	-	-
p3	0.32	0.26	0.17	0.16	-	0.01
p4	0.52	0.58	0.70	0.69	0.79	0.77
p9	-	-	-	-	-	-
p10	0.19	0.26	0.39	0.38	0.56	0.51
p11	-	-	-	-	0.03	-
p12	-	-	-	-	-	-
p5	0.23	0.33	0.52	0.52	0.76	0.75
p6	-	-	-	-	-	-
p7	-	-	-	-	-	-
p8	0.35	0.36	0.37	0.36	0.33	0.32
p13	0.38	0.37	0.26	0.26	0.09	0.10
p14	-	-	-	-	-	-
p15	-	-	-	-	-	-
p16	0.72	0.74	0.66	0.68	0.49	0.54

Augmentation de la stœchiométrie de l'air

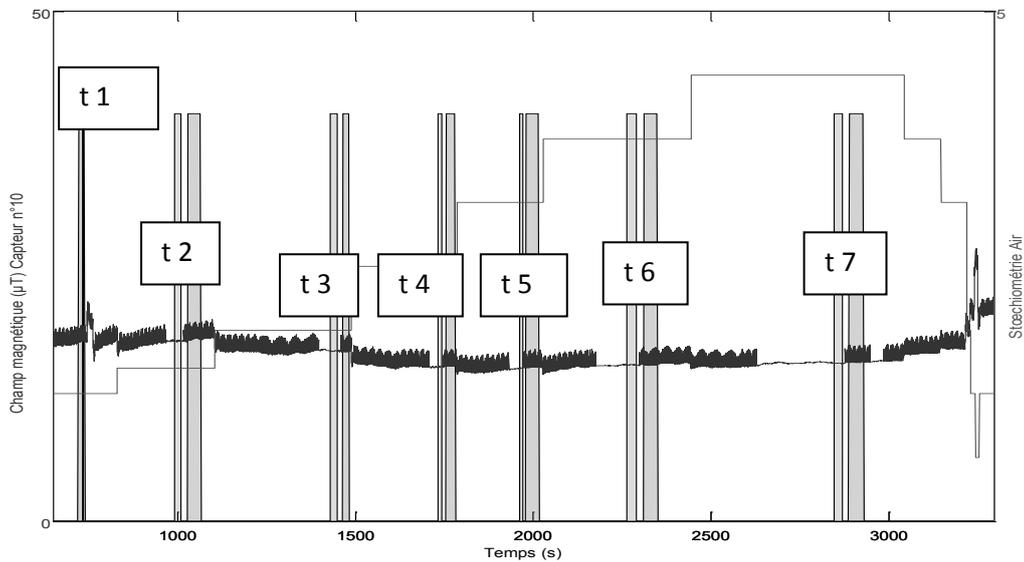


Figure B - 3 : Variations de la stœchiométrie de l'air et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur

Annexe

Tableau B - 5 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour une augmentation de la stœchiométrie de l'air (mesure instantanée et moyennée)

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	3	3	8	7	10	10	10	10	11	11	11	11
Symptôme 2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Symptôme 3	9	8	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8
Symptôme 4	10	9	13	13	15	15	16	16	16	16	15	15
Symptôme 9	5	5	5	5	3	3	5	5	5	5	5	5
Symptôme 10	12	12	14	14	17	17	18	18	17	17	15	16
Symptôme 11	5	5	7	7	5	5	5	5	5	5	6	6
Symptôme 12	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3
Symptôme 5	8	7	11	11	13	13	15	15	15	15	14	15
Symptôme 6	3	3	4	4	3	3	5	5	6	6	8	8
Symptôme 7	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Symptôme 8	11	11	6	5	3	3	2	2	2	2	2	2
Symptôme 13	6	5	5	5	4	4	3	3	3	3	5	4
Symptôme 14	4	4	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3
Symptôme 15	5	4	4	4	6	6	6	6	6	6	7	7
Symptôme 16	5	5	9	9	10	10	9	9	10	10	10	10

Tableau B - 6 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une augmentation de la stœchiométrie de l'air (mesure instantanée et moyennée)

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)		B(t6)-B(t1)		B(t7)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
p1	-	-	0.29	0.28	0.39	0.39	0.43	0.43	0.45	0.45	0.47	0.47
p2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p3	0.24	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p4	0.73	0.75	0.78	0.78	0.77	0.77	0.75	0.75	0.74	0.74	0.71	0.71
p9	0.24	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p10	0.60	0.63	0.57	0.57	0.63	0.63	0.65	0.65	0.66	0.66	0.65	0.65
p11	-	-	0.21	0.21	0.28	0.28	0.27	0.27	0.23	0.24	0.23	0.24
p12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p5	0.37	0.41	0.81	0.82	0.90	0.90	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91
p6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p8	0.73	0.72	0.30	0.31	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.22	0.22
p13	0.23	0.28	0.25	0.25	0.13	0.13	0.08	0.08	0.07	0.07	0.09	0.09
p14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p16	0.25	0.24	0.40	0.39	0.29	0.29	0.27	0.27	0.29	0.29	0.31	0.31

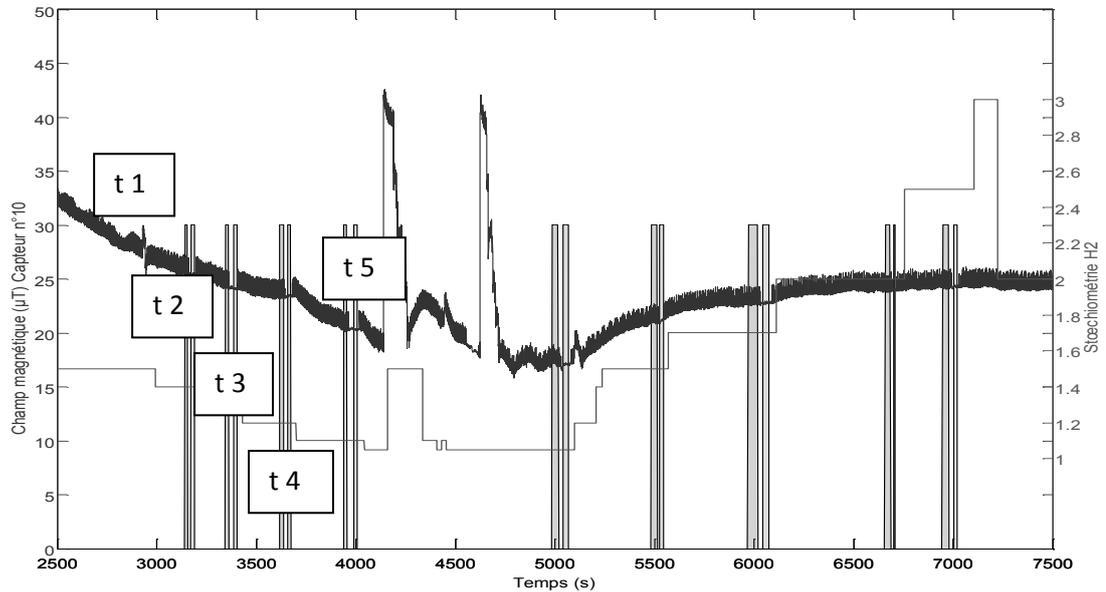
Diminution stœchiométrie de l'hydrogène

Figure B- 4 : Variations de la stœchiométrie de l'hydrogène et réponse du champ magnétique (composante u) sur un capteur

Tableau B - 7 : Symptômes obtenus avec la méthode des résidus pour une diminution stœchiométrie de l'hydrogène (mesure instantanée et moyennée)

Symptôme j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
Symptôme 1	9	9	5	5	8	8	7	7
Symptôme 2	7	7	9	9	8	8	2	2
Symptôme 3	8	7	7	7	4	4	3	3
Symptôme 4	3	3	8	8	9	9	13	13
Symptôme 9	7	5	9	9	6	6	7	7
Symptôme 10	9	10	10	9	11	11	7	7
Symptôme 11	7	7	9	10	10	10	10	10
Symptôme 12	11	11	4	4	5	5	3	3
Symptôme 5	13	13	13	13	15	15	17	17
Symptôme 6	9	9	6	8	5	5	3	3
Symptôme 7	4	5	6	5	5	5	2	2
Symptôme 8	5	5	4	4	2	2	3	3
Symptôme 13	5	5	6	6	4	4	3	3
Symptôme 14	7	7	8	8	7	7	3	3
Symptôme 15	13	14	13	13	11	11	9	9
Symptôme 16	10	10	10	10	10	10	7	7

Tableau B - 8 : Paramètres obtenus avec la méthode des projections pour une diminution stœchiométrie de l'hydrogène (mesure instantanée et moyennée)

Paramètre j	B(t2)-B(t1)		B(t3)-B(t1)		B(t4)-B(t1)		B(t5)-B(t1)	
	inst	moy	inst	moy	inst	moy	inst	moy
p1	0.35	0.39	0.46	0.48	0.63	0.63		0.51
p2	-	-	-	-	-	-		-
p3	-	-	-	-	-	-		-
p4	0.20	0.16	0.27	0.23	0.31	0.31		0.59
p9	-	-	-	-	-	-		-
p10	0.48	0.45	0.64	0.63	0.60	0.59		0.65
p11	0.58	0.60	0.52	0.53	0.61	0.60		0.48
p12	-	-	-	-	-	-		-
p5	0.60	0.60	0.73	0.72	0.86	0.86		0.93
p6	-	-	-	-	-	-		-
p7	0.03	0.08	-	-	0.10	0.10		-
p8	-	-	0.02	0.01	-	-		0.10
p13	-	-	-	-	-	-		-
p14	0.34	0.33	0.23	0.23	0.14	0.14		0.21
p15	0.65	0.63	0.52	0.52	0.31	0.31		0.14
p16	-	-	-	-	-	-		-