



# THESE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE SALERNE

Ecole Doctorale : XII Ciclo N.S. (2011-2013)

Spécialité : Génie Mécanique

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Ecole Doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur / Génie Electrique

**Raffaele PETRONE**

*“Electrochemical Impedance Spectroscopy for the on-board diagnosis of PEMFC via on-line identification of Equivalent Circuit Model parameters”*

**Soutenue le 18 mars 2014 devant le jury composé de :**

M. Gianfranco Rizzo	<i>Directeur des Etudes Génie Mécanique - Université de Salerne</i>	Président
M.me Delphine Riu	<i>G2ELAB - Université de Grenoble</i>	Rapporteur
M. Mohamed Machmoum	<i>IREENA - Université de Nantes</i>	Rapporteur
M. Cesare Pianese	<i>DIIN - Université de Salerno</i>	Directeur de thèse
M. Marco Sorrentino	<i>DIIN - Université de Salerno</i>	Directeur de thèse
M. Daniel Hissel	<i>FEMTO-ST / FCLAB - Université de Franche-Comté</i>	Directeur de thèse
M.me Marie-Cécile Péra	<i>FEMTO-ST / FCLAB - Université de Franche-Comté</i>	Directeur de thèse
M. Massimo Guarnieri	<i>DII - Université de Padova</i>	Examineur

**THÈSE PRÉPARÉE DANS LE CADRE DE LA CONVENTION DE CO-TUTELLE STIPULÉE ENTRE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ET L'UNIVERSITÉ DE SALERNE.**

# RESUME

## DESCRIPTION DU SUJET

La recherche de nouvelles sources d'énergie pour faire face aux besoins croissants de l'humanité est actuellement un sujet d'intérêt en vogue. De plus en plus, l'hydrogène joue un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie. Dans ce contexte, les piles à combustible (PàC) connaissent un regain d'intérêt tant sur le plan industriel qu'en recherche, en raison de leur rendement élevé, de leur densité de puissance acceptable, de leur démarrage rapide et de leur bonne compatibilité avec l'environnement. Notamment, les piles à combustible (PàC) à membrane polymère (PEM) offrent des perspectives d'utilisation larges aussi bien dans le domaine des applications stationnaires que dans celui des transports. Il reste cependant des contraintes liées à leur durée de vie qui sont les principaux défis à relever pour leur commercialisation. De nombreuses recherches ont été faites afin de tester de nouveaux matériaux et de développer des algorithmes capables d'assurer une gestion correcte de ces systèmes. C'est ainsi qu'en 2010, le Département américain de l'Energie (DoE) fixe comme objectif 40000 heures de fonctionnement pour les applications stationnaires et 5000 heures pour le secteur des transports. Ces normes sont considérées comme une référence pour la recherche dans le domaine des piles à combustible.

Les systèmes PàC, de par leur technologie sont par essence des systèmes multi-physiques. Leurs performances sont fortement liées aux variations des paramètres de fonctionnement, en effet en cas de défaillance, plusieurs mécanismes de dégradation chimiques, mécaniques et thermiques peuvent avoir lieu au cœur de la pile. Par conséquent, une exposition à long terme à ces phénomènes entraîne la réduction de la durée de vie des PàC. Une bonne gestion du système est donc l'un des objectifs clé, indispensable pour en assurer les performances. En général dans les systèmes PàC en commerce, on effectue des mesures sur les variables de fonctionnement, telles que la tension, le courant et la température de la pile afin de les contrôler. Toutefois, les stratégies de contrôle habituelles sont uniquement finalisées à garantir le fonctionnement du système dans des conditions acceptables. Il s'agit donc de développer de nouvelles stratégies d'identification des causes fontes des défaillances afin de pouvoir préciser les actions correctives à mener, soit la maintenance préventive.

C'est donc dans cette optique que ces activités de recherche ont été orientées vers le développement de nouveaux algorithmes de diagnostic capables de surveiller le fonctionnement de la PàC en assurant un contrôle correct du système. L'outil de diagnostic doit donc identifier et isoler un ou plusieurs phénomènes provoquant le dysfonctionnement du système. Dans ce scénario, la capacité à identifier en temps réel l'état de santé du système et les mécanismes de défaillance devient l'un des principaux objectifs pour atteindre une durée de vie plus longue.

Le présent travail vise à développer un algorithme d'identification en ligne des paramètres d'un circuit électrique équivalent (CEE) pour la caractérisation de l'impédance de la pile PEM, ayant pour but le développement d'une stratégie de diagnostic embarqué. La méthode développée se base sur la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE). La SIE est une technique expérimentale non destructive, généralement appliquée pour l'analyse des systèmes électrochimiques. Cette procédure stimule les principaux phénomènes physiques impliqués dans le système PEM. Son utilisation est basée sur l'injection d'un signal sinusoïdal, qui perturbe le système à des fréquences connues. A partir des résultats obtenus, il est possible de dissocier les différents procédés électrochimiques et d'en isoler les différentes pertes (ohmique, d'activation et de diffusion). L'exploitation des informations apportées par la SIE, advient grâce au circuit électrique équivalent (CEE). En effet, ce procédé permet de distinguer et analyser les différents phénomènes électrochimiques qui se produisent au cœur de la pile parmi les composants électriques du CEE. Pour chaque élément électrique un ou plusieurs paramètres sont identifiés; en analysant leur valeur, il est donc possible de surveiller le fonctionnement du système. La méthode de diagnostic présentée, se base sur une comparaison des valeurs entre les paramètres identifiés en ligne et ceux prévus en cas de non dysfonctionnement du système.

Ce travail analyse deux aspects fondamentaux: la mise en œuvre de la SIE sur des systèmes intégrés et l'identification des paramètres du modèle en ligne. Le premier cas est lié à la réalisation et à la fiabilité des mesures d'impédance. A cet effet, les activités expérimentales ont permis d'évaluer l'influence des facteurs internes et externes à la pile sur les mesures effectuées directement sur un système intégré plutôt que sur une pile montée sur un banc d'essai.

Quant au second, le but est de résoudre les problèmes liés à la minimisation d'une fonction complexe et non-linéaire, qui varie selon les conditions opératives de la pile. En particulier, l'influence de plusieurs variables dans la fonction de minimisation a été analysée en soulignant le problème des conditions initiales des paramètres.

Cette étude vise donc à remplacer l'interprétation des spectres d'impédance, communément réalisée hors ligne et basée sur l'expertise humaine, par une procédure automatique. La procédure proposée effectue la sélection automatique de la configuration du modèle CEE et des valeurs des paramètres de départ appropriés pour la minimisation; enfin, l'identification des paramètres a lieu après avoir effectué l'algorithme de pré-réglage. Successivement, nous avons développé des modèles de régression pour estimer les paramètres en condition normale de la PàC. Ces résultats sont donc comparés aux valeurs des paramètres identifiées en ligne, pour établir le diagnostic de la pile.

La méthode de diagnostic adoptée prévoit en premier lieu la surveillance du fonctionnement de la pile; et successivement la procédure d'identification en ligne. Pour observer le système, un modèle CEE simule le spectre d'impédance en utilisant les paramètres de référence obtenus avec les régressions. Par la suite, les spectres d'impédance simulés et mesurés sont comparés pour estimer la déformation du spectre réel par rapport au spectre attendu. Au cas où le résidu est inférieur au seuil fixé a priori, le système fonctionne en condition normale, en cas contraire la procédure d'identification en ligne démarre. La détection des défaillances et leur isolement sont réalisés suite à la comparaison des valeurs des paramètres identifiés à celles prévues en cas de condition normale du système. Il est possible de détecter un dysfonctionnement lorsqu'un ou plusieurs résidus se situent au-dessus des seuils fixés. A ce sujet, la détection des conditions de dysfonctionnement, en cas d'assèchement et de début de noyage, a été proposée.

Ces travaux s'inscrivent dans le projet D-CODE (DC/DC COnverter-based Diagnostics for PEM systems, <https://dcode.eifer.uni-karlsruhe.de>) financé par la Communauté Européenne (Seventh Framework Programme - FP7/2007-2013 for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative, under grant agreement n° 256673). L'objectif de cette thèse a été de mettre en œuvre un outil de diagnostic embarqué pour des PàC de type PEM basé sur la SIE. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés principalement à la fiabilité des mesures et l'exploitation des spectres d'impédance.

## TRAVAUX DE RECHERCHE

Une procédure automatisée d'identification en ligne des paramètres d'un modèle à circuit équivalent pour l'application d'un outil de diagnostic embarqué basé sur la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) a été développée. La procédure détecte les différents procédés électrochimiques qui se produisent à l'intérieur d'une pile PEM en analysant la forme du spectre d'impédance. Un algorithme de pré-réglage évalue la configuration du modèle et définit les valeurs initiales appropriées pour l'identification des paramètres en fonction de la géométrie du spectre. Grâce à l'analyse des paramètres identifiés en ligne, il est donc possible de surveiller l'état de santé du système et de vérifier des éventuels dysfonctionnements.

Au cours des travaux expérimentaux, nous avons analysé les problèmes liés essentiellement à la fiabilité des mesures en cas d'applications SIE embarquées. Les tests effectués au sein du Laboratoire Piles à Combustible (FCLAB) de l'Université de Franche-Comté, en collaboration avec l'Université de Salerne (UNISA) ont fourni plusieurs informations pour adapter la SIE sur les systèmes PEM en commerce. A cet effet, le module *BALLARD*<sup>®</sup> Nexa<sup>™</sup> a été adapté à la mise en œuvre de la SIE. Les spectres mesurés ont été exploités pour la validation de l'algorithme d'identification. Les données disponibles dans la littérature [Fouquet et al. (2006)]<sup>1</sup> et les spectres fournis par l'Institut Européen pour la Recherche Energétique (EIFER) de Karlsruhe sur le module Dantherm<sup>®</sup> DBX2000 dans le cadre du projet D-CODE ont également été utilisés pour cette validation.

Le circuit électrique équivalent exploité pour modéliser le spectre d'impédance caractéristique d'une pile PEM a été présenté. Le modèle permet de caractériser les différents phénomènes électrochimiques qui se produisent au cœur de la pile. L'impédance équivalente est une fonction complexe non linéaire influencée par les conditions opératives du système. Pour l'identification des paramètres, la méthode des moindres carrés pour fonctions complexe et non linéaire (CNLS) a été adoptée. A cet effet, l'algorithme de Nelder-Mead (NM) a été utilisé pour résoudre le problème de non-linéarité. Tandis que pour vérifier la qualité de la minimisation, les résidus entre les points expérimentaux et les résultats du modèle ont été évalués selon la norme 2. De plus, cette norme a permis d'évaluer la déformation relative de la forme du spectre d'impédance. A partir des conditions initiales appropriées, l'algorithme de NM montre une bonne performance, avec un résidu d'environ 1,5% et des temps de calcul d'environ 0,2 secondes. Toutefois, un changement des conditions

---

<sup>1</sup>Fouquet N, Doulet C, Nouillant C, Dauphin-Tanguy G, Ould-Bouamama B (2006). Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements. *Journal of Power Sources*, 159(2):905-13.

initiales peut influencer les résultats de la minimisation. Dans ce cas, l'identification peut converger vers un minimum local, plutôt qu'à une solution optimale. La forme du spectre varie en fonction des conditions opératives du système et donc le circuit équivalent qui modèle l'impédance de la pile peut changer de configuration. Ce qui se traduit par un changement du domaine d'identification des paramètres. Ceci est la principale contrainte pour définir le nombre de paramètres du modèle et leurs valeurs de départ pour l'identification.

Pour résoudre cet inconvénient et automatiser la procédure, un algorithme de préréglage, nommé *geometrical first guess* (GFG), a été développé. Cet algorithme permet la sélection correcte de la configuration du CEE et des conditions initiales pour l'identification des paramètres avec un temps de calcul d'environ 0,4 secondes. Le GFG est basé sur l'analyse de la géométrie du spectre d'impédance. Le procédé détecte la meilleure configuration du modèle qui caractérise les phénomènes électrochimiques qui se produisent durant le fonctionnement du système. Les résultats obtenus ont montré une bonne précision qui, par ailleurs n'a pas été influencés par la présence du bruit des mesures, soulignant ainsi une bonne fiabilité de la procédure d'identification. Enfin, l'algorithme GFG a été testé sur trois systèmes PEMFC différents dans plusieurs conditions de fonctionnement.

Le diagnostic basé sur l'application de la SIE a été développé en exploitant la procédure d'identification en ligne présentée. En particulier, la procédure s'est déroulée en deux étapes: la simulation et l'identification en ligne. Dans le premier cas, un simple modèle de Randles, qui représente la base des CEE pour les piles PEM, est utilisé pour surveiller l'état de santé du système. Pour la simulation le circuit équivalent exploite des paramètres de référence évalués en fonction des conditions opératives de la pile. A cet effet, des régressions mathématiques ont été développées, hors ligne, en exploitant les paramètres identifiés dans des conditions normales du système. Les résidus sont donc évalués en comparant le spectre mesuré au spectre simulé. Si les résidus sont délimités à l'intérieur des seuils fixés, le système fonctionne dans des conditions normales, sinon la procédure d'identification est démarrée.

De nouveaux résidus sont ensuite calculés en comparant les paramètres identifiés en ligne aux valeurs attendues. Ces valeurs sont obtenues par des régressions en considérant les conditions opératives de la pile. Si un ou plusieurs résidus dépassent les seuils prévus, un symptôme se pose. Lorsqu'un symptôme est identifié il est possible de détecter un dysfonctionnement. A cet effet, une matrice qui lie les symptômes aux défauts a été développée en cas de conditions d'assèchement,

noyage et débit d'air. La détection des dysfonctionnements en cas d'assèchement et de début de noyage a été proposée.

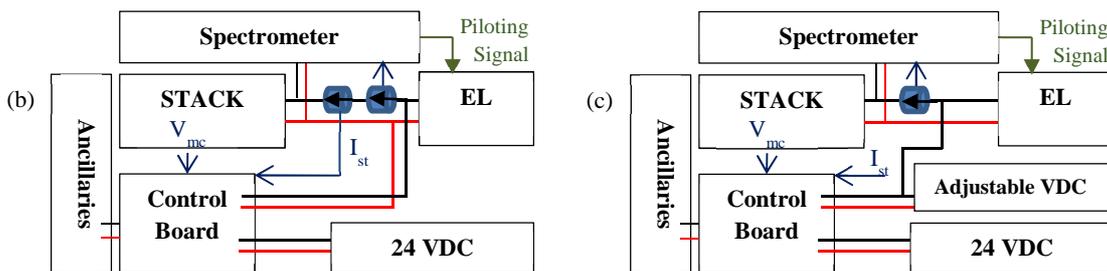
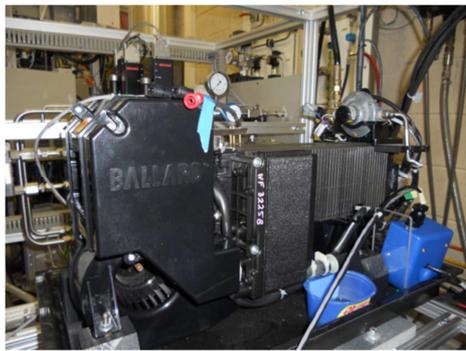
## **ETUDE EXPERIMENTALE**

Un des objectifs de cette thèse a été la mise en œuvre des méthodes expérimentales appliquées aux piles à combustible PEM pour des applications embarquées. Pour parvenir à cet objectif, un important travail expérimental a été mené dans le cadre des activités de recherche effectuées durant ces trois années de doctorat.

En particulier, l'expérience effectuée au sein du Groupe de Recherche du Laboratoire FCLAB m'a permis d'acquérir des compétences notamment sur l'emploi des différents instruments et logiciels pour la mise en œuvre de la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).

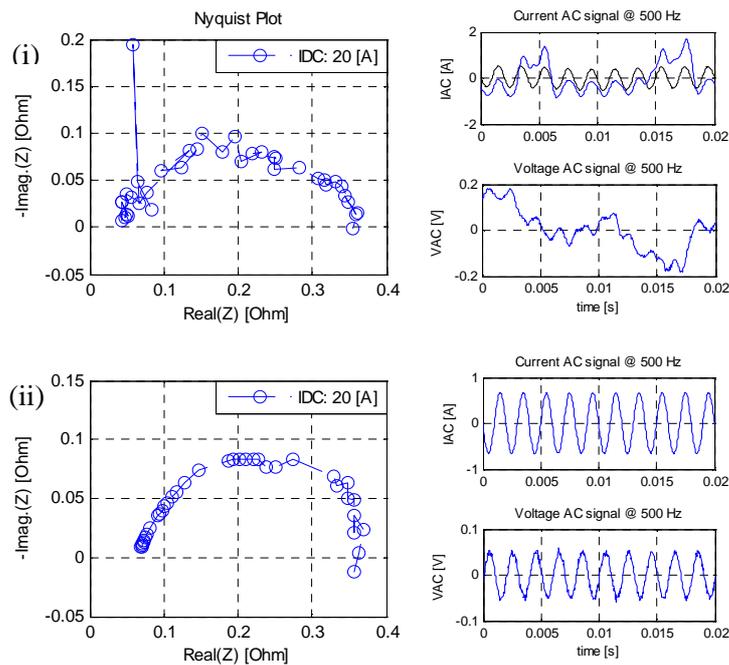
Au cours de ma première année de recherche, mes travaux se sont concentrés initialement sur des tests effectués sur le système Nuvera<sup>®</sup>PowerFlow, fourni en dotation au laboratoire I5 du Département Génie Industriel de l'Université de Salerne. Le système est composé d'un module refroidi par eau, ayant une puissance nominale de 5 kWe. Ce travail expérimental a permis la caractérisation du système qui a été faite à travers l'identification de la courbe de polarisation et l'évaluation de la puissance, du rendement et de l'utilisation d'hydrogène en conditions stationnaires. Les conditions de démarrage et les transitoires ont également été analysées. Les résultats obtenus ont été source d'une thèse de licence (BAC+3) et ont permis la mise en œuvre d'un simulateur pour les véhicules hybrides objet d'un autre travail.

Successivement, au cours de la deuxième année de doctorat, effectué au sein du laboratoire FCLAB de l'Université de Franche-Comté, plusieurs de mes activités ont été effectuées sur le système expérimental BALLARD<sup>®</sup>Nexa<sup>®</sup>. Le système en question est constitué d'un module d'une puissance nominale de 1,2 kWe refroidi par air. La première partie du travail fut de caractériser le système, puis la modification de la configuration du système Nexa<sup>®</sup>, comme le montre la figure 1, pour permettre l'application de la spectroscopie d'impédance électrochimique.



**Figure 1: BALLARD Nexa: a) version normale; b) version normale avec le spectromètre inclus; c) version adaptée pour l'application correcte de la SIE.**

En cas de configuration normal du système Nexa (fig.1.a) aussi bien les auxiliaires que la carte de contrôle sont alimentées aux extrémités de la pile; l'alimentation de 24 V est utilisée pour le démarrage et l'arrêt, ou en cas de défaillance. En appliquant la SIE directement à la configuration normale (fig. 1.b), le signal de courant sinusoïdal injecté est influencé par les auxiliaires du système. Ce problème nous a permis d'appliquer comme solution la configuration indiquée à la figure 1.c, de façon à découpler aussi bien les auxiliaires que la carte de commande. Une comparaison entre une mesure influencée par le bruit induit par les auxiliaires (i) et une mesure faite après le découplage des auxiliaires (ii) est proposée à la figure 2. Les changements apportés en cas de configuration 1.c ont permis de stabiliser aussi bien les signaux d'entrée que de sortie (courant et tension), ainsi que le fonctionnement des auxiliaires durant l'application de la SIE. Notamment, grâce à ce nouveau procédé, il est possible de maîtriser les auxiliaires du système pour effectuer des mesures dans des conditions de dysfonctionnement, qui sont normalement difficiles à obtenir avec la configuration initiale (fig.1.a). Par conséquent ces premiers essais m'ont permis d'effectuer par la suite la spectroscopie d'impédance, dans des conditions de fonctionnement normal et dysfonctionnement, créant une base de données utilisée par UNISA, FCLAB et EIFER pour le développement des respectifs modèles de diagnostic.



**Figure 2: Influence des auxiliaires: i) spectre d'impédance et signaux perturbés(configuration 1. b); ii) spectre d'impédance et signaux après le découplage des auxiliaires (configuration 1.c).**

Au cours de la troisième année de doctorat, mon travail s'est concentré sur une campagne expérimentale, de la durée d'une semaine, sur les piles à combustible PEM à haute température de l'Institut Européen pour la Recherche Energétique (EIFER) en Allemagne. Au cours de cette expérience, mon étude a permis de résoudre des problèmes liés à la configuration et la connexion du spectromètre sur le système, en cours d'étude.

## MODELISATION

Au cours de ces trois années de doctorat, une étude approfondie de la littérature sur l'état d'art des circuits électriques équivalents (CEE) visant à la caractérisation des piles à combustible PEM, a été faite afin d'approfondir mes connaissances et, les appliquer aux activités de recherche, complémentaires.

Plus précisément, ces travaux de recherche se sont orientés vers :

1. La modélisation des piles à combustible PEM par CEE;
2. Le développement d'une procédure automatisée pour l'identification en ligne des paramètres du CEE;
3. L'application de la procédure d'identification en ligne pour développer le diagnostic embarqué d'une PàC PEM.

Dans un premier temps, mes activités ont permis d'analyser les liens entre la forme du spectre et les différents phénomènes électrochimiques qui se produisent au sein d'une pile à combustible. Sur la base des procédés électrochimiques étudiés, il a été donc possible d'identifier les éléments du circuit capables de représenter le comportement du système. Le circuit équivalent obtenu est représenté en figure 3, tandis qu'à la figure 4 se trouve la représentation qualitative du circuit équivalent simplifié et l'impédance du spectre qui s'y rattache. Les pertes ohmiques sont caractérisées par une résistance au passage de charge. En particulier, la résistance au passage des protons dans l'électrolyte est modélisée par la résistance  $R_{\Omega}$ . Les pertes liées à la cinétique des réactions électrochimiques, du côté de l'anode et de la cathode, sont caractérisées par les résistances  $R_{ct,a}$  e  $R_{ct,c}$ . Afin de modéliser le comportement capacitif de l'interface électrolyte / électrode et la porosité de l'électrode un élément distribué à phase-constante (CPE) a été introduit. Enfin, les pertes liées aux phénomènes de diffusion et donc le transport de masse sont modélisées par un élément distribué, connu comme l'impédance de Warburg ( $Z_W$ ). Par conséquent, l'impédance équivalente d'une pile à combustible du type PEM s'avère être une fonction complexe et non-linéaire. Etant donné que les pertes à l'anode sont négligeables, le modèle de référence peut être simplifié, comme le montre la figure 4.

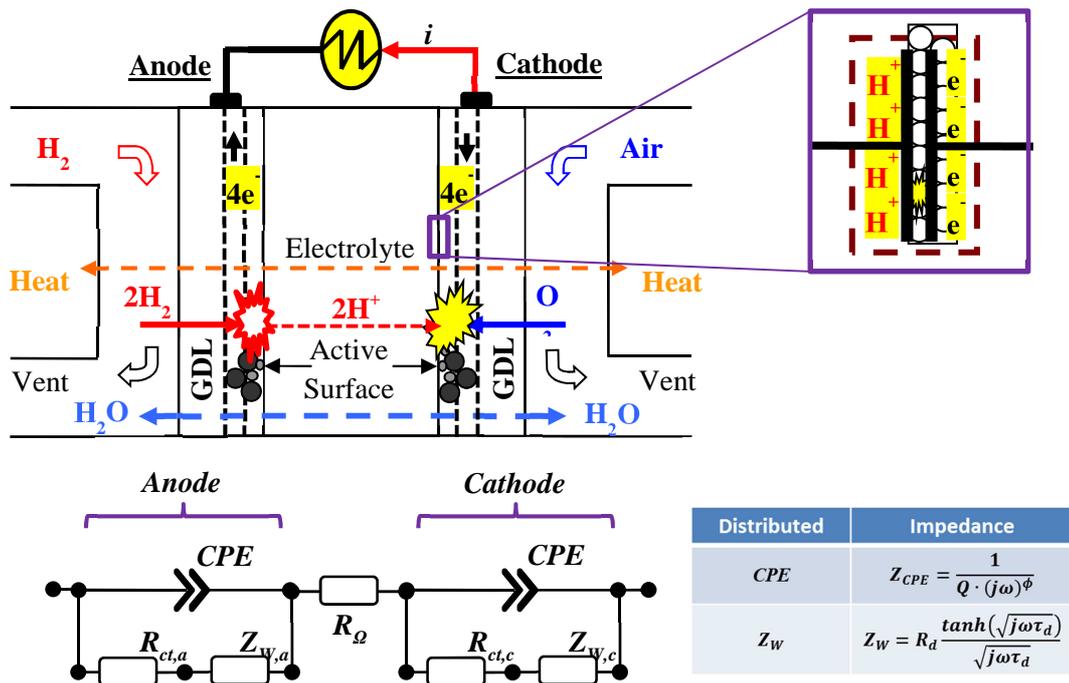


Figure 3: CEE d'une PàC PEM.

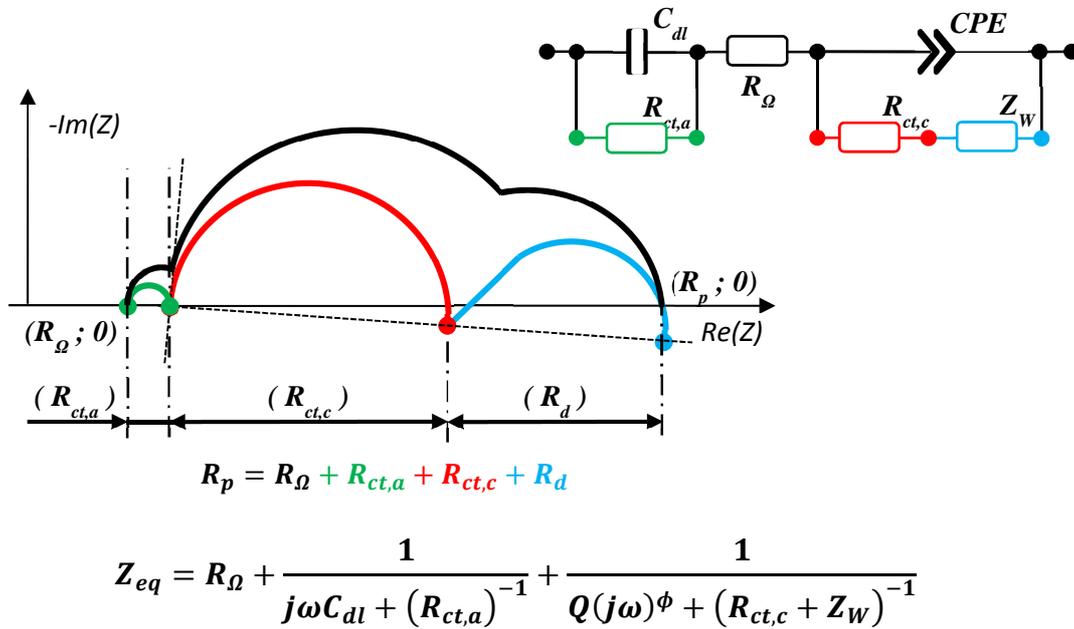


Figure 4: Représentation qualitative du spectre d'impédance d'une PàC PEM et le modèle CEE simplifié rattaché.

Il est important de souligner que la configuration du modèle est liée à la forme du spectre d'impédance, qui à son tour dépend des conditions opératives de la pile. Une variation du point de fonctionnement peut dégénérer la forme du spectre en deux arcs jusqu'à devenir un seul, ce qui varie également le circuit de référence, comme le démontre la figure 5. L'influence des conditions opératives de la pile sur la géométrie du spectre d'impédance et les liens avec les composant du CEE ont été donc analysés.

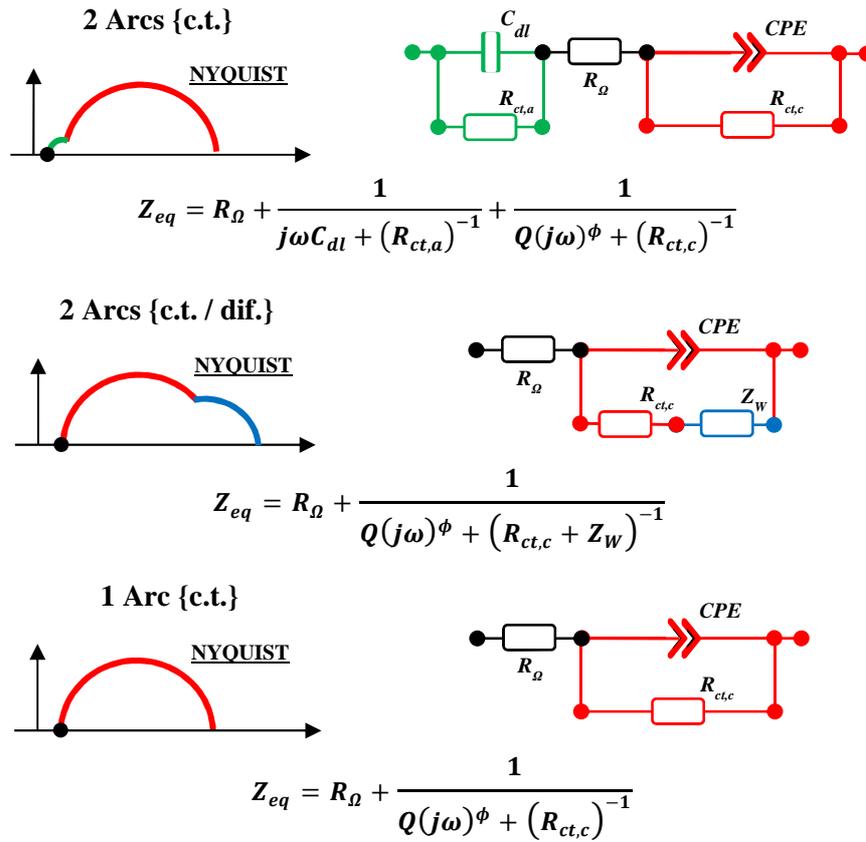


Figure 5: Réduction du CEE en fonction de la forme du spectre d'impédance.

La méthode des moindres carrés appliquée aux fonctions non-linéaires et complexes (CNLS), a été utilisée pour la mise au point de la procédure d'identification. La fonction objective de minimisation a donc été développée comme la somme des carrés des résidus de la partie réelle et imaginaire de l'impédance mesurée par rapport à celle identifiée.

$$Obj\_F = \sum_{i=1}^n (w_{Re,i} e_{Re,i}^2 + w_{Im,i} e_{Im,i}^2) \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec:

$$e_{Re,i} = Re\{Z_{mes}(j\omega_i)\} - Re\{Z_{id}(j\omega_i, \beta_m)\} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$e_{Im,i} = Im\{Z_{mes}(j\omega_i)\} - Im\{Z_{id}(j\omega_i, \beta_m)\} \quad (\text{Eq. 3})$$

La procédure de minimisation se base sur l'algorithme de Nelder-Mead (NM), qui contrairement aux méthodes basées sur le calcul du gradient fournit une meilleure solution pour les problèmes non-linéaires dans un espace multidimensionnel. L'existence de différents minima locaux ont mis en évidence le problème du choix des conditions initiales pour l'identification des paramètres. L'étude conduite a démontré que ces valeurs, à leur tour, tiennent compte des conditions opératives du système. Habituellement, pour les applications en laboratoire, le choix du circuit équivalent ainsi que les conditions initiales sont décidés en fonction de l'expertise du chercheur. Pour automatiser la procédure en vue d'une application en ligne, un algorithme a été développé pour le pré-réglage des paramètres sur la base de la géométrie du spectre, nommé *geometrical first guess* (première estimation géométrique- GFG). Cet algorithme est capable d'analyser la géométrie du spectre en identifiant à la fois la configuration optimale du CEE et l'ensemble des valeurs des paramètres initiales pour l'identification. La schématisation du GFG est proposée à la figure 6. Le spectre d'impédance est d'abord analysé dans le plan de Bode pour détecter le nombre d'arcs et fixer la configuration du modèle CEE. Ensuite, les paramètres sont évalués par la reconstruction des arcs dans le plan de Nyquist. Le spectre d'impédance proposé à la figure 6 est référé aux données publiées dans l'article de Fouquet et al. (2006). L'utilisation du GFG dans la procédure de minimisation a renforcé la convergence de la méthode, en assurant l'unicité de la solution. La procédure a été validée pour trois différents systèmes fonctionnant dans différentes conditions opératives, résumées dans le tableau 1. Les résultats de la validation sont proposés à la figure 7.

**Tableau 1: Base de données utilisées pour valider la procédure d'identification.**

Données	Auteurs	PàC PEM	Spécifications
A	<b>Fouquet et al. (2006)</b> Journal of Power Sources	Pile de 6 unités.	Tests effectués à 70 A en condition: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Noyé</li> <li>• Normale</li> <li>• Sèche</li> </ul>
B	Données <b>FCLAB</b> : Activité expérimentale	<b>BALLARD®Nexa™</b> Pile de 47 unités.	Tests effectués faisant varier: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le courant [5:45] A</li> <li>• Le rapport stœchiométrique de l'air [2:3.7] à 20 A</li> </ul>
C	Données <b>EIFER</b> : Partenaire D-CODE	<b>Dantherm® DBX2000</b> Pile de 56 unités; système à cathode ouverte.	Tests effectués faisant varier: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le courant [5:45] A</li> </ul>

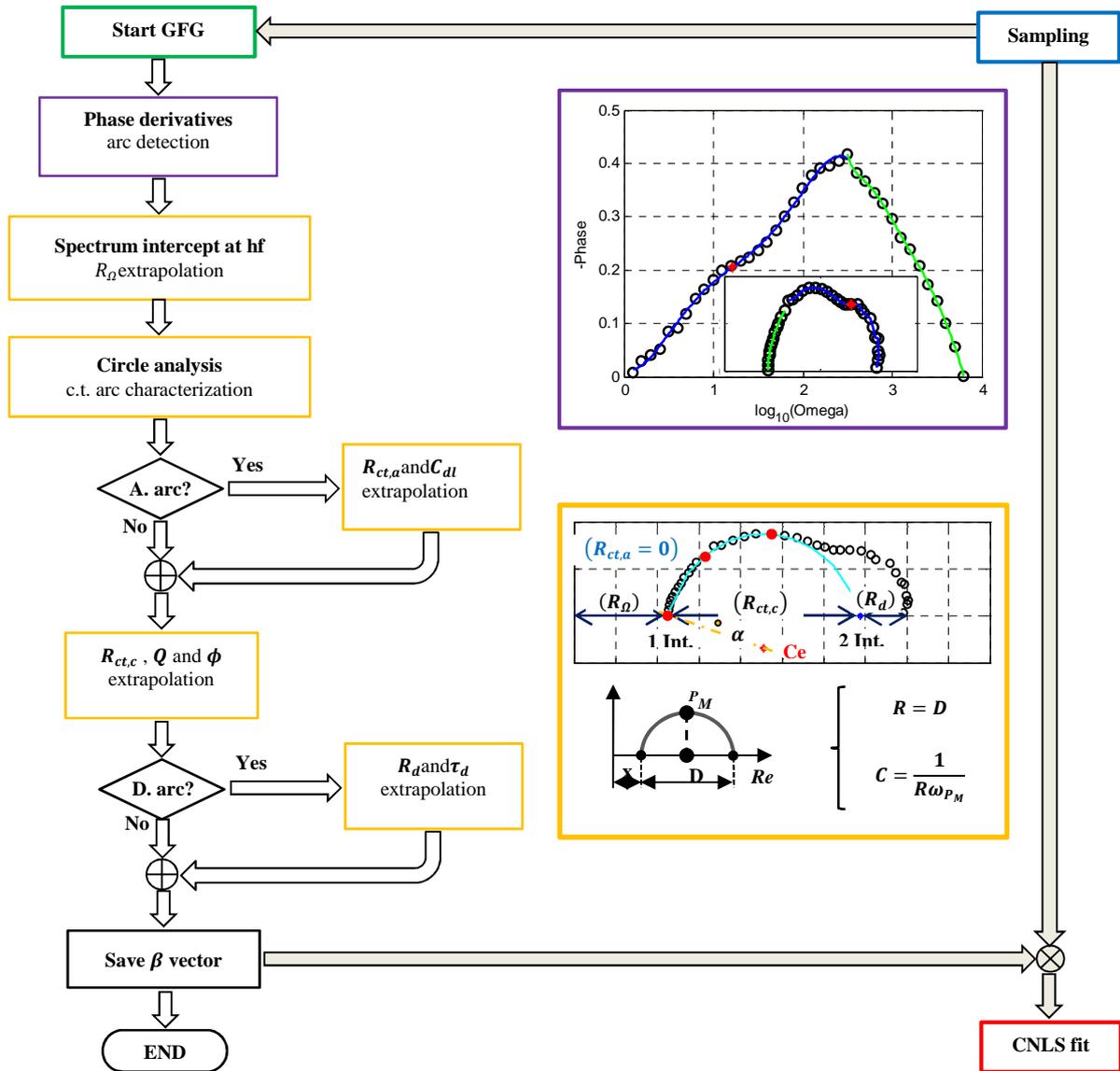
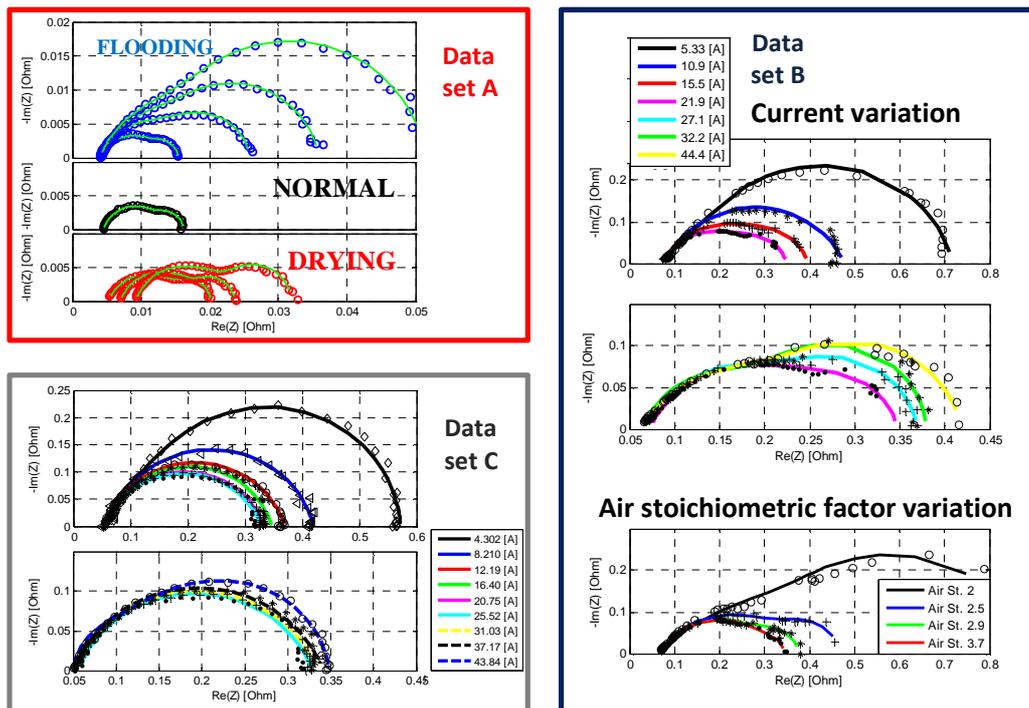


Figure 6: Schéma de l'algorithme GFG.



**Figure 7: Résultats de la validation.**

La suivante activité de recherche propose l'application de la procédure d'identification pour la mise au point d'une méthode de diagnostic embarqué. Il est possible de surveiller l'état du système en utilisant un modèle simplifié du CEE pour simuler l'impédance équivalente de la pile en conditions opératives normales (voir figure 8). Dans ce cas le spectre simulé est comparé au spectre mesuré. Une déformation de la forme du spectre évaluée par rapport à la géométrie attendue dans les mêmes conditions opératives indique une anomalie dans le fonctionnement de la pile. La déformation du spectre est évaluée selon la norme 2. Pour simuler le spectre d'impédance, il est nécessaire de fournir au CEE les valeurs des paramètres se référant aux conditions opératives mesurées. A cet effet, des régressions ont été développées en utilisant des paramètres identifiés dans des conditions opératives normales. Parmi ces régressions il est donc possible d'extrapoler les valeurs de référence des paramètres relatives aux conditions opératives de la pile. La procédure d'identification en ligne démarre en cas où une anomalie se vérifie.

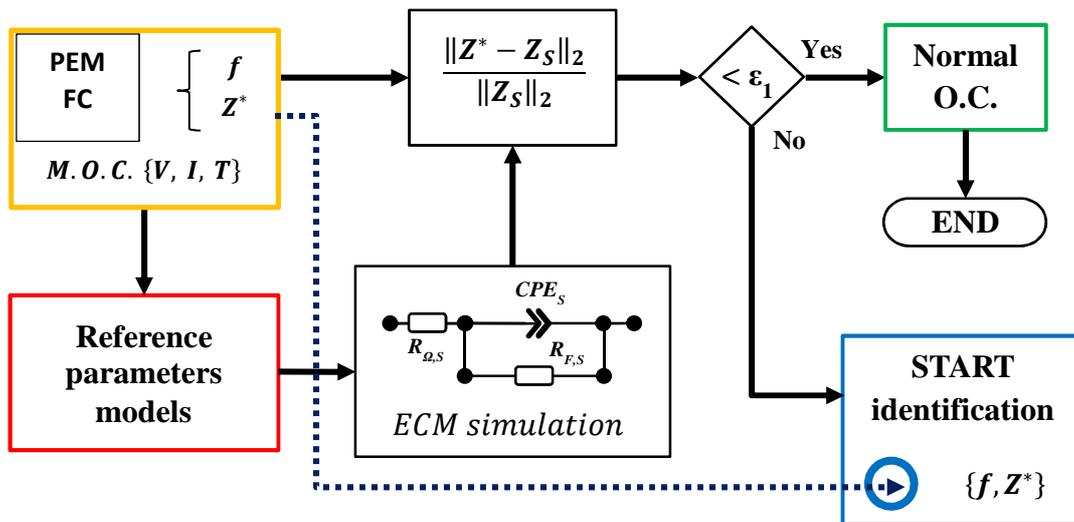


Figure 8: Diagnostic de l'état de fonctionnement de la pile: simulation.

Pour le diagnostic basé sur la procédure d'identification en ligne (voir figure 9), les éventuels défauts sont détectés et isolés par l'inférence des résidus évaluée en comparant aux mêmes conditions opératives, les paramètres identifiés à ceux de référence. Les paramètres de référence sont évalués avec les régressions introduites pour la simulation. Un ou plusieurs résidus identifient un symptôme. Le lien entre les symptômes et les dysfonctionnements est caractérisé par une matrice nommée matrice symptômes-défauts (fault to symptoms matrix – FSM). Si le symptôme n'est pas relevé dans la FSM la procédure effectue une analyse de la variation des paramètres, indiquant le défaut le plus probable vers lequel le système se dirige.

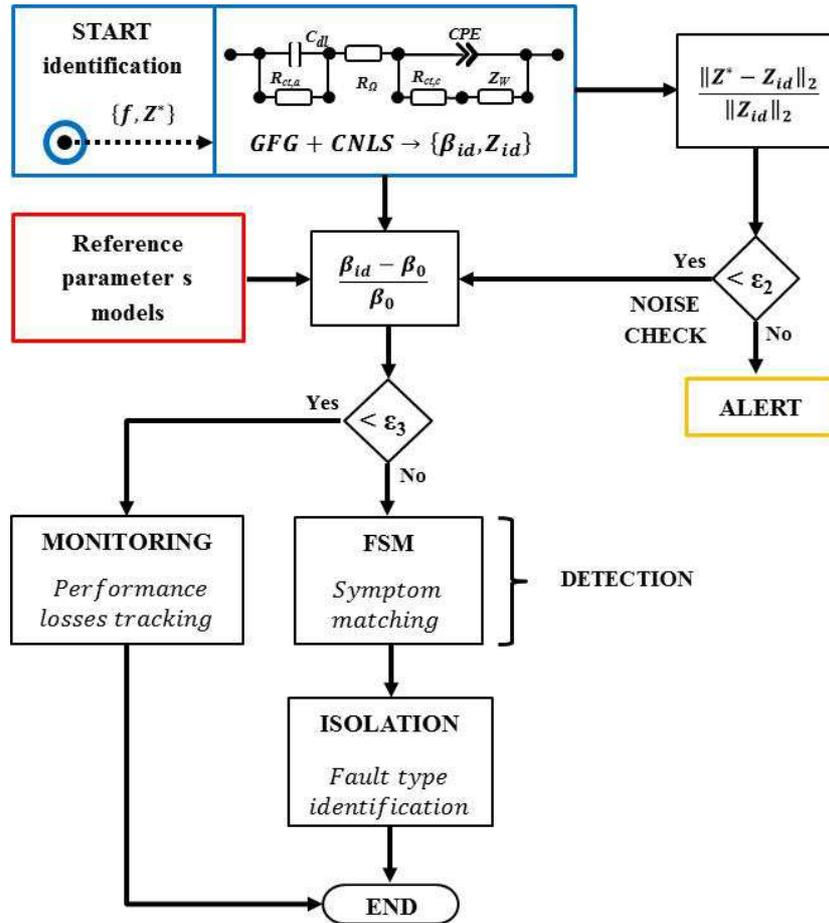


Figure 9: Diagnostic basé sur la procédure d'identification en ligne.

En fin un exemple de détection des conditions d'assèchement et de début de noyage ont été proposées. Les résultats sont reportés à la figure 10 et 11.

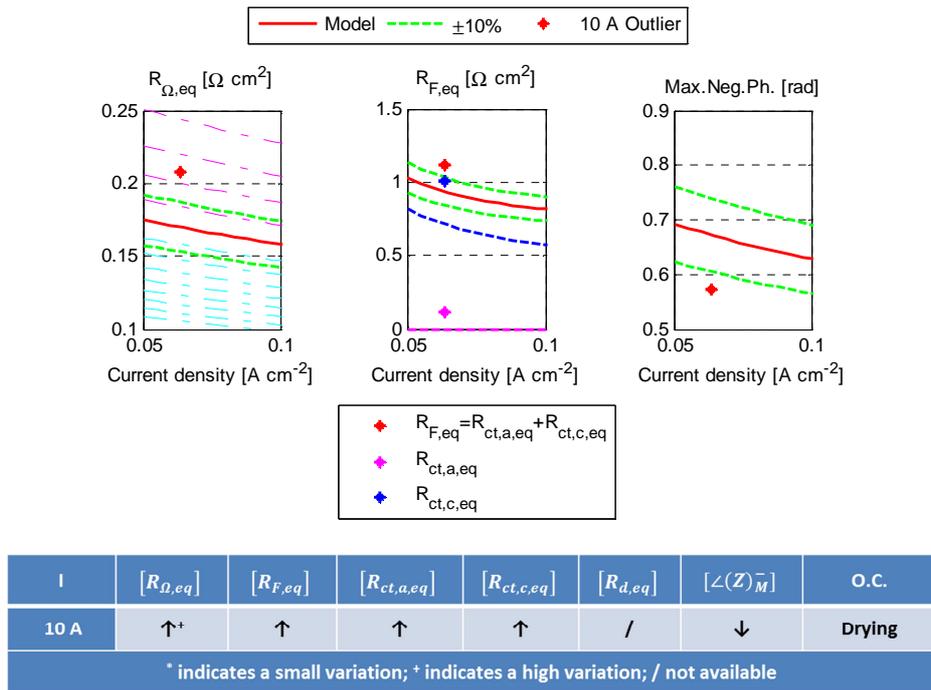


Figure 10: Détection de la condition d'assèchement.

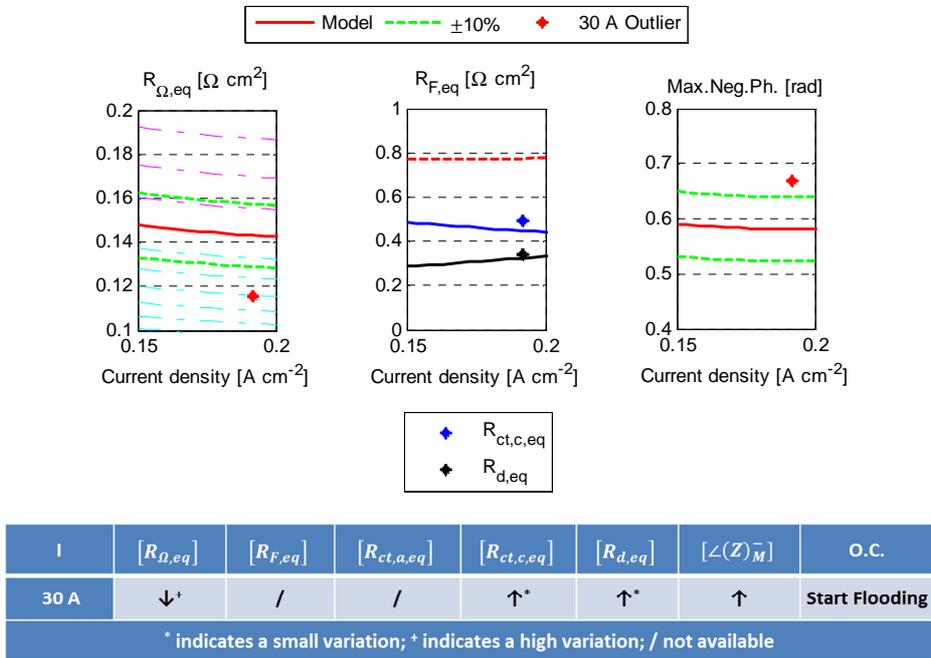


Figure 11: Détection de la condition de début de noyage.

## PERSPECTIVES

L'activité de recherche présentée peut être considérée comme un point de départ pour plusieurs applications.

La disponibilité du convertisseur DC/DC, mise au point par les partenaires du projet D-CODE, donne l'occasion d'élargir les applications de la SIE. En effet, grâce à ce nouveau convertisseur la SIE peut être mise en œuvre sur des systèmes PàC intégrés afin de réaliser aussi bien le contrôle que le diagnostic. L'approche proposée permet la mise en œuvre de la SIE sur des applications sur plusieurs échelles de puissance, par exemple puissances supérieures au kW<sub>e</sub>, qui n'est pas toujours possible d'effectuer avec des spectromètres communs. Il est intéressant de remarquer que la SIE est généralement exploitée sur plusieurs systèmes électrochimiques, tels que batteries et super-condensateurs, et représente un support valable dans l'analyse de la corrosion. Dans cette optique, grâce à la méthodologie proposée, chaque système équipé d'un convertisseur DC/DC commandé en ligne, peut en tirer des avantages.

La caractérisation du spectre basée sur l'analogie des CEE est l'objet du présent travail. L'algorithme développé (GFG) permet l'identification rapide de paramètres. La procédure est automatisée et aucune expertise humaine est nécessaire pour définir la configuration du CEE et les valeurs initiales pour l'identification. L'algorithme GFG peut être adopté sur des applications hors ligne, sur des analyses de laboratoire qui impliquent l'étude des phénomènes électrochimiques ou bien en ligne, sur l'application du diagnostic embarqué, qui exploite toutes ces capacités. Le GFG a été testé avec succès dans plusieurs conditions de fonctionnement sur trois différents systèmes. Toutefois, il est intéressant de remarquer que le GFG a été spécialement développé sur des PàC de type PEM. Par conséquent, pour élargir ces applications à d'autres PàC, aux batteries et à autres systèmes, la configuration de référence du CEE et les fonctions impliquées dans le GFG doivent être adaptées.

Une procédure de diagnostic basé sur l'identification des paramètres du CEE a été également présentée dans ce travail. Une première amélioration à prendre en considération en vue des prochains travaux est le perfectionnement des régressions des paramètres. D'autre part, la matrice de relation entre les symptômes et les défauts (FSM) doit être élargie, pour augmenter le nombre des défauts détectables. L'approche d'isolement des résidus basée sur la détection binaire peut entraîner une perte de donnée. Par la suite, l'introduction d'une analyse de sensibilité des résidus pourrait fournir des données supplémentaires et améliorer le processus d'isolement des défauts.

Enfin, l'algorithme de diagnostic mis au point permet d'analyser les variations des paramètres durant le fonctionnement de la pile. Une autre application pourrait donc être introduite, en analysant l'historique des variations des paramètres, ayant pour objectif final le développement d'un nouvel algorithme finalisé au pronostic.