

# Émulateur de piles à combustible pour applications de Hardware-in-the-Loop

## Mots clés

Pile à combustible,  
Modélisation,  
Émulateur,  
Applications temps réel,  
PEMFC

■ Fei GAO, Benjamin BLUNIER, David BOUQUAIN, Abdellah EL-MOUDNI,  
Abdellatif MIRAOUJ  
*UTBM, Laboratoire systèmes et transports (SeT)*

La pile à combustible est un champ de recherche très actif d'aujourd'hui. L'implémentation d'une pile dans un système complet, comme un système hybride, fait très souvent face à des problèmes de conditionnement, de validation et de sécurité. Pourtant, ces problèmes peuvent être contournés en utilisant un émulateur de pile à combustible dans la phase d'étude qui permet de remplacer une pile réelle afin de réaliser des tests. Cet article présente la conception et la validation d'un tel émulateur. L'utilisation de ce type d'émulateur permet de gagner un temps de développement considérable et de tester le fonctionnement de la pile en émulant celle-ci dans des conditions extrêmes. En éliminant l'utilisation d'hydrogène, la sécurité peut être également garantie.

## 1. Introduction

La pile à combustible (PàC) est un candidat très intéressant comme moyen de stockage et de conversion de l'énergie renouvelable du futur. Comparé avec les sources d'énergie actuelles telles qu'un groupe électrogène utilisant des combustibles fossiles, le système de la pile à combustible présente trois avantages majeurs. Tout d'abord, la pile à combustible permet de convertir directement l'énergie chimique stockée dans le combustible en énergie électrique sans passer par des étapes intermédiaires (thermique, mécanique). Ainsi un rendement élevé d'une pile à combustible peut être obtenu : jusqu'à 50 % pour la pile elle-même et jusqu'à 45 % pour le système total (B. Blunier and A. Miraoui [1]). Deuxièmement, le produit final de la pile à combustible est de l'eau pure. La pollution peut donc être réduite au minimum, à condition que l'hydrogène ait été produit à partir d'énergies renouvelables n'émettant pas de polluant. Enfin, il n'y a pas de pièce en mouvement dans

le cœur de la pile, le système peut être très compact et le besoin de maintenance est minimal. Malgré tous ses avantages, le coût d'une pile à combustible est encore relativement élevé. Il reste également des problèmes à résoudre avant sa commercialisation en masse, tels que la durée de vie, la dégradation de la membrane, le coût du catalyseur, etc.

Avant d'implémenter une pile dans un système électrique hybride (batterie classique, super condensateur), la pile doit être conditionnée selon la puissance demandée et les profils de la charge électrique associée. Dans certains cas, afin de valider ce conditionnement sur le système, une vraie pile peut être utilisée. Si la pile est mal conditionnée au départ, la procédure de validation doit être recommencée. Cela entraîne des coûts et du temps supplémentaires dus à la fabrication de la pile spécifique et au temps utile aux validations.

D'un autre côté, la pile à combustible est un système ouvert. Afin d'assurer son bon fonctionnement, elle nécessite des auxiliaires tels que le compresseur d'air, le

## L'ESSENTIEL

Cet article présente un émulateur de la pile à combustible pour des applications en temps réel. Un modèle électrochimique-fluidique-thermique du stack est introduit. Une architecture modulaire innovante de l'émulateur est ensuite présentée. Cet émulateur permet de remplacer une pile réelle dans un test H-i-L (Hardware-in-the-Loop) du système complet.

## SYNOPSIS

This paper presents a fuel cell emulator for real-time applications. An Electrochemical-Fluidic-Thermal model of fuel cell stack is introduced. An innovative modular architecture of fuel cell emulator is then presented. This kind of emulator can replace a real fuel cell during the Hardware-in-the-Loop test of a complex system.

circuit de refroidissement constituant les sous-systèmes fortement couplés et interdépendants. Une stratégie de commande globale doit être également appliquée afin de gérer le bon fonctionnement du système. Avant leur implémentation sur une pile à combustible, les auxiliaires doivent être testés et validés en conditions réelles. Le coût d'une PàC étant encore relativement élevé, tester un auxiliaire mal conçu risquerait d'endommager le cœur de pile de manière irréversible.

L'intérêt d'un émulateur de PàC est de pouvoir tester un système pile dans des conditions de fonctionnement réelles, voire extrêmes, sans avoir recours à une pile à combustible. L'utilisation d'un émulateur présente plusieurs avantages par rapport à l'utilisation d'une pile réelle :

- 1) il permet d'émuler au moyen d'un même dispositif différents types de PàC, par exemple, de quelques watts à une puissance qui peut atteindre 15 kilowatts pour une application de transport ;
- 2) il permet de simuler des scénarios extrêmes (court-circuit, surchauffe, etc.), sans endommager la PàC ;
- 3) il peut s'intégrer dans un banc d'essai de PàC, afin d'évaluer ou caractériser les choix des technologies et des architectures des auxiliaires ;
- 4) il permet de travailler de manière sécurisée tout en minimisant l'utilisation du circuit d'hydrogène.

Afin de réaliser l'émulateur, il est nécessaire de développer un modèle représentant au mieux le comportement réel d'une pile à combustible. Ce modèle mathématique est le noyau de l'émulateur. Il sera implanté dans un processeur temps réel. Il devra, à partir des conditions physiques de la pile, simuler le comportement de la pile avec des erreurs de calcul acceptables par rapport à une pile à combustible réelle.

Dans cet article, un modèle de la pile à combustible de type PEMFC est présenté. Ce modèle tient compte des effets dynamiques du domaine électrique, de la température, de la fluïdique et des répartitions spatiales des grandeurs physiques, tout en gardant la contrainte du temps réel. Basé sur ce modèle temps réel, le concept de l'émulateur physique, et plus particulièrement la partie électrique, est présenté de manière détaillée. Enfin, les résultats des applications Hardware-in-the-Loop de l'émulateur sont présentés et discutés.

## 2. État de l'art d'émulateurs de piles à combustible

Dans la littérature, plusieurs types d'émulateurs de piles à combustible ont été présentés par différents auteurs. Ces émulateurs peuvent être différenciés en 2 catégories : les émulateurs basés sur un modèle phénoménologique, et les émulateurs basés sur une vraie pile à l'échelle réduite, dont le signal est amplifié au moyen d'un dispositif *ad hoc*.

Dans l'émulateur basé sur le modèle, un modèle mathématique de la pile à combustible est utilisé afin de prédire le comportement de la pile. Le premier ému-

lateur dans la littérature est présenté par J. M. Corrêa, F. A. Farret, J. R. Gomes and M. G. Simões [2]. Les auteurs utilisent un convertisseur de puissance commandé par un ordinateur pour reproduire la caractéristique statique et dynamique de la sortie électrique d'une pile à combustible. Le convertisseur utilisé comprend un convertisseur AC/DC et un filtre passe-bas passif. Le modèle implémenté dans l'émulateur est un modèle électrique statique simple couplé avec un système premier ordre reproduisant l'effet dynamique de la « capacité de double couche ». La tension de sortie de la pile peut être reproduite avec précision. Cependant, leur modèle ne permet pas de prendre en compte les influences fluïdiques et thermiques sur la tension de la pile, comme l'assèchement de la membrane ou les transitoires de la température.

P. Acharya, P. Enjeti and I. J. Pitel [3] ont proposé un émulateur de la pile à combustible de type SOFC (pile à oxyde solide). Dans leur émulateur, une alimentation DC programmable est utilisée afin de reproduire la tension de sortie de la pile. Le modèle utilisé dans l'émulateur est obtenu par l'interpolation de la courbe de polarisation statique d'une pile par une méthode polynomiale cubique. Le comportement de la pile est modélisé simplement par une limitation de balayage puissance entre deux points de fonctionnement. Leur modèle n'a pas de sens physique, puisque c'est un résultat empirique. Pour chaque pile à combustible à émuler, le paramétrage nécessite la courbe de polarisation de la pile réelle afin d'identifier les paramètres empiriques.

T.-W. Lee, S.-H. Kim, Y.-H. Yoon, S.-j. Jang and C.-Y. Won [4] ont proposé un autre émulateur de la pile à combustible en utilisant un convertisseur abaisseur ou "buck" pour émuler la tension du stack. Afin de réduire le temps de calcul du modèle, ils divisent l'intervalle de fonctionnement d'une pile en deux régions : la région de prédominance des pertes d'activation (faibles courants) et la région de prédominance des pertes ohmiques (courants moyen et fort). Dans chaque région, une simplification linéaire est appliquée dans le modèle. La région de prédominance des pertes de concentration (très forts courants) de la pile n'est pas prise en compte dans leur modèle. Ainsi la précision du modèle est-elle limitée.

M. Ordonez, M. T. Iqbal and J. E. Quaiocoe [5] ont présenté un émulateur de la pile à combustible à méthanol direct. Leur modèle et le programme de commande sont implémentés dans un système DSP (*Digital Signal Processor*). À cause de la limitation de calcul d'un DSP, un modèle empirique très simplifié a été utilisé. Le comportement dynamique est modélisé par un système premier ordre capacitif.

A. Gebregergis and P. Pillay [6] ont introduit un émulateur de la pile SOFC. La sortie de puissance est émulée par un convertisseur linéaire de puissance. Le modèle implémenté dans l'émulateur est capable de prédire les comportements statiques et dynamiques d'une pile. Leur émulateur est le premier émulateur dans la littérature qui prend en compte l'effet de la dynamique thermique. Par contre, l'effet fluïdique n'y est pas présenté.

Enfin, un émulateur électrique de la pile à combustible a été présenté par G. Marsala, M. Pucci, G. Vitale, M. Cirrincione and A. Miraoui [7]. Leur modèle implémenté dans l'émulateur prend en compte le cœur de la pile et tous les auxiliaires du système. La tension du stack est émulée par un convertisseur statique, avec une méthode de commande matricielle implémentée dans un système dSpace (processeur temps réel de la société dSpace). Leur modèle ne considère pas l'effet thermique de la pile. La sortie de puissance est limitée à 800 W par le convertisseur utilisé.

La deuxième catégorie d'émulateur est celle basée sur la pile à échelle réduite dans laquelle une cellule réelle de pile à combustible est utilisée comme une référence afin de relever les caractéristiques de fonctionnement dans les conditions réelles. La relation courant-tension relevée de la cellule est ensuite « amplifiée » à l'échelle souhaitée du stack *via* un convertisseur statique afin d'émuler la sortie d'un stack complet. Ce type d'émulateurs est proposé par N.-A. Parker-Allotey, A. T. Bryant & P. R. Palmer [8] et M. Ordonez, M. T. Iqbal & J. E. Quaicoe [9]. En utilisant une vraie pile à combustible, la précision peut être emmenée à un degré élevé par rapport à l'émulateur basé sur le modèle mathématique. Les erreurs dues aux simplifications et les hypothèses d'un modèle mathématique peuvent être éliminées, à condition qu'une pile à combustible de  $n$  cellules se comporte comme  $n$  cellules élémentaires prises indépendamment (facteur d'échelle applicable à toutes les variables du système). En même temps, le coût des tests peut être réduit par rapport à l'utilisation d'un stack complet. Par contre, ce type d'émulateur ne peut pas être appliqué à n'importe quelle pile à combustible, puisque la disponibilité d'une cellule spécifique est très limitée. De plus, s'il existe une vraie pile (même une cellule élémentaire) en fonctionnement dans l'émulateur, un système d'auxiliaires est nécessaire afin d'assurer l'alimentation en hydrogène, en comburant, et d'assurer les bonnes conditions de fonctionnement en température, hygrométrie, etc. Tous ces systèmes augmentent le coût de l'émulateur. L'intérêt et l'avantage de ne plus utiliser d'hydrogène ou de système complexe ne peuvent plus être mis en avant.

Ainsi, l'émulateur basé sur le modèle montre plus d'intérêt pour la conception d'un émulateur. Ce type d'émulateur est plus facile à développer, et ne demande pas d'auxiliaires utiles à son fonctionnement. L'inconvénient global de ce type d'émulateur est la précision et la rapidité d'exécution du modèle qui doit satisfaire la contrainte du temps-réel. La complexité du modèle augmente significativement avec l'augmentation de la précision souhaitée. Ainsi la puissance de calcul demandée augmente. Cependant, cet inconvénient peut être partiellement réduit. Aujourd'hui, la puissance de calculs des processeurs temps-réel est disponible pour un coût abordable. L'implémentation d'un modèle assez complexe dans l'émulateur, comme celui qui sera présenté dans la section suivante, devient réalisable.

### 3. Modèle de la pile à combustible : orientation temps réel

Le modèle de la pile présenté dans cette section sera ensuite utilisé dans l'émulateur temps réel. Pour cela, trois objectifs principaux doivent être atteints lors de la modélisation :

- Tout d'abord, la précision du modèle doit être la plus grande possible, afin que l'émulateur puisse prédire temporellement et spatialement, avec un minimum d'erreur, les grandeurs de sortie de la pile à combustible.
- Deuxièmement, tout en ayant une bonne précision, ce modèle doit être assez « simple » afin que les calculs puissent être résolus mathématiquement en temps réel dans le processeur de l'émulateur.
- Troisièmement, l'émulateur sera conçu pour émuler différentes piles à combustible. Ce modèle doit donc être un modèle générique, qui permet de modéliser les PEMFCs avec différentes géométries, différents matériaux et différentes puissances.

Tout en respectant cette orientation temps réel, un modèle dynamique, multiphysique du stack sera présenté dans cette partie. Ce modèle couvre trois domaines physiques différents : électrique, fluide et thermique.

#### 3.1. Structure du modèle de stack

Une pile à combustible (stack) est composée de plusieurs cellules élémentaires assemblées en série de manière à augmenter la tension du dispositif. Le modèle du stack peut être obtenu à partir d'un empilement de modèle de cellules élémentaires. La méthode d'empilement pour réaliser le modèle du stack a été utilisée. Chaque cellule est empilée l'une après l'autre, les conditions physiques de la cellule  $n$  étant calculées à partir de la cellule  $n-1$  et de la cellule  $n+1$  (voir la partie haute de la figure 1). Les équations physiques de chaque cellule sont identiques : seules les conditions limites changent d'une cellule à l'autre. De cette manière, il est possible d'obtenir les profils des grandeurs physiques comme la température, la pression et la tension.

Le modèle d'une cellule élémentaire peut être divisé encore en plusieurs « couches » suivant leur position, géométrie et fonction. Dans le cas d'une PEMFC, 10 couches élémentaires peuvent être différenciées dans une cellule :

- 1 : Canaux de refroidissement
- 2 : Support des canaux cathodiques
- 3 : Canaux d'alimentation cathodique
- 4 : Couche de diffusion cathodique
- 5 : Sites catalytiques cathodiques
- 6 : Électrolyte : membrane
- 7 : Sites catalytiques anodiques
- 8 : Couche de diffusion anodique
- 9 : Canaux d'alimentation anodique
- 10 : Support des canaux anodiques

Les couches 1, 2, 3, 9 et 10 forment les plaques bipolaires de la cellule (voir la partie milieu de la figure 1).

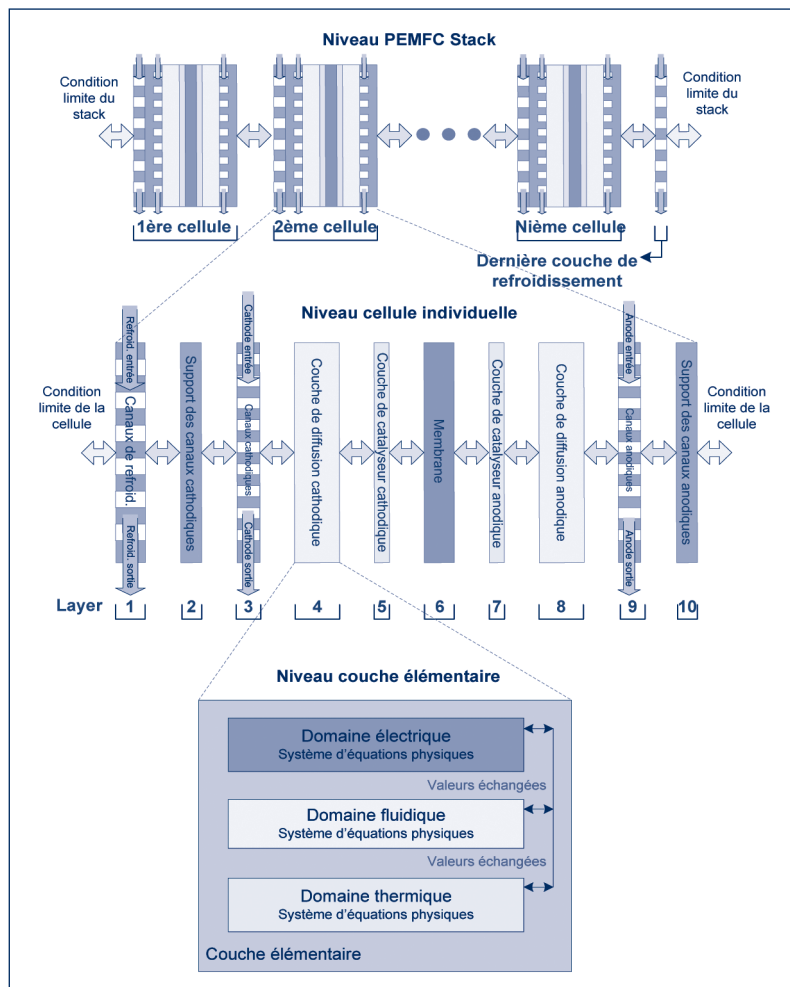


Figure 1. Structure du modèle PaC.

Dernièrement, chaque couche est associée à un système d'équations mathématiques qui décrivent le comportement physique dans trois domaines différents : électrique, fluide et thermique. Les conditions limites (température, pression, etc.) de chaque couche sont données par les deux couches adjacentes (voir la partie basse de la figure 1).

Il doit être noté que, le modèle de chaque domaine physique dans une couche élémentaire est indépendant de l'autre au niveau de la modélisation et du codage de modèle. Il n'existe que les variables échangées entre les modèles du domaine physique.

Cette structure de modèle respecte une approche “top-down” de la conception, elle permet de faciliter les futures améliorations éventuelles sur le modèle lui-même, car chaque domaine physique et chaque couche géométrique sont présentés indépendamment dans le modèle complet. Elle permet également de séparer facilement le modèle en trois modèles de domaines physiques spécifiques. Cette séparation est particulièrement importante pour une simulation distribuée (chaque modèle de domaine physique spécifique est implémenté dans un processeur indépendant pour la simulation) du modèle.

### 3.2. Modélisation dans le domaine électrique

La tension d'une cellule de la pile peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$V_{cellule} = E - V_{act} - V_{ohm} \quad (1)$$

La force électromotrice  $E$  (V) et la perte d'activation  $V_{act}$  (V) sont calculées dans la couche catalytique.

À partir de la température de la cellule  $T$  (K), la pression partielle d'oxygène  $P_{O_2}$  (atm) dans les sites catalytiques cathodiques et la pression partielle d'hydrogène  $P_{H_2}$  (atm) dans les sites catalytiques anodiques, la force électromotrice  $E_{cell}$  (V) peuvent être calculées :

$$E_{cell} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + \frac{R \cdot T}{2F} \ln(\sqrt{P_{O_2}} \cdot P_{H_2}) \quad (2)$$

Où  $R = 8,31$  est la constante des gaz parfaits (J/mol.K) et  $F = 96\,485$  la constante de Faraday (C/mol).

La perte d'activation statique d'une cellule  $\eta_{act}$  (V) peut être exprimée à partir de l'équation de Butler-Volmer :

$$i = i_0 \cdot S \left( e^{\frac{\alpha n F}{R T} \eta_{act}} - e^{\frac{-(1-\alpha) n F}{R T} \eta_{act}} \right) \quad (3)$$

Où  $i$  est le courant du stack (A),  $S$  la surface de la couche catalytique ( $m^2$ ),  $n$  le nombre d'électrons échangés dans la réaction électrochimique,  $\alpha$  le facteur de symétrie et  $i_0$  la densité de courant d'échange ( $A/m^2$ ).

Quand  $\eta_{act}$  est petite, l'équation (3) peut être simplifiée par une équation linéaire :

$$\eta_{act} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \frac{i}{i_0 \cdot S} \quad (4)$$

Quand  $\eta_{act}$  est grande, l'équation (3) devient l'équation de Tafel :

$$\frac{d}{dt} V_{act} = \frac{i}{C_{dl}} \left( 1 - \frac{1}{\eta_{act}} V_{act} \right) \quad (5)$$

La perte d'activation dynamique  $V_{act}$  (V) due à l'effet de la « capacité de double couche » dans le domaine électrique peut être ensuite exprimée :

$$\frac{d}{dt} V_{act} = \frac{i}{C_{dl}} \left( 1 - \frac{1}{\eta_{act}} V_{act} \right) \quad (6)$$

Où  $C_{dl}$  est la capacité de double couche d'une cellule élémentaire (F).

La résistance totale de la membrane  $R_{mem}$  ( $\Omega$ ) est obtenue en intégrant la résistivité  $r(T, \lambda(z))$  sur l'épaisseur de la membrane  $\delta$  (m) divisée par sa surface de section  $S$  ( $m^2$ ).

$$R_{mem} = \frac{\int_0^\delta r(T, \lambda(z)) dz}{S} \quad (7)$$

Étant donné la température de la membrane  $T$  (K) et le contenu d'eau de la membrane  $\lambda(z)$  en fonction de la position suivant l'axe  $z$ , la résistivité de la membrane  $r(T, \lambda(z))$  ( $\Omega.m$ ) peut être calculée :

$$r = \begin{cases} \frac{e^{\left[1268 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right]}}{0,1933} & \text{si } 0 < \lambda(z) \leq 1 \\ \frac{e^{\left[1268 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right]}}{0,5193 \cdot \lambda(z) - 0,326} & \text{si } \lambda(z) > 1 \end{cases} \quad (8)$$

Finalement, la perte ohmique d'une cellule peut être exprimée dans :

$$V_{ohm} = R_{mem} \cdot i \quad (9)$$

### 3.3. Modélisation dans le domaine fluide

*Les canaux :*

Pour le modèle dynamique des canaux, chaque couche des canaux est considérée comme un volume de contrôle (CV).

Le comportement dynamique de chaque volume de contrôle est donné par un bilan de masse :

$$V_{CV} \left( \frac{d}{dt} \rho_{CV} \right) = \sum_{\text{Entrée/Sortie}} q_{fluide} \quad (10)$$

Où  $V_{CV}$  est le volume des canaux ( $m^3$ ),  $\rho_{CV}$  la masse volumique du fluide dans les canaux ( $kg/m^3$ ) et  $q_{fluide}$  les

débits massiques ( $kg/s$ ) entrant ou sortant du volume de contrôle.

Les chutes de pression dans les canaux sont calculées à partir de l'équation de Darcy-Weisbach :

$$\Delta P = f_{darcy} \frac{\rho_{CV} \cdot L}{2 D_{hydro}} V_S^2 \quad (11)$$

Où  $f_{darcy}$  est le facteur de Darcy,  $L$  longueur du canal (m),  $D_{hydro}$  le diamètre hydraulique des canaux (m).

Dans le cas d'une pile à combustible, l'écoulement du fluide dans les canaux est laminaire, le facteur de Darcy peut être calculé par :

$$f_{darcy} = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

Où  $Re$  est le nombre de Reynold du fluide.

*Les couches de diffusion :*

Le phénomène de diffusion des gaz de chaque espèce  $i$  dans la GDL (couche de diffusion) est décrit par l'équation de Stefan-Maxwell :

$$\Delta P_i = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{P_{tot} \cdot S} \sum_{j \neq i} \frac{P_i \cdot \frac{q_j}{M_j} - P_j \cdot \frac{q_i}{M_i}}{D_{ij}} \quad (13)$$

Où  $\delta$  est l'épaisseur de la GDL (m),  $S$  la surface du GDL ( $m^2$ ),  $P_{tot}$  la pression totale moyenne (Pa) dans la GDL,  $q_i$  le débit massique de l'espèce  $i$  ( $kg/s$ ),  $M$  la masse molaire ( $kg/mol$ ),  $j$  représente les espèces autres que l'espèce  $i$ , et  $D_{ij}$  le coefficient de diffusion binaire entre les espèces  $i$  et  $j$  ( $m^2/s$ ).

Les débits massiques d'oxygène, d'hydrogène et d'eau produite par la réaction dans la cellule ( $kg/s$ ) sont imposés par le courant du stack  $i$  (A) :

$$q_{O_2} = \frac{M_{O_2} \cdot i}{4F} \quad (14)$$

$$q_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot i}{2F} \quad (15)$$

$$q_{H_2O, produit} = \frac{M_{H_2O} \cdot i}{2F} \quad (16)$$

*La membrane :*

Le contenu en eau dans une membrane n'est pas uniforme. Le coefficient du contenu d'eau  $\lambda$  est défini comme le rapport du nombre de molécules d'eau par site chargé (site sulfonates).

L'équation du contenu d'eau est donnée par :

$$\lambda = \begin{cases} 0,0043 + 17,81 \cdot a_{H_2O} - 39,85 \cdot a_{H_2O}^2 \\ \quad + 36 \cdot a_{H_2O}^3 & [0 < a_{H_2O} \leq 1] \\ 14 + 1,4 \cdot (a_{H_2O} - 1) & [1 < a_{H_2O} \leq 3] \end{cases} \quad (17)$$

Où  $a_{H_2O}$  est l'activité de l'eau, déterminée à partir de la pression partielle d'eau  $P_{H_2O}$  (Pa) et de la pression de saturation  $P_{sat}$  (Pa) :

$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{sat}} \quad (18)$$



Dans la membrane, deux phénomènes antagonistes sont distingués :

*Le phénomène d'électro-osmose* : soumis à un champ électrique, les protons migrent à travers les pores de la membrane (de l'anode vers la cathode) et entraînent dans leur sillage une ou plusieurs molécules d'eau. Ce débit massique (kg/s) peut être exprimé par :

$$J_{drag} = \frac{n_{sat} \cdot \lambda(z)}{11} \cdot \frac{i}{2F} \cdot M_{H_2O} \quad (19)$$

Où  $n_{sat} \approx 2,5$  est le coefficient d'électro-osmose pour des conditions d'hydratation maximale.

*Le phénomène de back diffusion* : quand la concentration d'eau à la cathode est supérieure à la concentration d'eau à l'anode, l'eau diffuse de la cathode vers l'anode. Ce phénomène compense l'effet du flux électro-osmotique. Ce débit massique (kg/s) peut être exprimé par :

$$J_{back\_diff} = -\frac{\rho_{dry}}{M_n} \cdot D_\lambda \cdot \frac{d\lambda(z)}{dz} \cdot S \cdot M_{H_2O} \quad (20)$$

Où  $\rho_{dry}$  est la densité sèche de la membrane (kg/m<sup>3</sup>),  $M_n$  la masse équivalente de la membrane (kg/mol),  $D_\lambda$  le coefficient de diffusion de l'eau dans la membrane (m<sup>2</sup>/s) et  $S$  la surface de la section membrane (m<sup>2</sup>).

Le coefficient de diffusion moyen de l'eau (m<sup>2</sup>/s) est donné dans la référence (F. Gao, B. Blunier, A. Miraoui & A. E. Moudni [10]).

En faisant le bilan massique d'eau, le débit massique total d'eau (kg/s) dans la membrane peut être calculé :

$$q_{H_2O,net} = J_{drag} + J_{back\_diff} \quad (21)$$

L'équation est une équation différentielle de  $\lambda(z)$  par rapport à  $z$ . En donnant les conditions limites de  $\lambda$  du côté anode et du côté cathode, l'expression de  $\lambda(z)$  et  $q_{H_2O,net}$  peut être obtenue.

### 3.4. Modélisation dans le domaine thermique

Dans le modèle dynamique thermique, les supports des canaux, les couches de diffusion, les couches des sites catalytiques et la membrane sont modélisés individuellement et chacun d'eux correspondant à un volume de contrôle (CV). En revanche, pour les canaux de refroidissement et de gaz, ces couches sont séparées en deux volumes de contrôle dans le modèle thermique, qui correspond au volume de gaz et au volume de la partie solide de la plaque.

La dynamique de la température dans chaque CV peut être obtenue par un bilan d'énergie :

$$(\rho \cdot V \cdot C_p) \frac{dT_{CV}}{dt} = \underbrace{Q_{cond}}_{\text{conduction}} + \underbrace{Q_{forced\_conv}}_{\text{convection forcée}} \quad (22)$$

$$+ \underbrace{Q_{nat\_conv\_radia}}_{\text{convection naturelle et radiation}} + \underbrace{Q_{mass}}_{\text{convection par flux de masse}} + \underbrace{Q_{int}}_{\text{source interne}}$$

Où  $\rho$  est la densité moyenne du volume de contrôle (kg/m<sup>3</sup>),  $V$  le volume (m<sup>3</sup>),  $C_p$  la capacité thermique (J/kg.K) et  $Q$  les flux de chaleur spécifiques entrant ou sortant du volume de contrôle (J/s).

Les flux de chaleur entre les matériaux solides sont échangés par le phénomène de conduction, d'après la loi de Fourier :

$$Q_{cond} = \frac{\lambda \cdot S}{\delta} (T_A - T_B) \quad (23)$$

Où  $\lambda$  est la conductivité thermique (W/Km),  $S$  la surface de la couche (m<sup>2</sup>), et  $\delta$  l'épaisseur de la couche (m).

Les phénomènes de convection forcée et de convection naturelle peuvent être décrits par la loi de Newton de refroidissement :

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot S \cdot (T_{fluide} - T_{solide}) \quad (24)$$

Où  $h_{conv}$  est le coefficient d'échange de chaleur par convection forcée ou par convection naturelle (W/m<sup>2</sup>.K), et  $S$  la surface d'échange (m<sup>2</sup>).

Ce coefficient d'échange de chaleur peut être obtenu à partir de nombre de Nusselt du fluide.

Le flux de chaleur dû à la convection par flux de masse peut être calculé par :

$$Q_{mass} = \left[ \sum_{espèce} (q_{espèce} \cdot C_{p,espèce}) \right] \cdot (T_{fluide} - T_{CV}) \quad (25)$$

Enfin, les sources de chaleur internes d'une cellule doivent être considérées.

Dans la couche des sites catalytiques cathodiques, une source de chaleur interne due à la variation d'entropie pendant la réaction électrochimique et à la perte d'activation peut être obtenue :

$$Q_{int1} = \underbrace{-i \cdot \frac{T \cdot \Delta S}{2F}}_{\text{partie variation d'entropie}} + \underbrace{i \cdot V_{act}}_{\text{Partie perte d'activation}} \quad (26)$$

Où  $\Delta S = -163,185$  est la variation d'entropie (J/mol.K) pendant la réaction électrochimique.

Dans la membrane, une deuxième source de chaleur interne due à l'effet joule de la résistance de membrane peut être obtenue d'après la loi de Joule :

$$Q_{int2} = i^2 \cdot R_{mem} \quad (27)$$

## 4. Architecture de l'émulateur

Afin de permettre l'implémentation en temps-réel, le modèle présenté précédemment a été développé dans l'environnement Matlab-Simulink via des "S-Functions" en langage C.

Cet émulateur est conçu dans le but de remplacer la

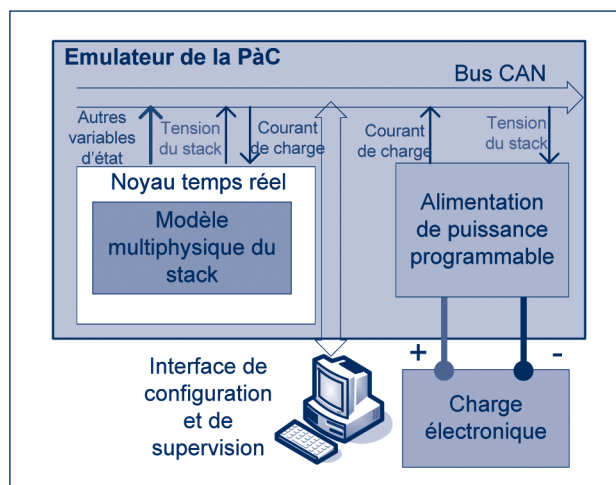


Figure 2. Architecture de l'émulateur électrique.

partie électrique d'une PàC réelle dans un système. Cet émulateur peut, par exemple, être utilisé pour émuler une pile à combustible d'une puissance choisie dans une application H.-I.-L (Hardware-In-the-Loop) telle qu'une chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride PàC-supercondensateurs. L'émulateur doit avoir les mêmes caractéristiques électriques, statiques ou dynamiques, qu'une PàC réelle. Cela est assuré par le modèle présenté précédemment et une alimentation programmable de 6 kW commandée par un système DSP, constituant la partie matérielle de l'émulateur.

Une architecture innovante de l'émulateur est présentée par la figure 2.

Un bus de communication multiplexé (bus CAN, "Control Area Network") est implémenté dans l'émulateur. Ce bus est le seul moyen de communication entre le noyau de calcul (où le modèle physique est implémenté) et l'extérieur (alimentation programmable, carte d'interface, capteurs, interface de supervision). Cette structure permet d'avoir une architecture modulaire de l'émulateur : le noyau de calcul fonctionne indépendamment. Les variables d'état (tension totale du stack, températures et tensions individuelles des cellules, température de sortie des canaux de refroidissement, etc.), qu'elles soient simulées ou mesurées, sont envoyées sur le bus CAN. Dans un premier temps, seule une alimentation commandée par DSP constitue la partie matérielle de l'émulateur, permettant d'émuler la partie électrique du stack. Dans ce cas-là, seule la variable « tension totale du stack » qui circule sur le bus est utilisée par l'alimentation afin de reproduire la tension de sortie du stack. Les autres variables circulant également sur le bus CAN, comme la température individuelle des cellules, peuvent être utilisées par un outil de diagnostic ou de supervision connecté sur le bus. Grâce à cette architecture modulaire, les nouveaux composants éventuels peuvent être directement connectés au bus CAN afin de récupérer les grandeurs de prédiction. Chaque partie matérielle de l'émulateur fonctionne ainsi indépendamment.

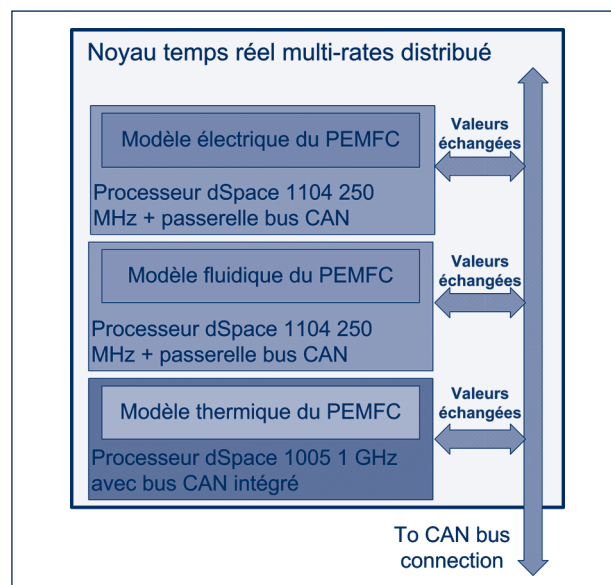


Figure 3. 1<sup>ère</sup> configuration de noyau de calculs temps réel.

Les variables d'état externes du stack (courant, pression d'hydrogène en entrée, débit d'air, température ambiante, etc.) sont également envoyées sur le bus, soit par les capteurs réels, soit par le modèle dans le cas où l'une des grandeurs est simulée. Ces variables sont ensuite centralisées par le noyau de calcul à partir du bus CAN afin de prédire les caractéristiques du stack en temps réel. Dans cette architecture, il n'y a donc aucune différence faite entre les variables simulées ou mesurées circulant sur le bus CAN.

## 5. Noyau de calcul temps réel

Dans le but d'une simulation temps réel du modèle proposé, deux configurations différentes du noyau de calcul ont été testées et validées séparément. Grâce à l'architecture modulaire de l'émulateur disposant d'un bus CAN, une configuration peut être remplacée par l'autre, sans influencer ou modifier les autres parties de l'émulateur.

La première configuration est basée sur trois processeurs temps réel de dSpace, comme l'illustre la figure 3.

Dans cette configuration, chaque modèle du domaine physique spécifique est implémenté dans un processeur indépendant. Suivant les tests de calculs, le modèle électrique et le modèle fluide demandent moins de puissance de calcul par rapport au modèle thermique, afin d'assurer l'exécution en temps réel. Ainsi, ces 2 modèles sont implémentés dans deux processeurs dSpace 1104 250 MHz, puis le modèle thermique est implémenté dans un processeur dSpace 1005 1 GHz. Les échanges de variables d'état entre les modèles et la communication avec d'autres parties de l'émulateur sont garantis par une communication basée sur un bus CAN disponible dans chaque processeur. Cette méthode de calcul distribué permet d'avoir des pas de calculs différents pour chaque domaine

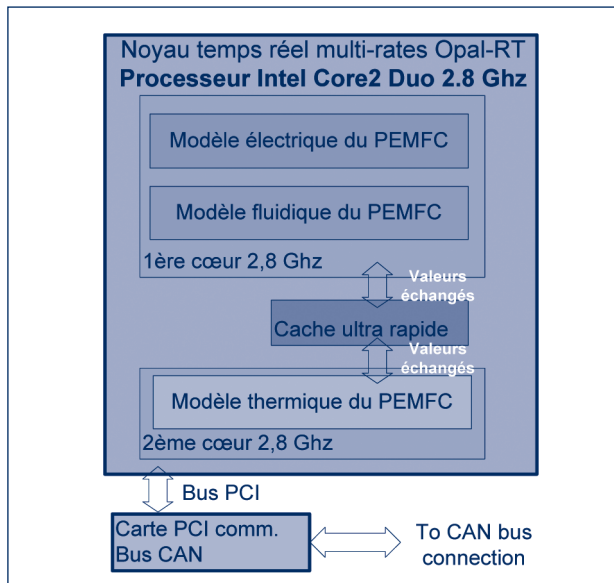


Figure 4. 2<sup>ème</sup> configuration de noyau de calculs temps réel.

physique, tout en gardant leur précision de prédiction dans chaque domaine. Par exemple, le modèle thermique peut avoir un pas de simulation plus grand par rapport au modèle électrique, puisque la dynamique de la température est plus grande par rapport à la dynamique de capacité double couche.

La deuxième configuration est basée sur un processeur bi-cœur d'Opal-RT, comme l'illustre la figure 4.

Comme il n'y a que 2 processeurs indépendants, le modèle électrique et le modèle fluide sont cette fois implémentés dans un seul processeur, et le modèle thermique est implémenté dans l'autre processeur. Cette fois les échanges des variables d'état entre les modèles sont assurés par le buffer ultrarapide au sein du processeur bi-cœur. Ce processeur communique avec l'autre partie de l'émulateur *via* une carte de communication bus CAN. Par rapport à la première configuration, la fréquence du processeur de 2,8 GHz permet d'avoir un pas de calcul plus petit pour la simulation temps réel. De plus, le protocole de la gestion de la synchronisation entre le modèle est plus simple à implémenter si le buffer de processeur

est utilisé (2<sup>ème</sup> configuration) entre les modèles à la place du bus CAN externe (1<sup>ère</sup> configuration).

### 5.1. Émulation électrique de la puissance

L'émulation électrique de la pile est réalisée par une alimentation de puissance programmable. Cette alimentation est commandée par un système DSP de "Texas Instruments" 40 MHz. Le schéma d'implémentation est présenté par la figure 5.

Lors du fonctionnement de l'émulateur, l'alimentation est connectée à la charge électrique réelle de la pile à combustible. Avec un courant de charge précis, l'alimentation doit être capable de fournir une tension du stack émulée en sortie, comme si une vraie pile était à la place de l'émulateur. Cela est assuré par le modèle temps réel et l'interface DSP entre le bus CAN et l'alimentation.

L'alimentation de 6 kW utilisée dans l'émulateur ne dispose pas de moyen de communication *via* bus CAN. Le DSP sert d'abord de passerelle de « bus CAN – Liaison série RS232 ». Le DSP reçoit l'information de la tension du stack prédite par le modèle *via* le bus CAN, et traduit cette consigne de tension en commande liaison série compatible avec l'alimentation programmable. En même temps, le DSP envoie à l'alimentation la requête de mesure du courant de charge, puis traduit la valeur de courant retourné en message de bus CAN au modèle temps réel, afin que le modèle puisse prédire la tension du stack de l'instant suivant.

Le DSP sert également de protecteur de la partie puissance de l'émulateur. Il surveille en permanence, *via* la liaison série, les facteurs de sécurité de l'alimentation, comme la température interne, la présence de surcharge, un fort courant anormal, etc. En cas d'anomalie de la partie puissance, une procédure d'arrêt urgence de l'émulateur sera déclenchée, afin de protéger l'ensemble du matériel.

## 6. Interface de configuration et de supervision

Comme mentionné dans la section précédente, l'ensemble des variables d'état physiques du stack prédites par le modèle multi-physiques (électriques, thermiques et

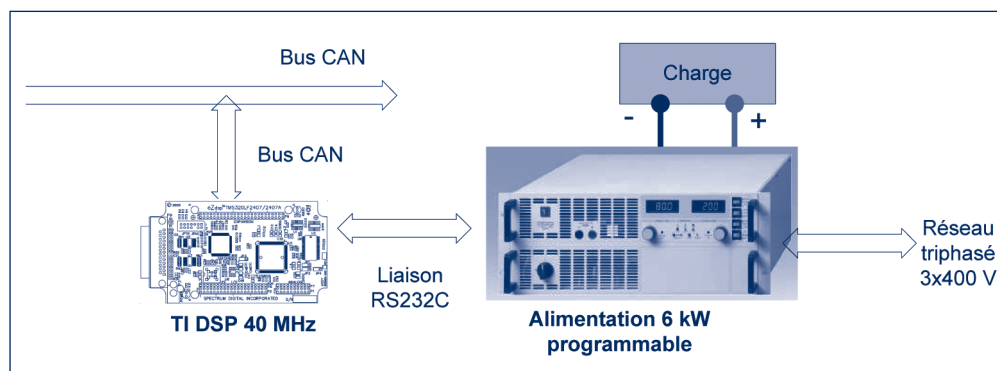


Figure 5. Schéma de la partie puissance de l'émulateur.



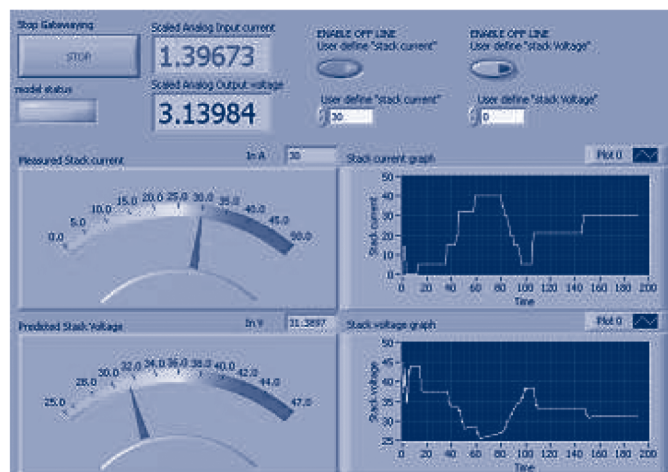


Figure 6. Interface de supervision de l'émulateur.

fluidiques) sont transmises au bus CAN. Dans un premier temps, seule l'information de la tension du stack est nécessaire pour l'émulation électrique. Mais les autres grandeurs d'état disponibles sur le bus CAN peuvent être également utilisées pour mettre en place des outils de diagnostic, ou pour simuler l'interface de supervision d'une pile réelle.

Dans l'exemple de la pile Ballard NEXA 1,2 kW, le constructeur fournit également un logiciel OEM afin de surveiller les grandeurs physiques importantes du stack, telles que le temps de fonctionnement du stack, la température de l'air, la tension et le courant du stack, la pression d'hydrogène, etc.

Il faut noter que toutes ces grandeurs physiques dans l'interface de supervision sont également simulées en temps réel par le modèle, et peuvent être obtenues à partir des messages envoyés par le modèle sur le bus CAN. Ainsi, une simulation de l'interface de supervision de la pile peut être utilisée dans l'émulateur afin de remplacer le logiciel de supervision du stack réel. Un exemple d'interface de supervision est donné par la figure 6.

En plus de cette simulation de logiciel de supervision, le modèle donne encore plus de possibilités de diagnostic : des nombreuses grandeurs physiques non-mesurables de la pile, y compris les résistances de la membrane, les températures de chaque couche (catalyseur, GDL), les pressions de gaz à l'interface des sites catalytiques, peuvent également être reçues dans les messages envoyés par le modèle *via* le bus CAN. Ainsi, les grandeurs physiques d'état accessibles de la pile dans l'émulateur sont largement étendues par rapport à celles d'une pile réelle. Certaines grandeurs, telles que le contenu d'eau des membranes, sont les facteurs-clés de la performance des piles à combustible. En utilisant un émulateur de la pile à combustible à la place d'une vraie pile, ces grandeurs physiques non-mesurables sont accessibles en temps réel pour les utilisateurs.

## 7. Validation du modèle et Hardware-in-the-Loop

Cet émulateur a été validé avec une pile de type PEMFC de marque Ballard NEXA 1,2 kW de 47 cellules individuelles. L'émulation est effectuée dans les mêmes conditions que l'essai expérimental. Le profil de courant appliqué à la pile NEXA est donné par une charge électronique pilotée par un bus GPIB. Ce profil de courant est appliqué ensuite au modèle de l'émulateur. Ainsi, les mêmes conditions physiques expérimentales sont utilisées lors des tests.

Un profil de courant dynamique de 1 300 s est appliqué à la pile pour le premier essai. Celui-ci est illustré par la figure 7. Les trois tensions, la tension de sortie du stack réelle, la tension prédite par le modèle et la tension de sortie de l'émulateur, sont données et comparées dans la figure 8. Il peut être conclu que la dynamique de la tension du stack est bien reproduite par le modèle temps réel, et l'erreur maximale entre la vraie tension et la prédiction est inférieure à 2 V, qui représente une erreur relative inférieure à 7 % pour le modèle présenté. En outre, la tension de sortie de l'émulateur suit la prédiction du modèle précisément.

Il doit être noté que le modèle de la pile à combustible implémenté dans l'émulateur permet également de prédire beaucoup plus d'autres grandeurs d'état du stack que la tension du stack. Par exemple, la température et la tension individuelle de chaque cellule, la température et l'humidité d'air de sortie, le contenu d'eau de la membrane, etc. Un exemple de la prédiction de la température de sortie cathodique est donné par la figure 9. Le modèle démontre que la prédiction dans le domaine thermique est aussi bonne que dans le domaine électrique. La forme dynamique de l'évolution de la température est correctement prédite par le modèle multiphysique.

Les profils spatio-temporels simulés et expérimentaux de la température du stack sont présentés sur les figures 10 et 11. Grâce à la structure d'empilement, le modèle est capable de prédire les tensions et les températures de chaque

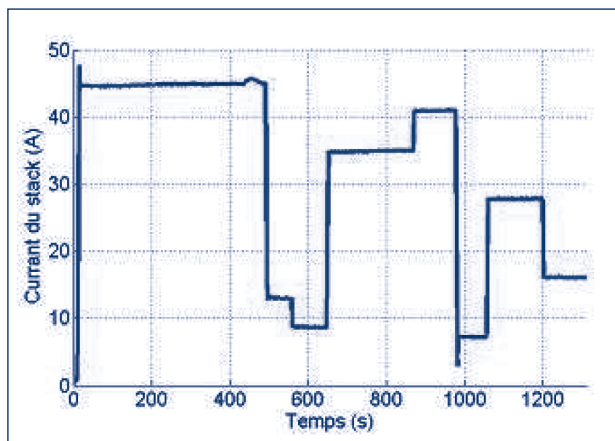


Figure 7. Premier essai : profil de courant du stack.

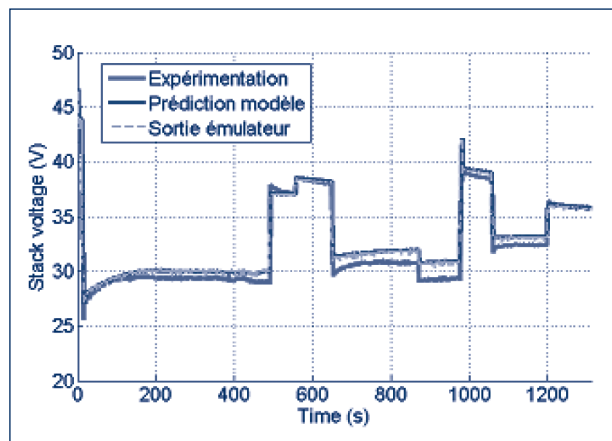


Figure 8. Premier essai : tension du stack (vraie pile, prédiction du modèle et émulation).

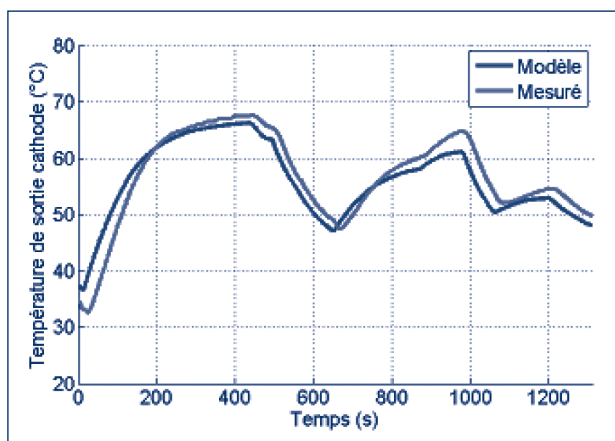


Figure 9. Premier essai : température de sortie des canaux cathodiques.

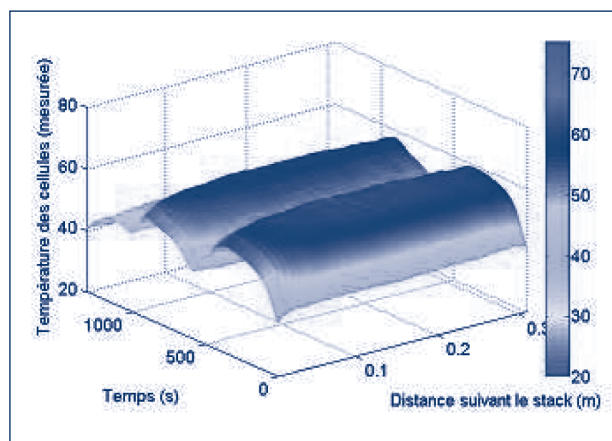


Figure 10. Premier essai : évolution temporelle et spatiale de la température du stack (vraie pile).

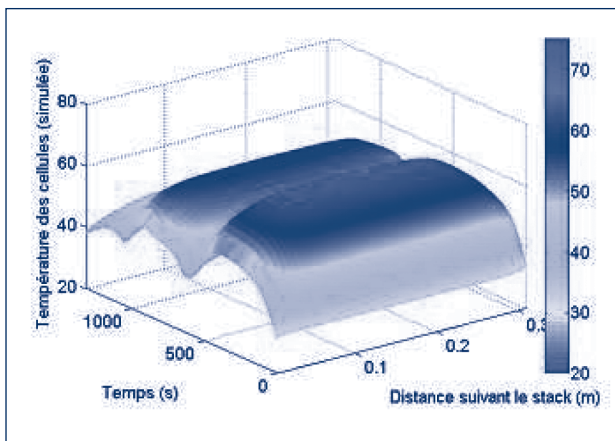


Figure 11. Premier essai : évolution temporelle et spatiale de la température du stack (prédiction du modèle).

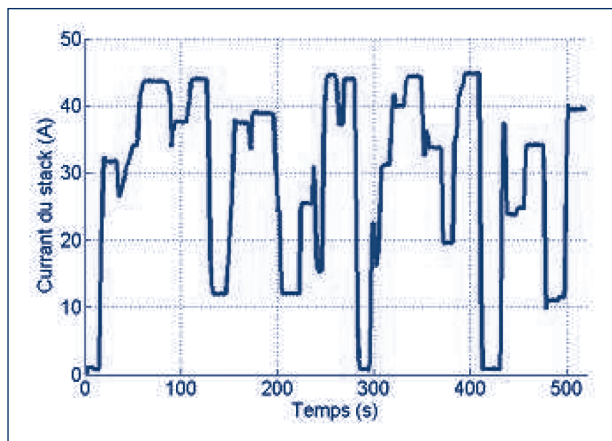


Figure 12. Deuxième essai : profil de courant du stack.

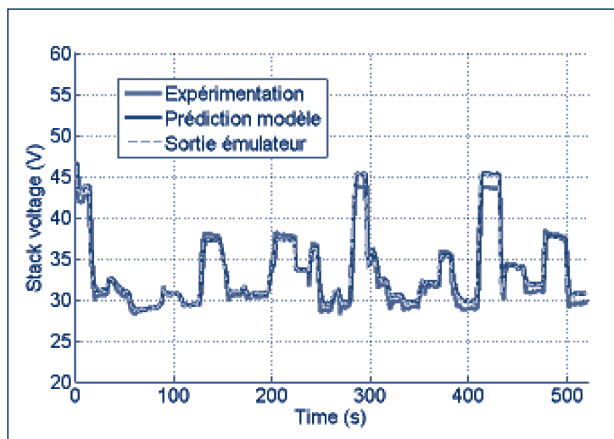


Figure 13. Deuxième essai : tension du stack (vraie pile, prédiction du modèle et émulation).

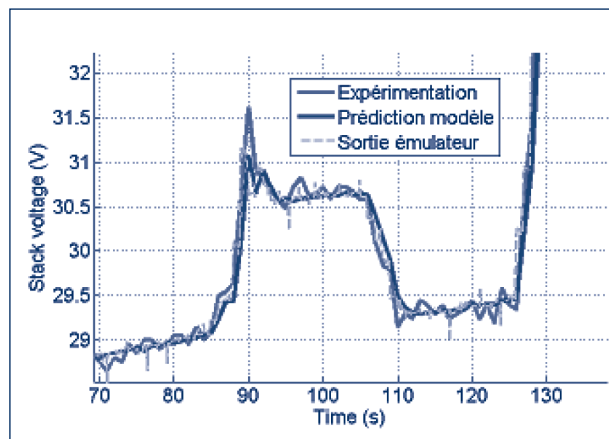


Figure 14. Deuxième essai : tension du stack agrandi vers 100 s.

cellule élémentaire. Comme l'illustrent ces deux figures, la répartition spatiale des températures n'est pas homogène. Ce phénomène est correctement prédit par le modèle.

Dans le deuxième test, un courant très dynamique est appliqué permettant de valider l'émulateur dans le cas d'une variation de charge rapide. Le profil de courant est donné par la figure 12. Pendant 520 s, le courant du stack varie entre 0 A et 45 A pendant plusieurs cycles.

La tension du stack réel, la tension prédite par le modèle et la tension de l'émulateur pour ce nouveau profil de courant sont présentées par la figure 13. Encore une fois, même avec une variation de courant rapide, une très bonne précision entre ces trois tensions peut toujours être constatée. Afin de comparer plus clairement, les courbes de ces trois tensions sont agrandies vers 100 s. Ces trois tensions montrent une très bonne corrélation, qui peut être visualisée dans la figure 14.

## 8. Conclusion

Un émulateur physique de pile à combustible a été présenté en introduisant une conception modulaire. Le modèle physique utilisé dans l'émulateur couvre trois domaines différents : électrique, fluide et thermique.

Ce modèle du stack est ensuite implémenté dans les processeurs de calculs afin d'assurer une prédiction de comportement de la pile en temps réel. Deux configurations différentes pour ce noyau de calcul sont comparées et discutées. Grâce à l'architecture de l'émulateur, une configuration peut être remplacée facilement par l'autre.

Une alimentation de puissance commandée numériquement par un système DSP est implémentée afin d'émuler la partie électrique de la PàC. L'expérimentation réalisée montre que l'émulateur peut correctement reproduire la dynamique de la tension d'une pile réelle.

La nouvelle architecture modulaire de l'émulateur de PàC est également introduite dans l'article. Elle permet de faciliter la réalisation et l'amélioration de l'émulateur

et d'étendre son domaine d'utilisation. Grâce au modèle multiphysique implémenté dans l'émulateur, toutes les variables d'état circulent sur le bus numérique, et celles-ci peuvent être utilisées pour mettre en place des outils de diagnostic, ou pour simuler une interface de supervision d'un stack réel.

Les résultats de l'émulateur montrent ses capacités à prédire avec une bonne précision les caractéristiques temporelles et spatiales (cellules individuelles) du stack. Ce type d'émulateur permet d'aider au dimensionnement d'une pile dans un système complexe et d'intégrer dans un test Hardware-in-the-Loop (H.I.L.) d'un système hybride.

## Références

- [1] B. BLUNIER, A. MIRAOU, « *Pile à combustible* » (French). 2007, Paris: Ellipses. 173.
- [2] J. M. CORRÊA, F. A. FARRET, J. R. GOMES & M. G. SIMÕES, "Simulation of Fuel-Cell Stacks Using a Computer-Controlled Power Rectifier With the Purposes of Actual High-Power Injection Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 2003. 39(4): p. 7.
- [3] P. ACHARYA, P. ENJETI & I. J. PITEL, "An Advanced Fuel Cell Simulator", in IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'04). 2004. p. 5.
- [4] T.-W. LEE, S.-H. KIM, Y.-H. YOON, S.-J. JANG & C.-Y. WON, "A 3kW Fuel Cell Generation System Using the Fuel Cell Simulator", in IEEE 35<sup>th</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 04). 2004. p. 5.
- [5] M. ORDONEZ, M. T. IQBAL & J. E. QUAICOE, "Development of a Fuel Cell Simulator Based in an Experimentally Derived Model", in IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005. p. 4.
- [6] A. GEBREGERGIS, P. PILLAY, "The Development of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Emulator". IEEE, 2007: p. 7.
- [7] G. MARSALA, M. PUCCI, G. VITALE, M. CIRINCIONE & A. MIRAOU, "A Prototype of a Fuel Cell PEM Emulator Based on a Buck Converter". Applied Energy, 2009. XXX: p. 12.

- [8] N.-A. PARKER-ALLOTEY, A. T. BRYANT & P. R. PALMER, "The Application Of Fuel Cell Emulation In The Design of an Electric Vehicle Powertrain", IEEE, 2005: p. 6.
- [9] M. ORDONEZ, M. T. IQBAL & J. E. QUAICOE, "A Novel Fuel Cell Simulator", in IEEE 36<sup>th</sup> Annual Conference on Power Electronics Specialists (PESC '05). 2005. p. 7.
- [10] F. GAO, B. BLUNIER, A. MIRAOUI & A. E. MOUDNI, "Cell Layer Level Generalized Dynamic Modeling of a PEMFC Stack Using VHDL-AMS Language", International Journal of Hydrogen Energy, 2009. 34(13): p. 24.

## Les auteurs

**Fei Gao** est actuellement doctorant-moniteur du département Génie électrique et systèmes de commande (GESC) de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Il a eu le diplôme d'ingénieur de l'UTBM en 2007. Ses activités de recherche concernent l'énergie renouvelable (pile à combustible), la modélisation multiphysique, les systèmes embarqués et les applications en temps réel (basés sur le modèle compliqué).

**Benjamin Blunier** est docteur et ingénieur diplômé de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), maître de conférences dans cette université depuis 2008. Ses activités de recherche concernent le traitement de l'énergie (en particulier la pile à combustible), les réseaux électriques intelligents ou Smart Grids, ainsi que la modélisation et l'optimisation de chaînes de traction électrique pour les véhicules électriques et hybrides. Depuis 2009, il est responsable de la nouvelle filière « Énergie et environnement » au sein du département Génie électrique et systèmes de commande (GESC) de l'UTBM. Il est auteur du premier livre francophone universitaire sur la pile à combustible (« *Piles à combustible, Principe, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés* », ed. Technosup, 2007) et du livre « *20 questions sur la pile à combustible* » paru en 2009 aux éditions Technip.

**David Bouquain** est maître de conférences de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Il est le directeur du département Génie électrique et systèmes de commande (GESC). Il a obtenu son Doctorat dans la même Université. Il effectue ses travaux de recherche

au sein de l'équipe Commande et conversion de l'énergie du laboratoire Systèmes et transports de l'UTBM. Ses travaux portent sur la conception et le développement d'architectures hybrides innovantes pour le transport. Il a participé à plusieurs projets industriels dans ce domaine, dont entre autres les projets ECCE (développement d'un véhicule militaire hybride, 1998-2004, partenaires : DGA, Alstom, UFC, UTBM...) et VECOVIL (développement d'un véhicule de voirie hybride, 2006-2010, partenaires : Pôle VdF, JUNGO, FAM, UTBM...). Il travaille également sur les systèmes pile à combustible dans le laboratoire FCLAB de Belfort, et a été responsable du projet ANR Fisypac pour FCLAB (Fiabilité des systèmes pile à combustible, 2005-2009, partenaires : PSA, SAFT, FCLAB...).

**Abdellah El-Moudni** est professeur à l'UTBM et chercheur au laboratoire SET. Il travaille sur les problèmes de modélisation et de commande appliqués dans trois domaines applicatifs : transport, production et la pile à combustible.

**Abdellatif Miraoui** est professeur des Universités à l'UTBM. Les activités de recherche de M. Abdellatif Miraoui concernent le traitement de l'énergie (en particulier la pile à combustible), ainsi que la modélisation et l'optimisation des chaînes de traction. Les applications privilégiées sont relatives au transport terrestre, et traitent plus particulièrement les aspects liés à la modélisation et à la conception des systèmes de traction des véhicules électriques et hybrides. Il est vice-président chargé de la recherche à l'UTBM. Il est docteur honoris causa de l'Université de Cluj-Napoca en Roumanie.