

Modélisation et émulation de piles à combustible pour applications en temps réel

Fei GAO

UTBM SeT (EA 3317) – Laboratoire Système et Transport, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort

Résumé — Cet article présente la modélisation et la conception d'un émulateur temps réel de pile à combustible. Le modèle 1-D multi-physique d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est tout d'abord introduit. Trois domaines physiques constituent ce modèle : électrique, fluide et thermique. Les résultats de simulation des profils spatiaux et temporels de la température et de la tension sont confrontés à l'expérience et montrent une bonne corrélation. Le modèle est implémenté dans un système embarqué temps réel avec un nouveau concept de structure. L'émulateur dispose d'un bus numérique multiplexé (CAN). L'émulation de la partie électrique du stack est réalisée par un convertisseur DC/DC. En plus de l'émulation électrique, grâce au modèle multi-physique et à la structure de l'émulateur, l'interface de supervision d'un stack réel peut être également simulée par l'émulateur.

I. INTRODUCTION

La pile à combustible (PàC) est un système ouvert. Afin d'assurer son bon fonctionnement, elle nécessite des auxiliaires tels que le compresseur d'air, le 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 [1].

L'intérêt d'un émulateur de PàC est de pouvoir tester un système pile dans des conditions de fonctionnement réelles, voire extrême, sans 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 les différents types de PàC, par exemple, de quelques watts à une puissance qui peut atteindre 15 kilowatts pour une application de transport, en utilisant un seul simulateur ;
2. il permet de simuler des scénarii 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.

Plusieurs émulateurs électriques ont été présentés dans la littérature [2]-[8]. Ces émulateurs sont toujours basés sur des modèles électriques de la PàC très simplifiés et les parties fluide et thermique ne sont pas considérées.

Contrairement aux modèles présentés dans la littérature, le modèle présenté dans cet article tient compte des effets dynamiques de la température, de la fluide et des répartitions spatiales des grandeurs physiques (tension, température, humidité, pressions, etc.) tout en gardant la contrainte du temps réel.

La première partie de l'article présente succinctement le modèle de la pile qui est présenté de manière complète dans l'article [9]. La seconde partie introduit le concept de l'émulateur physique avec une présentation détaillée de la partie électrique de l'émulateur.

II. MODELE DU CŒUR DE PILE

Dans cette partie les fondamentaux et principes de base du modèle de la pile à combustible sont décrits. Le lecteur intéressé par le modèle détaillé et sa validation expérimentale complète pourra se référer aux articles [9] et [10].

Ce modèle est uniquement basé sur des équations physiques. Les paramètres des équations sont d'ordre géométrique (épaisseurs, surfaces d'échanges, longueur des canaux...) et physique (propriétés des matériaux, type de fluide de refroidissement, coefficients d'échanges thermiques) et sont *connus ou mesurés* sans essais préalables de la pile à combustible. Dans l'ensemble du modèle, seuls quatre paramètres empiriques, dans l'équation de la tension, doivent être *identifiés* par un essai statique. Le calage du modèle est donc très rapide et facile car seul un essai statique permet d'identifier les quatre paramètres empiriques.

A. Structure de modèle d'une cellule

Une pile à combustible (stack) est composée de plusieurs cellules élémentaires assemblées en série de manière à augmenter la tension du dispositif. Une cellule élémentaire est décomposée en plusieurs « couches » suivant leur position, géométrie et fonction.

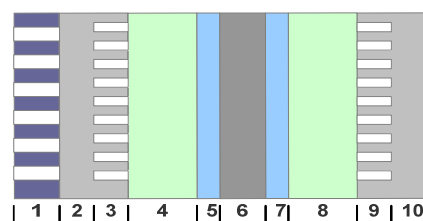


Figure 1 Structure d'une cellule élémentaire

Une cellule élémentaire de pile à combustible est décomposée en 10 couches élémentaires (voir Figure 1) :

- 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. Dans la modélisation, 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.

B. Structure de modèle du stack

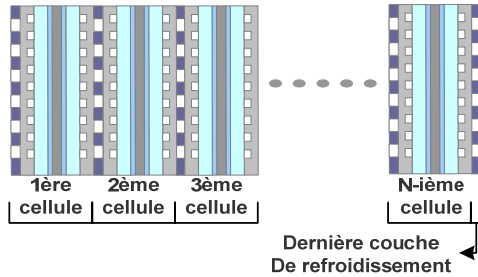


Figure 2 Empilement de N cellules construisant le stack

Le modèle du stack est ensuite construit à partir d'un empilement de cellules élémentaires comme l'illustre la Figure 2. Dans certains modèles de la littérature, le modèle du stack est basé sur le modèle d'une seule cellule appelée « cellule moyenne équivalente » censée représenter le comportement moyen de toutes les cellules. Les grandeurs du stack sont simplement obtenues en multipliant les grandeurs de la cellule moyenne équivalente par le nombre de cellules. Par exemple, pour un stack de n cellules, la tension totale sera égale à n fois la tension de la cellule moyenne équivalente. Cette hypothèse suppose que les conditions physiques pour chaque cellule soient identiques, ce qui n'est pas le cas dans la réalité physique.

En réalité, chaque cellule a ses propres conditions physiques et conditions limites (différentes températures, débits massiques, résistances, etc.). Les conditions limites d'une cellule influencent donc celles des cellules adjacentes, qui vont ainsi créer des conditions physiques différentes dans chaque cellule. On constate ces différences dans chaque domaine de la modélisation, mais principalement dans le domaine thermique dû à la grande constante de temps thermique du stack.

Dans ce modèle, 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 sont calculées à partir de la cellule $n-1$ et de la cellule $n+1$.

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.

C. Hypothèses de la modélisation

H1 : La chute de pression dans les canaux est seulement due à la perte mécanique du gaz (pertes de charge) en traversant les canaux et au flux de masse vers la couche de diffusion.

H2 : La diffusion de gaz dans les couches de diffusion, couche des sites catalytiques et couche de membrane est considérée en régime permanent.

H3 : Il n'y a pas de gradient de la pression totale dans la couche de diffusion.

H4 : La chute de tension associée aux pertes d'activation est négligeable à l'anode.

H5 : Les pertes ohmiques n'existent que dans la membrane, la résistance électrique de la plaque bipolaire est négligeable.

H6 : Les gaz dans les couches de la pile sont considérés comme des gaz parfaits.

D. Modèle électrique d'une cellule

La tension d'une cellule de la pile peut être calculée à partir de (1).

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

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

À partir de la température de la cellule T (K), la pression partielle d'oxygène P_{O_2} (Pa) dans les sites catalytiques cathodiques et la pression partielle d'hydrogène P_{H_2} (Pa) dans les sites catalytiques anodiques, la force électromotrice (V) peuvent être calculées [11] :

$$E = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3}(T - 298,15) + \frac{R \cdot T}{2F} \ln \left(\sqrt{\frac{P_{O_2} \cdot P_{H_2}}{101325^2}} \right) \quad (2)$$

Où $R = 8,31$ est la constante des gaz parfaits (J/mol.K) et $F = 96485$ la constante de Faraday (C/mol).

On doit noter que, les pressions de gaz P_{O_2} et P_{H_2} utilisées dans (2) sont les pressions à l'interface de la couche catalytique, la limitation de transport de gaz dans la couche de diffusion (GDL) sont déjà pris en compte. Ainsi, un terme de perte de concentration n'est pas nécessaire dans l'équation (1).

À partir d'hypothèse H4, la perte d'activation (V) due aux réactions électrochimiques est [12] :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P_{O_2} / 101325}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \right) + \varepsilon_4 \cdot T \cdot \ln(i) \quad (3)$$

Où i est le courant du stack et ε_1 à ε_4 quatre paramètres identifiés à partir de la courbe de polarisation du stack.

La résistance totale de la membrane R_{mem} (Ω) est obtenue en intégrant la résistivité $r(T, \lambda(z))$ sur l'épaisseur de la membrane δ (m) divisée par sa surface de section S (m²).

$$R_{mem} = \frac{\int_0^\delta r(T, \lambda(z)) dz}{S} \quad (4)$$

Étant donnée 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 [13] :

$$r = \begin{cases} \frac{e^{\left[1268 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right]}}{0,1933} & \text{si } 0 < \lambda(z) \leq 1 \\ \frac{e^{\left[1268 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right]}}{0,5193 \cdot \lambda(z) - 0,326} & \text{si } \lambda(z) > 1 \end{cases} \quad (5)$$

Finalement, la perte ohmique d'une cellule peut être exprimée dans (6) suivant l'hypothèse H5 :

$$V_{ohm} = R_{mem} \cdot i \quad (6)$$

E. Modèle fluidique d'une cellule

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 CV est donné par un bilan de masse :

$$V_{CV} \left(\frac{d}{dt} \rho_{CV} \right) = \sum_{\text{Entrée/Sortie}}^{CV} q_{fluide} \quad (7)$$

Où V_{CV} est le volume des canaux (m^3), ρ_{CV} la densité du fluide dans les canaux (kg/m^3) et q_{fluide} les flux de masse (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 :

$$\Delta P = f_{darcy} \frac{\rho_{CV} \cdot L}{2D_{hydro}} V_S^2 \quad (8)$$

Où f_{darcy} est le facteur de Darcy, L longueur du canal (m), D_{hydro} le diamètre hydraulique de 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 (9) :

$$f_{darcy} = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Où Re est le nombre de Reynold du fluide.

Les couches de diffusion :

D'après l'hypothèse H2, la conservation de masse dans la couche de diffusion cathodique n'est pas considérée. Le débit entrant de chaque espèce est égale à son débit sortant.

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

$$\Delta P_i = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{P_{tot} \cdot S} \sum_{j \neq i} \frac{P_i \cdot \frac{q_j}{M_j} - P_j \cdot \frac{q_i}{M_i}}{D_{ij}} \quad (10)$$

Où δ 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

produit par la réaction dans la cellule (kg/s) sont imposés par le courant du stack i (A) :

$$q_{O_2} = \frac{M_{O_2} \cdot i}{4F} \quad (11)$$

$$q_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot i}{2F} \quad (12)$$

$$q_{H_2O, produit} = \frac{M_{H_2O} \cdot i}{2F} \quad (13)$$

La membrane :

Le contenu en eau dans une membrane n'est pas uniforme.

Le coefficient du contenu d'eau λ est défini comme le rapport du nombre de molécule d'eau par site chargé (site sulfonates).

L'équation du contenu d'eau est donnée par [14] :

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

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) :

$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{sat}} \quad (15)$$

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 :

$$J_{drag} = \frac{n_{sat} \cdot \lambda(z)}{11} \cdot \frac{i}{2F} \cdot M_{H_2O} \quad (16)$$

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 :

$$J_{back_diff} = -\frac{\rho_{dry}}{M_n} \cdot D_\lambda \cdot \frac{d\lambda(z)}{dz} \cdot S \cdot M_{H_2O} \quad (17)$$

Où ρ_{dry} est la densité sèche de la membrane (kg/m^3), M_n la masse équivalente de la membrane (kg/mol), D_λ le coefficient de diffusion de l'eau dans la membrane (m^2/s) et S la surface de la section membrane (m^2).

Le coefficient de diffusion de l'eau moyen (m^2/s) est donné dans la référence [15].

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

$$q_{H_2O, net} = J_{drag} + J_{back_diff} \quad (18)$$

L'équation (18) est une équation différentielle de $\lambda(z)$ par rapport à z . En donnant les conditions limites de λ du coté anode et du coté cathode, l'expression de $\lambda(z)$ et $q_{H_2O, net}$ peuvent être obtenues.

F. Modèle thermique d'une cellule

Dans le modèle dynamique thermique, les supports des canaux, les couches de diffusion, les couches des sites catalyseur 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 le bilan d'énergie :

$$\left(\rho \cdot V \cdot C_p\right) \frac{dT_{CV}}{dt} = \underbrace{Q_{cond}}_{\text{conduction}} + \underbrace{Q_{forced_conv}}_{\text{convection forcée}} + \underbrace{Q_{nat_conv_radia}}_{\text{convection naturelle et radiation}} + \underbrace{Q_{mass}}_{\text{convection par flux de masse}} + \underbrace{Q_{int}}_{\text{source interne}} \quad (19)$$

Où ρ est la densité moyenne du volume de contrôle (kg/m^3), V le volume (m^3), C_p la capacité thermique (J/kg.K) et Q les flux de chaleur spécifiques entrée ou sortie du volume de contrôle (J/s).

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

$$Q_{cond} = \frac{\lambda \cdot S}{\delta} (T_A - T_B) \quad (20)$$

Où λ est la conductivité thermique (W/m.K), S la surface de la couche (m^2), et δ l'épaisseur de la couche (m).

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

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot S \cdot (T_{fluide} - T_{solide}) \quad (21)$$

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

Ce coefficient d'échange de chaleur peut être obtenu à partir de nombre de Nusselt du fluide [16].

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

$$Q_{mass} = \left[\sum_{\text{espèce}} (q_{\text{espèce}} \cdot C_{p,\text{espèce}}) \right] \cdot (T_{fluide} - T_{CV}) \quad (22)$$

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

Dans la couche des sites catalyseur 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 :

$$Q_{int1} = \underbrace{-i \cdot \frac{T \cdot \Delta S}{2F}}_{\text{partie variation d'entropie}} + \underbrace{i \cdot V_{act}}_{\text{Partie perte d'activation}} \quad (23)$$

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 :

$$Q_{int2} = i^2 \cdot R_{mem} \quad (24)$$

G. Résultats du modèle

Afin de permettre l'implémentation en temps-réel du modèle, celui-ci a été développé dans l'environnement Matlab-Simulink. Il a été ensuite validé avec une pile de type PEMFC de marque Ballard NEXA 1,2 kW. La simulation 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 en simulation. Ainsi, les mêmes conditions physiques expérimentales sont utilisées lors de la simulation.

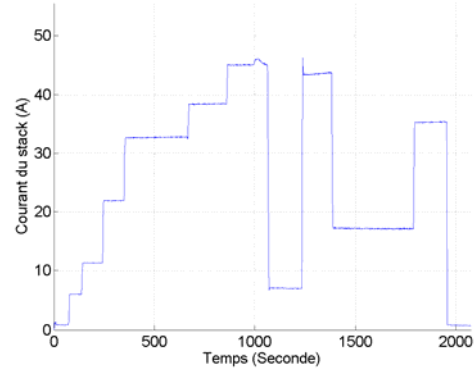


Figure 3 Courant délivré par la pile à combustible

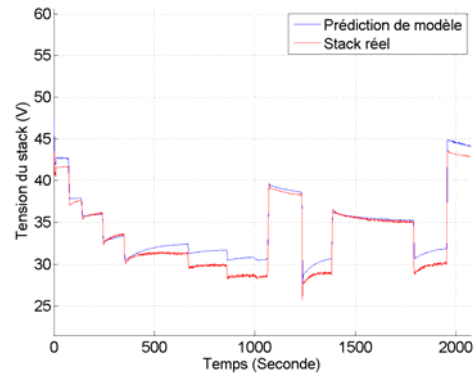


Figure 4 Tension du stack réelle et simulée

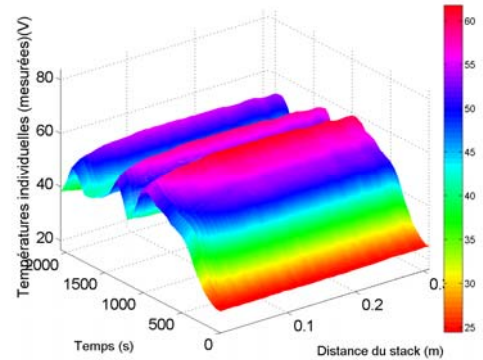


Figure 5 Températures spatiales et temporelles mesurées

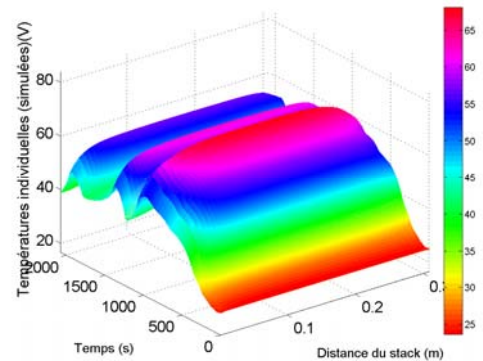


Figure 6 Températures spatiales et temporelles simulées par le modèle

Un courant dynamique est appliqué à la PàC (Figure 3). Ce courant mesuré est ensuite utilisé dans la simulation. La Figure 4 montre la bonne corrélation entre les tensions simulées et expérimentales. L'erreur maximale entre les tensions simulées et expérimentales reste toujours inférieure à 3 V ce qui représente moins de 10 % d'erreur relative.

Les profils spatiaux-temporels simulés et expérimentaux de la température sont présentés sur les Figure 5 et Figure 6. Grâce à la structure d'empilement, le modèle est capable de prédire les tensions et les températures de chaque 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.

III. EMULATEUR TEMPS REEL

A. Architecture matérielle

Le modèle présenté dans la section précédente est ensuite chargé dans un système temps réel embarqué (carte processeur « dSpace 1005 ») à l'aide de Matlab-Simulink.

Cet émulateur est conçu d'abord dans le but de remplacer la partie électrique seule d'une vraie PàC 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-supercapacités. L'émulateur doit avoir les mêmes caractéristiques électriques, statiques ou dynamiques, qu'une PàC réelle. Cela est assuré par le modèle présenté précédemment et un convertisseur de puissance DC/DC constituant la partie matérielle de l'émulateur.

L'émulation de la partie fluide et thermique (circuit de refroidissement, entrée/sortie de l'air et de l'hydrogène, etc.) sera ajoutée dans un travail futur. L'émulation des parties fluidiques et thermiques permettra de tester et de valider les différents auxiliaires d'une pile à combustible (compresseur, système de refroidissement, etc.) dans des conditions de fonctionnement réelles et extrêmes avant leur implémentation sur une vraie pile à combustible. L'émulateur sera également un outil de validation de bancs de tests pour piles à combustible.

La nouvelle architecture de l'émulateur est présentée par la Figure 7.

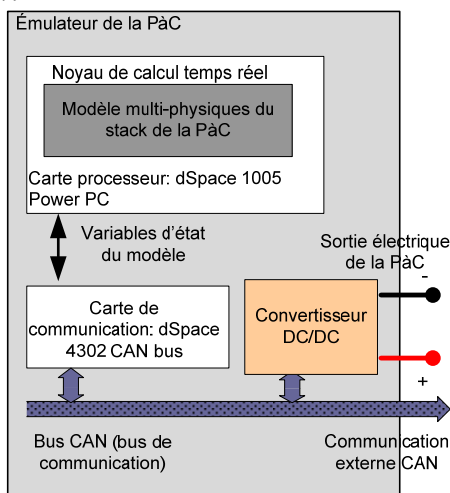


Figure 7 Architecture de l'émulateur électrique

Un bus de communication multiplexé (bus CAN) 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 (convertisseur DC/DC, capteurs, etc.) via une carte de bus CAN (dSpace 4302). 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, seul un convertisseur DC/DC 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 le convertisseur 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. Dans les travaux futurs, les parties fluidiques et thermiques seront ajoutées à l'émulateur. Grâce à cette architecture modulaire, les nouveaux actionneurs peuvent être directement connectés au bus CAN afin de récupérer les grandeurs de prédiction. Chaque partie matérielle de l'émulateur fonctionne ainsi indépendamment.

Les variables d'état externes du stack (courant, pression d'hydrogène en entrée, débit d'air, température ambiante, etc.) sont également envoyés 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.

B. Emulation électrique et méthode de commande

L'émulation électrique de la pile est réalisée par un convertisseur DC/DC type « boost ». Ce convertisseur est commandé par 2 régulateurs (PI et PID) implémentés dans système dSpace. Le schéma de commande est donné par la Figure 8:

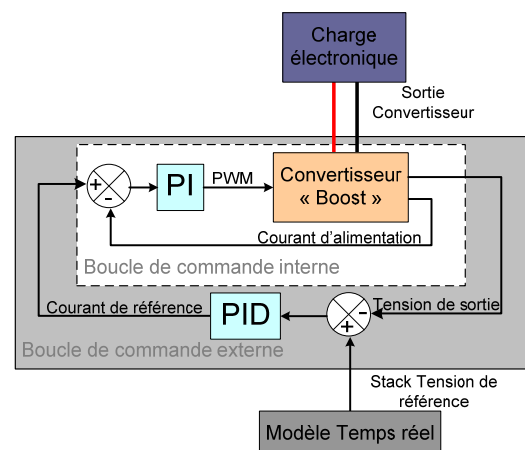


Figure 8 Schéma de commande (convertisseur DC/DC)

L'alimentation du convertisseur est assurée par une tension stabilisée. Deux boucles de contrôle peuvent être distinguées : un régulateur PI situé en boucle interne est utilisé afin de contrôler et limiter le courant d'alimentation. Un deuxième régulateur PID situé en boucle externe est utilisé afin de contrôler la tension de sortie du convertisseur, à partir de la consigne envoyée par le modèle temps réel.

C. Configuration des régulateurs : prototypage rapide avec dSpace

Le convertisseur DC/DC est un système non linéaire. Le modèle cohérent d'un tel système est difficile à obtenir.

Dans ce cas, afin de régler les régulateur PI et PID, une méthode empirique d'adaptation des coefficients est appliquée. Dans le régulateur PI, il y a 2 coefficients : Kp et Ki à régler, et dans le régulateur PID, 3 coefficients Kp, Ki et Kd ont besoin d'être configurée.

Grâce au système dSpace, tous les coefficients de régulateur peuvent être changés « en ligne » pendant le fonctionnement, l'effet de la modification d'un des coefficients peut être observé tout de suite sur la réponse du système. Cette méthode « en ligne » permet de trouver la valeur correcte des coefficients très rapidement. L'interface de prototypage rapide dans dSpace est illustrée dans Figure 9. Chaque valeur de coefficient de régulateur peut être modifiée individuellement. Leurs effets sur le comportement du convertisseur peuvent en même temps être observés sur les courbes.

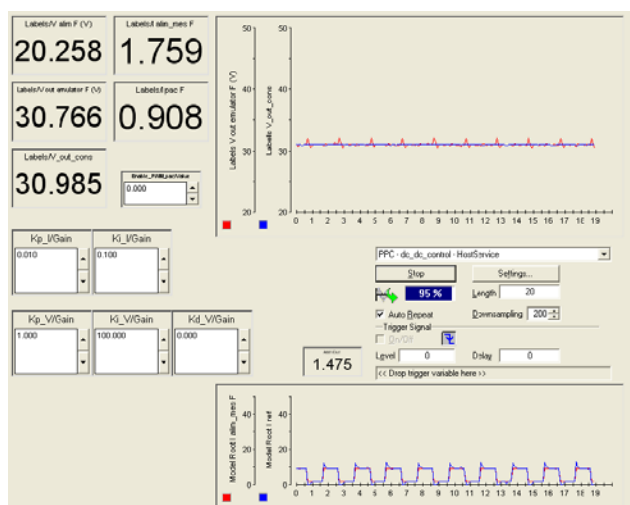


Figure 9 Prototypage rapide des régulateur PI et PID

Tout d'abord seul le régulateur PI de courant est utilisé dans la boucle de contrôle. Étant donné une consigne de courant, le coefficient Kp (proportionnel) est ajusté en premier afin d'obtenir une bonne dynamique de la réponse de courant. Le coefficient Ki (intégral) est ensuite ajusté afin de supprimer l'erreur statique de sortie. Le deuxième régulateur PID en boucle externe est ajouté ensuite quand le régulateur de courant est correctement configuré. La même procédure d'ajustement des coefficients est utilisée pour configurer ce régulateur de tension, le coefficient Kd est ajusté en dernier.

Après plusieurs essais expérimentaux, un ensemble des coefficients des 2 régulateur PI et PID peut être trouvé :

Régulateur de courant (PI)

coefficient	Kp	Ki
valeur	0,01	0,1

TABLEAU 1 COEFFICIENTS EMPIRIQUES DE REGULATEUR DE COURANT

Régulateur de tension (PID)

coefficient	Kp	Ki	Kd
valeur	1,0	100,0	0,005

TABLEAU 2 COEFFICIENTS EMPIRIQUES DE REGULATEUR DE TENSION

D. Résultats des expérimentaux

Dans les essais expérimentaux, le stack émulé est un stack Ballard NEXA 1,2 kW avec 47 cellules qui est alimenté par en air et en hydrogène pur. Le stack est refroidi par air via un ventilateur intégré. La tension de sortie typique du stack est de 25 V à 45 V. Ainsi, le convertisseur « boost » DC/DC est alimenté par une tension constante de 20 V DC au cours des essais expérimentaux.

Pendant les validations expérimentales, plusieurs profils de courant différents sont appliqués à la NEXA via une charge électronique programmable en GPIB. Les données expérimentales peuvent être enregistrées avec le logiciel NEXA OEM.

Ensuite, ces profils de courant et les mêmes conditions d'essai (température ambiante, débit d'air, etc.) sont utilisés comme des variables d'entrées dans le modèle temps réel connectée à l'émulateur (convertisseur DC/DC), afin de reproduire les états physiques de la pile (tension de sortie du stack, température de la cellule, etc.) En parallèle, le convertisseur reçoit, via le bus CAN, la tension du stack de référence envoyée par le modèle. La tension de sortie du convertisseur est donc contrôlée afin de suivre cette tension de référence.

Dans le premier test, un grand échelon de courant de 2 A à 44 A (courant maximal de la pile NEXA) est appliqué au stack réel et à l'émulateur, comme l'illustre la Figure 10.

Les trois tensions, la tension de sortie du stack réelle, la tension prédite par le modèle et la tension de sortie du convertisseur DC/DC de l'émulateur, sont données et comparées dans la Figure 11. D'après les résultats, on peut constater que le modèle prédit la tension totale de 47 cellules NEXA pile avec une bonne précision. La dynamique de la tension de la pile est correctement reproduite par le modèle. En outre, la tension de sortie de l'émulateur suit la prédiction du modèle.

Afin de comparer plus clairement, on agrandi les courbes de ces 3 tensions lors du changement de courant de 2 A à 44 A vers 134 s (Figure 12). Un délai d'environ 1 s entre la prédiction du modèle et le stack réel peut être constaté dans cette figure. Cela est dû au délai de communication de données du bus CAN entre le courant mesuré et la prédiction de tension. Les prédictions du modèle à l'instant t sont basées sur la valeur physique mesurée précédente. Le pas de calcul du modèle en temps réel étant fixé à 1 s, les prédictions du modèle sont retardées de 1 s par rapport aux grandeurs mesurées. Cependant, la tension de sortie du convertisseur et la tension prédite par le modèle montrent une très bonne corrélation, même pour un changement brusque de courant.

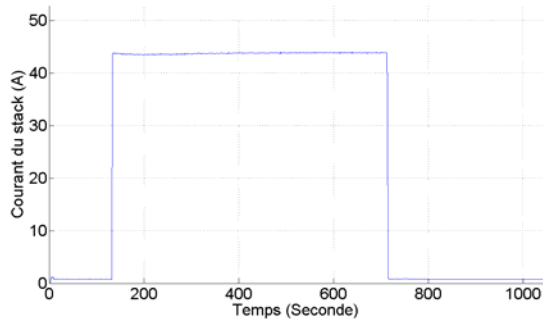


Figure 10 Premier test : profil de courant

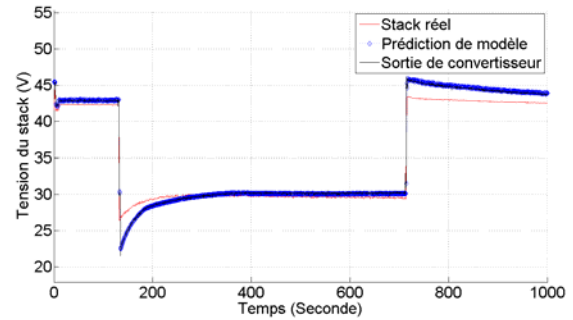


Figure 11 Premier test : tension du stack

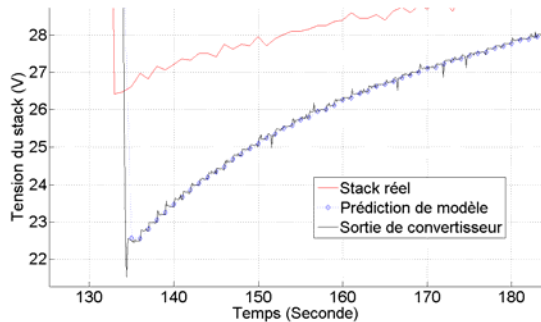


Figure 12 Premier test : tension du stack - zoom sur l'échelon de courant

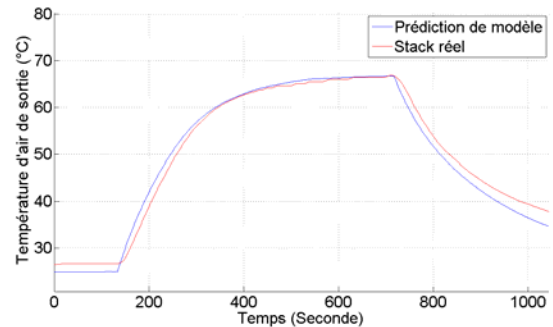


Figure 13 Premier test : Température d'air de sortie

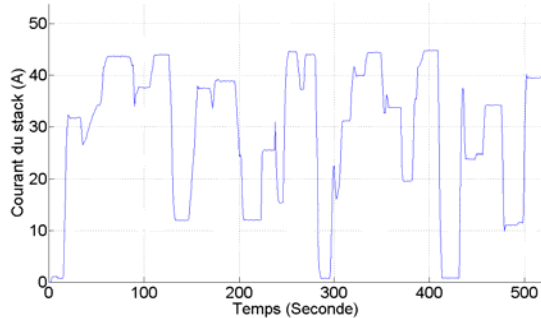


Figure 14 Deuxième test : profil de courant

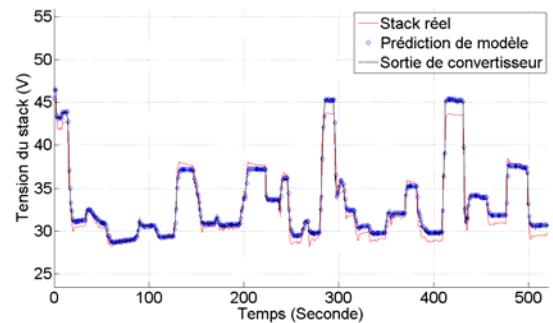


Figure 15 Deuxième test : tension du stack

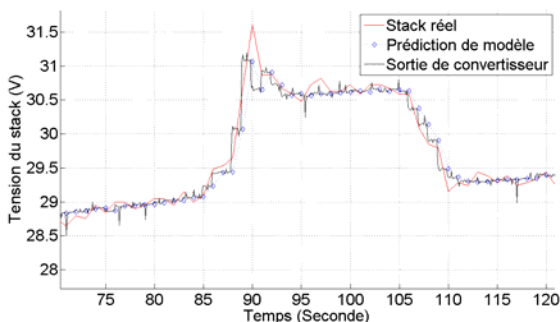


Figure 16 Deuxième test : tension du stack - zoom vers 100 s

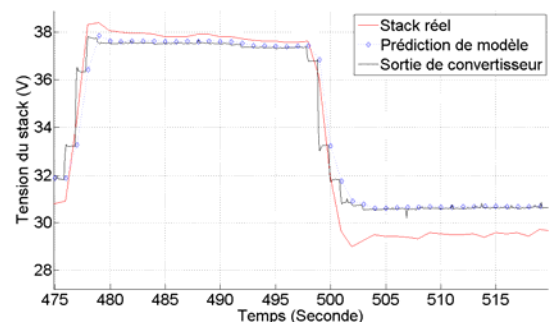


Figure 17 Deuxième test : tension du stack - zoom vers 500 s

Avec la stratégie de commande proposée précédemment pour le convertisseur, seulement quelques petits pics de tension (moins de 0,3 V), peuvent être distingués entre la tension de référence et la sortie du convertisseur.

Il doit être noté que le modèle de la pile à combustible implémenté dans l'émulateur permet également de prédire beaucoup plus d'autre grandeur 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. La Figure 13 donne un exemple de la capacité de prédiction du modèle : la température d'air de sortie. En effet, le stack Ballard NEXA dispose un capteur de température situé à la sortie des canaux cathodiques, afin de surveiller la température de l'air. Cette température d'air de sortie mesurée est ensuite comparée avec la valeur prédite par le modèle. À partir de la figure, on peut clairement voir que la dynamique de la température est bien prédite par le modèle

avec une très bonne précision. Ainsi, le modèle implémenté donne des possibilités d'émulation autres que la partie électrique comme par exemple l'émulation de la partie thermique du stack.

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 14. Pendant 520 s, le courant du stack varie entre 2 A à 44 A pendant plusieurs cycles.

La Figure 15 illustre la tension du stack réel, la tension prédite par le modèle et la tension de sortie du convertisseur. Encore une fois, même avec une variation de courant rapide, une très bonne précision entre ces 3 tensions peut toujours être constatée.

Les Figure 16 et Figure 17 montrent les résultats avec plus de précision sur deux variations de tension au début et à la fin du deuxième test. Même avec une variation rapide de la tension de référence, le convertisseur DC/DC de l'émulateur arrive toujours à reproduire la tension désirée.

E. Simulation de l'interface d'un stack réel : supervision et diagnostic

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

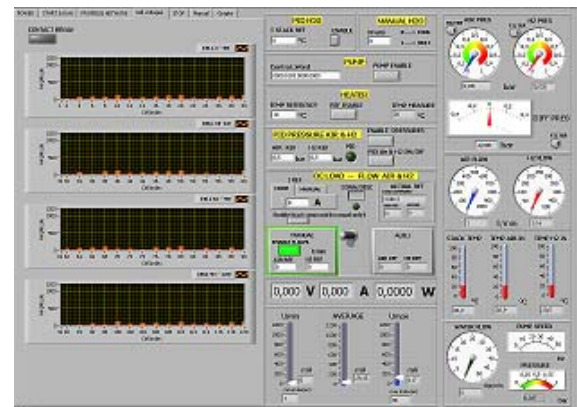
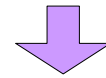
Dans l'exemple de la pile Ballard NEXA 1,2 kW, le constructeur fournit également un logiciel OEM afin de surveiller les grandeurs physiques importantes du stack, tels que le temps de fonctionnement du stack, la température d'air, la tension et le courant du stack, la pression d'hydrogène, etc.

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. L'interface de supervision réelle fournie par Ballard et l'interface de supervision simulée dans l'émulateur sont présentées dans la Figure 18.

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 envoyé par le modèle via le bus CAN. Ainsi, les grandeurs physiques d'état accessible 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 disponibles pour les utilisateurs.

Logiciel de supervision OEM fourni avec la NEXA



Interface de supervision simulée dans l'émulateur

Figure 18 Interface du stack et de l'émulateur

IV. CONCLUSION

Un émulateur physique de pile à combustible a été présenté en introduisant une conception modulaire. Le modèle physique implémenté dans l'émulateur couvre 3 domaines différents : électrique, fluide et thermique. Les résultats du modèle montrent ses capacités à prédire avec une bonne précision les caractéristiques temporelles et spatiales (cellules individuelles) du stack.

Dans un premier temps, un convertisseur DC/DC est implémenté afin d'émuler la partie électrique seule de la PàC. L'émulation des parties fluidiques et thermiques sera réalisée dans les futurs travaux. L'expérimentation réalisée avec le convertisseur « boost » montre que l'émulateur peut correctement reproduire la dynamique de la tension d'une pile réelle. Ce convertisseur est commandé par 2 régulateurs et la méthode de prototypage rapide est également discutée.

La nouvelle architecture modulaire de l'émulateur PàC est introduite dans l'article. Elle permet de faciliter la réalisation de l'émulateur et d'étendre son domaine d'utilisation. Grâce au modèle multi-physique 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.

Grâce au couplage de l'émulation électrique et de la simulation d'une interface de supervision, la partie électrique d'une pile à combustible commerciale peut être entièrement remplacé par l'émulateur.

REFERENCES

- [1] B. Blunier, A. Miraoui, Piles à combustible, Principe, modélisation et applications avec exercices et problèmes corrigés, Technosup, 2007.
- [2] J. M. Corrêa, F. A. Farret, J. R. Gomes, and 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, and 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, and C.-Y. Won, A 3kW Fuel Cell Generation System using the Fuel Cell Simulator, in *IEEE 35th annual power electronics specialists conference (PESC 04)*. 2004. p. 5.
- [5] M. Ordonez, M. T. Iqbal, and 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] G. Marsala, M. Pucci, G. Vitale, M. Cirrincione, and A. Miraoui, A prototype of a fuel cell PEM emulator based on a buck converter. *Applied Energy*, 2009. p. 12.
- [7] N.-A. Parker-Allotey, A. T. Bryant, and P. R. Palmer, The Application Of Fuel Cell Emulation In The Design Of An Electric Vehicle Power train. *IEEE*, 2005: p. 6.
- [8] M. Ordonez, M. T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, A novel fuel cell simulator, in *IEEE 36th annual conference on power electronics specialists (PESC '05)*. 2005. p. 7.
- [9] F. Gao, B. Blunier, A. Miraoui, and A. El-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.
- [10] F. Gao, B. Blunier, A. Miraoui, and A. El-moudni, A multi-physic dynamic 1D model of a proton exchange membrane fuel cell stack for real time simulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, In press, Accepted paper, 2009.
- [11] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. 2e ed. 2003: Wiley.
- [12] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell. *J. Electrochem. Soc*, 1995. 142(1): p. 15.
- [13] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *J. Electrochem. Soc*, 1991. 138(8): p. 9.
- [14] R. O'Hayre, S.-W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, *Fuel cell fundamentals*. 1st ed. 2005: John Wiley & Sons, INC. 409.
- [15] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems*. 2004.
- [16] Incropera, DeWitt, Bergman, and Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6e ed. Vol. 1. 2007: Wiley.