

Etude de l'effet thermique des différentes polarisations dans une pile à combustible de type SOFC

Hocine Ben Moussa^{1*}, Bariza Zitouni¹, Kafia Oulmi²,
Slimane Saighi¹, Bouziane Mahmah³ and Maiouf Belhamel³

¹ Laboratoire d'Etude des Systèmes Energétiques Industriels, 'LESEI', Département de Mécanique,
Université Hadj Lakhdar, Rue Chahid M. El Hadi Boukhrouf, Batna

² Département de Chimie, Université Hadj Lakhdar, Rue Chahid M. El Hadi Boukhrouf, Batna

³ Division Bioénergie et Environnement, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

(reçu le 19 Juillet 2007 – accepté le 25 Septembre 2007)

Résumé - C'est l'enthalpie de formation de l'eau qui est l'origine de la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique dans les piles à combustible. Dans le cas des piles à oxyde solide (SOFC), le carburant et le comburant, respectivement à l'anode et à la cathode, diffusent à travers les deux électrodes vers les interfaces avec l'électrolyte où les réactions chimiques exothermiques et endothermiques auront lieu. L'augmentation de la température, dans les électrodes et l'électrolyte de la pile, est due à la surtension d'activation (transfert de charge), à la surtension ohmique (résistance de polarisation), à la surtension de réaction (chaleur dégagée par la réaction chimique) et à la surtension de diffusion. Le but de cette étude est d'analyser l'effet de ces différentes sources de chaleur dans deux plans distincts, parallèle et perpendiculaire au sens de l'écoulement des gaz. La localisation et la valeur maximale de la température sont étudiées pour une densité de courant imposée. L'équation de l'énergie à deux dimensions est résolue numériquement en utilisant la méthode des volumes finis. Un programme informatique (fortran) est développé localement à cet effet, afin d'obtenir des champs de température pour chaque élément de la pile.

Abstract - It is the enthalpy of formation of the water which is the origin of the chemical conversion energy into electric power in the fuel cells. In the case of the piles with solid oxide (SOFC), the fuel and the combustive one, respectively with the anode and cathode, diffuse through the two electrodes towards the interfaces with the electrolyte where the exothermic and endothermic chemical reactions will take place. The increase in the temperature, in the electrodes and the electrolyte of the pile, is due to the overpressure of activation (transfer of load), with ohmic overpressure (resistance of polarization), with the overpressure of reaction (heat released by the chemical reaction) and with the overpressure of diffusion. The goal of this study is to analyse the effect of these various heat sources in two distinct plans, parallel and perpendicular within the meaning of the gas flow. The localization and the maximum value of the temperature are studied for an imposed density of current. The equation of energy with two dimensions is solved numerically by using the method of finished volumes. A data-processing program (Fortran) is developed locally to this end, in order to obtain fields of temperature for each element of the pile.

Mots clés: SOFC – Température – Surtension – Activation ohmique - Réaction.

1. INTRODUCTION

Les piles à combustible apparaissent comme l'un des moyens de production d'énergie pour le futur, en parallèle des énergies renouvelables, parce qu'elles ne produisent pas de polluants lorsqu'elles sont alimentées par de l'hydrogène pur. Les recherches sont essentiellement concentrées sur le développement de nouveaux matériaux et, pour une moindre part, sur des études de modélisation et développement de systèmes SOFC complet. Les piles SOFC travaillent à haute température, de l'ordre de 600 à 1000°C actuellement. Ces hautes températures peuvent, dans une certaine mesure, être avantageuses car la chaleur dégagée peut être mise à profit pour

* H2SOFC@gmail.com

d'autres systèmes thermiques. Cependant, les contraintes résultantes sur le choix des matériaux (aspects mécaniques, chimiques, etc...) ont limité les développements technologiques et entraînent des coûts élevés. Aussi, l'enjeu majeur des recherches actuelles dans le domaine des SOFC est de diminuer la température de fonctionnement tout en conservant des propriétés optimales. D'où, le but de notre travail est de localiser la valeur maximale de la température en chaque élément de la pile. Pour un développement efficace de ce système électrochimique, une étude thermique tend à mieux comprendre les phénomènes à l'intérieur de la pile et prévoir le comportement sous l'effet des paramètres de fonctionnement, structurel et géométrique. Un grand nombre de paramètres physiques doivent être contrôlés comme les conductivités thermique et électrique, la dimension des électrodes et de l'électrolyte.

Plusieurs travaux antérieurs ont été abordés. Jason LeMasters [1], a développé un code informatique en différence finie, capable d'exécuter des calculs de conception préliminaires pour l'analyse des contraintes thermiques qui peuvent avoir lieu dans les piles à combustible à oxyde solide. Le modèle opère dans les conditions de fonctionnement en état stationnaire. Le code a été minutieusement adapté pour inclure des changements significatifs (structure), des nouvelles sources de chaleur (électrochimiques), des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides. Ce code était comparé au code commercial FLUENT.

Eduardo Hernandez-Pacheco [2], a exposé un modèle thermique électrochimique pour simuler la performance d'une pile à combustible à oxyde solide sous des conditions de fonctionnement et des facteurs géométriques différents. La température, le courant, la distribution du gaz ont été calculés avec le modèle dans différentes régions. Les résultats de modélisation ont montré de bons résultats pour des faibles gradients de température à l'intérieur de la pile.

Srividya Valluru [3], son travail caractérise les contraintes thermiques durant le fonctionnement des piles à combustible à oxyde solide planaire. Les contraintes thermiques sont calculées à partir des champs de température en utilisant le code ANSYS. Une approche d'analyse de contraintes thermiques est mise en oeuvre par un modèle en deux et trois dimensions.

V.T. Srikar *et al.* [4], se sont intéressés aux piles SOFC miniaturisées. Ils considèrent une configuration planaire avec électrolyte supporté et en utilisant un modèle analytique simple. L'analyse des pertes d'énergie en raison de la conduction de chaleur met en évidence l'importance efficace de l'isolement thermique. Cette analyse avec des considérations géométriques, permet l'identification d'une structure qui réduit simultanément au minimum les pertes thermiques et assure une bonne stabilité suffisante.

Jinliang Yuan *et al.* [5], procèdent à une analyse numérique tridimensionnelle du flux de gaz et du transfert thermique dans le canal anodique d'une pile SOFC. Ils montrent que parmi les divers paramètres, la configuration du canal et les propriétés de la couche anodique poreuse ont des effets significatifs tant sur le flux du gaz que sur le transfert thermique.

Masayuki Suzuki *et al.* [6], évoquent une série de simulations numériques pour voir l'influence des transferts couplés (chaleur et masse) avec des réactions électrochimiques dans une pile de type SOFC planaire. Les résultats montrent que les pertes de tension sont principalement dues à la résistance interne dans l'inter connecteur et la surtension d'activation dans les électrodes. La différence de température dans la pile devient plus grande, lorsque la longueur de la cellule augmente. En se basant sur les résultats, ils proposent une conception améliorée de pile, qui utilise un matériau de résistance électrique basse et haute conductivité thermique. La tension calculée de la pile nouvellement conçue est environ 7 à 10 % plus élevée que celle de la pile conventionnelle, de plus, la température maximale est réduite de 10 à 40 K.

L. David *et al.* [7], ont étudié le transfert radiatif dans les électrodes et l'électrolyte, aussi bien que le transfert radiatif entre le carburant et les canaux véhiculant le flux d'oxygène. Les auteurs montrent que le mode de transfert radiatif est prépondérant et étudient les pertes de chaleur par conduction. Ces modes doivent être pris en considération durant la conception de la pile et ont une importance critique sur la gestion efficace thermique de la pile à haute température. Ils ont discuté les effets radiatifs dans les matériaux constituant ce type de pile (SOFC).

Y. Inui *et al.* [8], se penchent sur le problème de la durée de vie de la céramique utilisée dans les piles SOFC et élucident que les très hautes températures provoquent des contraintes thermiques dans la céramique. La distribution de température dans la pile, devrait être gardée aussi constante que possible durant l'opération de charge. En considérant ce fait, les auteurs optimisent numériquement les paramètres d'exploitation comme la température de gaz d'admission.

P.F. van den Oosterkamp [9], mentionne que l'état actuel de l'art du développement des piles à combustible, repose sur la connaissance des phénomènes des transferts thermiques. Aussi, tant dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) que les piles à combustible à oxyde solide, le transfert thermique est une question critique. L'auteur montrera les implications du transfert thermique de la pile à combustible à son architecture totale.

K.J. Daun *et al.* [10], montrent qu'à cause de leurs hautes températures d'exploitation, le transfert thermique radiatif peut jouer un rôle important dans les électrodes et les couches d'électrolyte des piles à combustible à oxyde solide. Ils présentent une caractérisation détaillée des propriétés radiatives et thermo physiques des matériaux composites, qui sont utilisés pour définir un modèle 2D simple incorporant les caractéristiques de transfert thermique de l'électrode et les couches d'électrolyte de la pile SOFC type planaire. Par la suite, l'importance des transferts radiatifs est évaluée en comparant le champ de température obtenu utilisant un modèle de conduction avec celui obtenu en utilisant un modèle couplé conduction/radiation. Contrairement à une certaine littérature publiée, ces résultats montrent que le transfert thermique de radiation a un effet négligeable sur le champ de température dans ces composants et ne doit pas être adapté dans les modèles thermiques complets de SOFC planaire.

2. MODELISATION MATHÉMATIQUE

La surtension totale d'une pile est la somme de la polarisation d'activation, la polarisation de diffusion, la polarisation de réaction et la polarisation ohmique. Ces surtensions peuvent être minimisées grâce aux choix de matériaux, de la géométrie et des paramètres de fonctionnement de la pile (température, pression, débit, etc.).

La polarisation d'activation est un potentiel supplémentaire nécessaire pour réduire la barrière d'énergie de l'étape déterminante de la réaction à une valeur telle que la réaction d'électrode se passe à la vitesse souhaitée. La polarisation de diffusion est importante lorsque la réaction d'électrode est empêchée par les phénomènes de transfert des espèces chimiques. La polarisation de réaction apparaît quand la réaction d'électrode est influencée par une réaction chimique. La résistance rencontrée lors des transports des ions au travers de l'électrolyte, des électrons au travers des électrodes et collecteurs de courant causent une résistance de polarisation. Dans ce travail, on ne s'intéresse pas à la surtension de diffusion.

L'augmentation de la température dans la partie solide de la pile SOFC est due à ces polarisations qui se comportent comme des sources de chaleur. La distribution bidimensionnelle de la température en fonction de ces trois types de source de chaleur a été élucidée selon deux plans, longitudinal (P1) et transversal (P2) (Fig. 1).

2.1 Equation d'énergie

La modélisation mathématique bidimensionnelle et stationnaire du phénomène thermoélectrique dans l'électrolyte et les électrodes suivant les deux plans (P1) et (P2) est exprimée par l'équation d'énergie donnant le champ de température:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \Phi = 0 \quad (1)$$

La conductivité thermique λ est supposée constante dans l'intervalle de température de fonctionnement. La source de chaleur Φ prend différentes expressions suivant le type de source.

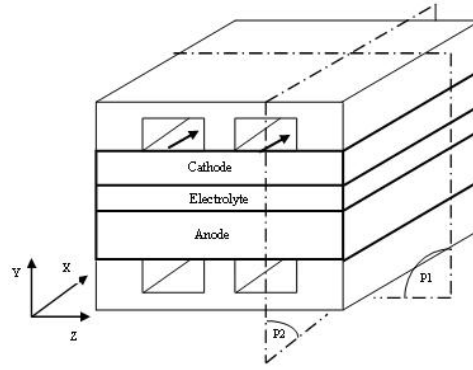


Fig. 1: Domaine de calcul, plans (P1) et (P2)

2.2 Termes sources

2.2.1 Source: effet Joule

La chaleur dégagée par effet Joule dans les trois parties solides de la pile, anode, cathode, et électrolyte est donnée par:

$$\Phi = \frac{j^2}{\sigma} \quad (2)$$

où j est la densité de courant qu'on suppose constante dans toute la pile. Les conductivités électriques de l'anode, l'électrolyte et la cathode sont calculées suivant les expressions données dans le **tableau 1** ci-dessous.

Tableau 1: Lois de la conductivité électrique

		Conductivité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)						
		[6]	[8-10]	[12]	[17]	[19]	[21]	[27]
Anode	$\sigma_{\text{an}} = \frac{95 \cdot 10^6}{T} \cdot e^{-1150/T}$							(3)
Cathode	$\sigma_{\text{ca}} = \frac{42 \cdot 10^6}{T} \cdot e^{-1200/T}$							(4)
Electrolyte	$\sigma_{\text{elec}} = \frac{3.34 \cdot 10^4}{T} \cdot e^{-10300/T}$							(5)

2.2.2 Source: réaction électrochimique

Une partie de l'enthalpie de formation de l'eau qui ne se transforme pas en électricité se transforme en chaleur et ceci aura lieu à l'interface anode/électrolyte (lieu de formation de l'eau). L'expression de cette densité de puissance thermique est donnée par:

$$\Phi = \frac{j T \Delta S}{2 F} \quad (6)$$

où l'entropie est exprimée par:

$$\Delta S = \Delta S_0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_{p_r}}{T} dT \quad (7)$$

$$\Delta C_{p_r} = C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} - C_{p_{\text{H}_2}} - 0.5 C_{p_{\text{O}_2}} \quad (8)$$

La chaleur spécifique C_p de l'eau, de l'hydrogène et de l'oxygène est exprimée en fonction de la température [3].

$$C_p = \sum a_i \left(\frac{T}{1000} \right)^i, \quad (i=1,6) \quad (9)$$

Les coefficients a_i sont présentés dans le **tableau 2**.

Tableau 2: Coefficients a_i de la chaleur spécifique [13]

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
O ₂	34.85	-57.975	203.68	-300.37	231.72	-91.821	14.776
H ₂	21.157	56.036	-150.55	199.29	-136.15	46.903	-6.4725
H ₂ O	37.373	-41.205	146.05	-217.08	181.54	-79.409	14.015

2.2.3 Source: pertes d'activation

Les pertes d'activation sont d'autres sources d'énergie thermique qui provoquent une élévation de température et prennent naissance dans les électrodes.

Les expressions des pertes d'activation à l'anode et à la cathode sont exprimées suivant l'approche de Tafel:

$$\Phi = \eta \cdot j \quad (10)$$

$$\eta = \frac{(R \cdot T)}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \quad (11)$$

Une recherche bibliographique exhaustive sur la densité de courant d'échange j_0 est entamée. L'expression j_0 choisie, pour nos calculs se trouve dans le **tableau 3**.

Tableau 3: Expression de la densité de courant d'échange

Lois de cinétique électrochimique		Valeurs	Ref.
$j_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{(p_{ref})} \right) \cdot \left(\frac{P_{H_2O}}{(p_{ref})} \right) \cdot \exp(-E_{an} / R \cdot T)$			[36] [28] [33]
$j_{0,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{(p_{ref})} \right) \cdot \exp(-E_{ca} / R \cdot T)$			
	$\gamma_{an} = 5.5 \cdot 10^8 \text{ (Am}^{-2}\text{)}, \gamma_{ca} = 7 \cdot 10^8 \text{ (Am}^{-2}\text{)}$ $E_{act,an} = 100 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}, E_{act,ca} = 120 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}$		
$j_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{(p_{ref})} \right) \cdot \left(\frac{P_{H_2O}}{(p_{ref})} \right) \cdot \exp(-E_{an} / R \cdot T)$			[16]
$j_{0,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{(p_{ref})} \right) \cdot \exp(-E_{ca} / R \cdot T)$			
	$\gamma_{an} = 5.5 \cdot 10^{10} \text{ (Am}^{-2}\text{)}, \gamma_{ca} = 7 \cdot 10^9 \text{ (Am}^{-2}\text{)}$ $E_{act,an} = 120 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}, E_{act,ca} = 120 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}$		
$j_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{(p_{ref})} \right) \cdot \left(\frac{P_{H_2O}}{(p_{ref})} \right)^m \cdot \exp(-E_{an} / R \cdot T_{an})$			[31]
$j_{0,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{(p_{ref})} \right)^{0.25} \cdot \exp(-E_{ca} / R \cdot T_c)$			
	$\gamma_{an} = 1.956 \cdot 10^{10} \text{ (Am}^{-2}\text{)}, \gamma_{ca} = 1.026 \cdot 10^{10} \text{ (Am}^{-2}\text{)}$ $E_{act,an} = 140 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}, E_{act,ca} = 149 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}$		
$j_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{(p_{0,fuel})} \right) \cdot \left(\frac{P_{H_2O}}{(p_{0,fuel})} \right) \cdot \exp(-E_{an} / R \cdot T)$			[34]
$j_{0,ca} = 11 \cdot 10^6 \cdot \exp[(1/T) - (1/1123)]$			
	$E_{act,an} = 200 \cdot 10^3 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}$		

$$\begin{aligned}
j_{0,an} &= 2FA'_a \left(P_{H_2} / P^\circ \right)^{0.5} \cdot \left(P_{H_2O} / P^\circ \right)^{0.5} \cdot \exp(-E_{act,a} / (R \cdot T_a)) \\
j_{0,ca} &= 4FA'_c \left(P_{O_2} / P^\circ \right)^{0.5} \cdot \exp(-E_{act,c} / (R \cdot T_c)) \\
A'_a &= 7.8 \cdot 10^9 \text{ (mol.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}), A'_c = 5.6 \cdot 10^9 \text{ (mol.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \\
E_{act,an} &= 94 \cdot 10^3 \text{ (J.mol}^{-1}), E_{act,ca} = 116 \cdot 10^3 \text{ (J.mol}^{-1})
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
j_{0,an} &= K_{an} \cdot (R \cdot T / (n_{an} \cdot F)) \cdot \exp[-E_{an} / R \cdot T] \\
j_{0,ca} &= K_{ca} \cdot (R \cdot T / (n_{ca} \cdot F)) \cdot \exp[-E_{ca} / R \cdot T] \\
K_{ca} &= 2.35 \cdot 10^{11} \text{ (S.m}^{-2}), K_{an} = 6.54 \cdot 10^{11} \text{ (S.m}^{-2}) \\
E_{ca} &= 137 \cdot 10^3 \text{ (J.mol}^{-1}), E_{an} = 140 \cdot 10^3 \text{ (J.mol}^{-1}) \\
&(* \text{ Utilisé dans ce modèle})
\end{aligned} \tag{12}^*$$

$$\begin{aligned}
j_{0,an} &= K_a \cdot (P_{H_2}^{inter})^{0.5} \cdot (R \cdot T / (2 \cdot F)) \cdot \exp(-E_{an} / R \cdot T) \\
j_{0,ca} &= K_c \cdot (R \cdot T / (2 \cdot F)) \cdot \exp(-E_{ca} / R \cdot T) \\
K_c &= 7 \cdot 10^{11} \text{ (S.m}^{-1} \cdot \text{bar}^{0.5}), K_a = 3.2 \cdot 10^{13} \text{ (S.m}^{-1} \cdot \text{bar}^{0.5}) \\
E_{ca} &= 130.9 \cdot 10^3 \text{ (J.mol}^{-1}), E_{an} = 129.4 \cdot 10^4 \text{ (J.mol}^{-1})
\end{aligned} \tag{32}$$

3. RESOLUTION NUMERIQUE

La résolution numérique de l'équation d'énergie est faite par la méthode des volumes finis. La partie solide de la pile (anode, électrolyte et la cathode) a été discrétisée suivant les deux plans (P1) et (P2) (Fig. 2). Le schéma de discrétisation opté est le schéma centré. Un programme informatique (en langage Fortran) est développé pour l'obtention du champ de température. L'équation d'énergie (1) exprimée dans un volume de contrôle par la méthode des volumes finis prend la forme suivante:

$$\int_{n \cdot w}^s \int_{n \cdot w}^e \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Phi \right) \cdot dx \cdot dy = 0 \tag{12}$$

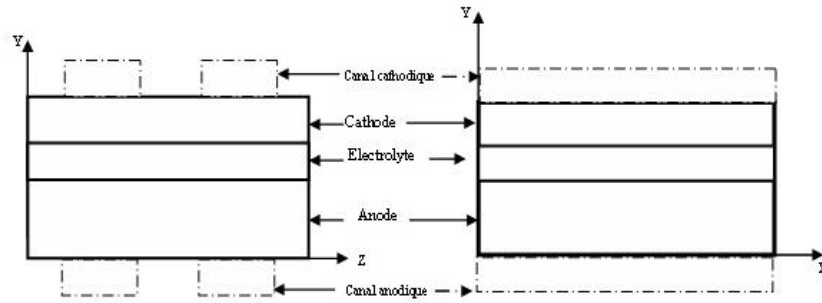


Fig. 2: Coupe de la pile suivant les plans (P1) et (P2)

Les conditions aux limites sont du type température imposée au contact des électrodes avec les gaz et flux nul dans le reste du domaine de calcul.

Tableau 4: Données des valeurs des paramètres [3, 4] et [28]

Valeur des paramètres			
$F = 96000 \text{ C/mol}$	$E_{an} = 1.4 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$	$\Delta S_0 = -44.4 \text{ (J/mol.K)}$	$K_{an} = 6.54 \cdot 10^{11} \Omega^{-1} \text{m}^{-2}$
$R = 6.318 \text{ J/mol.K}$	$E_{ca} = 1.37 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$	$\lambda = 2 \text{ W/m.K}$	$K_{ca} = 2.35 \cdot 10^{11} \Omega^{-1} \text{m}^{-2}$

Tableau 5: Epaisseurs de la pile

Anode	Electrolyte	Cathode
300 μm	100 μm	200 μm

4. RESULTATS

Les résultats de ce modèle électrothermique montrent l'effet des trois types de source de chaleur: effet Joule, chaleur due à la réaction électrochimique et celle due aux pertes d'activation. L'augmentation de température, dans la pile, est analysée dans deux plans différents. Le premier plan est perpendiculaire au sens de l'écoulement des gaz dans les canaux (P1), le second est parallèle au sens de l'écoulement (P2). Le tableau 6 regroupe les valeurs maximales de la température dans chaque plan et sous l'effet de chaque type de source de chaleur.

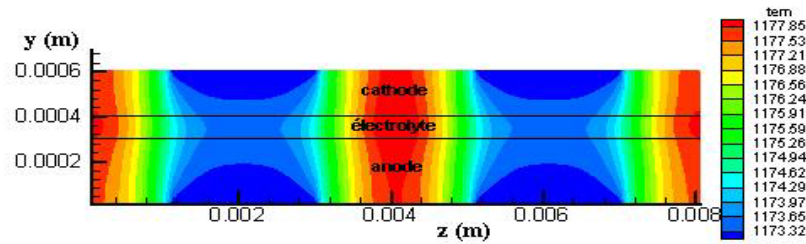
Tableau 6: Valeurs des températures maximales

Sources de chaleur	T (K) ($j = 20000 \text{ Am}^{-2}$)	
Effet Joule	Plan (P1)	1177.85
	Plan (P2)	1173.49
Pertes d'activation	Plan (P1)	1174.33
	Plan (P2)	1173.05
Réaction chimique	Plan (P1)	1173.63
	Plan (P2)	1173.00

4.1 Champ de température dans le plan perpendiculaire

a- Cas: Effet Joule

Dans ce plan, les températures les plus élevées sont localisées dans les endroits situés en contact avec l'inter connecteur. Cette région se comporte comme une résistance à la propagation de la chaleur. Par contre, dans la partie solide de la pile située entre deux canaux, (côté anodique et côté cathodique), l'élévation de température s'amoindrit et ceci peut s'expliquer par l'évacuation de la chaleur à travers les gaz qui s'écoulent dans les canaux anodiques et cathodiques. En parcourant la partie solide de l'anode vers la cathode, le maximum de température est situé dans l'électrolyte. Ce type de source dégage la plus grande quantité de chaleur par rapport aux autres sources, (Fig. 3).

**Fig. 3:** Champ de température sous l'effet Joule

b- Cas: surtensions d'activation

La température maximale atteinte est de 1174.33 K au niveau de la cathode. Les plus hautes températures sont localisées dans la cathode et aux endroits situés en contact avec l'inter connecteur, (Fig. 4).

c- Cas: réaction électrochimique

Sous l'effet de ce type de source de chaleur, la grande valeur de la température est située à l'interface anode/électrolyte. C'est là où la formation de l'eau aura lieu, cette augmentation de température est due à la chaleur dégagée lors de ce processus, (Fig. 5).

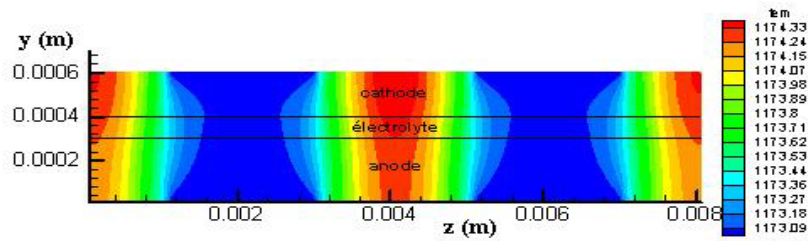


Fig. 4: Champ de température sous l'effet des surtensions d'activation

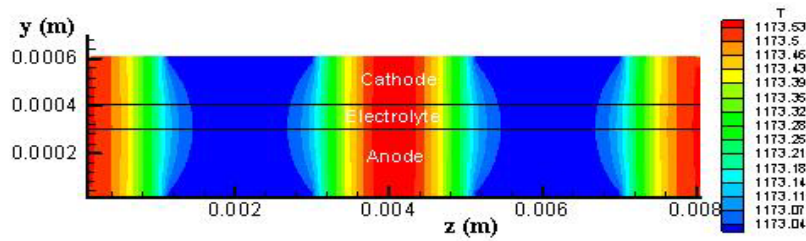


Fig. 5: Champ de température sous l'effet de la réaction électrochimique

4.2 Champ de température dans le plan parallèle

Dans le plan parallèle au sens de l'écoulement, les températures deviennent inférieures à celles du plan perpendiculaire et ceci toujours sous l'effet de tous les types de sources. La température maximale se trouve toujours, selon le type de source de chaleur, dans l'interface anode/électrolyte dû à la réaction chimique, et dans l'électrolyte dû à la surtension ohmique. Cette valeur maximale, dû aux surtensions d'activation, se situe dans la cathode, (Fig. 6 et 7).

On remarque dans la figure 8, l'absence d'augmentation de température dû à la réaction chimique.

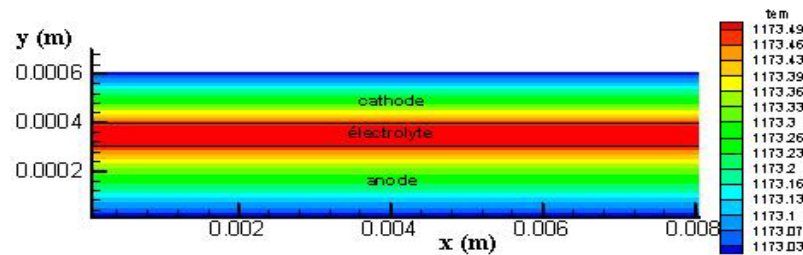


Fig. 6: Champ de température sous l'effet Joule

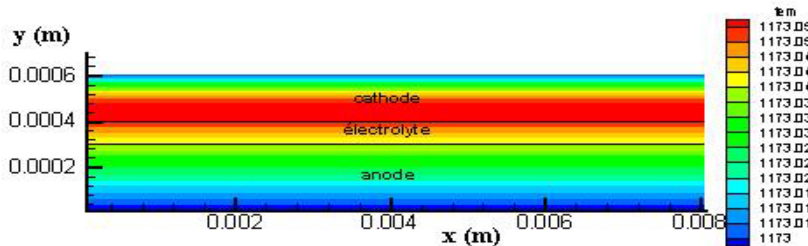


Fig. 7: Champ de température dû aux surtensions d'activation

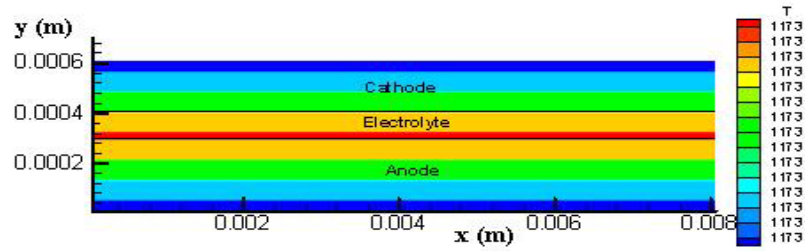


Fig. 8: Champ de température dû à la réaction chimique

5. CONCLUSION

Les résultats de ce simple modèle thermoélectrique montrent l'effet des trois types de source de chaleur: source ohmique, source électrochimique et celle de la polarisation d'activation. L'élévation de la température dans la partie solide d'une cellule de la pile SOFC est montrée dans deux plans différents, un plan parallèle et un plan perpendiculaire au sens de l'écoulement de gaz dans les canaux. Les valeurs maximales de température sont localisées suivant la nature de source de chaleur. Ces dites valeurs sont repérées dans l'interface anode/électrolyte sous l'effet de la chaleur dû à la réaction chimique, dans l'électrolyte sous l'effet Joule et sous l'effet de chaleur dû aux surtensions d'activation, elles se situent dans la cathode. On observe dans les deux plans que les températures maximales se trouvent dans les mêmes endroits, sauf que ces valeurs sont moins faibles dans le plan parallèle que dans le plan perpendiculaire.

L'élévation maximale de température est causée par la source de chaleur due à l'effet Joule. La réaction chimique provoque la moins faible augmentation de température. Les plus hautes valeurs de températures sont localisées dans les endroits situés au contact de l'inter connecteur, cette région se comporte comme une barrière à la propagation de la chaleur. Par contre, la partie solide de la pile située entre deux canaux, (coté anodique et coté cathodique), présente moins d'élévation de température, à cause de l'évacuation de la chaleur à travers les gaz qui s'écoulent dans les canaux.

NOMENCLATURE

T	: Température, K
j	: Densité de courant, $A.m^{-2}$
j_0	: Densité de courant limite, $A.m^{-2}$
R	: Constante des gaz parfaits, $J.mol^{-1} K^{-1}$
η	: Pertes de tension, Volt
F	: Constante de Faraday, $C.K^{-1}$
σ	: Conductivité électrique, $\Omega^{-1}m^{-1}$
C_p	: Capacité thermique molaire, $J.mol^{-1}.K^{-1}$
a	: Coefficient
ΔH_r^0	: Enthalpie, $J.mol^{-1}$
ΔS	: Entropie, $J.mol^{-1} K^{-1}$
λ	: Conductivité thermique, $W.m^{-1} K^{-1}$
Φ	: Source de chaleur, $W m^{-3}$

REFERENCES

- [1] J. LeMasters, 'Thermal Stress Analysis of Lca-Based Solid Oxide Fuel Cells', Master of Science, Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004.

- [2] E. Hernandez-Pacheco, '*Electro-Thermal Model for a Solid Oxide Fuel Cell*', Thesis of PhD, Grand Forks, North Dakota, 2004.
- [3] S. Valluru, '*Steady State Thermal Stress Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Solid Oxide Fuel Cells*', Master of Science, Mechanical Engineering, West Virginia University, 2005.
- [4] V.T. Srikar, K.T. Turner, T.Y. Andrew and S.M. Spearing, '*Structural Design Considerations for Micro Machined Solid-Oxide Fuel Cells*', Journal of Power Sources, Vol. 125, N°1-2, pp. 62 – 69, 2004.
- [5] J. Yuan, M. Rokni and B. Sundén, '*Three-Dimensional Computational Analysis of Gas and Heat Transport Phenomena in Ducts Relevant for Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, N°5, pp. 809 – 821, 2003.
- [6] M. Suzuki, K. Fukagata, N. Shikazono and N. Kasagi, '*Numerical Analysis of Temperature and Potential Distributions in Planar-Type SOFC*', Thermal and Fluids Engineering Conference, The 6th KSME-JSME. KJ.01, Jeju, Korea, 3.20 – 3.23, 2005.
- [7] D.L. Damm and A.G. Fedorov, '*Radiation Heat Transfer in SOFC Materials and Components*', Journal of Power Sources, Vol. 143, N°1-2, pp. 158 – 165, 2005.
- [8] Y. Inui, N. Ito, T. Nakajima and A. Urata, '*Analytical Investigation on Cell Temperature Control Method of Planar Solid Oxide Fuel Cell*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°15-16, pp. 2319 – 2328, 2006.
- [9] P.F. van den Oosterkamp, '*Critical Issues in Heat Transfer for Fuel Cell Systems*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°20, pp. 3552 – 3561, 2006.
- [10] K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu and G.J. Smallwood, '*Radiation Heat Transfer in Planar SOFC Electrolytes*', Journal of Power Sources, Vol. 157, N°1, pp. 302 – 313, 2005.
- [11] P. Mandin, C. Bernay, S. Tran-Dac, A. Broto, D. Abes and M. Cassir, '*SOFC Modelling and Numerical Simulation of Performance*', Journal Fuel Cells, Vol. 06, N°1, pp. 71 – 78, 2006.
- [12] P. Aguiar, C.S. Adjiman and N.P. Brandon, '*Anode Supported Intermediate Temperature Direct Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell, I: Model Based Study State Performance*', Journal of Power Sources, Vol. 138, N°1-2, pp. 120 – 136, 2004.
- [13] Yixin Lu, '*Numerical Simulation of a Flat Tube High Power Density Solid Oxide Fuel Cell*', PhD Thesis, 2005.
- [14] S. Raju Pakalapati, '*A New Reduced Order Model for Solid Oxide Fuel Cell*', PhD Thesis, Mechanical Engineering, Morgantown, West Virginia, 2006.
- [15] K.C. Wincewicz and S. Cooper, '*Taxonomies of SOFC Material and Manufacturing Alternatives*', Journal of Power Sources, Vol. 140, N°2, pp. 280 – 296, 2005.
- [16] D. Sánchez, R. Chacartegui, A. Munoz and T. Sánchez, '*Thermal and Electrochemical Model of Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cells with Tubular Geometry*', Journal of Power Sources, Vol. 160, N°2, pp. 1074 – 1087, 2006.
- [17] S. Kakaça, A. Pramuanjaroenkij and X.Y. Zhou, '*A Review of Numerical Modelling of Solid Oxide Fuel Cells*', International Journal of Hydrogen Energy, Received 9 Nov. 2006, accepted 18 Nov. 2006.
- [18] T. Aloui and K. Halouani, '*Analytical Modelling of Polarizations in a Solid Oxide Fuel Cell Using Biomass Syngas Product as Fuel*', Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 731 – 737, 2007.
- [19] Y. Shi, N. Cai and C. Li, '*Numerical Modelling of an Anode-Supported SOFC Button Cell Considering Anodic Surface Diffusion*', Journal of Power Sources, Vol. 164, N°2, pp. 639 – 648, 2007.
- [20] M.M. Hussain, X. Li and I. Dincer, '*Mathematical Modelling of Planar Solid Oxide Fuel Cells*', Journal of Power Sources, Vol. 161, N°2, pp. 1012 – 1022, 2006.
- [21] Y. Ji, K. Yuan, J.N. Chunga and Y.C. Chen, '*Effects of Transport Scale on Heat/Mass Transfer and Performance Optimization for Solid Oxide Fuel Cells*', Journal of Power Sources, Vol. 161, N°1, pp. 380 – 391, 2006.
- [22] X. Zhang, G. Li, J. Li and Z. Feng, '*Numerical Study on Electric Characteristics of Solid Oxide Fuel Cells*', Energy Conversion and Management, Vol. 48, N°3, pp. 977 – 989, 2007.
- [23] C. Rochaix, '*Electrochimie, Thermodynamique, Cinétique*', Ed. Nathan, 1996.
- [24] A.V. Virkar, J.Chen, C.W. Tanner and J.W. Kim, '*The Role of Electrode Microstructure on Activation and Concentration Polarizations in Solid Oxide Fuel Cells*', Solid State Ionics, Vol. 131, pp. 189 – 198, 2000.

- [25] S.H. Chan, K.A. Khor, Z.T. Xia, 'A Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness', *Journal of Power Sources*, Vol. 93, N°1-2, pp. 130 – 140, 2001.
- [26] E. Hernández-Pacheco, D. Singh, P.N. Hutton, N. Patel and M.D. Mann, 'A Macro-Level Model for Determining the Performance Characteristics of Solid Oxide Fuel Cells', *Journal of Power Sources*, Vol. 138, N°1-2, pp. 174 – 186, 2004.
- [27] J. Palsson, 'Thermodynamic Modelling and Performance of Combined Solid Oxid Fuel Cell and Gas Turbines Gas', Doctoral Thesis, Lund University Sweden, 2002.
- [28] E. Hernández-Pacheco, M.D. Mann, P.N. Hutton, D. Singh and K.E. Martin, 'A Cell-Level Model for a Solid Oxide Fuel Cell Operated with Syngas from a Gasification Process', *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, N°11, pp. 1221 – 1233, 2005.
- [29] H. Yakabe and T. Sakurai, '3D Simulation on the Current Path in Planar SOFCs', *Solid State Ionics*, Vol. 174, pp. 295 – 302, 2004.
- [30] J.J. Hwang, C.K. Chen, D.Y. Lai, 'Computational Analysis of Species Transport and Electrochemical Characteristics of a MOLB-Type SOFC', *Journal of Power Sources*, Vol. 140, N°2, pp. 235 – 242, 2005.
- [31] B. Thorud, 'Dynamic Modelling and Characterisation of a Solid Oxide Fuel Cell Integrated in a Gas Turbine Cycle'. Doctoral Thesis, Norwegian University, 2005.
- [32] R.T. Leah, N.P. Brandon and P. Aguiar, 'Modelling of Cells, Stacks and Systems Based Around Metal-Supported Planar IT-SOFC Cells with CGO Electrolytes Operating at 500-600 °C', *Journal of Power Sources*, Vol. 145, N°2, pp. 336 – 352, 2005.
- [33] R. Bove, P. Lunghi and N.M. Sammes, 'SOFC Mathematic Model for Systems Simulations. Part One: From a Micro-Detailed to Macro-Black-Box Model', *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, N°2, pp. 181 – 187, 2005.
- [34] T. Ota, M. Koyama, C.J. Wen, K. Yamada and H. Takahashi, 'Object-Based Modelling of SOFC System: Dynamic Behaviour of Micro-Tube SOFC', *Journal of Power Sources*, Vol. 118, N°1-2, pp. 430 – 439, 2003.
- [35] S.H. Chan, H.K. Ho and Y. Tian, 'Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plan', *Journal of Power Sources*, Vol. 109, N°1, pp. 111 – 120, 2002.
- [36] P. Costamagna, A. Selimovic, M. Del Borghi and G. Agnew, 'Electrochemical Model of the Integrated Planar Solid Oxide Fuel Cell (IP-SOFC)', *Chemical Engineering Journal*, Vol. 102, pp. 61 – 69, 2004.
- [37] J.R. Ferguson, J.M. Fiard and R. Herbin, 'Three-Dimensional Numerical Simulation for Various Geometries of Solid Oxide Fuel Cells', *Journal of Power Sources*, Vol. 58, N°2, pp. 109 – 122, 1996.
- [38] D. Larrain, 'Solid Oxide Fuel Cell Stack Simulation and Optimization, Including Experimental Validation and Transient Behavior', Thesis, EPFL, Lausanne, 2005.