

## Effet de températures d'hydrogène sur le gradient thermique d'une SOFC planaire à anode supportée

H. Abdenebi<sup>1</sup>, B. Zitouni<sup>1\*</sup>, H. Ben Moussa<sup>2†</sup> et D. Haddad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Etudes des Systèmes Energétiques Industriels, 'LESEI'  
Département de Mécanique. Faculté des Sciences de l'Ingénieur.  
Université El Hadj Lakhdar, Rue Chahid Boukhlouf Mohamed El Hadi, B.P. 499, Batna, Algérie

<sup>2</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'  
B.P. 88, Z.I. Garaa Taam, Ghardaïa, Algérie  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, 'CDER'  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(reçu le 28 Juillet 2010 – accepté le 25 Mars 2011)

**Résumé** - Ce présent travail a pour objectif la visualiser du champ thermique dans les composants solides et poreux d'une pile à oxyde solide planaire à anode supportée (SOFC\_P à AS). L'intérêt est porté à la localisation des hautes températures. Les paramètres étudiés sont: les valeurs de température des gaz, hydrogène et air, alimentant la pile et la source totale de chaleur. Ces dernières sont dues aux surtensions électriques; ohmiques, activation et concentration et au phénomène exothermique lors de la formation de l'eau. Cette étude nécessite un couplage des phénomènes de transport de masse, d'énergie en plus de la loi d'écoulement gouvernée par la loi de Darcy, ainsi que la tension de la pile. Un modèle mathématique bidimensionnel est présenté. La méthode adoptée pour résoudre numériquement un tel problème est celle des différences finies. Le champ de température dans toute la pile (les deux interconnexions, la cathode, l'anode et l'électrolyte) a été obtenu en développant un programme informatique (Fortran).

**Abstract** - The aim of the present work is to visualize the thermal field in solid and porous components of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Anode Supported (SOFC\_P to AS). The interest is the high temperatures location. The parameters studied are: the gas temperature values; hydrogen and air, supplied stack and the total heat source. These are due to electrical overpotential; ohmic, activation and concentration and the exothermic phenomenon during the water formation. This study requires a coupling of mass and energy transport phenomena and more law flow governed by Darcy's law and the cell voltage. A two-dimensional mathematical model is presented. The method adopted to solve numerically such a problem is the finite differences. The complete cell temperature field (the two interconnections, the cathode, anode and electrolyte) was obtained by developing a computer program (Fortran).

**Mots clés:** SOFC - Température d'hydrogène - Anode supportée - Sources de chaleur – bidimensionnel.

### 1. INTRODUCTION

Dans la pile à combustible du type SOFC, les sources de chaleur existantes sont les suivantes. La source de chaleur due aux surtensions ohmiques, qui naît de la résistance des matériaux au mouvement électrique de la charge [1, 2], [4], [6]. La source de chaleur due aux surtensions d'activation liée à la cinétique des réactions

---

\* zitounibariza@yahoo.fr

† H2SOFC@gmail.com

d'oxydoréduction dans les électrodes [4]. La source de chaleur due aux surtensions de concentration [1], celle-ci est liée à la diffusion des espèces dans les électrodes poreuses. Enfin, la source de chaleur due à la réaction chimique. Elle est liée à la formation d'eau [1], [8, 9].

Il est bien connu que les hautes températures améliorent la performance de cette pile à combustible SOFC. Plusieurs valeurs de température sont attribuées aux deux gaz suivant les auteurs, mêmes valeurs ( $T_{H_2} = T_{air}$ ) ou valeurs différentes ( $T_{H_2} > T_{air}$ ).

Le comportement thermique de la pile vis-à-vis de ces valeurs de températures de gaz est l'objectif visé de ce travail à travers une étude numérique bidimensionnelle des champs thermiques dans une pile à combustible type SOFC planaire à anode supporté (SOFC\_P à AS) en absence ou en présence de la source totale de chaleur.

L'étude bibliographique nous a permis de faire un choix du modèle physique et mathématique régissant le phénomène de transfert thermique et massique dans les différentes parties de cette pile à combustible (interconnexion cathodique, cathode, électrolyte, anode et interconnexion anodique).

Le modèle mathématique porte plus d'intérêt aux différentes valeurs de température des gaz, ainsi que à la totalité des sources de chaleur existantes au sein de la pile.

## 2. MODELE PHYSIQUE ET MATHEMATIQUE

Le modèle physique étudié est représenté dans la figure 1. Il s'agit d'une pile à combustible type SOFC planaire à anode supportée alimentée par de l'air et de l'hydrogène en co-courant. Le champ thermique dans une SOFC\_P à AS est régi par les équations de base, telles que l'équation de conservation de masse, de conservation d'espèces et de conservation d'énergie. Pour la quantité de mouvement, dans les électrodes poreuses, l'écoulement est modélisé par la loi de Darcy.

Les équations utilisées pour la description du phénomène de transfert de chaleur dans les composants de la pile SOFC, c'est-à-dire anode, cathode, électrolyte interconnexion anodique et interconnexion cathodique, peuvent aussi être modélisées par l'équation générale de transport.

$$\text{div}(\varepsilon \rho U \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad } \Phi) + S_{\Phi}$$

Où,  $\Phi$  est une variable générale,  $\Gamma_{\Phi}$  le coefficient de diffusion et  $S_{\Phi}$  le terme source.

- Dans le cas de l'équation de continuité

$$\Phi = 1, \Gamma_{\Phi} = 0 \text{ et } S_{\Phi} = 0.$$

- Pour l'équation de conservation d'espèce

$$\Phi = X_i \text{ avec } i = (H_2, O_2, H_2O) \text{ et } \Gamma_{\Phi} = \rho D_{(eff,j)} \text{ avec } j = (an, cat).$$

- Dans le cas de l'équation d'énergie

$$\Phi = T \text{ et } \Gamma_{\Phi} = \lambda_j \text{ avec } j = (\text{éle}, an, cat, int).$$

- Pour l'équation de pression

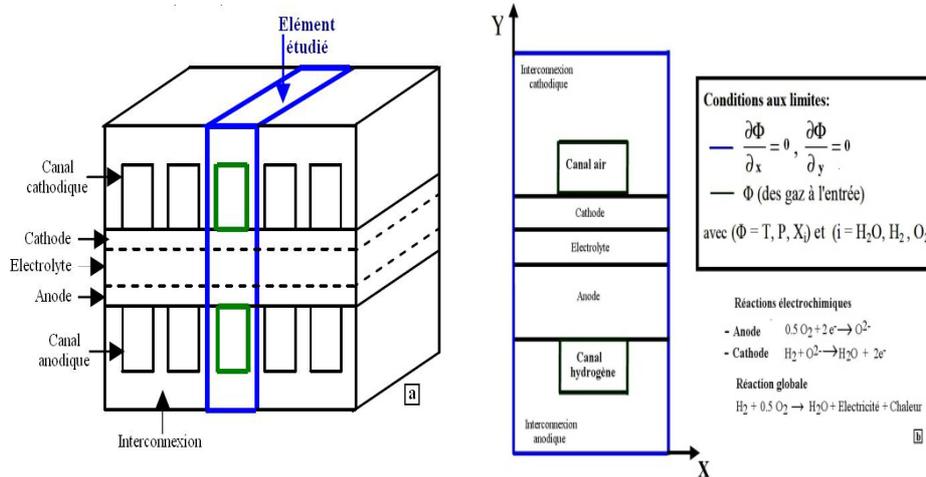
$$\Phi = P, \Gamma_{\Phi} = \frac{\kappa \times \rho}{\mu} \text{ et } S_{\Phi} = 0.$$

Les sources de chaleur prises en considération dans ce travail sont: la source de chaleur due aux surtensions ohmiques, la source de chaleur due aux surtensions de concentrations, la source de chaleur due aux surtensions d'activation et la source de chaleur due à la réaction chimique.

L'expression du terme source de chaleur dans l'équation d'énergie est représentée, suivant l'endroit de la pile à combustible, dans le **Tableau 1**. Les expressions de chaque type de source de chaleur sont données dans le **Tableau 2**.

Les données des propriétés physiques des composants de la cellule, de l'air et de l'hydrogène sont illustrées dans les **Tableau 3 - 5**.

Les conditions aux limites sont mentionnées dans la figure 1.



a- Schéma d'une cellule SOFC planaire

b- Conditions aux limites

Fig. 1: Modèle physique

**Tableau 1:** Sources de chaleur et de masse et leurs localisations

Terme source $S_\Phi$	Localisation
<b>Equation d'énergie</b>	
$S_T = S_{ohm} + S_{con} + S_{act} + S_{chim}$	$S_{ohm}$ : Anode, cathode et électrolyte
<b>Equation de conservation des espèces</b>	
$S_{X_j} = \pm \frac{M_j}{2F} \times i$	$S_{con}$ : Anode et cathode
$j = H_2, H_2O, O_2$	$S_{act}$ : aux interfaces anode/cathode et cathode / électrolyte
	$S_{chim}$ : à l'interface anode / électrolyte
	Anode: $j = H_2, j = H_2O$
	Interface anode/électrolyte: $j = H_2O$
	Cathode: $j = O_2$

**Tableau 2:** Expressions des sources de chaleur

Types de source de chaleur	Expressions de la source de chaleur	Expressions de: $\eta$ et $Q_{\text{chim}}$	Ref
Source de chaleur due aux surtensions ohmiques	$S_{\text{ohm}} = \frac{\eta_{\text{ohm}}}{\delta} \times i$	$\eta_{\text{ohm}} = \frac{e_j}{\sigma_j} \times i$ avec ( $j = \text{éle, an, cat}$ )	[2]
			[3]
			[4]
		( $\sigma_j$ ): (Tableau 5)	[10]
Source de chaleur due aux surtensions d'activation	$S_{\text{act},i} = \frac{\eta_{\text{act},i}}{\delta} \times i$ Avec ( $i = \text{an, cat}$ )	$\eta_{\text{act},i} = \frac{R \times T}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln \left( \frac{i}{i_{0,i}} \right)$	[11]
		$i_{0,i} = \gamma_i \cdot \left( \frac{R \times T}{2F} \right) \times \exp \left( \frac{-E_i}{R \times T} \right)$	[12]
		( $E_i$ ) et ( $\gamma_i$ ): (Tableau 4)	
Source de chaleur due aux surtensions de concentration	$S_{\text{con},i} = \frac{\eta_{\text{con},i}}{\delta} \times i$	$\eta_{\text{con,an}} = -\frac{R \times T}{2 \cdot F} \times \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{l,\text{an}}} \right)$ $+ \frac{R \times T}{2 \cdot F} \times \ln \left( 1 + \frac{P_{\text{H}_2,\text{car}}}{P_{\text{H}_2\text{O,car}}} \frac{i}{i_{l,\text{an}}} \right)$	
		$\eta_{\text{con,cat}} = -\frac{R \times T}{4 \cdot F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{l,\text{cat}}} \right)$	[5]
		$i_{l,\text{an}} = \frac{2F \times P_{\text{H}_2,\text{cat}} \times D_{\text{eff,an}}}{R \times T \times e_{\text{an}}}$	
		$i_{l,\text{cat}} = \frac{4F \times P_{\text{O}_2,\text{an}} \times D_{\text{eff,cat}}}{\left( (P - P_{\text{O}_2,\text{an}}) / P \right) \times R \times T \times e_{\text{an}}}$	
Source de chaleur due à la réaction chimique	$S_{\text{chim}} = \frac{Q_{\text{chim}}}{2F} \times \frac{i}{\delta}$	$Q_{\text{chim}} = -\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}} - 2F \times V$	
		$\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}} = -(240506 + 7.3835 T)$	
		$V = E_{\text{ideal}} - \text{pertes}$ $= E_{\text{ideal}} - (\eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{con}} + \eta_{\text{act}})$	[8]
		$E_{\text{ideal}}(T) = E^0(T) - \frac{R \times T}{n_e F} \times \ln \left[ \frac{X_{\text{H}_2\text{O}}}{X_{\text{H}_2} \times X_{\text{O}_2}^{0.5}} \right]$	[11]
		$E^0(T) = 1.2723 - 2.7645 \times 10^{-4} T$	

**Tableau 3:** Composition et propriétés de l'air et de l'hydrogène [1], [7]

Propriétés	Air	Hydrogène
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.399	0.255
$C_p$ (J/kg.K)	1.129	1.673
$\mu$ (kg/m.s)	$2.3 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$
$X_{O_2}$	0.8	0
$X_{H_2}$	0	0.9
$X_{H_2O}$	0.2	0.1
P (bar)	2	2

**Tableau 4:** Propriétés physiques des parties solides [2], [5]

Paramètres	Anode	Electrolyte	Cathode	Interconnexions
$\varepsilon$ (%)	50	/	50	/
D (m <sup>2</sup> /s)	$3.5 \times 10^{-5}$		$7.3 \times 10^{-6}$	
$\kappa$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-12}$	/	$10^{-12}$	/
$\lambda$ (W/m.K)	6.2	2.7	9.6	9.6
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	3030	5160	3310	8030
$C_p$ (J/kg.K)	595	606	573	502
$\gamma$ (1/ $\Omega$ .m <sup>2</sup> )	$6.54 \times 10^{11}$	/	$2.35 \times 10^{11}$	/
E (J/mole)	$137 \times 10^3$	/	$137 \times 10^3$	/
e (mm)	0.2	0.05	0.05	0.3

**Tableau 5:** Conductivités électriques

Composants du SOFC	$\sigma$ (1/ $\Omega$ cm)
Electrolyte	$\sigma_{\text{éle}} = 3.34 \times 10^4 \exp(-10300/T)$
Cathode	$\sigma_{\text{cat}} = \frac{4.2 \times 10^7}{T} \exp(-1200/T)$
Anode	$\sigma_{\text{an}} = \frac{9.5 \times 10^7}{T} \exp(-1150/T)$

### 3. RESULTATS

Les champs de températures calculés résultent d'un modèle de calcul appliqué dans un plan perpendiculaire au sens de l'écoulement des gaz, l'hydrogène et l'air, dans les canaux d'une cellule SOFC standard ((NiYSZ), (YSZ), (LSM)), planaire à anode supportée (SOFC\_P à AS).

L'analyse du champ de température est faite avec une densité de courant égale à  $20000 \text{ (A/m}^2\text{)}$ . C'est en fonction de l'effet des valeurs des températures d'entrée des gaz en présence et en absence de la source totale de la chaleur que les champs thermiques sont visualisés.

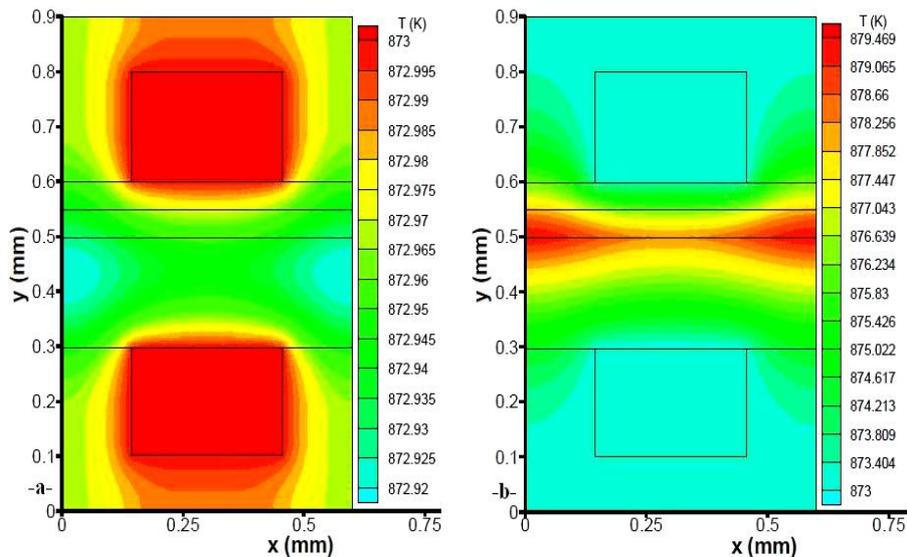
Sachant que les températures d'air ou d'hydrogène ( $T_{H_2} / T_{air}$ ) sont différentes et de valeur très élevées, de l'ordre de  $873 - 1173 \text{ K}$ , notre étude englobe deux cas. En premier lieu, la SOFC fonctionne aux mêmes valeurs de ( $T_{H_2} = T_{air}$ ). Dans un second cas, elle fonctionne à des températures de gaz différentes ( $T_{H_2} > T_{air}$ ) dont la différence entre ces dernières est de  $10$  et  $270 \text{ K}$ .

#### 4.1 SOFC\_P à AS fonctionnant aux mêmes températures de gaz

En absence de la source de chaleur totale, la figure 2 (a- et c-) montre que quelque soient les valeurs de température attribuées aux gaz;  $873$  ou  $1173 \text{ K}$ , l'allure de la distribution de température demeure la même et la température maximale se localise dans les canaux des gaz.

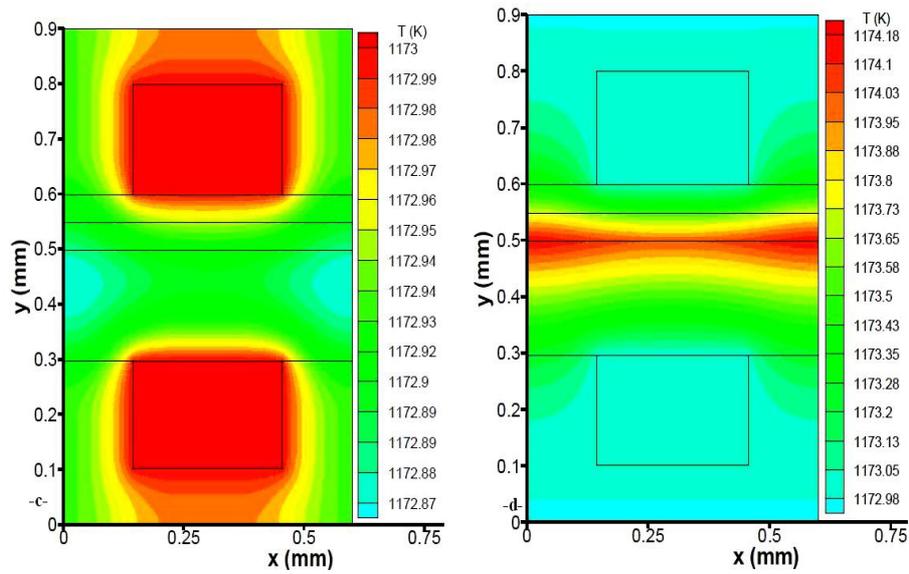
Sous l'effet de la source totale de chaleur, les sources de chaleur dues aux surtensions électriques et la source de chaleur due à la réaction chimique, l'élévation maximale de la température dans une SOFC\_P à AS se trouve au niveau de l'interface anode/électrolyte et de part et d'autre de ses extrémités.

Aux températures de gaz égales à  $873 \text{ K}$ , l'élévation maximale de température est de  $6.469 \text{ K}$ . Toutefois à des températures plus élevées;  $1173 \text{ K}$ , cette valeur s'atténue (Fig. 2 (b- et d-)).



a- Absence source totale de chaleur

b- Présence source totale de chaleur



c- Absence source totale de chaleur

d- Présence source totale de chaleur

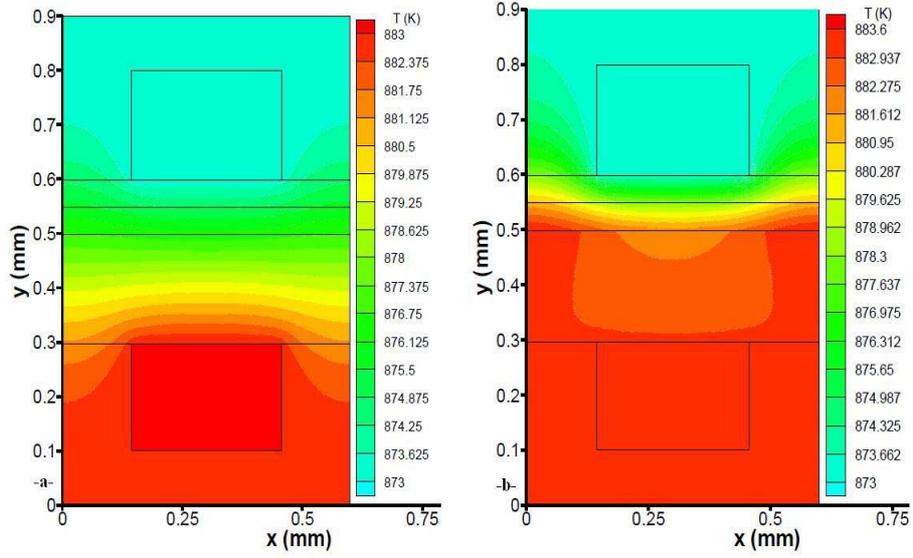
Fig. 2: Champ de température d'une SOFC\_P à AS; ( $T_{H_2} = T_{air}$ )

#### 4.2 SOFC\_P à AS fonctionnant aux températures de gaz inégales ( $T_{H_2} > T_{air}$ )

En absence de la source totale de la chaleur, la pile présente une même allure pour le champ de température quelque soit les valeurs de ( $T_{H_2} / T_{air}$ ). La chaleur se propage du canal anodique vers les autres parties de la pile. Une partie de l'anode en contact du canal anodique atteint la température maximale  $T_{max}$ . Cette dernière se localise aussi dans la totalité de l'interconnexion anodique (Fig. 3 (a- et c-)).

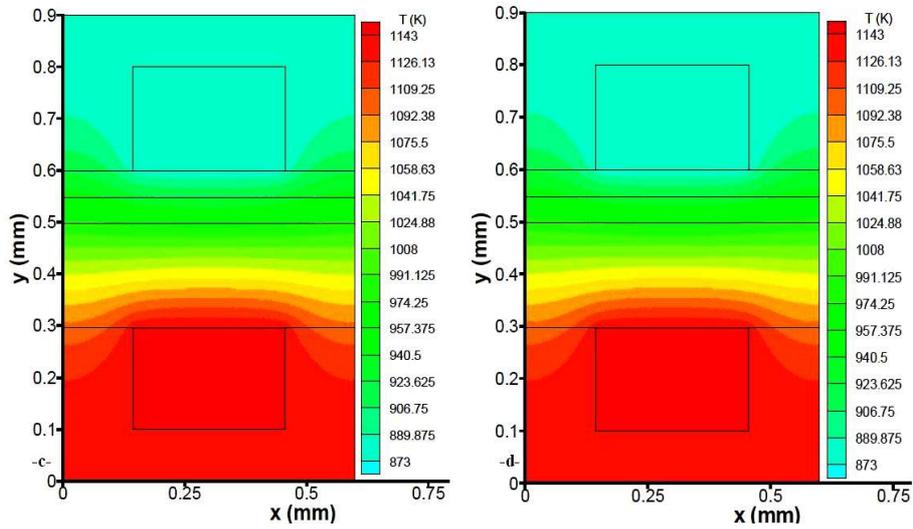
En présence de la source totale de la chaleur, aux basses valeurs de ( $T_{H_2} / T_{air}$ ), 883/873 K, une élévation d'ordre de 0.6 K a été remarquée (Fig. 3 (b-)). La température maximale se localise dans la totalité de l'interconnexions anodique et dans la totalité de l'anode. Une évacuation de la chaleur à travers le canal cathodique a été remarquée.

La distribution de température dans les parties solides d'une pile SOFC alimentée par des gaz dont la température d'hydrogène est plus élevées; 1143/873 K, a la même allure que celle en absence de la source totale de la chaleur et aucune élévation de température a été remarqué (Fig. 3c- et Fig. 3d-).



a- Absence source totale de chaleur

b- Présence source totale de chaleur



c- Absence source totale de chaleur

d- Présence source totale de chaleur

Fig. 3: Champ de température pour une cellule SOFC\_P à AS; ( $T_{H_2} > T_{air}$ )

#### 4. CONCLUSION

L'effet des valeurs de températures des gaz alimentant la pile à combustible SOFC; hydrogène/air est étudié pour des cas de l'égalité ( $T_{H_2} = T_{air}$ ) et de l'inégalité

( $T_{H_2} > T_{air}$ ) des températures de gaz et en présence ou en absence de la source totale de chaleur présentée au sein de la pile SOFC.

Dans le cas où  $T_{H_2} = T_{air}$ : En absence de la source totale de chaleur, les températures maximales sont les températures des gaz. Elles sont localisées dans les canaux. De ces derniers se propage la chaleur vers les composantes de la pile. Le champ de température au sein de la pile à une allure inchangeable quelque soit la température de fonctionnement. L'effet de la source totale de chaleur est remarquable à une température de fonctionnement moins élevée. Aux températures de gaz plus élevées, l'effet de la source totale de chaleur devient négligeable.

Dans le cas où  $T_{H_2} > T_{air}$ : En absence de la source totale de chaleur, les résultats montrent que le champ thermique est le même pour une cellule SOFC\_P à AS fonctionnant à des températures de gaz dont une différence est de 10 et 270 K entre  $T_{H_2}$  et  $T_{air}$  respectivement.

La totalité de l'interconnexion anodique ainsi que la totalité de l'anode sont portées à la température maximale. La propagation de la chaleur se fait vers le côté cathodique de la pile. L'effet de la source totale de chaleur est négligeable. L'élévation est maximale à des températures de fonctionnement moins élevées.

## NOMENCLATURE

$C_p$	Chaleur spécifique du fluide à pression constante, J/kg.K	$E^0$	Potentiel réversible standard, V
$D_{eff}$	Coefficient de diffusion effectif, $m^2.s$	$E_{idéal}$	Potentiel idéal d'une cellule, V
$e$	Epaisseur de chaque composant, $\mu m$	$E_i$	Energie d'activation de l'anode et de la cathode, J/mole
$F$	Constante de Faraday, C/mole	$i_0$	Densité de courant d'échange, $Am^2$
$n_e$	Nombre d'électrons	$i$	Densité de courant, $Am^2$
$P$	Pression, Pa	$p_k$	Pression partielle, espèce k, Pa
$R$	Constante des gaz parfaits	$S$	Source de chaleur, $W.m^3$
$T$	Température, K	$V$	Tension de cellule, V
$U$	Vitesse, m/s	$\Delta H$	Variation d'enthalpie, J/mole
$X$	Fraction massique des espèces ( $i = H_2, H_2O, O_2$ )		
$\delta$	Epaisseur de la zone où la chaleur est produite, mm	$\sigma$	Conductivité électrique, $\Omega^{-1} m^{-1}$
$\gamma$	Coefficient préexponentiel, $A/m^2$	$\alpha$	Coefficient de transfert de charge
$\lambda$	Conductivité thermique, W/m.K	$\rho$	Masse volumique, $kg/m^3$
$\varepsilon$	Porosité, %	$\kappa$	Perméabilité, $m^2$
	<b>Indices</b>	$\mu$	Viscosité, kg/m.s
an cat	Anode, Cathode	éle, T	Electrolyte, Thermique
act, Ohm;	Activation; con, concentration; ohm, Ohm;	chi, tot	Chimique; l, Limite; totale

## REFERENCES

- [1] Y. Lu, L. Schaefer and P. Li, 'Numerical Study of a Flat-Tube High Power Density Solid Oxide Fuel Cell. Part I. Heat/Mass Transfer and Fluid Flow', *Journal of Power Sources*, Vol. 140, N°2, pp. 331 – 339, 2005.
- [2] Qiusheng Wang, Lijun Li and Cheng Wang, *Numerical Study of Thermoelectric Characteristics of a Planar Solid Oxide Fuel Cell with Direct Internal Reforming of Methane*, *Journal of Power Sources*, Vol. 186, N°2, pp. 399 – 407, 2009.
- [3] J. Ferguson, J. 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 – 222, 1996.
- [4] A. Chaisantikulwat, C. Diaz-Goano and E.S. Meadows, 'Dynamic Modeling and Control of Planar Anode supported Solid Oxide Fuel Cell', *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 32, N°10, pp. 2365 – 2381, 2008.
- [5] A. Pramuanjaroenkij, S. Kakac and X.Y. Zhou, 'Mathematical Analysis of Planar Solid Oxide Fuel Cells', *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, N°10, pp. 2547 – 2565, 2008.
- [6] X. Zhang, Jun Li, G. Li and Z. Feng, 'Numerical Study on the Thermal Characteristics in a Tubular Solid Oxide Fuel Cell with Indirect Internal Reformer', *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, N°4, pp. 805 – 814, 2009.
- [7] 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 – 310, 2006.
- [8] M. Chnani, 'Modélisation Macroscopique de Piles PEFC et SOFC pour l'Etude de leur couplage', Thèse de Doctorat. Institut FEMTO-ST- Département ENISYS UMR CNRS 6174 –Université de France-Comté, ENSMM – Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 2008.
- [9] P.W. Li and M.K. Chyu, 'Simulation of the Chemical/Electrochemical Reactions and Heat/Mass Transfer for a Tubular SOFC in a Stack', *Journal of Power Sources*, Vol. 124, N°2, pp. 487 – 498, 2003.
- [10] S.R. Pakalapati, 'A New Reduced Order Model for Solid Oxide Fuel Cells', PhD Thesis, West Virginia, 2006.
- [11] Y.W. Kang, Jun Li, G.Y. Cao, H.Y. Tu, Jian Li and Jie Yang, 'Dynamic Temperature Modeling of an SOFC Using Least Squares Support Vector Machines', *Journal of Power Sources*, Vol. 179, N°2, pp. 683 – 692, 2008.
- [12] A.C. Burt, I.B. Celik, R.S. Gemmen and A.V. Smirnov, 'A Numerical Study of Cell-To-Cell Variations in a SOFC Stack', *Journal of Power Sources*, Vol. 126, N°1-2, pp. 76 – 87, 2003.