

# Gradient Thermique dans une SOFC: Effet de Températures d'Hydrogène et d'Air

Ben Moussa Hocine, Zitouni Bariza, Zeroual Mostefa, Haddad Djamel, Abdessemed Soumia, Abdenebi Hafsia

**Abstract**—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).

**Index Terms**—SOFC, température d'hydrogène, anode supportée, sources de chaleur, bidimensionnel.

## I. INTRODUCTION

Dans la pile à combustible du type SOFC, les sources de chaleur existantes sont: La source de chaleur due aux surtensions ohmiques qui naissent de la résistance des matériaux au mouvement électrique de la charge [1], [2], [4] et [6]. La source de chaleur due aux surtensions d'activation liée à la cinétique des réactions 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] et [9].

H. Ben Moussa. Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER). Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Ghardaïa. Algérie ([H2SOFC@gmail.com](mailto:H2SOFC@gmail.com)).

B. Zitouni, M. Zeroual, D. Haddad, S. Abdessemed and H. Abdenebi, Laboratoire d'étude des systèmes énergétiques industriels (LESEI). Faculté des sciences. Université de Batna. ([zitounibariza@yahoo.fr](mailto:zitounibariza@yahoo.fr))

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 ( $T_{H_2} = T_{air}$ ) ou différentes valeurs ( $T_{H_2} > T_{air}$ ). 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 supportée (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 existants au sein de la pile.

## II. MODELE PHYSIQUE ET MATHEMATIQUE

Le Modèle physique étudié est représenté dans (Figure.1). Il s'agit d'une 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 modelé par la loi de Darcy.

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

$$\text{div}(\epsilon\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\Phi) + S_\phi \quad (1)$$

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.

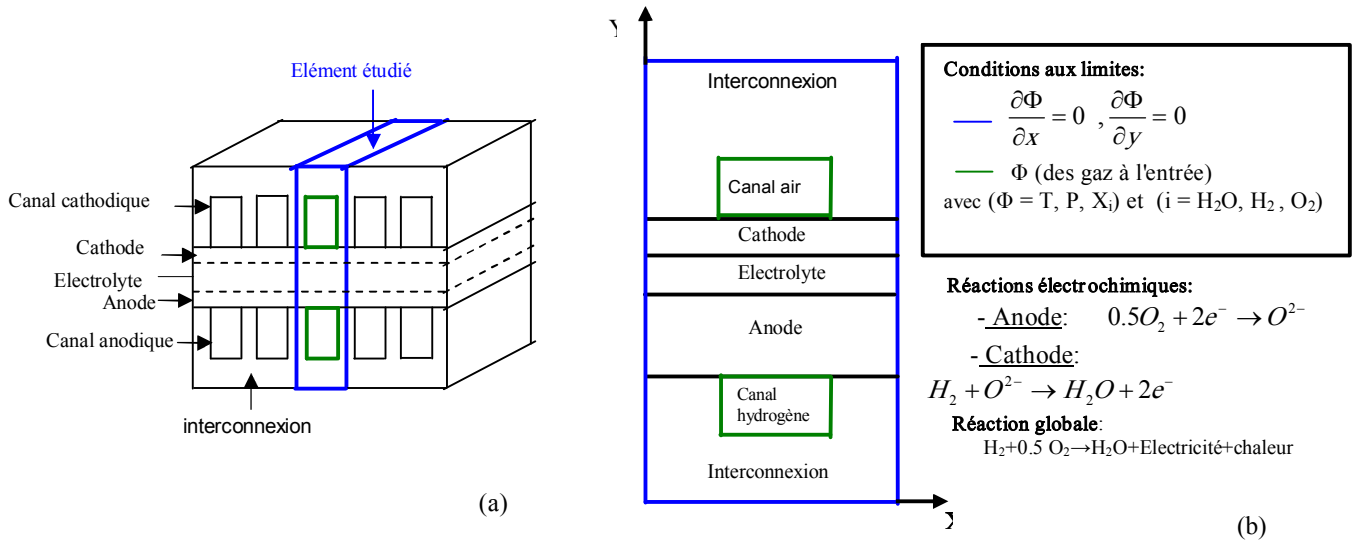


Figure. 1 Modèle physique. (a): Schéma d'une cellule SOFC planaire, (b): Conditions aux limites

TABLEAU I: EXPRESSIONS DES SOURCES DE CHALEUR

Types de source de chaleur	Expressions de la source de chaleur	$\eta$ et $Q_{chim}$	Références
Source de chaleur due aux surtensions	$S_{ohm} = \frac{\eta_{ohm}}{\delta} \cdot j$	$\eta_{ohm} = \frac{e_j \cdot j}{\sigma_j}$ avec $j = (\text{éle, an, cat})$	[2], [3], [4] [10]
Source de chaleur due aux surtensions d'activation	$S_{act,i} = \frac{\eta_{act,i}}{\delta} \cdot j$ avec $(i = \text{an, cat})$	$\eta_{act,i} = \frac{RT}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln \left( \frac{j}{i_{0,i}} \right)$ $i_{0,i} = \gamma_i \left( \frac{RT}{2 \cdot F} \right) \cdot \exp \left( \frac{-E_i}{RT} \right)$	[11] et [12]
Source de chaleur due aux surtensions de concentration	$S_{con,i} = \frac{\eta_{con,i}}{\delta} \cdot j$	$\eta_{con,an} = -\frac{RT}{2 \cdot F} \ln \left( 1 - \frac{j}{i_{i,an}} \right)$ $+\frac{RT}{2 \cdot F} \ln \left( 1 + \frac{P_{H_2,car}}{P_{H_2O,car}} \cdot \frac{j}{i_{i,an}} \right)$ $\eta_{con,cat} = -\frac{RT}{4 \cdot F} \ln \left( 1 - \frac{j}{i_{i,cat}} \right)$ $i_{i,an} = \frac{2 \cdot F \cdot P_{H_2,car} \cdot D_{eff,an}}{RT \cdot e_{an}}$ $i_{i,cat} = \frac{4 \cdot F \cdot P_{O_2,a} \cdot D_{eff,cat}}{\left( (P - P_{O_2,a}) / P \right) RT \cdot e_{cat}}$	[5]
Source de chaleur due à la réaction chimique	$S_{chim} = \frac{Q_{chim}}{2F} \cdot \frac{j}{\delta}$	$Q_{chim} = -\Delta H_{f, H_2O} - 2FV$ $\Delta H_{f, H_2O} = -(240506 + 7.3835T)$ $V = E_{idéal} - \text{pertes}$ $= E_{idéal} - (\eta_{ohm} + \eta_{con} + \eta_{act})$ $E_{idéal}(T) = E^0(T) - \frac{RT}{n \cdot F} \ln \left[ \frac{X_{H_2O}}{X_{H_2} \cdot X_{O_2}^{0.5}} \right]$ $E^0(T) = 1.2723 - 2.7645 \times 10^{-4} T$	[8] et [11]

TABLEAU II: SOURCES DE CHALEUR ET DE MASSE ET LEURS LOCALISATIONS

Terme source $S_{\Phi}$		Localisation
Équation d'énergie	$S_T = S_{ohm} + S_{con} + S_{act} + S_{chim}$	$S_{ohm}$ : l'anode, la cathode et l'électrolyte. $S_{con}$ : l'anode et la cathode. $S_{act}$ : aux interfaces anode/électrolyte et cathode/électrolyte. $S_{chim}$ : à l'interface anode/électrolyte.
Équation de conservation des espèces	$S_{X_j} = \pm \frac{M_j}{2F} \cdot j$ Avec $j = H_2, H_2O$ et $O_2$	Anode: $j = H_2, j = H_2O$ interface anode/électrolyte: $j = H_2O$ cathode: $j = O_2$

TABLEAU III: PROPRIETES PHYSIQUES DES PARTIES SOLIDES [2] ET [5]

Paramètre	Anode	électrolyte	cathode	interconnexions
$\epsilon$ %	50	/	50	/
$D$ [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]	$3.5 \cdot 10^{-5}$	/	$7.3 \cdot 10^{-6}$	/
$K$ [ $m^2$ ]	$10^{-12}$	/	$10^{-12}$	/
$\lambda$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	6.2	2.7	9.6	9.6
$\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	3030	5160	3310	8030
$C_p$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	595	606	573	502
$\gamma$ [ $\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$ ]	$6.54 \cdot 10^{11}$	/	$2.35 \cdot 10^{11}$	/
$E$ [ $J \cdot mole^{-1}$ ]	$140 \cdot 10^3$	/	$137 \cdot 10^3$	/
$e$ [mm]	0.2	0.05	0.05	0.3

### III. 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 873-1173K, 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 K.

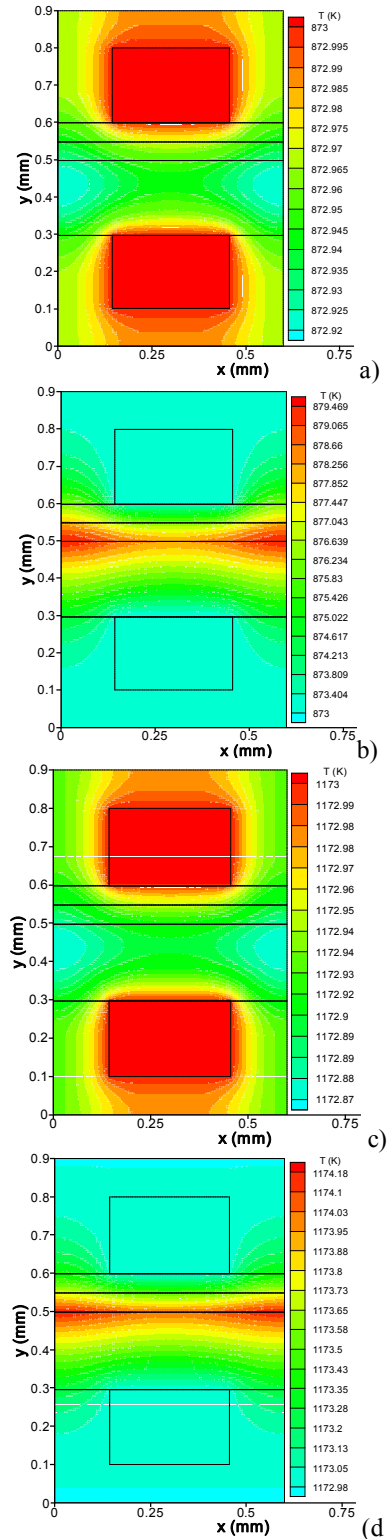
#### a) Fonctionnant aux mêmes températures de gaz

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 K, l'allure de la distribution de température demeure la même et la température maximale se localise dans les canaux des gaz.

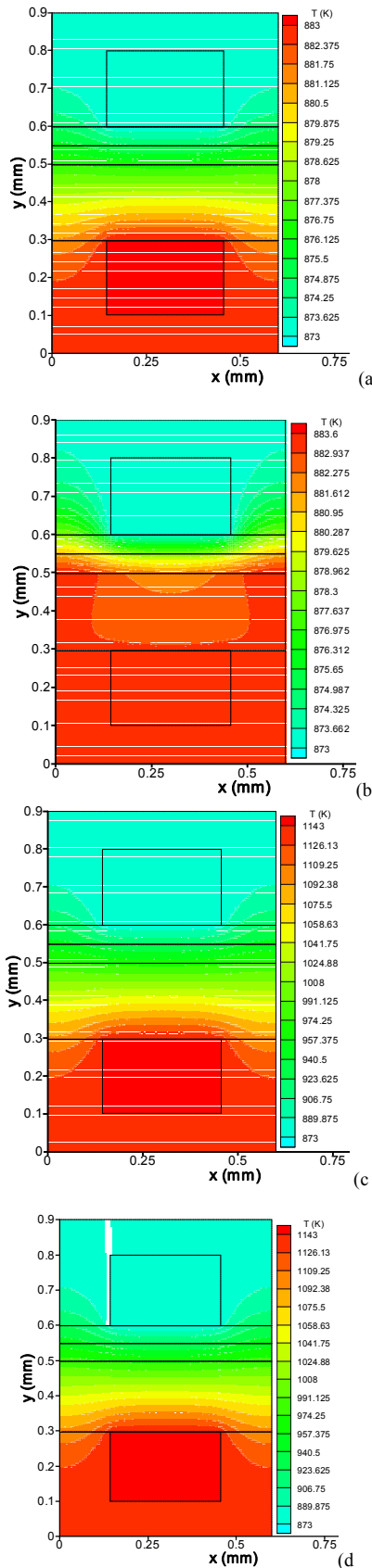
Sous l'effet de la source totale de chaleur; les sources de chaleur dues aux surtensions électriques et la source de chaleur due à la réaction chimique, l'élévation maximale de la température dans une SOFC\_P à AS se trouve au niveau de l'interface anode/électrolyte et de part et d'autre de ses extrémités. Aux températures de gaz égales à 873 K, l'élévation maximale de température est de 6.469 K. Toute fois à des températures plus élevées; 1173 K, cette valeur s'atténue" Fig.2 (b) et (d) ".

#### b) 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 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. 3.c et d"



**Figure. 2** Champ de température d'une SOFC\_P à AS; ( $T_{H_2} = T_{air}$ )  
(a) et (c): Absence de la source totale de chaleur  
(b) et (d): Présence de la source totale de chaleur



**Figure. 3** Champ de température pour une cellule SOFC à AS:  $T_{H_2} > T_{air}$   
 (a) et (c): Absence de la source totale de chaleur  
 (b) et (d): Présence de la source totale de chaleur

## 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 inchangée 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.

## REFERENCES

- [1] Yixin Lu, Laura Schaefer, Peiwen 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 140 (2005) 331-339
- [2] Qiusheng Wang, Lijun Li, Cheng Wang. *Numerical Study of Thermoelectric Characteristics of a Planar Solid Oxide Fuel Cell with Direct Internal Reforming of Methane*. Journal of Power Sources 186, Issue 2 (2009) 399-407
- [3] Ferguson, J., Fiard, J., Herbin, R.. *Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells*. Journal of Power Sources 58 (1996) 109-222.
- [4] Chaisantikulwat, C. Diaz-Goano, E.S. Meadows. *Dynamic modeling and control of planar anode-supported solid oxide fuel cell*. Computers and Chemical Engineering 32 (2008) 2365-2381.
- [5] Anchasa Pramuanjaroenkij, Sadik Kakac, Xiang Yang Zhou. *Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells*. International Journal Of Hydrogen Energy 33 (2008) 2547-2565.
- [6] Xiongwen Zhang, Jun Li, Guojun Li, Zhenping Feng. *Numerical study on the thermal characteristics in a tubular solid oxide fuel cell with indirect internal reformer*. International Journal of Thermal Sciences 48, Issue 4 (2009) 805-814
- [7] K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu, G.J. Smallwood. *Radiation heat transfer in planar SOFC electrolytes*. Journal of Power Sources 157 (2006) 302-310.
- [8] Moussa CHNANI. *Modélisation Macroscopique de piles PEFC et SOFC pour l'étude de leur couplage*. Thèse de doctorat. Institut FEMTO-ST- Département ENISYS UMR CNRS 6174 - UFC - ENSMM - UTBM. 2008.
- [9] Pei-Wen Li, Minking K. Chyu. *Simulation of the chemical/electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack*. Journal of Power Sources 124 (2003) 487-498.
- [10] Suryanarayana Raju Pakalapati. *A new reduced order model for solid oxide fuel cells*. PhD thesis (2006) West Virginia.
- [11] Ying-Wei Kang, Jun Li, Guang-Yi Cao, Heng-Yong Tu, Jian Li, Jie Yang. *Dynamic temperature modeling of an SOFC using least squares support vector machines*. Journal of Power Sources 179 (2008) 683-692.
- [12] A.C. Burt, I.B. Celik, R.S. Gemmen, A.V. Smirnov. *A numerical study of cell-to-cell variations in a SOFC stack*. Journal of Power Sources 126, Issues 1-2 (2003) 76-87.