

# Champ Thermique dans une Pile à Combustible SOFC: Influence du Rayonnement Thermique

Soumia Abdessemed, Hocine Ben moussa, Bariza Zitouni, Mostafa Zeroual

**Résumé**—Une modélisation bidimensionnelle couplée conduction, convection et rayonnement utilisant la méthode des volumes finis est mise en œuvre pour calculer le champ de température. En tenant en compte de l'effet de Joule, le calcul numérique porte sur le cœur de la pile à combustible à oxyde solide SOFC de première génération (cathode poreuse de  $\text{LaMnO}_3$ , électrolyte faiblement poreux de  $\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ , anode poreuse de  $\text{Ni-ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ ) à géométrie planaire. La configuration géométrique de la SOFC est à anode supportée. L'effet du rayonnement thermique sur le champ de la température ainsi que son impact sur les conditions globales de fonctionnement de ce système tri-couche est étudié en fonction de la température de fonctionnement.

**Mot clé**— SOFC; anode supportée, radiation, température

## I. INTRODUCTION

A cause de leur température de fonctionnement 800-1000°C le rayonnement thermique peut jouer un rôle très important dans la combinaison de transfert thermique à travers les différentes couches de la structure SOFC. Le rayonnement thermique fait intervenir un autre mécanisme qui est le rayonnement électromagnétique où les atomes, les molécules ou les électrons libres des corps peuvent perdre une partie de leur énergie cinétique par émission d'une radiation électromagnétique, et lorsque un tel rayonnement est reçu à la surface d'un corps constitue la pile SOFC une partie de ce dernier est absorbée par le corps et se retrouve dans l'énergie cinétique de ces composantes sous forme de chaleur. En générale les matériaux constituant l'électrolyte et les électrodes poreuses de SOFC sont considérés comme étant des milieux semi-transparent c'est eux qui peuvent absorber, disperser et émettre le rayonnement thermique.

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

S. Abdessemed, B. Zitouni et M. Zeroual. Faculté des sciences. Université de Batna. (H2SOFC@gmail.com)

## II. MODELISATION DE TRANSFERT RADIATIF DANS UNE PILE SOFC

### A. Modélisation à Partir de l'équation de Transfert de Chaleur Radiatif ETR

Pour un milieu semi transparent, gris, absorbant, émissif et diffusant et à l'équilibre thermodynamique local. le transfert radiatif est décrit dans chaque zone de la structure SOFC par l'équation "Eq. (1)" [5] ; [6]

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + (1 - \omega_\lambda) I_{b,\lambda} + \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I(S_i) \phi(S_i, S) d\Omega_i \quad (1)$$

La condition aux limites radiative d'une surface grise et diffusante en émission comme en réflexion est exprimée par "Eq. (2)"

$$I_\phi(\bar{\Omega}) = \frac{\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4}{\pi} + \frac{1 - \varepsilon_\phi}{\pi} \int_{\bar{\Omega}', \bar{n}_\phi < 0} I_\phi(\bar{\Omega}') |\bar{\Omega}' \cdot \bar{n}_\phi| d\Omega' \quad (2)$$

Le transfert de chaleur par rayonnement est modélisé à l'aide de l'équation du Transfert radiatif ETR qui permet de déterminer le flux radiatif en intégrant le champ de luminance dans toutes les directions et sur toutes les longueurs d'ondes. L'ETR, prise sous sa forme complexe, n'a pas de solution analytique. Il apparaît alors nécessaire d'employer une méthode numérique pour résoudre l'équation. Sur le plan pratique, l'une des difficultés essentielles dans la résolution numérique de l'ETR, réside dans le calcul d'une fonction de sept variables trois coordonnées de position, deux coordonnées angulaires, une variable temporelle et un paramètre spectral. Par ailleurs, l'ETR étant de type intégral-différentiel, l'autre difficulté majeure pour la résoudre provient du terme intégral et du terme non homogène où intervient la température et qui nécessite généralement de coupler l'ETR à l'équation de conservation de l'énergie.

Les méthodes numériques existantes pour résoudre "Eq. (1)" sont relativement nombreuses, on cite : Méthode de Monte Carlo, Méthode des zones, Méthodes multi flux, Méthode des ordonnées discrètes, Méthode des harmoniques sphériques, Méthode des transferts discrets, Méthode des volumes finis. Chacune des méthodes citées plus haut présente ses avantages et ses inconvénients. Les problèmes que l'on peut rencontrer sont très diversifiés, notamment par la nature du milieu à étudier et les propriétés thermo radiatives des matériaux constituant SOFC, et la variété des conditions aux limites qui peuvent être traitées. Xiongwen Zhang et all [2]; David L et all [7]; modélisation d'effet de

transfert de chaleur radiative au sein de structure PEN-SOFC de géométrie planaire se fait a travers l'équation : Xiongwen Zhang et all [2] "Eq. (3)" et David L et all [7] "Eq. (4)"

$$\vec{N} \cdot \left( I(\vec{r}, \vec{S}) \vec{S} \right) + (a_s + a) I(\vec{r}, \vec{S}) = \text{an}^2 \frac{\sigma_s T^4}{\pi} + \frac{a_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{S}') \phi(S, S') d\Omega \quad (3)$$

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + (1 - \omega_\lambda) I_{b\lambda} + \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I(S_i) \phi(S_i, S) d\Omega_i \quad (4)$$

La résolution des équations se fait par la méthode des ordonnées discrètes et le flux de chaleur radiative est donné par "Eq. (5)"

$$qr = \int_0^\infty \int_{4\pi} I_\lambda(s) s d\lambda d\Omega \quad (5)$$

### B. Modélisation par les Méthodes des Approximation

Les méthodes connues sous le nom de l'approximation de Rosseland ou approximation de la diffusion et le modèle à deux flux. Dans certains cas, ces deux méthodes permettent d'approcher les solutions exactes. Elles ont en outre l'avantage de permettre de représenter le transfert radiatif comme un phénomène diffusif et de définir une conductivité radiative par analogie avec la conductivité thermique [8], [7], [5] et [4].

#### a) Approximation de Rosseland

Le flux de chaleur radiatif est approxime comme étant un flux diffusif par l'intermédiaire d'une conductivité radiatif dite la conductivité radiative de Rosseland. "Eq. (6)". (Table.1)

Table I. COEFFICIENTES THERMORADIATIVES

Paramètre	Expression
Coefficient d'adsorption spectrale	$k = \frac{4\pi K}{n\lambda}$
Coefficient d'extinction spectrale	$\beta_\lambda = k_\lambda + \sigma_\lambda$
Epaisseur optique spectrale	$\tau_\lambda = \int_0^z \beta_\lambda ds$
Coefficient d'adsorption	$K = -\frac{n\lambda \ln[\tau]}{4\pi d}$

$$q_{rad} = -\frac{16n^2\sigma T^3}{3\beta_R} \nabla T \quad (6)$$

#### b) Approximation de Schuster-Schwartzchild

Le modèle à double flux ou l'approximation de Schuster-Schwartzchild est utilise pour approxime le flux de chaleur radiatif a travers l'électrolyte d'YSZ. Le flux de chaleur radiatif échange a travers la surface d'électrolyte peut être approxime par "Eq. (8)"

$$q_{rad} = -\sigma(T_{top}^4 - T^4) e^{-2kl} e^{2kx} + \sigma(T_{bott}^4 - T^4) e^{-2kz} \quad (7)$$

### III. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

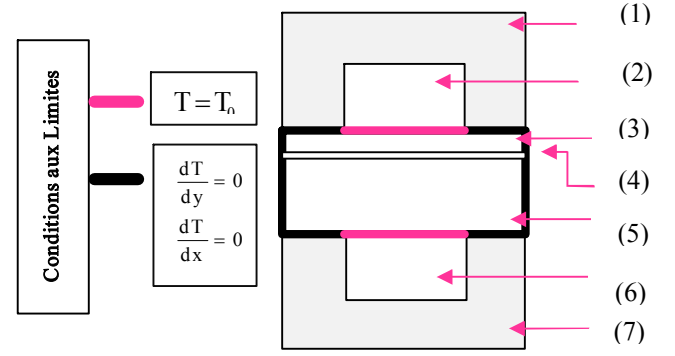


Figure 1. Présentation du domaine d'étude et les conditions aux limites (1) Interconnecteur supérieur (2) Canal cathodique (3) Cathode (4) Electrolyte (5) Anode auto-soutenue (6) Canal anodique (7) Interconnecteur inférieur

Les équations fondamentales régissant le phénomène de transfert de chaleur couplé; conduction, convection et rayonnement, au sein de domaine d'étude tiennent compte des conditions suivantes:

Toutes les variables admettent des valeurs constantes sur chaque volume de contrôle;

(2) la seule source de chaleur considérée est la source de chaleur ohmique;

(3) L'électrolyte de zircone yttrée est considéré comme milieu optiquement mince sur tout le domaine de température de cette étude [873-1273 K].

#### a) Electrolyte

Au sein de l'électrolyte supposé dense, l'énergie est transportée par deux mécanismes liés à la conduction phonique et au rayonnement thermique. L'équation de transport tient compte aussi des pertes ohmiques qui peuvent être importantes. L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein de l'électrolyte prend alors la forme suivante : "Eq. (8)"

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff,ph} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eff,ph} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \underbrace{\left[ 2k\sigma C_1 + 4\sigma T^3 e^{2kl} \frac{\partial T}{\partial x} \right]}_{\text{source diffusion}} e^{2kx} + \underbrace{\left[ 2k\sigma C_2 + 4\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right]}_{\text{source diffusion}} e^{-2kx} + \underbrace{\frac{e_{ohm}}{\Gamma_{ohm}}}_{\text{source ohmique}} \quad (8)$$

#### b) Electrodes

L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein des électrodes (anode et cathode), tient compte de trois modes de transfert de la chaleur: conduction, convection et rayonnement. "Eq. (9)"

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Anode} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho C_p v)_{an} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho C_p v)_{an} T \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\lambda_{eff,an} + K_{R,an}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda_{eff,an} + K_{R,an}) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{e_{ohm}}{\Gamma_{ohm}} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cathode} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho C_p v)_{ca} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho C_p v)_{ca} T \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\lambda_{eff,ca} + K_{R,ca}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda_{eff,ca} + K_{R,ca}) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{e_{ohm}}{\Gamma_{ohm}} \end{array} \right.$$

#### IV. RESULTATS

Les résultats sont donnés, pour la configuration considérée, dans le plan perpendiculaire à l'écoulement des réactifs et pour deux types de températures de fonctionnement: une température intermédiaire de 873K et une haute température de 1273K. les propriétés thermique et les condition physique de fonctionnement utilisé sont données dans le tableau "Table II".

Pour une température intermédiaire de 873K, et en absence des effets radiatifs, une forte diffusion de champs de température, la température maximale est située à l'électrolyte dont la valeur est de l'ordre de 876.52K. L'augmentation de la température est due à la présence de la source ohmique. La présence des effets radiatifs augmente la diffusion thermique ce qui réduit la température maximale jusqu'à 876.09K "Figure 2, Figure 3 et Figure 4".

Table I.I. PARAMETRES PHYSIQUES  
ET PROPRIETES THERMIQUES [7]

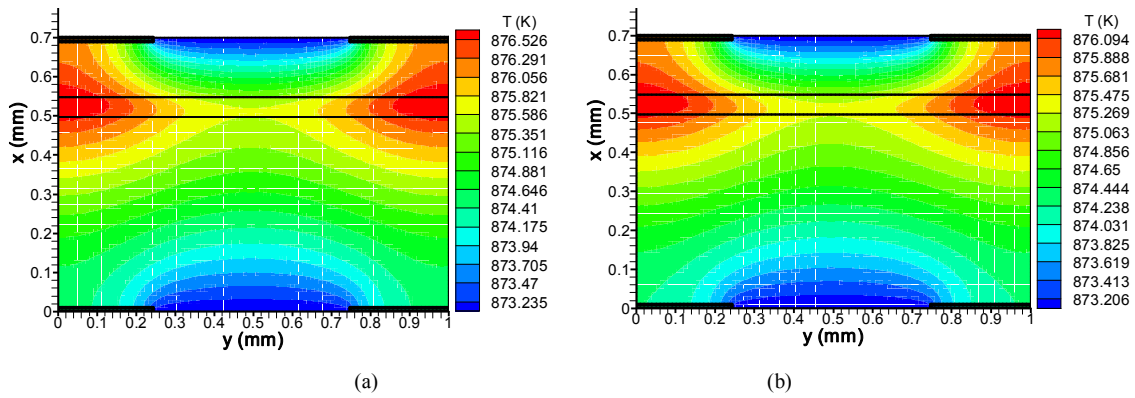
Propriétés des électrodes et d'électrolyte	Symbole	Unité	Cathode	Anode	Electrolyte
	$C_p$	$\frac{J}{kg^{-1}K^{-1}}$	573	595	606
	$\rho$	$[kg/m^3]$	6000	6200	5560
	$K$	$[m^2]$	$10^{-20}$	$10^{-20}$	$10^{-25}$
	$\varepsilon$	$[\%]$	40	40	6
	$\lambda$	$[W/km]$	02.00	02.00	02.00
	$e$	$[\mu m]$	$150.10^{-6}$	$500.10^{-6}$	$50.10^{-6}$
Conditions de fonctionnement	$P$	$[bar]$	$P_{H_2} = P_{O_2} = 2.10^5$		
	$T$	$[K]$	$T_{H_2} = T_{O_2} = 1000$		
	$I$	$[A/m^2]$	15000		
	$E$	$[V]$	1		

#### II. CONCLUSION

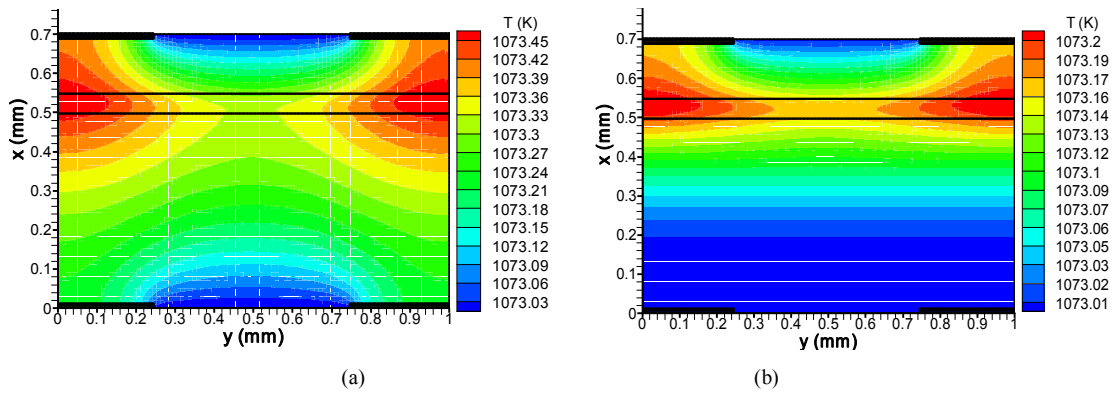
Sous une température intermédiaire de fonctionnement 873K, la présence de la source de chaleur; due à la résistance ohmique causé par la migration des ions  $O^{2-}$ , le passage des électrons et la résistance de contacte entre les couches d'électrolyte et les électrodes, conduit à une élévation de température très importante. En augmentant la température, l'effet du transfert radiatif sur la température globale de la structure PEN-SOFC-AS est très évidant. Sous une haute température de fonctionnement; 1273K, l'effet de l'agitation thermique réduit considérablement l'élévation de la température due à la source ohmique et l'effet du rayonnement thermique intervient fortement sur le champ de température et la distribution spatiale de température mais son effet sur la température globale du PEN-SOFC-AS peuvent être négligé.

#### REFERENCES

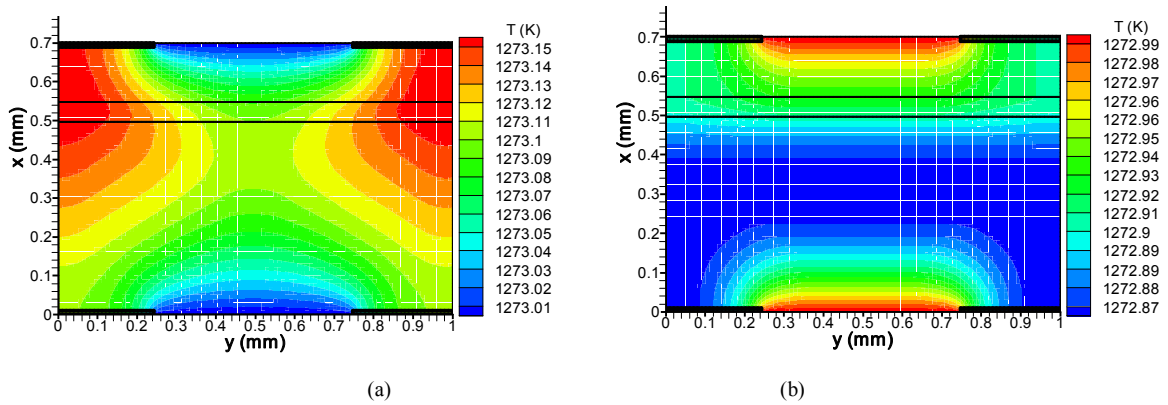
- [1] Graham M. Goldina, Huayang Zhub, Robert J. Keeb, David Bierschenkc, Scott A.Barnett, Multidimensional flow, thermal, and chemical behavior in solid-oxide fuel cell button cells, Journal of Power Sources 187 (2009) 123–135.
- [2] Xiongwen Zhang, Jun Li, Gijon Li, Zhen ping Feng, Numerical study on the thermal characteristics in a tubular solid oxide fuel cell with indirect internal reformer; International Journal of Thermal Sciences 48 (2009) 805–814.
- [3] Grzegorz Brus, Janusz S. Szmyd, Numerical modelling of radiative heat transfer in an internal indirect reforming-type SOFC, Journal of Power Sources 181 (2008) 8–16.
- [4] D. S'anchez, A. Mu'noz, T. S'anchez, An assessment on convective and radiative heat transfer modeling in tubular solid oxide fuel cells, Journal of Power Sources 169 (2007) 25–34.
- [5] D. S'anchez, R. Chacartegui, A. Mu'noz, T. S'anchez, Thermal and electrochemical model of internal reforming solid oxide fuel cells with tubular geometry, Journal of Power Sources 160 (2006) 1074–1087.
- [6] K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu, G.J. Smallwood, Radiation heat transfer in planarSOFC electrolytes, Journal of Power Sources 157 (2006) 302–310.
- [7] David L. Damm, Andrei G. Fedorov, Radiation heat transfer in SOFC materials and components, Journal of Power Sources 143 (2005) 158–165.
- [8] Sunil Murthy, Andrei G. Fedorov, Radiation heat transfer analysis of the monolith type solid oxide fuel cell, Journal of Power Sources 124 (2003) 453–458.
- [9] Jinlinang yuan, masoud rokni,bengt .s.,simulation of fully developed laminar heat and masse transfert in ducts with different cross-section .international journal of heat and masse transfer 44(2001) 4047–4058.
- [10] D. Larrain, J. Van herle, F. Mare'chal, D. Favrat, Generalized model of planar SOFC repeat element for design optimization, Journal of Power Sources 131 (2004) 304–312



**Figure 2.** Champs de température pour PEN-SOFC-AS à  $T = 873\text{K}$   
 (a) sans radiation, (b) avec radiation



**Figure 3.** Champs de température pour PEN-SOFC-AS à  $T = 1073\text{K}$   
 (a) sans radiation, (b) avec radiation



**Figure 4.** Champs de température pour PEN-SOFC-AS  $T = 1273\text{K}$   
 (a) sans radiation, (b) avec radiation