

Influence du rayonnement thermique sur le champ de température d'un cœur de pile à combustible SOFC à anode supportée Effet des températures de gaz

S. Abdessamed¹, H. Ben Moussa², B. Zitouni¹, B. Rousseau³ et M. Zeroual⁴

¹ Laboratoire d'Etudes des Systèmes Energétiques Industriels, 'LESEI'
Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Mécanique,
Université Hadj Lakhdar, Avenue Chahid M^{ed} El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

² Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'
Route de Ouargla, Noumerate Bounoura, B.P. Gart Taam, Ghardaïa, Algérie

³ Conditions Extrêmes et Matériaux, Haute Température et Irradiation, 'CEMHTI'
UPR CNRS 3079, 1D Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans cedex 2, France

⁴ Laboratoire de Physique Energétique Appliquée, 'LPEA'
Faculté des Sciences, Université Hadj Lakhdar
Avenue Chahid Med El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

(reçu le 25 Juillet 2010 – accepté le 25 Septembre 2010)

Résumé - Une modélisation bidimensionnelle couplée, utilisant la méthode des volumes finis, est mise en œuvre pour calculer le champ de température d'un cœur de pile à combustible à électrolyte solide de première génération. Le système étudié repose sur l'assemblage coplanaire de trois céramiques (cathode LaMnO_3 , électrolyte de ZrO^{2-} 8 % Y_2O_3 , anode de Ni-ZrO^{2-} 8 % Y_2O_3). La modélisation, qui tient compte de l'effet du rayonnement thermique, calcule le champ de température du cœur de pile pour deux températures de gaz réactants. Dans ce cadre, l'impact du rayonnement thermique est ici discuté.

Abstract - A two-dimensional coupled model, using finite volume method is implemented to calculate the temperature field of a heart cell solid electrolyte fuel first generation. The system studied is based on assembling coplanar three ceramics (LaMnO_3 cathode, electrolyte ZrO^{2-} 8 % Y_2O_3 , anode Ni-ZrO^{2-} 8 % Y_2O_3). Modeling, which into account the thermal radiation effect, calculated the temperature field of the heart cell for two reactant gas temperatures. In this context, the thermal radiation impact is here discussed.

Mots clés: SOFC - Rayonnement thermique – Température - Anode supportée – Bidimensionnel.

1. INTRODUCTION

Les piles à combustible à électrolyte solide plus connues sous l'acronyme de SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) sont une solution prometteuse pour produire sobrement de l'électricité et de la chaleur, notamment dans le domaine de l'habitat. La partie clé des SOFC est le cœur de pile (cathode-électrolyte-anode), siège des réactions électrochimiques. Le cœur de pile est lui-même enserré par deux inter connecteurs métalliques qui ont pour rôle d'apporter les gaz réactants et de collecter l'électricité.

La température de fonctionnement de ces piles est relativement élevée ($T = 1000 - 1300 \text{ K}$), car imposée par le régime de fonctionnement de l'électrolyte qui est, pour les piles SOFC de première génération, une céramique de zircone-yttrée (ZrO^{2-} 8 % Y_2O_3).

Cette haute température est source de rupture mécanique aux points chauds de la pile, affaiblissant ainsi ses performances électrochimiques.

Prédire le comportement thermomécanique requiert avant tout une connaissance plus poussée du champ de température au sein du système cœur de pile-inter connecteurs, système où se couplent différents modes de transfert thermique. En particulier, la contribution exacte du rayonnement thermique au bilan énergétique totale demeure mal connue.

Ainsi, peu de données thermo radiatives concernant les différentes parties de la pile sont aujourd'hui disponibles pour les températures de travail usuelles. Cette tâche est d'autant plus difficile que les matériaux d'intérêt sont souvent texturés (céramique poreuse pour la cathode, cermet poreux pour l'anode, alliage métallique pour les inter connecteurs), donc présentant des valeurs éloignées de celles mesurables sur des systèmes homogènes de composition chimique analogue (monocristaux).

Cette méconnaissance induit une absence de prise en compte de ce phénomène dans les codes de calcul [1]

Pour pallier cette difficulté, nous présentons un travail qui prend en compte dans un premier temps la contribution du rayonnement thermique pour un système modèle comprenant un cœur de pile enserrée par deux inter connecteurs.

La géométrie du système a déjà été présentée dans la littérature [2, 3]. Cette prise en compte revient à intégrer à l'équation de l'énergie, l'équation du transfert radiatif dont l'expression sera approximée, pour simplifier sa résolution, en fonction de chaque élément du cœur de pile. Cela revient à tenir compte des propriétés radiatives des matériaux utilisés et de leurs dimensions.

2. MODELISATION MATHEMATIQUE

2.1 Description du dispositif

Le système étudié est dit à anode autosupportée [2]: l'anode se présente sous forme d'un substrat au-dessus duquel sont déposés successivement une couche intermédiaire servant d'électrolyte (YSZ) et une couche supérieure jouant le rôle de la cathode.

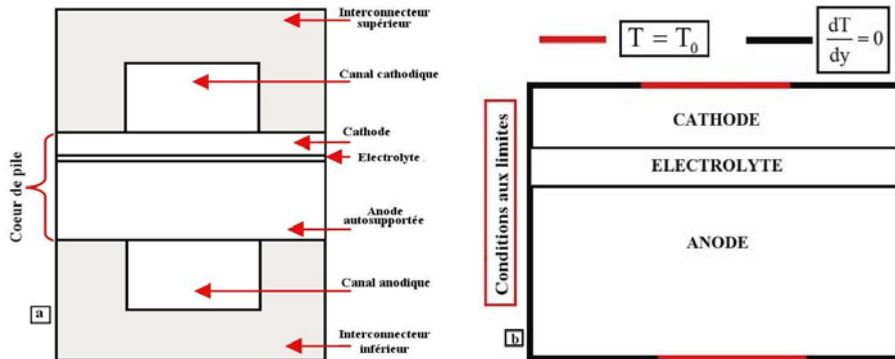


Fig. 1: a- Présentation du domaine d'étude, b- Conditions aux limites

Sur un plan matériau, l'électrolyte se présente sous la forme d'une couche dense polycristalline de zircone-yttriée (ZrO_2 - 8% Y_2O_3) dont l'épaisseur est de 15 μm . La cathode est une couche poreuse (30 %) de manganite de lanthane de 75 μm d'épaisseur et l'anode est un cermet poreux (40 %) de nickel zircone-yttriée (mélange 50/50 en masse) de 500 μm d'épaisseur.

Compte tenu des données relatives aux matériaux impliqués dans la conception de ce cœur de pile [2], nous pouvons plausiblement affirmer que l'électrolyte est optiquement mince sur le plan radiatif alors que les cathodes et anodes sont optiquement épaisses.

Ceci constitue une approximation, car les comportements radiatifs obtenus dans la littérature à $T = 300 \text{ K}$, peuvent selon les domaines spectraux concernés, évoluer fortement avec la température à la température d'utilisation des piles SOFC.

Par ailleurs, tant pour la cathode que pour l'anode, nous allons supposer que le rayonnement quittant le cœur de pile est diffusé, tant pour la cathode que pour l'anode, de manière isotrope. Pour les propriétés radiatives, nous nous référerons aux travaux décrits en [2]. Par ailleurs, la source de chaleur considérée lors du fonctionnement de pile est de source ohmique, source liée à la polarisation ohmique [4].

2.2 Modélisation du transfert radiatif SOFC

Les équations fondamentales régissant le phénomène de transfert couplé au sein de domaine d'étude tiennent compte des conditions suivantes:

- Toutes les variables admettent des valeurs constantes sur chaque volume de contrôle;
- La seule source de chaleur considérée est la source de chaleur ohmique;
- L'électrolyte de zircone yttriée est considéré comme milieu optiquement mince sur tout le domaine de température de cette étude [873 – 1273 K].

2.2.1 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. (1)}:

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}}_{\text{Terme d'accumulation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff,ele}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{eff,ele}} \frac{\partial T}{\partial y} \right)}_{\text{Terme conductif}} = \underbrace{\left[2k\sigma C_1 + 4\sigma T^3 e^{2kL} \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{2kx} + \left[2k\sigma C_2 + 4\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{-2kx}}_{\text{Terme radiatif}} + \underbrace{\frac{i}{\Gamma_{\text{ele}}}}_{\text{Source ohmique}} \quad (1)$$

Dans le terme radiatif de l'équation (1), les échanges radiatifs sont d'autant plus significatifs que l'épaisseur de l'électrolyte est importante. Le terme radiatif est obtenu après l'application de la méthode à deux flux ou approximation de Schuster-Schwartzchild à l'expression complète de l'équation du transfert radiatif. Cette

approximation repose sur le fait que la luminance est isotrope dans les deux hémisphères de diffusion.

Puis Modest [7] a montré que ce problème pouvait avoir une solution analytique, qui revient, à traiter le cas du transfert conducto-radiatif au sein d'un milieu non diffusant à géométrie planaire 1D, milieu qui est contenu entre deux surfaces isothermes maintenues à des températures différentes.

Le flux de chaleur radiatif échangé à travers ces surfaces est représenté par l'équation suivante:

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

D'après Fedorov *et al.*, [5], le flux de chaleur radiatif échangé peut se mettre sous la forme suivante:

$$q_{\text{rad}} = C_1 e^{2kL} + C_2 e^{-2kx} \quad (3)$$

Où

$$\begin{aligned} C_1 &= -\sigma(T_{\text{top}}^4 - T^4)e^{-2kx} \\ C_2 &= \sigma(T_{\text{bott}}^4 - T^4) \end{aligned} \quad (4)$$

La divergence de flux radiatif suivant x nous donne l'expression de la source radiative:

$$\begin{aligned} S_{\text{rad,ele}} &= -\nabla q_{\text{rad}} = -\frac{\partial q_{\text{rad}}}{\partial x} = \\ &= \underbrace{\left[2k\sigma C_1 + 4\sigma T^3 e^{2kL} \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{2kx} - \left[2k\sigma C_2 + 4\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{-2kx}}_{\text{Terme radiatif}} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2.2 Electrodes

L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein des électrodes (anode et cathode), tient compte des trois modes de transfert de la chaleur: conduction, convection et rayonnement; {Eq. (6)} et {Eq. (7)}.

Anode

$$\begin{aligned} \underbrace{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Terme d'accumulation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left((\rho C_p u)_{\text{fuel}} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\rho C_p v)_{\text{fuel}} T \right)}_{\text{Terme convectif}} = \\ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda_{\text{eff,an}} + K_{R,\text{an}}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda_{\text{eff,an}} + K_{R,\text{an}}) \frac{\partial T}{\partial y} \right]}_{\text{Terme diffusion-rayonnement}} + \underbrace{\frac{i}{\Gamma_{\text{an}}}}_{\text{Terme source}} \end{aligned} \quad (6)$$

Cathode

$$\underbrace{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Terme d'accumulation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left((\rho C_p u)_{\text{air}} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\rho C_p v)_{\text{air}} T \right)}_{\text{Terme convectif}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda_{\text{eff, cath}} + K_{R, \text{cath}}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda_{\text{eff, cath}} + K_{R, \text{cath}}) \frac{\partial T}{\partial y} \right]}_{\text{Terme diffusion - rayonnement}} + \underbrace{\frac{i}{\Gamma_{\text{cath}}}}_{\text{Terme source}} \quad (7)$$

Le flux de chaleur radiatif échangé à travers les deux électrodes considérés comme isotropes et optiquement épaisses est obtenue via la conductivité radiative dite de Rosseland, {Eq. (8)}

$$q_{\text{rad}} = - \underbrace{\frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 \beta_R}}_{K_R} \nabla T \quad (8)$$

où β_R est le coefficient de Rosseland donné en [5].

3. RESULTATS**Effet de la température de fonctionnement**

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 873 K et une haute température de 1273 K.

Pour une température intermédiaire de 873 K, 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 876.52 K. 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 876.09 K (Fig. 2 et Fig. 3).

Tableau 1: Paramètres physiques et propriétés thermiques [3]

	Symbole, unité	Cathode	Anode	Electrolyte
Propriétés des électrodes et de l'électrolyte	C_p , J/kgK	573	595	606
	ρ , kg/m ³	6000	6200	5560
	K , m ²	10 ⁻²⁰	10 ⁻²⁰	10 ⁻²⁵
	ε , %	40	40	0
	λ , W/mK	02.00	02.00	02.00
	e , μm	150×10 ⁻⁶	500×10 ⁻⁶	50×10 ⁻⁶

Conditions de fonctionnement	P, bar	$P_{H_2} = P_{O_2} = 2 \times 10^5$
	T, K	$T_{H_2} = T_{O_2} = 1000$
	I, A/m ²	15000
	E, V	1

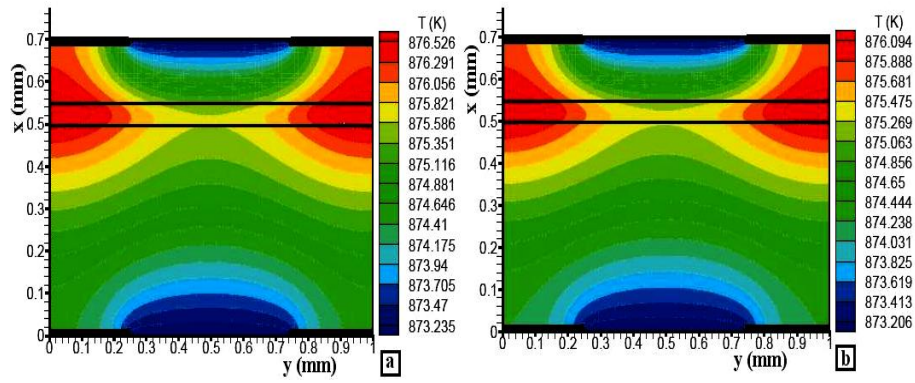


Fig. 2: Champs de température pour PEN-SOFC-AS à $T = 873$ K
a- sans radiation, b- avec radiation

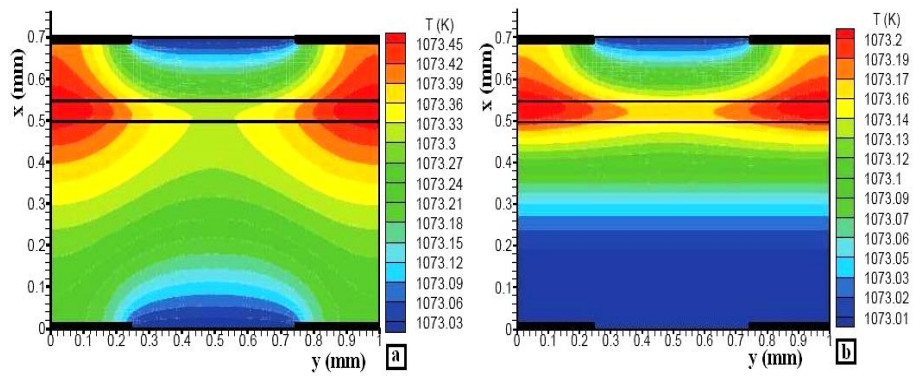


Fig. 3: Champs de température pour PEN-SOFC-AS à $T = 1073$ K
a- sans radiation, b- avec radiation

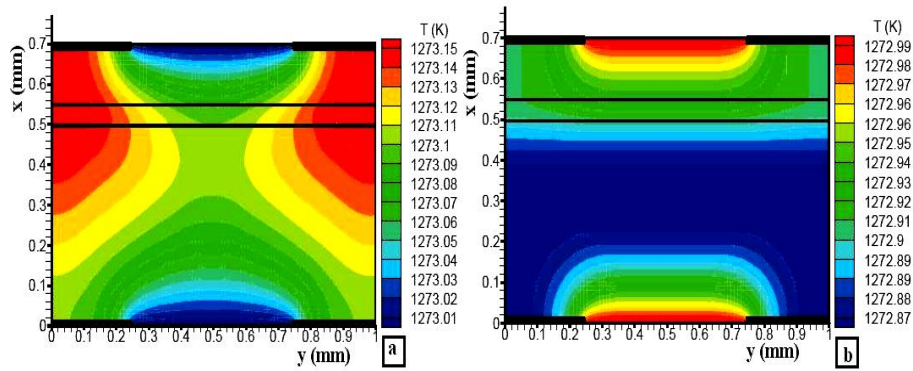


Fig. 4: Champs de température pour PEN-SOFC-AS à $T = 1273$ K
a- sans radiation, b- avec radiation

Le **tableau 1** présente les principaux paramètres physiques et les propriétés thermiques.

4. CONCLUSION

Sous une température intermédiaire de fonctionnement 873 K, la présence de la source de chaleur, due à la résistance ohmique causée par la migration des ions O^{2-} , le passage des électrons et la résistance de contact entre les couches d'électrolyte et les électrodes, conduit à une élévation de température très importante.

En augmentant la température et la densité de courant, l'effet de transfert radiatif sur la température globale de la structure PEN-SOFC-AS est très évident.

Sous une haute température de fonctionnement, 1273 K, 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.

NOMENCLATURE

C_p	Chaleur spécifique, J/kgK	β	Coefficient d'extinction, 1/m
e	Epaisseur, m	ε	Emissivité
I	Densité de courant, A/m ²	Γ	Coefficient électrique, 1/Ωm
k	Coefficient d'absorption, 1/m	λ	Longueur d'onde, μm
K_R	Conductivité de Rosseland, Wm/K	ρ	Masse volumique, kg/m ³
n	Indice de réfraction	σ	Constante de Stefan boltzmann,
q_{rad}	Flux de chaleur radiatif, W	σ_s	Coefficient de diffusion, 1/m
S_{ohm}	Source ohmique, W/m ³	τ_λ	Epaisseur optique spectrale
S_T	Source totale, W/m ³	τ_L	Epaisseur optique totale
T	Température, K		Indices et exposants

U	Composante longitudinale de la vitesse, m/s	a	Air,
		an	Anode
V	Composante transversale de la vitesse, m/s	ca	Cathode, Fuel,
		f el	Electrolyte

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] D.L. Damm, '*Radiative and Transient Thermal Modeling of Solid Oxide Fuel Cells*', Master of Science, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.
- [3] 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.
- [4] D. Larrain, J. Van herle, F. Marechal and D. Favrat, '*Thermal Modeling of a Small Anode Supported Solid Oxide Fuel Cell*', Journal of Power Sources, Vol. 118, N°1-2, pp. 367 – 374; 2003.
- [5] S. Murthy and A.G. Fedorov, '*Radiation Heat Transfer Analysis of the Monolith Type Solid Oxide Fuel Cell*', Journal of Power Sources, Vol. 124, N°2, pp. 453 – 458, 2003.
- [6] D. Sanchez, A. Munoz and T. Sanchez, '*An Assessment on Convective and Radiative Heat Transfer Modeling in Tubular Solid Oxide Fuel Cells*'. Journal of Power Sources, Vol. 169, N°1, pp. 25 – 34, 2007.
- [7] M.F. Modest, '*Radiative Heat Transfer*', 860 p., Academic press, Second Edition, 2003.