

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



# MÉMOIRE

Présenté  
AU DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
FACULTE DES SCIENCES  
LABORATOIRE DE PHYSIQUE ENERGETIQUE APPLIQUE –LPEA-  
Pour l'obtention du diplôme

MAGISTÈRE EN PHYSIQUE  
Option: Énergétique

Par  
M<sup>elle</sup> ABDESSEMED SOUMIA

---

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur  
Radiatif dans une Pile à Combustible à Oxyde Solide*

---

Soutenu le 06/07/2010..... Devant le jury composé de:

Dr. ZEROUAL Mostefa	M.C. Université de Batna	Président
Pr. BEN MOUSSA Hocine	Prof. Université de Batna	Rapporteur
Dr. MOUMMI Nouredine	M.C. Université de Biskra	Examineur
Dr. ZITOUNI Bariza	M.C. Université de Batna	Examinatrice



# Remerciements

*Je commence par le remerciement du bon DIEU pour la santé, la volonté et la patience qui m'a donné pour accomplir ce modeste travail.*

***Je tiens à remercier sincèrement:***

*mes enseignants du département de physique,*

*le Professeur BEN MOUSSA Hocine du département de mécanique pour l'encadrement et les conseils jusqu'à la dernière minute,*

*le Docteur ZITOUNI Bariza, maître de conférences du département d'agronomie, pour l'aide de la réalisation de ce mémoire et l'acceptation d'être examinatrice de ce mémoire.*

*Que le Docteur ZEROUAL Mostefa, maître de conférences du département de physique, trouve tous nos remerciements, pour l'aide le conseil et l'acceptation de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier le Docteur MOUMMI Noureddine, maître de conférences du département de mécanique université de Biskra, pour l'acceptation de juger ce travail et la peine qu'il a pris pour le déplacement.*

*A la fin, le Professeur ABDESSEMED Rachid, du département de l'électrotechnique université de Batna, pour l'encouragement et les conseils,*

*Mr HADDAD Djamel pour l'aide de la réalisation du programme numérique.*



*Soumia Abdessemed*

# الاهداء



"ربي أوزعني أن اشكر نعمتك التي أنعمت علي و على والدي وان  
اعمل عملا صالحا ترضاه و أدخلني برحمتك في عبادك الصالحين"

إلى كل من يسكن ها هنا في سويداء قلبي:

إلى مهجة الروح و بهجتها إلى نبع الحنان أمي...

إلى مبعث الحب و الأمان أبي ...

إليكم يا من قاسمتكم لحظات حزني و سعادتي... إخوتي...

إليك معلمي أينما كنت...

إلى جميع رفقاء الدرب الطويل...

إليكم: صديقاتي، زميلاتي و زملائي...

إليكم و معكم جميعا اهدي و أتوج سنوات دراستي

*Soumia Abdessmed*



*« De L'hydrogène Chimique à L'hydrogène Energétique.  
La demande d'énergie va changer de nature ... »*



# Tables de Matières

Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans la Pile SOFC

Dédicace الإهداء	
Remerciement	
Tables de matières	
Nomenclature et symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

01

## Introduction générale

### Chapitre I

#### *Pile à Combustible à Oxyde Solide: Description et Caractéristiques*

Introduction	
<b>I. Energie d'hydrogène et les piles à combustible</b>	04
I.1. Hydrogène énergétique	04
I.2. Pile à combustible	05
I.2.1. Historique	05
I.2.2. Notions de base sur les piles à combustible	05
I.2.2.1. Principe de fonctionnement	06
I.2.2.2. Mécanisme de fonctionnement	07
I.2.2.3. Principe d'empilement	07
I.2.2.4. Différents types	09
I.2.2.5. Pile à combustible et son environnement	09
I.2.2.6. Applications et commercialisation	10
I.2.2.7. Qualités des piles à combustible	11
<b>II. Pile à combustibles à oxyde solide SOFC</b>	11
II.1. Vue générale sur les piles à combustible à oxyde solide SOFC	11
II.2. Structure de la pile à combustible SOFC	12
II.3. Principe de fonctionnement des piles SOFC	13
II.4. Principales caractéristiques	14
II.5. Technologies développées	15
II.6. Thermodynamique et Electrochimie de la pile	18

### Chapitre II

#### *Transfert de Chaleur Radiatif dans la Pile à Combustible à Oxyde Solide: Etat de L'art de la Modélisation*

Introduction	21
<b>I. Rayonnement thermique</b>	21
I.1. Notions fondamentales sur le rayonnement thermique	21
I.2. Définition des grandeurs énergétiques	23
<b>II. Transfert de chaleur radiatif et la pile SOFC</b>	25
II.1. Propriétés thermiques radiatives	25
II.2. Modélisation et simulation du transfert radiatif dans la pile SOFC	25

II.1.1.Méthodes approchées	26
II.1.2.Méthodes numériques	26
<b>III. Etat de l'art de la modélisation</b>	26
II.1.Modélisation des phénomènes de transfert de chaleur	28
II.3.1.Géométrie tubulaire	28
II.3.2.Géométrie planaire	34
II.3.3.Géométrie monolithe	43
II.2.Paramètres physiques et les propriétés thermiques et thermoradiatives	45

### *Chapitre III*

#### *Modélisation Mathématique et Résolution Numérique*

Introduction	52
<b>I. Modèle Physique</b>	52
<b>II. Modélisation Mathématique des Phénomènes de Transfert Radiatif</b>	53
II.1.Approximation de Rosseland	53
II.2.Approximation de Schuster-Schwartzchild	53
<b>III. Equations de Modélisation</b>	54
<b>III.1.Modèle conducto-radiatif monodimensionnel</b>	54
<b>III.2.Modèle couplé bidimensionnel</b>	55
III.2.1.Electrolyte	55
III.2.1.1.Equation de conservation d'énergie	55
III.2.1.2.Equation de conservation des espèces	55
III.2.2.Electrodes	55
III.2.2.1. Equation de continuité	55
III.2.2.2. Loi de Darcy	55
III.2.2.3. Equation de pression	56
III.2.2.4. Equation de conservation d'énergie	56
III.2.2.5. Equation de conservation des espèces	56
<b>IV. Méthode des Volumes Finis pour un Couplage Convection Diffusion</b>	57
IV.1.Génération du maillage	58
IV.2.Conditions initiales et aux limites	59
IV.3.Discretisation par la méthode des volumes finis	61
IV.4.Résolution d'un système d'équations algébriques	65
IV.5. Paramètres Utilisés	66
<b>Organigrammes des programmes</b>	67

### *Chapitre IV*

#### *Résultats et Discussion*

<b>I. Modèle Conducto-Radiatif Monodimensionnel</b>	69
I.1.Effet d'indice de réfraction	70
I.2.Effet d'épaisseur spectral optique	71
<b>II. Modèle Couple Bidimensionnel</b>	71
<b>II.1.Comportement Dynamique</b>	72
<b>II.2.Comportement Thermique</b>	73
II.2.1.Effet de température de fonctionnement	73
II.2.1.1.Configuration anode supporté	73



## Nomenclature

### Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide

$n$	Indice de réfraction	/
$k$	Coefficient d'absorption	[cm <sup>-1</sup> ]
$K_R$	Conductivité thermique radiatif de Rosseland	[W/K]
$\sigma$	Constante de <i>Stefan – Boltzman</i> $\sigma = 5.46.10^{-8}$	[W/Km <sup>2</sup> ]
$\sigma_s$	Coefficient de dispersion	[m <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Coefficient d'extinction	[m <sup>-1</sup> ]
$\tau_\lambda$	Epaisseur optique spectrale	/
$\tau_L$	Epaisseur totale	/
L	Epaisseur d'électrolyte	[m]
$\beta$	Coefficient d'extinction	[cm <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Longueur d'onde	[μm]
$\varepsilon$	Emissivité	/
$q_{rad}$	Flux de chaleur radiatif	[W]
$S_{ohm}$	Source ohmique	[W/m <sup>3</sup> ]
$S_{rad}$	Source radiatif	[W/m <sup>3</sup> ]
$S_T$	Source totale	[W/m <sup>3</sup> ]
T	Température	[K]
T <sub>Top</sub>	Température de la surface supérieure d'électrolyte	[K]
T <sub>Bott</sub>	Température de la surface inferieur d'électrolyte	[K]
I	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Conductivité électrique	[Ω <sup>-1</sup> . m <sup>-1</sup> ]
x	Axe des abscisses	[m]
y	Axe des ordonné	[m]

$\mu$	Viscosité dynamique	[PI]
$\varepsilon$	Porosité des électrodes	[%]
$U$	Composante longitudinale de la vitesse	[m/s]
$V$	Composante transversale de la vitesse	[m/s]
$C_{O_2}$	Concentration de l'oxygène	[mole/m <sup>3</sup> ]
$C_{H_2O}$	Concentration de l'eau	[mole/m <sup>3</sup> ]
$C_{H_2}$	Concentration d'hydrogène	[mole/m <sup>3</sup> ]
$D$	Coefficient de diffusion	[m <sup>2</sup> /s]
$F$	Constante de Faraday	[C/mol]
$J$	Courant volumique	[A/m <sup>3</sup> ]
$K$	Perméabilité des électrodes	[m <sup>2</sup> ]
$k^{eff}$	Conductivité thermique effective	[W/m.K]
$L_x$	Longueur suivant x	[m]
$L_y$	Longueur suivant Y	[m]
$e$	Epaisseur	[m]

### **Indices**

ele	Electrolyte
an	Anode
ca	cathode
a	Aire
f	Fuel
R	Rosseland
rad	Radiation
T	Totale

# Liste des Figures

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

Figure.I.1:Pile à combustible PAC	06
Figure.I.2: Application Cogénération	09
Figure.I.3:Application transport	10
Figure.I.4:Application portable PC	13
Figure.I.5:Structure de la Cellule SOFC	14
Figure.I.6:Principe de Fonctionnement de la Cellule SOFC	15
Figure.I.7:Principe de Reformage de Méthane	16
Figure.I.8:(a) Configuration SOFC Planaire, (b) Technologie Tubulaire	17
Figure.I.9:Cellule Sulzer-Hexis pour la cogénération électricité et chaleur	17
Figure.I.10:Technologie Monolithique	24
Figure.II.1: Intensité de rayonnement d'un corps noir	52
Figure.III.1: Empilement des cellules SOFC	52
Figure.III.2: Cellule élémentaire d'une pile SOFC	53
Figure.III.3: PEN-SOFC domaine de conduction, convection et rayonnement	53
Figure.III.4: Electrolyte SOFC domaine de conduction et radiation	58
Figure.III.5: Volume de contrôle bidimensionnel élémentaire	59
Figure.III.6: Présentation du maillage	61
Figure.III.7: Présentation des conditions initial et aux limites	70
Figure.IV.1:Profile de température pour différente valeurs d'indice de réfraction	71
Figure.IV.2. Effet d'épaisseur spectrale optique sur le profile de température	72
Figure.IV.3:Champ de pression pour $\Delta P=0$ (bar)	74
Figure.IV.4:Champs de température PEN-SOFC-AS, $T = 873K$ , avec et sans rayonnement	74
Figure.IV.5:Champs de température PEN-SOFC-AS, $T = 973K$ , avec et sans rayonnement	74
Figure. I .6: Champs de température PEN-SOFC-AS, $T = 1073K$ , avec et sans rayonnement	74
Figure.IV.7:Champs de température PEN-SOFC-AS, $T = 1273K$ , avec et sans rayonnement	76
Figure.IV.8:Champs de température PEN-SOFC-ES, $T = 873K$ , avec et sans rayonnement	76
Figure.IV.9:Champs de température PEN-SOFC-ES, $T = 1073K$ , avec et sans rayonnement	77
Figure.IV.10:Champs de température PEN-SOFC-AS, $T = 1273K$ , avec et sans rayonnement	80
Figure.IV.11:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=873K$ et $I=10000A/m^2$	80
Figure.IV.12:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=873K$ et $I=15000A/m^2$	81
Figure.IV.13:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=873K$ et $I=20000A/m^2$	81
Figure.IV.14:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=1000K$ et $I=10000A/m^2$	82
Figure.IV.16:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=1000K$ et $I=20000A/m^2$	82
Figure.IV.17:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=1273K$ et $I=10000A/m^2$	83
Figure.IV.18:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=1273K$ et $I=15000A/m^2$	83
Figure.IV.19:Champs de température PEN-SOFC-AS pour $T=1273K$ et $I=20000A/m^2$	83
Figure.IV.20:Champs de température PEN-SOFC-ES pour $T=873K$ et $I=15000A/m^2$	84
Figure.IV.21:Champs de température PEN-SOFC-ES pour $T=873K$ et $I=20000A/m$	85
Figure.IV.22:Champs de température PEN-SOFC-ES pour $T=1000K$ et $I=15000A/m^2$	86
Figure.IV.23:Champs de température pour PEN-SOFC-ES $T=1000K$ et $I=20000A/m^2$	86
Figure.IV.24:Champs de température pour PEN-SOFC-ES $T=1273K$ et $I=20000A/m^2$	86
Figure.IV.25:Champs de température pour PEN-SOFC-ES $T=1273K$ et $I=20000A/m^2$	86
Figure.IV.26:Champs de concentration d' $H_2O$ pour PEN-SOFC-AS	89
Figure.IV.27:Champs de concentration d' $H_2O$ pour PEN-SOFC-ES	89
Figure.IV.28:Profile de concentration d' $H_2O$	89
Figure.IV.29:Champs de concentration d' $H_2O$ pour PEN-SOFC-AS	90
Figure.IV.30:Champs de concentration d' $H_2O$ pour PEN-SOFC-ES	90
Figure.IV.31: Profile de concentration d' $O_2$	91
Figure.IV.32:Champs de concentration d' $H_2$ pour PEN-SOFC-AS	91
Figure.IV.33:Champs de concentration d' $H_2$ pour PEN-SOFC-ES	92
Figure.IV.34: Profile de concentration d' $H_2$	92

# Liste des Tableaux

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

Tableau.I.1:Données générales sur l'hydrogène	05
Tableau.II.1:Conductivité thermique des constituants des cellules SOFC	46
Tableau.II.2:Propriétés des électrodes	46
Tableau.II.3:Dimension générales de la cellule	47
Tableau.II.4:Condition de fonctionnement et paramètres physique de la pile SOFC	47
Tableau.II.5:Conductivité électrique des constituants des cellules SOFC	48
Tableau.II.6:Propriétés thermique des matériaux constituant la cellule SOFC	49
Tableau.II.7:Propriétés thermiques des réactifs	49
Tableau.II.8:Formules donnant les propriétés radiatives	50
Tableau.II.9:Emissivité et Coefficient de dispersion	50
Tableau.II.10:Propriétés radiative d'YSZ en fonction de la longueur d'onde	51
Tableau.II.11:Coefficients d'absorption des gaz	51
Tableau.III.1:Termes sources correspondants à l'équation d'énergie	57
Tableau.III.2: Termes sources correspondants à l'équation de conservation des espèces	57
Tableau.III.3:Flux massiques convectifs	63
Tableau.III.4: Variable de la conduction de diffusion	64
Tableau.III.5:Coefficients de schéma Hybride	65
Tableau.III.6:Coefficients d'équation de pression	66
Tableau.III.7:Données thermiques, dynamiques et thermo radiatives utilisées	78
Tableau.IV.1:Effet de température de fonctionnement PEN-SOFC-AS	75
Tableau.IV.2:Effet de température de fonctionnement PEN-SOFC-ES	78
Tableau.IV.3:Effet de température de fonctionnement PEN-SOFC-AS /PEN-SOFC-ES	79
Tableau.IV.4:Effet de densité de courant sur le champ de température PEN-SOFC-AS	84
Tableau.IV.5:Effet de densité de courant sur le champ de température PEN-SOFC-ES	87
Tableau.IV.6:Effet de densité de courant sur le champ de température PEN-SOFC AS /ES	88

# *Introduction Générale*

# *Introduction Générale*

---

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés. Elle est indispensable au développement économique des états. Pour ses besoins et sa survie, l'homme utilise depuis longtemps les richesses de son environnement comme des ressources d'énergie. Il utilise aussi les phénomènes naturels pour produire l'énergie. Autrefois, le bois et le charbon de bois étaient les principaux combustibles utilisés pour leur pouvoir calorifique. La révolution industrielle entraîna une augmentation de la demande en combustible.

Les réserves des combustibles fossiles de la planète sont fixes et au rythme de consommation progressive. Leur épuisement doit être envisagé. L'utilisation des quantités considérables de combustibles fossiles est à l'origine d'un déséquilibre important du cycle du carbone. C'est ce qui provoque une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre. La solution c'est de prédire à d'autres sources d'énergies nouvelles et renouvelables.

D'une façon générale les énergies nouvelles et renouvelables ENR, sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont imités. L'eau, le soleil, le bois et le vent sont des ressources naturelles capables de générer de l'énergie. Le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaires excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage, sans oublier les végétaux comme le bois, la canne a sucre ou la colza utilisés pour produire des biocarburants,

Afin d'éviter de futurs problèmes d'épuisement du pétrole et de réchauffement de la planète dus à la consommation de carburants fossiles, beaucoup d'efforts sont consentis dans le monde pour rendre possible la vision d'un monde basé sur l'hydrogène et les piles à combustible.

## *Objectif*

---

La pile à combustible qui utilise le dioxyde de zirconium comme électrolyte dite: SOFC est l'objet de ce travail. A cause de sa haute température de fonctionnement de 800-1000°C, le

rayonnement thermique peut jouer un rôle très important dans la combinaison des modes de transport thermique au sein des piles à combustible à oxyde solide SOFC. 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.

Dans ce travail on s'intéresse à l'effet de transfert de chaleur radiatif sur le champ de température au sein de la pile SOFC. L'effet des différents paramètres physiques et géométriques sur la distribution spatiale de la température avec et sans effet du transfert thermique radiatif est étudié. Notre travail considéré comme une contribution à l'étude du transfert radiatif dans une pile SOFC est présenté en quatre chapitres.

**Premier chapitre:** Présentation fondamentale des piles à combustible et présentation du modèle physique et électrochimique d'une pile SOFC en particulier; principe de fonctionnement, différents types et les principales caractéristiques.

**Second chapitre:** Il s'agit d'une synthèse bibliographique. La première partie concerne des notions de base sur le transfert de chaleurs radiatives, description et définition des paramètres énergétiques, ainsi que la formulation et modalisation des phénomènes de transfert de chaleur radiatif dans la pile SOFC. La deuxième partie concerne un état de l'art sur les travaux de simulation et modalisation des phénomènes de transfert de chaleur au sein d'une pile SOFC tout en s'intéressant à la modélisation de transfert radiatif dans la pile SOFC. Une troisième partie concerne les données sur les différents paramètres opérationnels, physiques, thermiques et thermo-radiatifs.

**Troisième chapitre:** Une présentation des modèles physiques, des équations régissant la modélisation de transfert radiatif et des phénomènes de transport est faite pour deux types de modèles. Il s'agit d'un modèle de conduction-radiation monodimensionnel dans l'électrolyte SOFC et un modèle bidimensionnel couplé dans la structure PEN-SOFC. Les conditions aux limites, les méthodes numériques de résolution, les schémas utilisés ainsi que les organigrammes des programmes seront présentés.

**Quatrième chapitre:** Porte la présentation des résultats et leurs discussions pour les deux modèles; le modèle 1D et le modèle couplé 2D.

**Modèle Conduction-Radiation:** Les résultats obtenus régissant l'effet de l'indice de réfraction du milieu YSZ, ainsi que l'épaisseur optique (effet d'épaisseur de l'électrolyte et le coefficient d'absorption) sur le profil de température.

**Modèle Couplé:** pour deux configurations géométriques différentes; PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES, l'effet de transfert radiatif est pris en considération afin de quantifier son effet sur le champ de température et la température globale de fonctionnement de la cellule. L'effet de température de fonctionnement et la densité du courant sont étudiés pour les deux configurations géométriques PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES. Le comportement dynamique (champ de pression) et massique (champs des concentrations de espèces) sont aussi donnés et les résultats sont discutés.

Ce travail s'achève par une conclusion générale sur l'étude faite.

Les résultats de ce présent mémoire ont fait l'objet de plusieurs participations dans des conférences nationales et internationales:

2009/2010

- 
- 1 **Soumia Abdessemed**, Hocine Ben moussa, Bariza Zitouni. Transfert Radiatif dans la Pile a Combustible SOFC: Etat de l'Art de la Modélisation. **JENM2009** Journées d'études nationales de mécanique 2009. Du 14 au 16 décembre 2009 Batna.

---

  - 2 H. Ben moussa, B. Zitouni, D. Haddad, **S. Abdessemed**, H. Abdenbi. Performance d'une pile à combustible SOFC: État de L'art et Calcul. 3<sup>rd</sup> International Workshop on Hydrogène. Rabat, October 28-30, 2009, Morocco.

---

  - 3 **Abdessemed Soumia**, Zitouni Bariza, Ben moussa Hocine, D. Haddad, Zeroual Mostafa. Temperature Field under Thermal Radiation Transfer: Effect of Reactant Gases Temperatures and SOFC Configurations. **ICHE10** Second international conference on hydrogen energy. 9-11 May Hammamet Tunisia.

---

  - 4 **Abdessemed Soumia**, Ben moussa Hocine, Zitouni Bariza , Zeroual Mostafa. Study of Radiatif Heat Transfert in the Electrolyte of Planar Solid Oxide Fuel Cell. **ICHE10** Second international conference on hydrogen energy. 9-11 May Hammamet Tunisia.

---

  - 5 Ben moussa Hocine, **Abdessemed Soumia**, Zitouni Bariza, D. Haddad, Zeroual Mostafa. Temperature Field under Thermal Radiation Transfer: Effect of Reactant Gases Temperatures and SOFC Configurations. **CICME10** Second International Conference on Energy Conversion and Conservation. April 22-25, 2010, El Mouradi Hammamet hotel Tunisia.

---

  - 6 **Abdessemed Soumia**, Ben moussa Hocine, Zitouni Bariza , D. Haddad, Zeroual Mostafa. Champ Thermique dans une Pile à Combustible du Type SOFC en Présence de l'Effet Joule et des Effets thermo Radiatifs, Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, **SIGCLE'2010**, 6 et 7 décembre 2010 Constantine, Algérie. *Accepté*

---

  - 7 **Abdessemed Soumia** , Ben Moussa Hocine , Zitouni Bariza , Haddad Djamel , M. Zeroual . Effect of current density on the profile of concentration of reactants and water vapor in the planar SOFC heart, 10th International Conference on Clean Energy **ICCE-2010**, September 15-17, 2010, Famagusta, N. Cyprus. *Accepté*
-

## *Chapitre I*

### *Pile SOFC Description et Caractéristiques*

# Chapitre I: Pile SOFC Description et Caractéristiques

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

## Introduction

La pile à combustible (PAC) est une technologie maintenant maîtrisée qui permet de convertir efficacement le combustible hydrogène en énergie électrique et thermique. Les recherches sur de multiples technologies de piles à combustible sont en effervescence. Cette diversification ouvre la voie à de nombreuses offres d'énergie non polluante.

Dans ce chapitre, une présentation de l'hydrogène vecteur énergétique et de la pile à combustible est faite. Plus d'intérêt est portée au principe de fonctionnement, à la structure de d'une cellule SOFC, les différentes configurations géométriques et à l'étude thermodynamique et électrochimique qui introduit la performance de la pile à combustible à oxyde solide SOFC.

## I. Hydrogène énergétique et pile à combustible SOFC

### I.1. Hydrogène Énergétique

L'hydrogène est l'atome le plus petit, le plus léger et le plus répandu dans l'univers. On le trouve partout. De la molécule d'eau aux hydrocarbures, en passant par tous les organismes vivants. Au vu des développements technologiques récents, il devient important d'imaginer l'exploitation de cet atome fondamental en termes énergétiques et économiques dans notre futur proche. Sous sa forme gazeuse, l'hydrogène  $H_2$  est incolore, inodore et non corrosif. Il présente l'avantage d'être particulièrement énergétique. Un kilogramme d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie qu'un kg d'essence. L'hydrogène ne réagit ni avec l'eau ni avec les acides et les bases. Il ne réagit pas avec l'air sauf si on l'enflamme. Cela provoque une explosion qui produit une flamme rouge caractéristique et de l'eau. L'hydrogène est extrait de molécules qui le contiennent en deux filières industrielles:

- ↪ **Filière Hydrocarboné;** l'hydrogène est extrait de composés hydrocarbonés comme le gaz naturel, le charbon ou des produits pétroliers. 95 % de l'hydrogène est aujourd'hui produit à partir du méthane; constituant principal du gaz naturel.
- ↪ **Filière Électrolytique;** on utilise un courant électrique pour casser la molécule d'eau et l'électricité peut provenir de sources renouvelables. Dans ce cas, il n'y a pas d'émission de gaz nocifs.

Données générales sur l'hydrogène sont données dans le( *tableau I.1*).

La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène ne produit que de l'eau. Ce qui fait donc de l'hydrogène un carburant propre. Il constitue ainsi l'une des solutions possibles pour résoudre les problèmes environnementaux liés à la pollution atmosphérique. Il est abondant et peut être stocké sous forme liquide. Ainsi, avec une réserve d'hydrogène et une pile à combustible, il devient possible de produire de l'électricité n'importe où et n'importe quand, sans être relié au réseau électrique.

Tableau I.1: Données générales sur l'hydrogène [04]

Propriété	Valeur
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	12770 kJ/Nm <sup>3</sup>
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K
Mélange stœchiométrique dans l'air	29,53%
Température de solidification	14,01 K

## I.2. Pile à Combustible

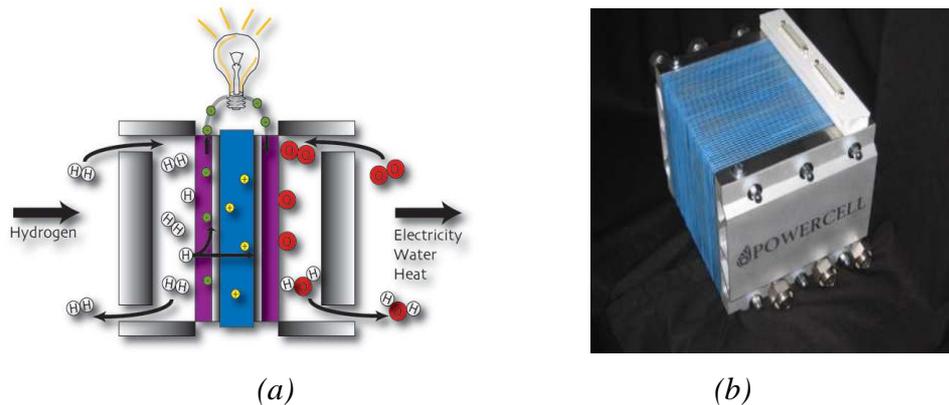
### I.2.1. Historique

La pile à combustible PAC est une technologie maintenant maîtrisée qui permet de convertir efficacement le combustible hydrogène en énergie électrique et thermique. Elle est intéressante non seulement par son rendement plus élevé par rapport à des conversions thermiques traditionnelles moteur ou turbine, mais encore par son faible impact environnemental. Le principe des piles à combustible découvert en 1839 par Sir W.Groove, fut oublié avant d'être repris en 1935 par F.T. Bacon pour aboutir en 1953 au premier prototype de 1 kW qui servit de modèle à la pile hydrogène-oxygène des missions spatiales Apollo. Basé sur le principe de l'électrolyse inverse de l'eau, il permet de transformer directement l'énergie de la réaction chimique de formation de l'eau à partir de l'hydrogène et de l'oxygène, en énergie électrique. Ainsi hormis la production de l'hydrogène en amont du système, ce procédé est tout à fait non polluant dans son fonctionnement.

### I.2.2. Notions de Base sur les Piles à Combustible

La pile à combustible est un convertisseur où l'énergie chimique libérée lors d'une réaction d'oxydoréduction est transformée en énergie électrique. Elle permettent donc la transformation directe de l'énergie chimique de la réaction d'un combustible l'hydrogène avec un comburant l'oxygène en énergie électrique. Une pile à combustible est constituée d'une anode

alimentée par un combustible généralement de l'hydrogène et d'une cathode alimentée par un oxydant généralement l'air ou l'oxygène. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte. Cette technologie de production locale d'électricité peut être considérée comme un nouveau système de cogénération. Cette conversion d'énergie chimique en énergie électrique se fait sans combustion directe, ni production intermédiaire d'énergie mécanique. Propres et silencieuses, elles sont particulièrement bien adaptées au contexte urbain où les contraintes environnementales sont les plus fortes. A la différence des autres systèmes classiques de cogénération qui utilisent des turbines à gaz ou des moteurs (*Figure I.1*).



*Figure I.1: Pile à combustible PAC  
(a) Cellule élémentaire d'une pile à combustible, (b) Empilement des cellule*

### I.2.3. Principe de Fonctionnement

Il est extrêmement simple. Il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue:



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes; garnies de catalyseur à base de platine (l'anode pour l'oxydation de l'hydrogène et la cathode ou la réduction de l'oxygène) et séparées par un électrolyte (corps qui fondu ou en solution, peut dissocier en ions sous l'action d'un courant électrique). C'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Le principe de fonctionnement est donc tout à fait similaire à celui d'une pile électrique conventionnelle. Dans cette dernière, l'oxydant et le réducteur sont progressivement consommés et on s'en débarrasse lorsque la matière active est épuisée.

Dans une pile à hydrogène, l'anode est alimentée en continu par de l'hydrogène provenant d'un réservoir et la cathode est alimentée par l'oxygène de l'air. L'hydrogène n'est pas le seul élément capable d'alimenter les piles à combustible: le méthanol par exemple fait parti de ces

autres combustibles. Le principe de fonctionnement reste alors basé sur un échange d'électrons, en revanche l'équation de la réaction et par conséquent les rejets sont différents. Si on utilise du méthanol ou du gaz naturel, on observe des émissions de CO très faible et des émissions de CO<sub>2</sub> légèrement inférieure à celle d'un moteur thermique, mais la pile n'est alors plus propre.

#### **I.2.4. Principe d'Empilement**

Une pile à combustible est constituée d'un grand nombre de cellules élémentaires. Chaque cellule élémentaire est constituée d'une anode et d'une cathode. Ces deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. Les interconnecteurs portent les canaux de gaz. Chaque cellule dans une pile à combustible fournit normalement 0,6 volts [26] quand une charge est appliquée à la pile à combustible. La surface de la cellule crée normalement un courant de 0,5 A/cm<sup>2</sup>. [26] Pour créer l'effet nécessaire à l'usage de la pile, les cellules sont empilées. C'est le principe d'empilement qui rend la conception de la pile à combustible modulable et flexible et qui donne donc de grandes possibilités d'usage. Le courant continu de ces piles est produit suivant le même principe qu'une batterie à partir de l'utilisation d'hydrogène et d'oxygène être ensuite transformé en courant alternatif dans un convertisseur électrique. Les réactions électrochimiques mises en jeu produisent également de l'eau et de la chaleur.

#### **I.2.5. Différent Types**

On distingue actuellement six types de pile à combustible, La classification repose essentiellement sur la nature de la membrane et la température de fonctionnement de la pile. Ces piles se différencient selon la nature de leur électrolyte et de là par le niveau de leur température de fonctionnement. Leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Par ailleurs, chaque pile a des exigences différentes en termes de combustibles.

- ↳ DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)
- ↳ PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- ↳ AFC (Alkaline Fuel Cell)
- ↳ PAFC (Phosphoric Acid fuel Cell)
- ↳ SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
- ↳ MOFC (Molten Fuel Cell)

Le premier type est la «pile à membrane échangeuse de protons PEMFC». La membrane est faite de polymère perfluoré. Sa conductivité aux ions H<sup>+</sup> dépend beaucoup du degré d'hydratation de la membrane qui doit être maintenue humide en permanence. Les électrodes

sont en platine ce qui occasionne un coût de fabrication élevé. Elle fonctionne à basse température. Ce type de pile est adapté au matériel portable (ordinateur, téléphone...), au transport, et à quelques applications en stationnaire comme l'habitat. C'est aujourd'hui la technologie la plus mature.

Un second type utilise les mêmes membranes en polymère perfluoré mais fonctionne avec du méthanol comme carburant DMFC. Théoriquement, le rendement de ce type de pile devrait être très bon, mais les membranes sont souvent légèrement perméables au méthanol ce qui occasionne des chutes de rendement. On arrive ensuite aux piles à membrane liquide. L'électrolyte est alors constitué soit par un acide soit par une base concentrée. Dans les piles à combustible dites: à acide phosphorique, la membrane est constituée par de l'acide phosphorique concentré PAFC. Le système fonctionne à température intermédiaire de 150 à 220°C. Le problème de cette technologie est la corrosion très rapide des électrodes car le milieu est très agressif. Toujours dans le domaine des membranes liquide, on trouve les piles alcalines dans lesquelles l'électrolyte est constitué de potasse concentrée AFC. Là aussi, les problèmes de corrosion sont importants, les seules électrodes qui tiennent dans cet électrolyte sont en platine. Ces deux types de pile à membrane liquide ont été développés dans les années 60 au moment du développement de l'industrie spatiale.

Ensuite, on rencontre les piles dites à hautes températures. Elles fonctionnent aux environs de 650-1000°C. Il existe les piles à combustible à carbonates fondus MCFC et les piles à combustible à membrane oxyde SOFC. Dans les piles à combustible à carbonates fondus, la membrane est constituée d'un mélange de carbonates que l'on chauffe à une température supérieure à leur température de fusion. L'électrolyte sera conducteur par les anions carbonates qui vont d'une part oxyder l'hydrogène pour former de l'eau à l'anode et d'autre part réduire l'oxygène pour former des carbonates à la cathode. Les applications de telles piles ne peuvent qu'être envisagées pour des installations fixes car le milieu électrolytique est très corrosif et il existe des risques de fuite.

Enfin les piles à oxyde de zirconium; SOFC sont des matériaux bons marchés et très stables. La particularité de ce type de piles est qu'elles sont conductrices ioniques par des anions  $O^{2-}$ . Dans ce cas, l'eau est produite dans le compartiment anodique. L'intérêt de cette technologie est que l'on peut utiliser différents types de combustibles  $H_2$ ,  $CH_4$  ou les biogaz. L'inconvénient est qu'ils ne sont conducteurs qu'à haute température. Il faut donc chauffer le système. Cependant, le rendement final reste élevé si on considère la cogénération d'électricité et de chaleur.

### I.2.6. Pile a Combustible et son Environnement

En règle générale, les piles à combustible exigent un environnement complexe. Divers composants étant nécessaires pour conditionner les réactifs. Extraire les produits, stocker et transformer l'électricité produite et enfin conditionner thermiquement la pile. L'étude détaillée de certains composants d'un système de production électrique à pile à combustible constitue souvent un sujet de recherche à part entière. C'est le cas notamment des compresseurs et des humidificateurs, des convertisseurs électriques, du reformeur pour la production de l'hydrogène ou des moyens de stockage de l'hydrogène. [06]

### I.2.7. Applications et Commercialisation

Les piles à combustible peuvent en principe être utilisées dans tous les secteurs industriels concernés par la production d'énergie électrique ou mécanique. Ces utilisations peuvent être regroupées en trois classes:

- ❖ Utilisation portable telle que le téléphone et l'ordinateur
- ❖ Utilisation stationnaire dans la génération de la chaleur et de l'électricité
- ❖ Utilisation dans le transport voiture, bus et véhicules de transport.

#### I.2.7.1. Cogénération

Les utilisations stationnaires des PAC concernent la production décentralisée et centralisée de l'électricité avec des puissances allant jusqu'à des centaines de MW. Les piles MCFC et les SOFC constitueront les bases de cette production future. Les tendances vers une production décentralisée de l'électricité plus importante renforcent les utilisations stationnaires des PAFC, MCFC et les SOFC (Figure I.2).

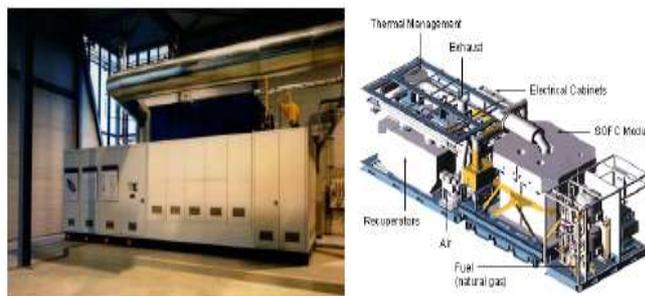


Figure I.2: Application en cogénération. Système Westervoort, Hollande 14000 h

#### I.2.7.2. Transport

L'utilisation des PAC dans le domaine de transport et l'une des raisons qui a poussé à développer cette technologie. Mais l'utilisation de l'hydrogène pour alimenter les piles à combustible dans les voitures se trouve confrontée à des contraintes sévères de volume et de coût de stockage. Les piles PEMFC et les PAFC sont les mieux adaptées à ce type d'utilisation. Toutefois l'utilisation de l'hydrogène liquéfié ou comprimé jusqu'à 700 bars peut assurer une autonomie avec un volume acceptable. Par exemple une quantité de 5 kg d'hydrogène peut assurer une autonomie de 500 km. L'efficacité de fonctionnement des voitures à PAC est améliorée en économisant jusqu'à 50% du combustible et en réduisant les émissions des gaz à effet de serre. [06]

### I.2.7.3. Portable

Les applications portables concernent essentiellement l'alimentation des ordinateurs portables et des téléphones mobiles avec de l'électricité. Les piles DMFC et les PEMFC qui chargent des petites batteries assurent l'alimentation en énergie de ces appareils mobiles, connaissent une très forte croissance. Elles sont plus performantes que les batteries au Lithium (Figure I.3).



Figure I.3: Application transport version européenne de la Chevrolet Equinox 2007  
Application portable. PC portable à PAC International Computers Inc 2006

### I.2.8. Qualités des Piles à Combustible

Les piles à combustible bénéficient de plusieurs qualités: elles sont modulaires car leurs capacités peuvent être facilement modifiées avec un ajout d'empilement ou stack, de quelques kilowatte jusqu'à des mega watte. C'est ainsi qu'elles sont flexibles dans leur utilisation, que ce soit pour des applications fixes ou mobiles. Elles ont un haut rendement de production direct d'électricité, bien meilleur que celui des systèmes classiques de production de l'électricité et de la chaleur. La chaleur produite lors du fonctionnement de la pile peut être utilisée en cogénération en augmentant davantage l'efficacité de ces piles à combustible.

Les piles à combustible peuvent être alimentées en hydrogène ou en gaz de synthèse. L'intégration d'une unité de reformage dans le système, permettrait l'utilisation d'autres combustibles riches en hydrogène, tels que le gaz naturel et certains hydrocarbures. Lorsque la

température de fonctionnement est suffisamment élevée, le système de réformation valorise la chaleur de haut niveau produit par Les piles à combustible et la réinjecte dans la pile à combustible en tant qu'énergie chimique. Les piles à combustible fonctionnent sous ces conditions d'une façon comparable au cycle combiné. Les piles à combustible n'émettent ou émettent que très peu de gaz tels que  $\text{NO}_x$  ou  $\text{SO}_x$  selon le combustible utilisé.

Le coût de fonctionnement et d'entretien est faible car ces piles ne possèdent pas de pièces mobiles. La durée de vie du stack est de 20000 à 30000 heures de fonctionnement. Comparativement à un moteur à combustion interne. Les piles à combustible ne sont pas soumises aux limitations du cycle de Carnot. Leur rendement énergétique théorique est donc plus élevé. Il correspond au rapport de l'enthalpie libre de la formation de l'eau sur l'énergie thermique délivré par la réaction.

## II. Pile à Combustible à Oxyde Solide SOFC

### II. 1. Vue générale sur les piles à combustible à oxyde solide SOFC

Les pile a combustibles à oxyde solide SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) sont une technologie jugée prometteuse pour leur rendement global et leur aptitude à fonctionner avec divers combustibles. Les SOFC sont également des piles à "haute température", tout comme les MCFC. La pile à combustible à oxyde solide est une des solutions technologiques les plus efficaces pour contrer la pollution résultant de la dépendance du monde moderne aux combustibles fossiles. Ce dispositif, qui fonctionne de manière semblable à une pile, ne pollue pas l'atmosphère, ne fait pas de bruit, ne libère que de l'eau et de la chaleur mais, surtout, produit de l'électricité. Dans les années 30 en Suisse, *Emil Baur* et *H. Preis* ont expérimenté des piles à combustible à haute température équipées d'un électrolyte à oxyde solide, en utilisant des matériaux tels que le zirconium, l'yttrium, le cérium, le lanthane et le tungstène. Ils se trouvèrent face à des problèmes de conductivité électrique et de réactions chimiques secondaires incontrôlées. Puis dans les années 40, *O. K. Davtyan* en Russie a exploré la même voie, en y ajoutant divers additifs, sans plus de succès.

Dans les années 50, divers centres de recherche aux Pays-Bas et aux Etats-Unis ont amélioré les connaissances sur la technologie des électrolytes solides. Dans Les années 60, des chercheurs de Westinghouse ont réussi à faire fonctionner une cellule utilisant un oxyde de zirconium et un oxyde de calcium<sup>1962</sup>. C'est finalement au début des années 80 que les développements ont véritablement débuté. Les recherches actuelles s'orientent vers:

- ❖ La synthèse de nouveaux matériaux permettant aux piles SOFC de fonctionner à plus basse température que les 800-1000°C, Actuellement utilisée ;

- ❖ Le développement d'anodes capables de fonctionner avec un gaz naturel, sans souffrir de l'accumulation de carbone due au craquage catalytique;
- ❖ Les recherches visent à diminuer les coûts tout en améliorant les performances.

## II.2. Structure de la pile à combustible SOFC

Une pile à combustible est constituée de deux électrodes: anode et cathode et un conducteur principalement électronique de part et d'autre d'un électrolyte principalement conducteur ionique.

### II.2.1. Electrolyte

Les électrolytes pour les piles à combustibles à oxyde solide SOFC sont des conducteurs ioniques aux ions d'oxygène. L'électrolyte habituellement de la zircone dopée à l'yttrium il était utilisé avec une épaisseur de 100 à 200 $\mu$ . Si le maximum de conductivité est atteint avec un pourcentage de 8% d'oxyde d'yttrium, la baisse progressive de conductivité avec le temps conduit à élever ce pourcentage jusque vers 12%.

### II.2.2. Electrodes

#### II.2.2.1. Cathode

Les matériaux de cathode fonctionnent en conditions très oxydantes. Ce qui interdit l'emploi de matériaux classiques et oblige à l'utilisation de matériaux nobles ou exotiques. Le matériau le plus utilisé à la cathode est un manganite de lanthane dopé au strontium  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$ . Les résistances électriques aux électrodes sont les sources principales de pertes internes.

#### II.2.2.2. Anode

Le matériau généralement utilisé à l'anode est du nickel poreux ou un mélange de nickel et d'oxyde de zirconium dopé à l'yttrium avec un catalyseur de type cermet  $\text{Ni-Zr-O}_2$ , les propriétés requises pour l'anode sont à peu près les mêmes que celles pour la cathode sauf qu'elles doivent être adaptées pour un milieu très réducteur. Chaque élément doit être stable chimiquement dans les conditions d'utilisation de la pile. En effet, chaque composant doit posséder des propriétés constantes en milieu réducteur et/ou oxydant en fonction de son rôle au sein du cœur de la pile.

Les différents composés doivent posséder un coefficient d'expansion linéaire thermique compatible avec les autres éléments pour éviter l'apparition de contraintes thermiques. Les matériaux doivent présenter une stabilité structurale et ne pas réagir d'un point de vue chimique avec les autres composants. Pour un bon fonctionnement de la pile, il est nécessaire que

l'ensemble de ces conditions soit respecté en incluant également un faible coût de fabrication. Les électrodes qui transportent les électrons sont le lieu des réactions d'électro catalyse. Ces éléments doivent être poreux, conducteurs électro chimiquement actifs et posséder une grande surface d'échange.

### II.2.3. Interconnecteur

Elles ont pour fonction de collecter le courant et d'assurer la distribution de combustible et d'air. Les matériaux utilisés dépendent des technologies développées et du niveau de température souhaité: ce peut être de la chromite de lanthane dopé au magnésium pour les températures supérieures à 900°C, ou des alliages à base de chrome et de fer. Dans le cas de piles fonctionnant à une température inférieure à 750°C, ces plaques peuvent être en aciers inoxydables. L'interconnecteur possède une bonne conductivité électronique, une excellente étanchéité et doivent supporter les milieux oxydant et réducteur de la pile en cours de fonctionnement. Ils doivent gérer l'évacuation de la chaleur et la circulation des gaz (*Figure I.4*).

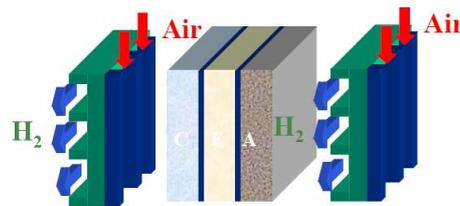


Figure I.4: Structure de la Cellule SOFC

### II.2.4. Catalyseur

Ce type de pile n'a pas besoin de catalyseur précieux.

- ❖ l'anode: un cermet Ni-Zr-O<sub>2</sub>
- ❖ à la cathode: un composé de type La<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>MnO<sub>3</sub>.

## II.3. Principe de Fonctionnement des Piles SOFC

La pile à combustible permet donc la transformation directe de l'énergie chimique de la réaction d'un combustible l'hydrogène avec un comburant l'oxygène en énergie électrique. L'énergie électrique provient de l'échange électronique de la réaction chimique et non pas de la chaleur dégagée par cette dernière. Pour ce faire, deux compartiments contenant le comburant et le combustible sont réalisés de part et d'autre de l'électrolyte évitant ainsi le mélange des gaz et donc la réaction chimique directe. De part et d'autre de l'électrolyte dans chaque compartiment gazeux sont disposées des électrodes qui assurent dans le même temps, le transport des électrons et des espèces ioniques comme indiqué (*Figure. I.5*).

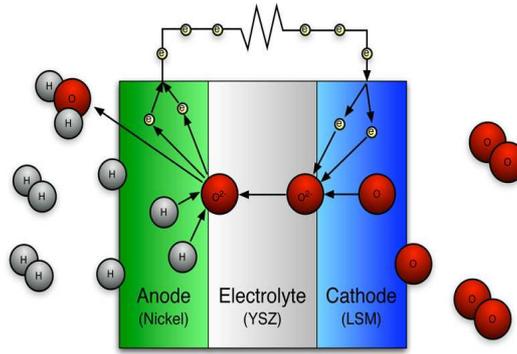


Figure I. 5: Principe de Fonctionnement de la Cellule SOFC

La réduction électrochimique de l'oxygène à la cathode conduit à la formation d'ions oxyde qui diffusent à travers l'électrolyte conducteur ionique pour atteindre le matériau d'anode où se produit l'oxydation électrochimique du combustible avec production simultanée d'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant les deux réactions (I.2) et (I.3).



Le modèle d'électrochimie est fondé sur l'hypothèse que la réaction chimique globale se produisant dans la cellule. La réaction globale est analogue à celle d'une combustion mais il ne se produit aucune combustion dans la pile SOFC, les gaz n'étant pas directement en contact.



#### II.4. Principales Caractéristiques

La pile à combustible SOFC fait partie des piles dites: à électrolyte solide; fonctionnant à haute température (650 à 1000°C). Ce niveau de température est nécessaire pour que l'électrolyte solide utilisé (habituellement de la zircone dopée à l'yttrium) ait une conductivité ionique suffisante. aujourd'hui, elles sont les moins développées malgré les efforts actuels, mais aussi celles sur lesquelles on fonde les plus grands espoirs.

Tout comme la pile MCFC, le haut niveau de température de fonctionnement permet une valorisation de la chaleur récupérée via une turbine à gaz suivie éventuellement d'une turbine à vapeur. Il faut noter, par ailleurs que la température élevée de fonctionnement permet un reformage direct du gaz naturel à l'anode. Ce type de pile fonctionne tout aussi bien en hydrogène direct. La production de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et du CO est minimale en comparaison avec les autres technologies.

Les chercheurs travaillent sur la possibilité d'abaisser sa température de fonctionnement autant que possible, tout en la maintenant au dessus de 650°C et utiliser les hydrocarbures en procédant à un reformage interne (Figure.I.6).

Deux voies sont retenues pour abaisser la température:

- ❖ la recherche d'un électrolyte restant conducteur ionique à plus basse température,
- ❖ la mise en œuvre de couches très minces avec l'électrolyte traditionnel (Zircone-Yttria) pour en diminuer la résistance interne.

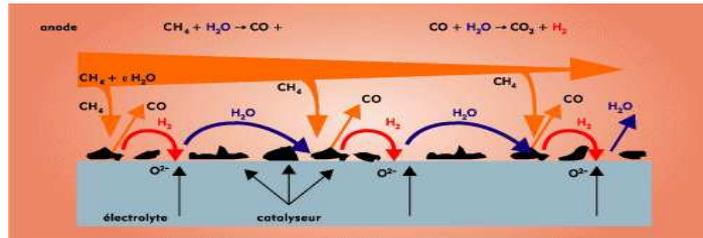


Figure.I.6: Principe de Reformage de Méthane

## II.5. Technologies Développées

La partie suivante présente les différentes géométries qui ont pu être développées par des laboratoires de recherche ou des industriels. La variété des géométries est importante. Elles ont toutes des avantages et des inconvénients qui sont souvent un compromis entre coût de fabrication, facilité d'empilement et donc de pouvoir réaliser des piles de tailles variables, ou même encore facilité dans la résolution des problèmes d'étanchéité des chambres gazeuses qui est un point très important pour les piles à combustible. Plusieurs architectures ont été étudiées pour optimiser le fonctionnement de la pile complète. Les deux principales sont les géométries tubulaires et planaire mais d'autres technologies ont également été imaginées par différentes sociétés. Elles se décrivent ainsi:

### II.5.1. Technologie Tubulaire

La cellule élémentaire est constituée d'un cylindre poreux de cathode fabriqué par extrusion, d'une couche d'électrolyte déposée par électrodéposition en phase vapeur et d'une couche poreuse d'anode déposée par spray. L'air circule à l'intérieur des tubes et le combustible à l'extérieur. Les tubes sont connectés par des feutres de nickel qui permettent la contraction et l'expansion des tubes en température. Cette technologie a été développée depuis plus de vingt ans aux Etats Unis par le groupe Westinghouse. Depuis 1998, ce groupe investit 200 millions d'euros afin de commercialiser cette technologie en 2003 sur le marché des générateurs de 250 kW de puissance. Les prix visés avoisinent les 1000 euros le kW<sub>e</sub>, ce qui représente un prix

assez compétitif pour la cogénération de puissance de type industriel. Les installations de type pile à combustibles étant très souples, Siemens Westinghouse a également projeté de construire une mini centrale de 3MWe en assemblant plusieurs modules de 250 kWe, couplés à une turbine à gaz, dont le rendement global sera proche de 75% .[05]

### II.5.2. Technologie Planaire

L'empilement est généralement composé d'une anode support d'environ 300  $\mu\text{m}$  réalisée par coulage en bande, de dépôts d'électrolyte 15-100  $\mu\text{m}$  et d'une cathode 50 -100  $\mu\text{m}$  réalisés par diverses techniques [09]. Les interconnecteurs sont généralement des plaques en acier. Cette technologie offre de meilleures performances en termes de puissance spécifique. Mais elle apparaît plus délicate à mettre en œuvre avec notamment des problèmes d'étanchéité rencontrés lors de la dilatation des matériaux dans les hautes températures. Les piles SOFC planaires ont deux types de configuration géométrique: à électrolyte supportée ou à électrode supportée; cathode supportée ou anode supportée. L'avantage de cette dernière configuration réside dans la faible résistance ohmique comparée au cas de l'électrolyte supportée.

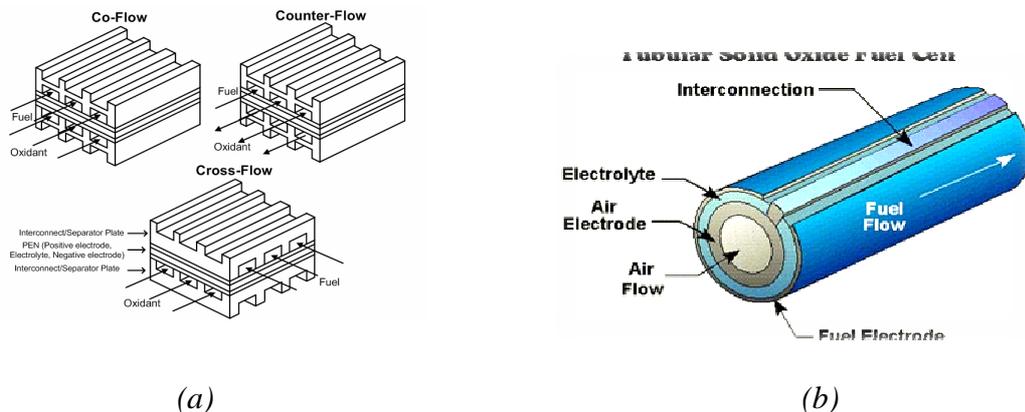


Figure 1.8: (a) Configuration SOFC Planaire, (b) Technologie Tubulaire

### II.5.3. Technologie Sulzer-Hexis

Elle est intermédiaire entre la planaire et la tubulaire. Cette technologie a été en particulier mise au point par la société Sulzer-Hexis. Le cœur de pile est constitué de disques percés en leur centre. Le combustible est amené suivant l'axe vertical, alors que l'air arrive de manière radiale sur les côtés. Toute l'astuce de ce système vient du schéma de circulation des gaz. En fait on a une structure tubulaire, par empilement de disque, et planaire puisque le gaz vient lécher un plan. Cette technologie permet d'obtenir des rendements élevés: en chauffant l'ensemble on augmente la conductivité du système.

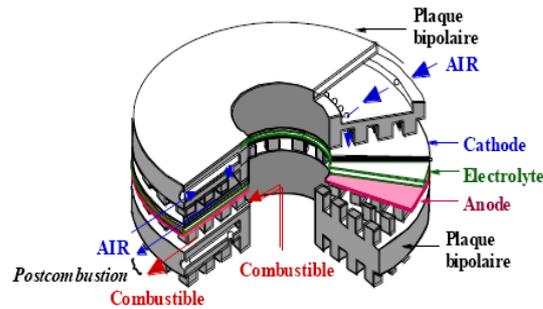


Figure I.9: Cellule Sulzer-Hexis pour la cogénération électricité et chaleur

Les matériaux utilisés sont assez variés, mais il reste toujours une part pour l'innovation dans ces deux domaines. Chacun a ses avantages et inconvénients, et globalement, le but recherché est de trouver des matériaux ou des solutions technologiques originales pour produire de l'électricité avec des systèmes moins onéreux à fabriquer, fonctionnant à plus basse température et présentant les sécurités requises pour une commercialisation.

#### II.5. 4. Technologie Monolithique

Des technologies plus originales, propres à certaines entreprises, elle permet une plus grande compacité et des densités de courant plus élevées. En effet, la puissance spécifique attendue est proche de  $4\text{kW}/\text{dm}^3$  [24]. Cependant, peu d'informations sont disponibles sur l'état d'avancement de cette technologie développée par le groupe Américain Honeywell.

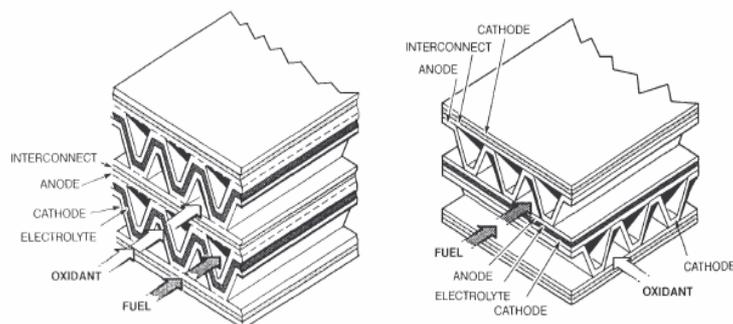


Figure I.10: Technologie Monolithique

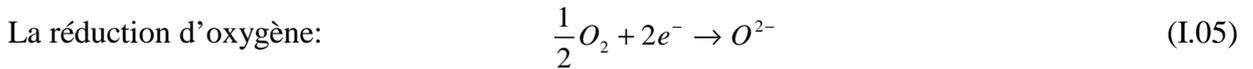
Enfin, il faut parler de la technologie développée par Roll Royce, qui est issue de l'industrie microélectronique, Elle consiste à déposer en couches minces l'empilement anode-électrolyte-cathode sur un substrat poreux. Les gaz vont ainsi diffuser facilement à l'intérieur du substrat pour réagir aux électrodes. Le grand nombre de micro-piles déposées par unité de surface,

associées en série via des interconnecteurs permet d'intégrer directement sur les cartes électroniques des micros générateurs. Les applications de cette technologie sont cependant limitées à la microinformatique, aux portables ou autres dispositifs de faible puissance.

### III. Thermodynamique et Electrochimie de la pile

#### III.1. Réactions Electrochimiques

Il s'agit d'une oxydoréduction électrochimique contrôlée du carburant plus un comburant, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur. Les réactions électrochimiques s'opèrent au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes: anode et cathode séparées par un électrolyte solide, conducteur des ions d'oxygène  $O^{2-}$ , considérons que l'hydrogène et l'oxygène sont utilisés comme carburant et comburant suivant les réactions:



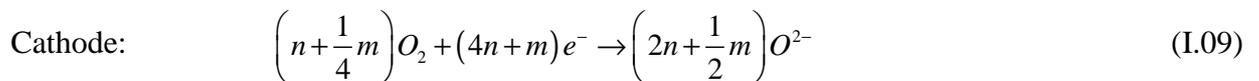
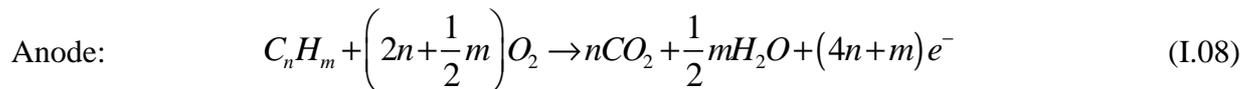
et l'oxydation du carburant est effectuée à l'interface anode-électrolyte selon la réaction:



Le modèle d'électrochimie est fondé sur l'hypothèse que la réaction chimique globale se produisant dans la cellule est:



En générale, pour un hydrocarbure de type  $C_nH_m$  les deux réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent au niveau des électrodes sont :



La différence entre le potentiel des électrodes. cette différence est toujours inférieure à la force électromotrice à vide donnée par la formule de *Nernst*. Ce fait a plusieurs facteurs, d'une part le passage d'un courant électrique fini dans la pile provoque une chute de tension due aux différents phénomènes de polarisations qui sont responsables au dégagement de chaleur. Et d'autre part une chute de tension causée par les réactions électrochimiques et la différence de concentration. La tension de Nernst est donnée en fonction des pressions partielles des trois espèces et de la température.

### III.2. Potentiel de NERNST

La force électromotrice ou tension thermodynamique réversible d'une pile à combustible représente la différence de potentiel entre la cathode et l'anode. Elle est donnée par l'équation de Nernst:

$$E_{NERNST} = E_{cathode} - E_{anode} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_{2c}}}{P_{O_{2a}}} \quad (I.10)$$

Pour une certaine pression partielle d'oxygène à la cathode, l'amplitude de la tension de NERNST dépendra de la pression partielle d'oxygène à l'anode, qui dépend-elle de la nature du combustible fourni à l'anode. Dans le cas le plus général où l'hydrogène est le combustible, la réaction suivante s'établit à l'anode:

$$E_{nernst} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (I.11)$$

### III.3. Potentiel Réel

Lorsque la pile débite des irréversibilités la tension de la cellule devient :

$$E = E_{NERNST} - \eta \quad (I.12)$$

$$\eta = \eta_{ohm} + \eta_{act,an} + \eta_{act,ca} + \eta_{conc,an} + \eta_{conc,ca} \quad (I.13)$$

La polarisation ne peut pas être éliminée, simplement minimisée grâce au choix des matériaux et à la géométrie de la pile. Bien entendu, température, pression, ou encore composition de l'électrolyte et électrodes sont autant de facteurs qui influencent la polarisation de cellule.

#### III.3.1. Polarisation Ohmique

La polarisation ohmique ; ou la résistance de polarisation est causée par la résistance rencontrée lors du transport des ions au travers de l'électrolyte mais aussi des électrons au travers des électrodes et collecteurs de courant. Elle provient également des résistances de contact entre les différents matériaux constituant la pile. Son expression est la suivante, avec R représente la résistance interne de la cellule (ionique et électronique).

$$\eta_{ohm} = iR = i \left[ \frac{e_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{e_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{e_{cathode}}{\sigma_{cathode}} \right] \quad (I.14)$$

#### III.3.2. Polarisation D'activation

Les réactions électrochimiques impliquent une barrière d'énergie appelée énergie d'activation. La polarisation d'activation peut être vue comme le 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 d'activation est liée à la densité de courant par l'équation de **Butler-Volmer**:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (I.15)$$

La densité de courant est donné par :

$$i = i_0 \exp \left[ \frac{\alpha \eta_a F}{RT} \right] - i_0 \exp \left[ \frac{(1-\alpha) \eta_c F}{RT} \right] \quad (I.16)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de transfert et  $i_0$  la densité de courant échangée. Le coefficient de transfert est considéré comme la fraction de la variation de la polarisation qui mène à une variation de la constante de réaction. La densité de courant échangée est liée quant à elle au bilan de la réaction d'électrode à l'équilibre.

### III.3.3. Polarisation de Concentration

Les surtensions de concentration sont causées par la diffusion de gaz dans les électrodes poreuses. Ces pertes sont en fonction des pressions partielles des gaz produites et les gaz réactant au niveau des canaux et au niveau des interfaces électrodes/électrolyte. Les pertes de concentration au niveau de l'anode et la cathode prennent les formes suivantes:

$$\eta_{conc,an} = \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O,TPB} \cdot P_{H_2,TPB}}{P_{H_2O,f} \cdot P_{H_2,TPB}} \right) \quad \text{et} \quad \eta_{conc,cath} = \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{P_{O_2,a}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (I.18)$$

De manière générale, le transport de masse est fonction de la température, de la pression et de la concentration des espèces. Les réactifs doivent diffuser au travers de la porosité des électrodes d'où l'importance de la microstructure et de la géométrie de celles-ci. Notant que ; la polarisation de réaction Elle apparaît quand la réaction d'électrode est influencée par une réaction chimique, ce qui est le cas quand la cinétique d'apport des réactifs ou de départ des produits au voisinage de l'électrode avant ou après la réaction de cellule, est faible. Ce type de polarisation est similaire au phénomène de polarisation de concentration précédemment expliqué, à haute température cette polarisation de réaction est normalement faible.

## *Chapitre II*

### *Pile SOFC Etat de l'Art et Modélisation*

## Chapitre II: Pile SOFC Etat de l'Art et Modélisation

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

### Introduction

Le transfert d'énergie thermique au sein d'une pile SOFC se fait généralement par une combinaison des trois modes; la conduction, la convection et le rayonnement. Nous abordons avec ce chapitre l'étude d'un mode de transfert d'énergie thermique qui est le rayonnement électromagnétique. En premier lieu, on donne les notions de base sur le transfert de chaleur radiatif, la description et la définition des paramètres énergétiques, la formulation et la modalisation des phénomènes de transfert de chaleur radiatif.

La deuxième partie de ce chapitre est un état de l'art sur les travaux de simulation et modélisation des phénomènes de transfert de chaleur au sein d'une pile SOFC. Cette dernière fait l'objectif de plusieurs travaux théoriques, numériques et expérimentaux. C'est suivant les travaux consultés qu'on a fait une étude détaillée basée sur les modèles thermiques couplant les différents modes de transport d'énergie thermique et les divers sources volumiques de génération de chaleur.

Le fait que la pile SOFC est dit à haute température. Cela provoque un échange de chaleur très important entre les différents composants de la pile SOFC. Dans ce cadre on parle de rayonnement thermique et on s'intéresse à la modélisation de transfert radiatif dans la pile SOFC. Mais 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.

Une troisième partie porte sur les données générales de la pile SOFC. On site: les conditions globale de fonctionnement, les dimensions, les paramètres dynamique ainsi que les propriétés thermique et thermo radiatives des réactif et des matériaux constituant la pile SOFC.

### I. Rayonnement Thermique

#### I.1. Notions Fondamentales sur le Rayonnement Thermique

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est qu'il peut se propager dans le vide. Cet échange de chaleur attribué à l'émission, par la matière du fait de sa température, d'ondes électromagnétiques est appelé rayonnement thermique. Il ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel.

Le rayonnement thermique est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.1 et 100 $\mu$ m. Il inclut le domaine du visible; onde lumineuse ou lumière de 0.4 et 0.8  $\mu$ m et n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques. Au niveau microscopique, ce phénomène ne peut s'expliquer en physique classique. Cependant, on retiendra comme image que plus la température du corps est élevée, plus l'agitation thermique responsable de l'émission est élevée.

Comme tout rayonnement électromagnétique, le rayonnement dit thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre (répartition de l'énergie suivant la longueur d'onde). Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente. Il faut finalement distinguer la nature des récepteurs de ce rayonnement thermique. Certains le réfléchissent, d'autres l'absorbent et le transforment en énergie interne pour rayonner à leur tour.

### **I.1.1. Émission**

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission.

### **I.1.2. Absorption**

Il s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé.

### **I.1.3. Réflexion et Diffusion**

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions on distingue deux cas: le premier cas le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique. Il s'agit alors de la réflexion. Et le deuxième cas le renvoi se fait dans toutes les directions. On parle alors de diffusion. On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente.

### **I.1.4. Transparence et Opacité**

Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente. Il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent. En première approximation, le verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible. Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

### **I.1.5. Flux Incident**

Le flux incident  $\Phi_i$  est défini comme la puissance surfacique du rayonnement incident en un point considéré de la surface du corps étudié. Le flux incident est soit réfléchi-diffusé, soit absorbé.

### I.1.6. Flux Partant

Le flux surfacique partant du corps est lui la somme du flux émis et du flux réfléchi. Un petit résumé avec un schéma représentant les différents flux au niveau de la surface d'un corps opaque. On remarque que le flux émis n'est pas forcément à la même longueur d'onde que le flux incident.

$$\Phi_{\text{incident}} = \Phi_{\text{reflechi}} + \Phi_{\text{diffuse}} + \Phi_{\text{emis}} + \Phi_{\text{absorbe}} \quad (\text{II.1})$$

### I.1.7. Équilibre Radiatif

On dit qu'un corps opaque est en équilibre radiatif avec le rayonnement qui l'entoure, s'il n'emmagasine pas d'énergie ou n'en perd pas. Dans ces conditions, le flux incident doit être égal au flux partant.

### I.1.8. Corps Noir

Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis. La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux émis d'un corps noir à la température  $T$ . La loi de Wien découle directement de la formule de Planck. Pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde où le flux est maximal. La loi de

Stefan est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde. La formule de Stefan est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température. On note la forte dépendance en  $T$  puisqu'il s'agit d'une puissance quatrième. Alors que la température du soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la Terre son flux partant est  $16 \cdot 10^4$  fois plus élevée. La figure (II.1) représente la distribution de l'énergie des corps noirs aux différentes températures. La forme caractéristique en cloche de la distribution de luminance (loi de Planck), le déplacement du pic d'émission (loi de Wien) et l'énergie totale rayonnée est représentée par l'aire sous la courbe (loi de Stefan).

## I.2. Définition des Grandeurs Energétiques

Tout corps matériel, à la température absolue  $T$ , rayonne de l'énergie dans toutes les directions sous forme d'ondes électromagnétiques de différentes fréquences, donc des différentes longueurs d'onde  $\lambda$ . On parle du *Rayonnement Thermique* émis par la surface du corps. Ce

rayonnement thermique à des caractéristiques mesurables. On fera la distinction entre ces diverses définitions.

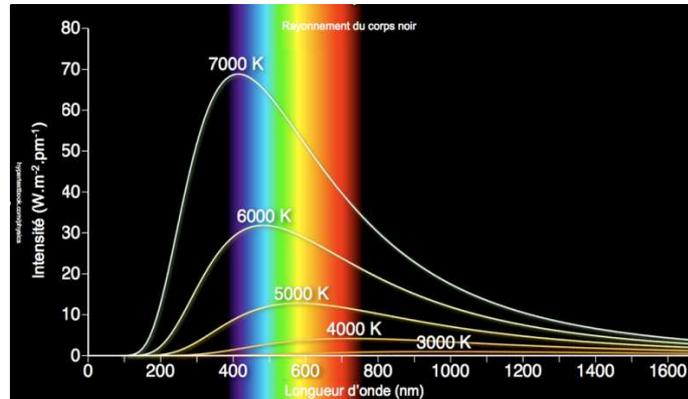


Figure. II.1: Intensité de rayonnement d'un corps noir

### I.2.1. Flux Radiatif

Cette notion est bien connue. C'est l'énergie ou la puissance par unité de temps traversant une surface S. Cette surface peut-être une surface émettrice ou réceptrice.

### I.2.2. Intensité

C'est le flux émis par unité d'angle solide. Il est exprimé en watt par stéradian. L'intensité dépend en général de la direction. On peut également la définir monochromatique.

$$I(\lambda) = \frac{d^2\phi}{d\Omega d\lambda} \quad I = \int I(\lambda) d\lambda \quad (\text{II.2})$$

### I.2.3. Émittance Totale

C'est la puissance totale émise par unité de surface dans toutes les directions du demi-espace supérieur à la surface et pour toutes les longueurs d'onde.

$$M(T) = M_T = \int M_{T,\lambda}(T) d\lambda \quad (\text{II.3})$$

### I.2.4. Luminance monochromatique

C'est la puissance émise par unité de surface et par unité d'angle solide dans une direction donnée.

$$L(T) = \iint L_{T,\lambda,\Omega}(\Omega) d\Omega d\lambda \quad (\text{II.4})$$

Ces deux grandeurs sont des puissances émises par unité de surface. Lorsqu'elles concernent toutes les longueurs d'onde émises et toutes les directions d'émission, elles sont qualifiées de totales. Si elles concernent une direction ou une longueur d'onde précise, elles sont qualifiées de directionnelles et/ou monochromatiques.

## I.3. Equation de Transfert Radiatif

Dans un milieu semi transparent, gris, absorbant, émissif et diffusant et à l'équilibre thermodynamique local, le transfert radiatif est décrit par l'équation suivante:

$$\bar{\nabla} \cdot (L(s, \bar{\Omega}) \cdot \bar{\Omega}) = -(k_a + k_d) L(s, \bar{\Omega}) + k_a L_b(s) + \frac{k_d}{4\pi} \int_{4\pi} L(s, \bar{\Omega}') P(\bar{\Omega}, \bar{\Omega}') d\Omega_i \quad (\text{II.5})$$

La condition aux limites radiative d'une surface grise et diffusante en émission comme en réflexion est exprimée par:

$$L_p(\bar{\Omega}) = \frac{\varepsilon_p \sigma T_p^4}{\pi} + \frac{1 - \varepsilon_p}{\pi} \int_{\bar{\Omega}', \bar{n}_p < 0} L_p(\bar{\Omega}') |\bar{\Omega}' \cdot \bar{n}_p| d\Omega'_i \quad \text{si } \bar{\Omega}' \cdot \bar{n}_p > 0 \quad (\text{II.6})$$

Où  $\bar{n}_p$  est un vecteur normal à la surface considérée. L'équation (II.5) est de type intégral-différentiel et fait intervenir non seulement une dérivation spatiale mais aussi une intégration angulaire sur l'angle solide total  $\Omega = 4\pi$ . Pour résoudre numériquement cette équation, la discrétisation des domaines spatial et angulaire est nécessaire pour déterminer le champ de luminance spectrale.

## II. Transfert de Chaleur Radiatif et les Pile SOFC

A cause de sa haute température de fonctionnement de 800-1000°C, le rayonnement thermique peut jouer un rôle important dans la combinaison de transfert thermique au sein des piles à combustible à oxyde solide SOFCs. 0.02% de l'énergies est transporté par conduction; 1.9% de l'énergies est transporté par convection et 98% d'énergies est transporté par rayonnement Grzegorz Brus et al [8]. En générale les matériaux constituant l'électrolyte SOFC sont des matériaux semi-transparent. Il peut absorber, disperser et émettre le rayonnement thermique. La simulation de transfert de chaleur radiative passe par l'équation de transfert de chaleur radiatif ETR. La résolution de cette équation permet de déterminer la distribution spatiale du champ de la luminance spectrale et le flux de chaleur radiatif.

### II.1. Propriétés Thermiques radiatives

Pour un milieu linéaire, le coefficient d'absorption spectrale, l'indice de réfraction, le coefficient de dispersion, fournissent un ensemble complet des propriétés phénoménologiques nécessaire pour modéliser la propagation de l'énergie radiative. En outre, l'émissivité et la réflectivité doivent être fournies afin de préciser les conditions aux limites [20;24]. Ces propriétés radiatives changent typiquement avec la longueur d'onde. Pour des températures de fonctionnement 900K-1100K, l'indice de réfraction de l'électrolyte est égale à 1,8 ou 90% de la puissance émissive est contenu dans la région des longueurs d'ondes  $0,9 < \lambda < 7,8$ . La détermination des propriétés radiatives des matériaux concernés s'effectue soit par le biais des méthodes expérimentaux ou par des modèles prédictifs. La connaissance précise de ces

propriétés en fonction de la longueur d'onde et de la température est actuellement le plus grand obstacle à la juste prévoir de transfert de chaleur radiatif dans électrodes et l'électrolyte des systèmes SOFC [20].

## **II.2. Modélisation et Simulation du Transfert Radiatif dans la pile SOFC**

Dans le cas des milieux semi-transparents, le transfert de chaleur par rayonnement est modélisé à l'aide de l'équation du transfert radiatif ETR qui permet de déterminer le champ de luminance dans le milieu [16], [20] et [24]. Le flux radiatif est donné en intégrant le champ de luminance dans toutes les directions de l'espace et sur toutes les longueurs d'ondes. L'équation du transfert radiatif ETR, prise sous sa forme complexe, n'a pas de solution analytique. Il apparaît alors nécessaire d'employer une méthode numérique pour résoudre cette équation. Plusieurs méthodes numériques existent pour simuler le transfert radiatif. Par exemple, la méthode de Monte Carlo propose une solution originale dans la mesure où elle repose sur un suivi de photons effectué de manière probabiliste, suivi d'un traitement statistique donnant accès aux grandeurs énergétiques [16]. La méthode des zones est basée sur un ensemble de bilans entre zones et surfaces isothermes...ect.

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 intégro-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. Parmi les différentes méthodes existantes, il y a les méthodes dites approchées et les méthodes numériques [20], [08], [24] et [16].

### **II.2.1. Méthodes approchées**

Il s'agit généralement de méthodes donnant des formes simplifiées de solutions formelles. Parmi lesquelles 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 [24].

### **II.2.2. Méthodes numériques**

La simulation du transfert de chaleur radiative passe par l'équation de transfert de chaleur radiatif ETR. Cette équation peut être dérivée directement à partir de l'équation de Boltzmann

appliquée aux photons. On peut aussi l'établir à partir d'un bilan d'énergie. Les méthodes numériques utilisées pour la résolution de l'équation de transfert radiatif ETR sont relativement nombreuses [20] et [16];

#### ❖ **Méthode de Monte Carlo**

Cette méthode se distingue des autres par le fait qu'elle ne passe pas par la résolution de l'ETR. Elle est basée sur une approche statistique pour résoudre le transfert radiatif en utilisant une description probabiliste des processus d'échanges radiatifs.

#### ❖ **Méthode des zones**

Cette méthode consiste à diviser le milieu en un nombre fini de zones volumiques isothermes et les surfaces entourant le milieu en un nombre fini de zones surfaciques isothermes. Le transfert radiatif est alors modélisé en écrivant un bilan d'énergie pour chaque zone.

#### ❖ **Méthodes multi flux**

Le principe de ces méthodes repose sur une discrétisation de l'espace angulaire et, dans les différents angles solides formés, la luminance est considérée uniforme.

#### ❖ **Méthode des ordonnées discrètes**

Également appelée MOD ou méthode SN. Elle consiste à approcher le terme intégral dans l'équation par une formule de quadrature. En écrivant l'ETR pour chaque direction, on obtient alors un système d'équations aux dérivées partielles qui se résout en utilisant une discrétisation spatiale, par une méthode aux différences finies par exemple.

#### ❖ **Méthode des harmoniques sphériques**

Cette méthode consiste à développer la distribution angulaire de la luminance en une série d'harmoniques sphériques. La série peut être tronquée arbitrairement à N termes. Le problème devient un système d'équations aux dérivées partielles.

#### ❖ **Méthode des transferts discrets**

Cette méthode privilégie la discrétisation angulaire du rayonnement aux parois. L'idée est de suivre un rayon à la fois, plutôt que de résoudre tout le champ de luminance à travers le domaine.

#### ❖ **Méthode des volumes finis**

La résolution des transferts radiatifs par la méthode des volumes finis est relativement récente. C'est une méthode dans laquelle on exprime que les flux d'énergie radiative entrant et sortant au travers des faces d'un volume de contrôle sont compensés par l'atténuation et l'augmentation d'énergie radiative dans ce même volume et ce pour un angle de propagation donné. L'angle solide total ( $\Omega=4\pi$ ) est discrétisé en un nombre fini d'angles solides d'une manière qui dépend du problème traité. La méthode des volumes finis est conservative car elle

assure la conservation globale de l'énergie pour chaque composante discrète de la luminance ainsi que pour les flux radiatifs. Signalons qu'un soin tout particulier doit être apporté à chaque niveau de discrétisation. Le choix de la quadrature angulaire pour la discrétisation directionnelle, du mode de discrétisation spectrale et de la discrétisation spatiale conditionne la qualité du résultat.

Chacune des méthodes citées plus haut présente ses avantages et ses inconvénients. quoi qu'il en soit, aucune de ces méthodes n'est considérée comme étant la plus adaptée à tout type de problème. Le choix d'une méthode est le plus souvent conditionné notamment, par la nature du milieu à étudier, la variété des conditions aux limites qui peuvent être traitées et la précision et le temps de calcul.

### **III. Etat de l'art et modalisation**

Cette synthèse bibliographique concerne les travaux publiés récemment sur la pile SOFC. Elle porte sur la modélisation des phénomènes de transport en général et les phénomènes de transport de chaleur en particulier. Sachant que la configuration géométrique de la pile (planaire ou tubulaire), les dimensions de l'électrolyte et des électrodes, le type de métaux de construction, la technologie de fabrication et les conditions de fonctionnement de la pile telle que la température et la densité de courant ont une influence directe sur la distribution spatiale de la température et l'ensemble des conditions de fonctionnements de la pile SOFC, plus d'intérêt sera porté aux cas dont le transfert radiatif apparaît dans la combinaison des modes de transfert de chaleur.

Dans ce qui suit, on décrit les modèles thermiques, les termes de transport conductif, convectif et rayonnant et les expressions des termes sources de chaleur évaluées par chaque auteur. On donne l'ensemble des paramètres physiques ainsi que les propriétés thermique thermo radiatives de la cellule SOFC.

#### **III.1. Modélisation des phénomènes de transfert de chaleur**

##### **III.1.1. Géométrie Tubulaire**

**Y. Mollayi Barzi et al [4] (2009)** ont développé un modèle à deux dimension 2D pour une cellule tubulaire SOFC, en utilisant la méthode des volumes finis pour résoudre l'équation de transport non linéaire. Les paramètres électrochimiques: pression, température, concentration locale des espèces sont calculés. Le procédé itératif est employé pour résoudre les équations électrochimiques, électriques et l'équation de transport simultanément. Ce modèle prévoit le taux

d'échauffement de cellule qui dépend de la température d'écoulement. La réponse électrique de la cellule est d'environ 2.5 fois plus vite que la réponse de la température (Tableau II.1).

Tableau II.1: Modèle thermique [4]

$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p u T)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho C_p v T)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}$	
<i>Paramètre</i>	<i>Expression</i>
Source de chaleur volumique	$\dot{Q} = \dot{Q}_p^e + \dot{Q}_p^a + \dot{Q}_p^c + \dot{q}_p^{th}$
Source de chaleur cathodique	$\dot{Q}_p^c = \frac{R_p^c I_p^2}{\Delta V_p^c}$
Source de chaleur anodique	$\dot{Q}_p^a = \frac{R_p^a I_p^2}{\Delta V_p^a}$
Source de chaleur à l'électrolyte	$\dot{Q}_p^e = \frac{R_p^e I_p^2}{\Delta V_p^e}$
Source électrochimique	$\dot{q}_p^{th} = \left[ \frac{\Delta H}{2F} - E_p \right] \times I_p$

**D. S'anchez et al [13] (2007).** Quatre modèles détaillés et compliqués sont utilisés pour simuler le transfert de chaleur par convection et par rayonnement dans une cellule SOFC tubulaire pour les cas où des modèles simples peuvent être utilisés. Les erreurs sont évaluées et comparées à celles des modèles les plus complexes. Pour le transfert de chaleur par convection, deux représentent la variation du coefficient de transfert de chaleur en fonction de la température locale. Ce modèle donne une valeur pour le deuxième modèle et utilise une valeur moyenne du coefficient de transfert qui est appliqué à toute la longueur de la gaine. Il est conclu qu'il est nécessaire de calculer les températures locales. Un modèle simple peut être utilisé pour évaluer la performance globale de la cellule avec satisfaction. Pour le transfert de chaleur par rayonnement deux modèles sont présentés. L'un des deux modèles considère et exclusivement le rayonnement radial et par conséquent l'échange radiatif entre les cellules adjacentes est négligé. D'autre part le second modèle représente le rayonnement dans toutes les directions ce qui augmente sensiblement la complexité du problème. Dans ce cas il est conclu que les écarts entre les deux modèles sont plus élevés que pour la convection. En effet un modèle simple peut conduire à une sous-estimation non négligeable de la température de la cellule (Tableau II.2).

Tableau II.2: Modèle thermique [13]

<b>Equation d'énergie: Terme de convection</b>	
Flux de chaleur par convection	$q_{conv} = h_{cv} (T_{wall} - T_{gaz})$
Coefficient de transfert de chaleur convectif	$h_{cv} = \frac{Nuk}{D_h}$
<b>Nombre du NUSSELT</b>	$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)[R_e - 1000]P_r}{1 - 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(P_r^{2/3} - 1\right)} \left(1 + \left(\frac{D_h}{L}\right)^{2/3}\right) \quad ; \quad f = \frac{1}{0.79 \ln(R_e) - 1.64}$
<b>Equation d'énergie terme de rayonnement</b>	
Modèle simple	$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_{cathode}^4 - T_{injector}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{cathode}} + \frac{D_{cathode}}{D_{injector}} \left(\frac{1}{\epsilon_{injector}} - 1\right)} \pi D_{cathode} \Delta x$
Modèle complexe	$Q_{rad,i} = \left(J_i - \sum_{\forall j} F_{ij} J_j\right) S_i \quad ; \quad J_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \sum_{\forall j} (1 - \epsilon_j) F_{ij} J_j$

**Xiongwen Zhang et al [5] (2009).** Les caractéristiques de la génération d'énergie thermique ont été analysées sur la base des résultats d'une simulation numérique en trois dimensions 3D d'une cellule tubulaire à oxyde solide. Les Processus électrochimiques où la réaction exothermique génèrent 82.7% de l'ensemble de la production de la chaleur et la source ohmique présente que 17.3%. L'absorption de la chaleur durant la réaction du reformage présente 47.3%, l'écoulement d'air prend 36.6% de la génération de la chaleur et le reste 16% est emporté par le débit de carburant (Tableau II.3).

**Tae Won Song et al [21] (2009).** Un modèle quasi bidimensionnel (quasi-2D) est proposé comme un outil pour prévoir l'exécution du système des cellules SOFC composé des paquets Tubulaires SOFC et de réformateur interne. Le modèle est développé en considérant les caractéristiques de transfert de chaleur et de masse le long de la direction longitudinale du système et les caractéristiques électrochimiques dans la direction perpendiculaire. La distribution de la température dans le carburant et le jet d'air le long de la direction longitudinal des SOFC tubulaire montre les phénomènes importants qui incluent l'élévation de la température près de l'entrée de la cellule par la réaction électrochimique, sa dimension due à la chaleur transférée à partir de la cellule du carburant au réformateur interne qui absorbe la chaleur durant les réactions de reformage. On constate que l'arrangement, les composants et les caractéristiques du système

influencent de manière significative la chaleur transférée. Les résultats du quasi modèle sont appliqués pour le système hybride tubulaire d'une turbine à gaz SOFC (MGT) (Tableau II.4).

**D. S'anchez et al [14] (2006).** Un modèle bidimensionnel asymétrique d'une SOFC tubulaire contient une étude rigoureuse de l'échange de chaleur radiatif entre la surface de l'anode et le gaz du carburant contenu dans la partie anodique pour évaluer l'effet du transfert de chaleur par rayonnement sur la performance globale d'une cellule. En tenant compte de la production de la chaleur à l'intérieur de la cellule causée par l'effet joule, les résultats montrent que, sous certaines conditions de fonctionnement, cet effet peut être négligé dans la plus part des cas (Tableau II.5)

Tableau II.3: Modèle thermique [5]

<i>Equation d'énergie généralisée</i> $\Phi = T$	
$\underbrace{\text{div}(\rho \vec{v} \phi)}_{\text{terme convective}} = \underbrace{\text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi)}_{\text{terme diffusif}} + \underbrace{S_{\phi}}_{\text{terme source}} \quad S_{\phi} = S_{\text{ohmique}} + S_{\text{radiative}} + S_{\text{chimique}}$ $S_{\phi} = \int_{\Sigma} I \cdot \vec{S} \cdot \vec{n} d\Sigma + \sigma \text{grad} \phi \text{grad} \phi + (r_f - r_b) \frac{\Delta H_E A_{CV} \left  \begin{matrix} \vec{i} \cdot \vec{n} \end{matrix} \right }{2F}$	
<i>Equation de transfert de chaleur radiatif</i>	
$\tilde{N} \cdot \left( I \left( \begin{matrix} \vec{r} \\ \vec{S} \end{matrix} \right) \vec{S} \right) + (a_s + a) I \left( \begin{matrix} \vec{r} \\ \vec{S} \end{matrix} \right) = a n^2 \frac{\sigma_s T^4}{\pi} + \frac{a_s}{4\pi} \int_{4\pi} I \left( \begin{matrix} \vec{r} \\ \vec{S} \end{matrix} \right) \theta(S, S') d\Omega_i$	
Source de chaleur radiative	$Q_{rad} = \int_{\Sigma} I \cdot \vec{S} \cdot \vec{n} d\Sigma$
Source de chaleur ohmique	$Q_{ohm} = \sigma \text{grad} \phi \text{grad} \phi$
Source de chaleur chimique	$Q_{chim} = (r_f - r_b) \Delta H_S + r_R \Delta H_R + \frac{\Delta H_E A_{CV} \left  \begin{matrix} \vec{i} \cdot \vec{n} \end{matrix} \right }{2F}$

**Pedro Noether et al [17] (2006).** Une simulation numérique à l'aide d'un modèle en cascade à deux dimensions d'une pile à combustible SOFC de type micro tubulaire avec pré-chauffeur a été développée pour déterminer et calculer la répartition des paramètres physiques; la température, la tension, le courant et les espèces des gaz. L'objectif était de comparer deux modèles différents. A l'état d'équilibre les résultats de la simulation ont montré que la conception en cascade des cellules SOFC est capable de fonctionner sous des tensions plus élevées avec une résistance de polarisation ohmique anodique et cathodique 84 fois plus faible sous une tension moyenne de 0,7 V. Cette conception offre la possibilité de faire fonctionner la

cellule sous les tensions les plus élevées. Cela pourrait être intéressant pour réaliser l'utilisation élevée du carburant (plus de 85%) avec une faible chute temporaire de tension (Tableau II.6).

Tableau II.4: Modèle thermique [21]

<b>Bilan thermique l'air et le tube d'alimentation d'air</b>
$\sum \dot{n}_{x,i} \bar{h}_x (T_{a,ft,i}) - \sum \dot{n}_{x,i+1} \bar{h}_x (T_{a,ft,i+1}) = h_{a1} A_{ft} (T_{ft,i} - T_{a,ft,m})$
<b>Bilan thermique: tube d'alimentation de l'air et la paroi intérieure du tube SOFC</b>
$\sum \dot{n}_{x,i+1} \bar{h}_x (T_{a,c,i+1}) - \sum \dot{n}_{x,i} \bar{h}_x (T_{a,c,i}) = h_{a2} A_c (T_{c,i} - T_{a,c,m}) + h_{a3} A_{ft} (T_{ft,i} - T_{a,c,m}) - Q_{elec,ox}$
$Q_{elec,ox} = \frac{1}{2} (z_{H_2} + z_{CO}) \bar{h}_{O_2} (T_{a,c,m})$
<b>Bilan thermique : paroi du tube d'alimentation de l'air</b>
$h_{a1} A_c (T_{ft,i} - T_{a,ft,m}) + h_{a3} A_{ft} (T_{ft,i} - T_{a,c,m}) = 0$
<b>Bilant thermique: mur extérieur du tube SOFC et mur de réformateur</b>
$\sum \dot{n}_{x,i+1} \bar{h}_x (T_{f,c,i+1}) - \sum \dot{n}_{x,i} \bar{h}_x (T_{f,c,i}) = h_{f1} A_c (T_{c,i} - T_{f,c,m}) + h_{f2} A_{rw} (T_{rw,i} - T_{f,c,m}) - Q_{elec,fuel}$
$Q_{elec,fuel} = z_{H_2} [\bar{h}_{H_2} (T_{f,c,m}) - \bar{h}_{H_2O} (T_{c,i})] + z_{CO} [\bar{h}_{CO} (T_{f,c,m}) - \bar{h}_{CO_2} (T_{c,i})]$
<b>Bilan thermique: mur du tube SOFC et mur du reformeur</b>
$Q_{elec,fuel} + Q_{elec,ox} - W_{FC,i} = h_{a2} A_c (T_{c,i} - T_{a,c,m}) + h_{f1} A_c (T_{c,i} - T_{f,c,m}) + Q_{rad} - k_{s,c} A_{s,c} \Delta x \frac{d^2 T_c}{dx^2}$
$Q_{rad} = \sigma A_{rad} \sum_{j=1}^N \frac{(T_{c,i}^4 - T_{rw,j}^4)}{\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} + \frac{1}{F_{i-j}} + \frac{1 - \epsilon_{rw}}{\epsilon_{rw}}}$
<b>Bilan thermique entre les plaques d'alimentation du carburant</b>
$\sum \dot{n}_{x,i+1} \bar{h}_x (T_{f,fp,i+1}) - \sum \dot{n}_{x,i} \bar{h}_x (T_{f,fp,i}) = h_{fp} A_{fp} (T_{fp,i} - T_{f,fp,m})$
<b>Bilan thermique : plaque d'alimentation du carburant et du mur de reformeur</b>
$\sum \dot{n}_{x,i} \bar{h}_x (T_{f,rw,i}) - \sum \dot{n}_{x,i+1} \bar{h}_x (T_{f,rw,i+1}) = h_{r1} A_{rw} (T_{rw,i} - T_{f,rw,m}) + h_{r2} A_{fp} (T_{fp,i} - T_{f,rw,m})$
<b>Bilan thermique: plaque d'alimentation du carburant</b>
$h_{r2} A_{fp} (T_{fp,i} - T_{f,rw,m}) + h_{fp} A_{fp} (T_{fp,i} - T_{f,fp,m}) = 0$
<b>Bilan thermique: mur de reformeur</b>
$Q_{rad} = h_{f2} A_{rw} (T_{rw,i} - T_{f,c,m}) + h_{r1} A_{rw} (T_{rw,i} - T_{f,rw,m}) - k_{s,rw} \Delta x \frac{d^2 T_{rw}}{dx^2}, \quad Q_{rad} = \sigma A_{rad} \sum_{j=1}^N \frac{(T_{c,j}^4 - T_{rw,i}^4)}{\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} + \frac{1}{F_{i-j}} + \frac{1 - \epsilon_{rw}}{\epsilon_{rw}}}$

Tableau II.5: Modèles thermique [14]

<b>Equation d'énergie: terme de conduction</b>	
Flux de chaleur par conduction	$q_{cond} = -k_{cd} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{cd} \frac{\Delta T}{\Delta x}$
Conductivité thermique	$k_{cd} = \frac{k_{cd,c}t_c + k_{cd,e}t_e + k_{cd,a}t_a}{t_a + t_e + t_c}$
<b>Equation d'énergie: terme de convection</b>	
Flux de chaleur par convection	$q_{conv} = h_{cv} (T_{sup} - T_{gaz})$
Coefficient de transfert de chaleur convective	$h_{cv} = \frac{k_{cd,gaz} Nu}{D_h}$
Diamètre hydraulique	$D_h = 4 \frac{\text{section transversale}}{\text{périmètre mouillé}}$
<b>Equation d'énergie: terme de rayonnement</b>	
Flux radiatif total échangé entre la cathode et le canal d'admission d'air	
<b>Echanges radiatifs entre les murs gris:</b>	$Q_{rad} = \frac{\sigma (T_{cathode}^4 - T_{injector}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{cathode}} + \frac{D_{cathode}}{D_{injector}} \left( \frac{1}{\epsilon_{injector}} - 1 \right)} \pi D_{cathode} \Delta x$
Flux radiatif échangé entre le gaz et les murs par unité de surface	
<b>Echanges radiatifs gaz – mur:</b>	$q_{rad} = \frac{\epsilon_{surface} \sigma}{1 - (1 - \alpha_{gaz})(1 - \epsilon_{surface})} (\epsilon_{surface} T_{gaz}^4 - \alpha_{gaz} T_{surface}^4)$
Emissivité d'un seul gaz	$\epsilon_i = \sum_{i=1}^3 C_i [1 - \exp(-k_i p_i L)]$
Emissivité des gaz	$\epsilon_{gaz} = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \epsilon_{CO_2 H_2O}$
Absorptivité des gaz	$\alpha_{gaz} = \epsilon_{CO_2} \left( \frac{T_{gaz}}{T_{surface}} \right)^{0.65} + \epsilon_{H_2O} \left( \frac{T_{gaz}}{T_{surface}} \right)^{0.45} - \epsilon_{CO_2 H_2O}$

**Graham M. Golding et al [01] (2009).** L'analyse quantitative et l'interprétation des expériences faites sur les cellules SOFC repose généralement sur des hypothèses, des conditions isothermes et uniformes et sur la composition des gaz. Un modèle en trois dimensions (CFD) est développé et appliqué pour une cellule SOFC dans lequel les caractéristiques de l'écoulement de fluide et le transport d'énergie thermique sont étudiés. Les résultats montrent que lorsque les débits ne sont pas suffisants, les hypothèses sur l'uniformité de la composition peuvent être variables de façon significative. En outre, selon les conditions d'exploitation, les variations de température peuvent être importantes dans le compartiment de gaz et de l'assemblage membrane-électrode (Tableau II.7).

Tableau II.6: Modèle thermique [17]

<b>Transfert de chaleur par conduction : Partie solide</b>	
$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \text{div.grad}T + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} \text{ direction axiale}$	
$\text{div.grad}T = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \text{ direction radiale}$	
<b>Transfert convectif : entre les surfaces solides et le gaz</b>	
$\dot{q}_\alpha = \frac{\alpha (Nu)}{\Delta r} (v_{solide} - v_{fluide}) = \frac{1}{\Delta r \Delta A} \Delta \dot{H}_{fluide}$	
<b>Transfert radiatif : entre la cathode et le tube de préchauffeur d'air</b>	
$\dot{q}_{rad} = \frac{C_{ca,ft}}{\Delta r} \left[ \left( \frac{T_{ca}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ft}}{100} \right)^4 \right]$	
Source chimique due au reformage	$\dot{q}_{reac} = \frac{1}{\Delta r \Delta A} (\Delta H_{reac(T=cons)} - W_{ox,rev})$
Source de chaleur due aux polarisations	$\dot{q}_\eta = \frac{\eta_i \Delta A_i}{\Delta r \Delta A} = \frac{R (i \Delta A_i)^2}{\Delta r \Delta A} = \frac{\delta R_\delta i^2 \Delta A_i}{\Delta r \Delta A}$ $R_\delta$ : Résistance Ohmique équivalente

Tableau II.7: Modèle thermique [1]

<b>Equation d'énergies: gaz</b>	
$\nabla \cdot (\rho h V) = \nabla \cdot \left( \lambda \nabla T - \sum_{K=1}^{K_g} h_k J_k \right)$	
<b>Equation d'énergies : les électrodes</b>	
$\nabla \cdot (\rho h V) = \nabla \cdot \left( \lambda^{eff} \nabla T - \sum_{K=1}^{K_g} h_k J_k \right) + \sum_{K=1}^{K_g} \dot{s}_k h_k W_k h_k$	
Conductivité thermique effective $\lambda_{eff}$	$\lambda^{eff} = \phi \lambda^{gaz} + (1 - \phi) \lambda^{solide}$
<b>Modèle radiatif: les électrodes – surfaces MEA</b>	
Flux de chaleur radiative	$\dot{q}_{rad} = \epsilon \sigma (T_{surfac}^4 - T_\infty^4)$

### II.1.2. Géométrie Planaire

**Q.Wang et al [03] (2009).** Un modèle tridimensionnel couplant la cinétique électrochimique et la dynamique des fluides pour simuler le transfert de chaleur et de masse au sein d'une pile à

combustible à oxyde solide planaire avec une configuration anode supporté. La température, la fraction molaire, la densité du courant et les pertes de tension ont été obtenues par le code commercial CFD. Les résultats de la simulation montrent que la chute de tension à la cathode est la plus grande perte de tension parmi les autres éléments de la cellule où la dimension appropriée de la tension d'opération mène à l'augmentation de la densité du courant. Le terme source de chaleur dans l'équation d'énergie de la partie solide est comme mentionné dans le (Tableau 8).

Tableau II.8: Modèle thermique [3]

source électrochimique $S_T = 0$ l'Interconnecteur et carnaux	$S_T = -R_r \Delta h_r - R_s \Delta h_s$ $S_T = \left( \frac{-\Delta h_{hyd-ox}}{2F - \bar{E}} \right) i_{hyd-ox} + \left( \frac{-\Delta h_{co-ox}}{2F - \bar{E}} \right) i_{co-ox}$
Tension	$\bar{E} = E_{hyd-ox} - (\eta_{hyd} + \eta_{oxy}) = E_{co-ox} - (\eta_{co} + \eta_{oxy})$
source ohmique	$S_T = i^2 R_j h_j \text{ avec } j \in \{a, c, e\}$

**Florian P. Nagel et al [07] (2008).** Un modèle copulé chaleur-masse basé sur la méthode des volumes finis est le modèle développé. Ce modèle visant d'être appliqué rapidement pour les différentes géométries de la cellule SOFC. Les trois modèles de cellule pour les trois géométries planaire, tubulaire et monolithique sont comparés en soulignant les différences entre les modes de transfert de masse, la chaleur interne et l'impact des paramètres électrochimiques sur la performance globale de la cellule (Tableau II.9).

**J.J. Hwang et al [15] (2006):** Un modèle couplé chaleur et masse sert à prédire les phénomènes de transport à l'intérieur des électrodes d'une cellule à oxyde solide SOFC. Les équations de conservation d'énergie sont basées sur le principe de « non équilibre thermique (LTNE) » qui est fonction des paramètres monodimensionnels et qui sert à déterminer la différence de température entre les deux phases solide et gaz à l'intérieur des électrodes poreux. La répartition détaillée de la température locale, le nombre du Nusselt local, la concentration des espèces et enfin la densité du courant électrique à l'intérieur des électrodes sont présentés en fonction des paramètres (LTNE), ce qui montre l'effet de ces paramètres sur le comportement thermique du fluide dans les électrodes.

**N. Govindaraju [10] (2009):** Une simulation multi-physique a été développée pour déterminer le niveau de stress à travers le système électrode électrolyte-électrode d'une pile à combustible

SOFC. Les résultats de la simulation indiquent que les niveaux de stress sont dominés par l'expansion thermique des inadéquations entre les différentes composantes de la cellule.

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

flux de chaleur volumique  $Q$  est donné par:

$$Q = i^2 \rho_c(i) = \frac{i^2 R(i) A}{l} = \frac{i^2 A}{l} \left[ \frac{E^0 - V(i)}{i} \right] \quad (\text{II.2})$$

Tableau II.9: Modèle thermique [07]

<b>Equation d'énergie: solide /cancale anodique</b>
$Q_{conv,an} = \alpha_{an} I_{circ,an} (T_{ak} - T_{sk}) \quad \text{avec} \quad \alpha_{an} = \frac{Nu \lambda_{an}}{D_{hud,an}}$
<b>Equation d'énergie : cancale anodique</b>
$\frac{d(\dot{n}_{an} c_{p,an} T_{ak})}{dx} = \dot{Q}_{SH,prod,an} - \dot{Q}_{SH,ed,an} - \dot{Q}_{conv,an}$
<b>Equation d'énergie: cancale cathodique</b>
$Q_{conv,ca} = \alpha_{ca} I_{circ,ca} (T_{sk} - T_{ck}) \quad \text{avec} \quad \alpha_{ca} = \frac{Nu \lambda_{ca}}{D_{hud,ca}}$
<b>Equation d'énergie : partie solide</b>
$\lambda_s A_{cross} \frac{d^2 T_{SK}}{dx^2} = -\dot{Q}_{conv,an} - \dot{Q}_{SH,ed,an} - \dot{Q}_{SH,ed,ca} \dot{Q}_{SH,prod,an} + \Delta H_r + P_{el}$
<b>Equation d'énergie : gaz cathodique</b>
$\frac{d(\dot{n}_{ca} c_{p,ca} T_{ck})}{dx} = \dot{Q}_{conv,ca} - \dot{Q}_{SH,ed,an} - \dot{Q}_{conv,ADT} \quad \text{co-courant}$
$\frac{d(\dot{n}_{ca} c_{p,ca} T_{ck})}{dx} = \dot{Q}_{SH,ed,an} - \dot{Q}_{conv,ca} \quad \text{contre-courant}$

**D. Larrain et al [26] (2004).** Le développement d'un modèle numérique permet d'étudier et de calculer la distribution des espèces, les concentrations, les températures et les taux de réaction à la fois des gaz et des solides ainsi que la performance globale d'une pile à combustible SOFC. L'approche de modélisation mise au point permet de comparer plusieurs configurations en fonction des paramètres de conception tels que: la taille des cellules, l'épaisseur des composantes et les débits des gaz. Le modèle est conçu pour modifier facilement ces paramètres d'une

manière à explorer le plus grand nombre possible des cas. Cela est particulièrement vrai pour les configurations de flux. Ce modèle aide à choisir une configuration.

$$\lambda_{sx,y} \left( \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} = 0 \tag{II.3}$$

$\dot{Q}$ : source de chaleur volumique = énergies de la réaction électrochimique + l'énergie Retirée par le système + l'énergie transfert aux fluides

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^{n_{comp}} C_{p_i} \left( F_{i-x} \frac{\partial T_{gaz}}{\partial x} + F_{i-y} \frac{\partial T_{gaz}}{\partial y} \right) \tag{II.4}$$

**A.Chaisantikulwat et al [06] (2008)**; Développons un modèle thermique et dynamique d'une pile à combustible SOFC. Les réponses dynamiques sont définies comme les solutions des équations aux dérivées partielles couplées aux lois de conservation des charges, de masse et d'énergie. Le modèle dynamique est soumis à divers courants de charge pour les différentes spécifications des carburants, la tension des réponses à des changements de concentration de combustible et du courant sont déterminés (Tableau II.10).

Tableau II.10: Modèle thermique [06]

<b>Transfert de chaleur par conduction : partie solide</b>	
$\frac{\partial}{\partial t} ((\rho C_p))T = -\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q$ et $Q = Q_{ohm} + Q_{act,irreve} + Q_{chm,reve}$	
Conductivité thermique effective	$\lambda^{effc} = \epsilon k_f + (1 - \epsilon) k_s$
Source ohmique	$Q_{ohm} = \frac{J^2}{\sigma}$
Source d'activation	$Q_{act,irreve} = J \eta_{act}$
Source chimique	$Q_{chm,reve} = J \left( -\frac{T (\Delta S)}{2F} \right)$

**Xiao-juan Wu et al [12] (2008)**; le modèle de *Takagi-Sungeno* sert à décrire la température et la tension en fonction des paramètres dynamiques non linéaires du système SOFC; pendant ce processus les paramètres antécédents non linéaires et les paramètres linéaire conséquents sont identifiés par un algorithme des moindres carrés (Tableau II.11).

Tableau II.11: Modèle thermique [12]

<b>Bilan énergétique - STACK-</b>	
$m_p C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_{an}^{in} \left[ \sum_{i=1}^4 x_{an,i}^{in} (h_{an,i}^{in} - h_{an,i}^0) \right] - \sum_{i=1}^4 h_{an,i}^0 q_{an,i}^0 + q_{ca}^{in} \left[ \sum_{i=1}^3 x_{ca,i}^{in} (h_{ca,i}^{in} - h_{ca,i}^0) \right] - \sum_{i=1}^3 h_{ca,i}^0 q_{ca,i}^0 - P_{de}$	
L'enthalpie molaire	$h_i = h_i^{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_{p,i}(u) du$
Coefficient spécifique de chaleur	$C_{p,i} = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3$
Puissance de cellule	$P_{de} = U \times I$

**K.J. Daun et al [16] (2006);** En raison de sa température de fonctionnement élevée (800-1000°C), le rayonnement thermique peut jouer un rôle très important dans la combinaison transfert thermique à travers les couches des électrodes et d'électrolyte dans la SOFC. Une caractérisation détaillée des propriétés thermo physiques et radiatives des matières composites des électrodes et de l'électrolyte est présente et qui sont par la suite employées pour définir un modèle thermique à deux dimensions 2D, où l'importance du rayonnement thermique est évaluée en comparant le champ de température obtenu par conduction pure et ceux obtenus en utilisant un modèle couplé conduction-rayonnement. Les résultats obtenus indiquent que le transfert thermique par rayonnement à travers les électrodes et l'électrolyte, a un effet négligeable sur le champ de température et n'est pas besoin d'être adapté dans les modèles thermiques complets des cellules planaires SOFC (Tableau II.12).

**Grzegorz Brus et al [08] (2008);** Ce modèle numérique décrit les processus de transfert de chaleur par rayonnement entre la surface du réformateur de carburant et toutes autres surfaces faisant face au réformateur. Les équations régissant le transfert de chaleur radiatif sont décrites par la méthode de *Zone de Hottel*. La réaction qui se produit à l'intérieur du réformateur de carburant est décrite en utilisant le modèle d'Achenblach. La résolution numérique des équations de transfert de chaleur couplée rayonnement-conduction à été réalisée avec une combinaison des méthodes de *Gauss-Seidel* et *Newton Raphson*. Les résultats obtenus indiquent que la position du réformateur ainsi que la cellule et les autres éléments dans le module SOFC jouent un rôle principal (Tableau II.13).

Tableau II.12: Modèle thermique [16]

génération réversible de la chaleur à la cathode	$q''_{reve,c} = T \left( 2S_{O^{2-}} - S_{O_2} - 4S_{e^-} \right) \frac{i''}{4F'}$ $q''_{reve,c} = 1.7kWm^{-2}$
génération réversible de la chaleur à l'anode	$q''_{reve,a} = T \left( 2S_{H_2O} - 2S_{H_2} - 2S_{O^{2-}} + 4S_{e^-} \right) \frac{i''}{4F'}$ $q''_{reve,a} = -0.6kWm^{-2}$
Changement d'enthalpie	$\Delta S_{tot} = \Delta S_{anode} + \Delta S_{cathode}$
Génération irréversible de chaleur à la cathode	$q''_{irreve,c} = i'' \times \eta_c = 0.4kWm^{-2}$
génération irréversible de chaleur à l'anode	$q''_{irreve,a} = i'' \times \eta_a = 0.6kWm^{-2}$
Génération ohmique de chaleur à l'électrolyte	$q''_{ohm} = \rho_e \times i''^2 = 14.7 \times 10^3 kWm^{-3}$

Tableau II.13: Modèle thermique [8]

<b>Modèle de transfert de chaleur Radiatif</b>
$\int_{A_i} dA_i \int_{A_j} \int_{\lambda=0}^{\infty} \left[ \frac{W_{\lambda_j} \cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji} \varepsilon_{\lambda_j}}{\pi r_{ij}^2} \right] dA_j d\lambda - \int_{A_i} dA_i \int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda_j} E_{\lambda_j} d\lambda + \int_{A_i} q_i dA_i = 0$ <p style="text-align: center;">Avec <math>w_j = \varepsilon_j E_j + \rho_j H_j</math> et <math>E_i = \sigma T^4</math></p>
<b>Modèle de transfert de chaleur par conduction</b>
$\frac{\partial T}{\partial x} \left( \lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left( \lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left( \lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$
<b>Equation de transfert de chaleur globale</b>
$\rho_0 C_p \left( U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$ $\lambda_{eff} = \{ \varepsilon_0 \lambda_f + (1 - \varepsilon_0) \lambda_s \}$

**P. Dokamaingam et al [02] (2009);** un modèle mathématique décrit les processus de reformage interne pour analyser l'accouplement thermique de reformage endothermique interne avec des réactions électrochimique exothermique, d'une cellule tubulaire à oxyde solide alimenté

en méthane. Le modèle est basé sur l'équilibre hétérogène bidimensionnel. Pour cela deux types de réformateurs internes sont étudiés : conventionnel et catalytique. Les résultats de la simulation indique que la cellule SOFC avec un réformateur conventionnel mène à une consommation très rapide du méthane et refroidissement local indésirable à l'entrée du réformateur à cause de la disparition de la charge thermique associée à la vitesse rapide de reformage et aux quantités de chaleur fournies par les réactions électrochimiques. L'analyse de sensibilité des trois paramètres importants : sens d'écoulement, la température prise de carburant et la pression de fonctionnement. On a également constaté que le modèle SOFC avec un réformateur IIR-SOFC Co-courant, c'est-à-dire en fournissant le plus haut gradient de tension et de température de loisir le long du système, l'abaissement de la température de la prise de carburant et par conséquent un profil de température plus doux à l'entrée du réformateur ce qui mène à l'augmentation des pertes de tension et réduit par conséquent la tension de la cellule, en augmentant la pression de fonctionnement qui correspond à l'augmentation de l'efficacité de ce système en outre la baisse de la température à l'entrée du réformateur interne est réduite au minimum (Tableau II.14).

Tableau II.14: Modèle thermique [2]

<b>zone de reformeur :</b>	$\nabla \left( v \rho c_p T \right) - \nabla (\lambda_i \nabla T) + \sum \Delta H_{reform} R_{reform} = 0$
<b>parois du reformeur :</b>	$\nabla \left( v \rho c_p T \right) - \nabla (\lambda_i \nabla T) = 0$
<b>canaux des carburants</b>	$\nabla \left( v \rho c_p T \right) - \sum \nabla (\lambda_i \nabla T) = 0$
<b>partie solide :</b>	$\nabla \left( v \rho c_p T \right) - \nabla (\lambda_s \nabla T) + \sum \Delta H_{ele} + \frac{\sigma A_s (T_r^4 - T_f^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{A_r}{A_s} \left( \frac{1}{\epsilon_s} - 1 \right)} = 0$
Condition aux limites: interface anode/électrolyte:	$n \cdot (k \nabla T) = \sum \Delta H_{elec} R_{elec} + J \eta_{total}$
<b>canaux d'air</b>	$\nabla \left( v \rho c_p T \right) - \sum \nabla (\lambda_i \nabla T) = 0$

**Christoph.S et al [19] (2005);** Une simulation en trois dimensions des différents phénomènes de transport se produit dans une conduite d'anode d'une SOFC. L'épaisseur de la couche poreuse et l'écoulement des gaz à travers les conduites solides sont considérés comme étant les conditions aux limites thermiques sur les parois solides. Les flux des gaz et les processus de

transfert de chaleur on été étudiés et présentés en fonction des fractions molaires. Il a été conclu que parmi les différents paramètres de fonctionnement physiques et géométriques que les propriétés de la configuration de la couche poreuse d'anode ont des effets significatifs sur les flux des gaz réactifs et les mécanismes de transfert de chaleur dans les conduites d'anode (Tableau II.15).

Tableau II.15: Modèle thermique [19]

<b>Géométrie planaire</b>
<b>Bilan thermique d'air</b>
i: direction d'écoulement de carburant; j : direction d'écoulement d'air
$\alpha_{air} A_c (T_{air}^{i,j} - T_s^{i,j}) = \sum_{co}^{CO_{air}} (c_{p,co} (T_{air}^{i,j-1}) n_{co}^{i,j-1} T_{air}^{i,j-1} - c_{p,co} (T_{air}^{i,j}) n_{co}^{i,j} T_{air}^{i,j})$
<b>Bilan thermique du combustible</b>
$\alpha_f A_a (T_f^{i,j} - T_s^{i,j}) = \sum_{co}^{CO_f} (c_{p,co} (T_f^{i-1,j}) n_{co}^{i-1,j} T_f^{i-1,j} - c_{p,co} (T_f^{i,j}) n_{co}^{i,j} T_f^{i,j})$
<b>Bilan thermique du solide</b>
$\frac{2T_s^{i,j} - T_s^{i+1,j} + T_s^{i-1,j}}{R_{p,i}} + \frac{2T_s^{i,j} - T_s^{i,j+1} + T_s^{i,j-1}}{R_{p,j}} =$ $\alpha_{air} A_c (T_f^{i,j} - T_s^{i,j}) + \alpha_f A_c (T_f^{i,j} - T_s^{i,j}) = r_{CH_4} \Delta H_{ref} - r_{CO} \Delta H_{shift}$ $- r_{H_2} (\Delta H_{electro} + 2UF) - Q_{p,preref}^{i,j}$
Le flux de chaleur radiative près de reformeur est donnees par :
$Q_{p,preref}^{i,j} = \varepsilon \sigma A_s ((T_s^{i,j})^4 - (T_{black})^4)$
<b>Géométrie Tubulaire</b>
<b>Bilan thermique du combustible</b>
$\frac{T_f^i - T_s^i}{R_{t1}} = \sum_{co}^{CO_f} (c_{p,co} (T_f^{i-1,j}) n_{co}^{i-1,j} T_f^{i-1,j} - c_{p,co} (T_f^{i,j}) n_{co}^{i,j} T_f^{i,j})$
<b>Bilan thermique du solide et près du reformeur</b>
$\frac{2T_s^i - T_s^{i+1} + T_s^{i-1}}{R_{tax}} + \frac{T_s^i - T_f^i}{R_{t1} + \frac{1}{2} R_{t2}} + \frac{T_s^i - T_{a1}^i}{R_{t3} + \frac{1}{2} R_{t2}} + Q_{s,rad}^i - Q_{s,irrad}^i =$ $r_{CH_4} \Delta H_{ref} - r_{CO} \Delta H_{shift} - r_{H_2} (\Delta H_{electro} + 2UF) - Q_{t,preref}^{i,j}$

$Q_{s,rad}^i = [0.3 + 0.2 + 2.0.16] \varepsilon \sigma A_s (T_s^i)^4 = 0.64 \varepsilon \sigma A_s (T_s^i)^4$ $Q_{s,irrad}^i = \varepsilon \sigma \left[ A_{inj} \left( 0.64 (T_{inj}^i)^4 + 0.18 (T_{inj}^{i-1})^4 + 0.18 (T_{inj}^{i+1})^4 \right) + A_s \left( 0.1 (T_s^{i-1})^4 + 0.1 (T_s^{i+1})^4 \right) \right]$
<b>bilan thermique du tube d'injecteur</b>
$\frac{T_{inj}^i - T_{a1}^i}{R_{t4}} + \frac{T_{inj}^i - T_{a2}^i}{R_{t5} + R_{t6}} + Q_{inj,rad}^i - Q_{inj,irrad}^i = 0$ $Q_{inj,rad}^i = [0.64 + 0.36] \varepsilon \sigma A_{inj} (T_{inj}^i)^4 = \varepsilon \sigma A_{inj} (T_{inj}^i)^4$ $Q_{inj,irrad}^i = \varepsilon \sigma \left[ A_s \left( 0.3 (T_s^i)^4 + 0.08 (T_s^{i-1})^4 + 0.08 (T_s^{i+1})^4 \right) \right]$

**Roberto Bove et al [18] (2006);** Ils ont défini un modèle numérique en fonction du temps et en trois dimensions 3D en tenant compte de tous les phénomènes qui se produisent dans chaque élément de la cellule SOFC. Toutes les équations sont écrites sous une forme aux dérivées partielles de telle sorte que le modèle soit indépendant de la cellule, de sa géométrie (planaire, tubulaire, monolithique) et en fonction du temps. Le terme source dans l'équation de conservation d'énergie est donné par les conditions aux limites (*Tableau II.16*).

Tableau II.16: Modèle thermique [18]

<b>Equation d'énergie : partie solide</b>	
$\lambda_{cell} \left( \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial y^2} \right) + \sum \dot{Q}_{cell} = 0$	
Source de chaleur volumique	$\sum \dot{Q}_{cell} = Q_{conviction} + Q_{radiation}$
<b>Equation d'énergie: partie fluide</b>	
$\sum H_i c p_i \left( v_x \frac{\partial T_{gaz}}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_{gaz}}{\partial y} \right) = \frac{h_{gaz}}{L} [T_{flange} - T_{gaz}] + \frac{h_{gaz}}{L} [T_{cell} - T_{gaz}]$	

**David. L et al [20] (2005);** Le transfert de chaleur radiative au sein des couches d'électrodes et d'électrolyte ainsi que les canaux de réactifs, a le potentiel d'influencer d'une façon spectaculaire sur le champ de température et l'ensemble des conditions de fonctionnement des SOFC. A plus grande échelle, le transfert de chaleur par rayonnement de la pile vers l'environnement comprend les pertes de chaleur par isolation qui doivent être pris en compte dans la conception de ces dispositifs et qui est d'une importance critique sur l'efficacité thermique des piles à haute température. La détermination des propriétés radiatives des

matériaux concernés s'effectue soit par le biais des méthodes expérimentales ou par des modèles prédictifs, qui doivent être effectués par un effort continu à cause des nouveaux matériaux en cours de développement. La complexité des équations dites intégro-différentielles qui régissent le transfert de chaleur radiatif est généralement la non linéarité de ces équations, qui dépendent de sept variables indépendantes qui sont: le temps, les trois variables de position, les deux variables angulaires décrivant la direction de propagation du rayonnement et la longueur d'onde  $\lambda$  (Tableau II.17).

**D. Larrain et al [23] (2003)** ; un modèle combiné thermique et cinétique est appliqué à une cellule à oxyde solide. L'objectif était de calculer le champ de température pour analyser les conditions d'exploitation active de la cellule. Les dimensions de l'anode :  $20\text{cm}^2$  et la surface active :  $1\text{cm}^2$ . La simulation du champ de température montre clairement que cet aspect de la courbe s'explique par l'augmentation de la température locale de  $30\text{K}$  au  $1\text{ A/cm}^2$ . Ce modèle combiné à un outil d'estimation des paramètres permet d'utiliser les résultats expérimentaux (Tableau II.18).

**N. Autissier [22] (2004)**; l'outil commercial CFD a été utilisé pour résoudre les équations de conservation de la masse, d'énergie et l'équation de la quantité de mouvement. En tenant compte du transfert de chaleur radiatif entre les surfaces internes des éléments de la cellule SOFC et le transfert convectif-radiatif sur les surfaces externes. Le choix d'un maillage fini est dû à la grande variété de dimension de cellule:  $300\text{m}$  d'épaisseur et les canaux de gaz de  $1\text{ mm}$  d'hauteur. Les données sur la conductivité thermique et les paramètres cinétiques ont été estimés à partir des expériences à été déjà réalisé (Tableau II.19).

### III.1.3. Géométrie Monolithe

**Sunil Murthy et al [24] (2003)**; Un modèle de transfert de chaleur est établi pour une cellule à oxyde solide de type monolithe en tenant compte le transfert thermique par rayonnement. L'approximation de Schuster-Schwartzchild est utilisée pour traiter le rayonnement thermique dans l'électrolyte. La conductivité thermique radiative de Rosseland est employé pour expliquer l'effet de transfert de chaleur par rayonnement à travers les électrodes. Les équations régissant le transfert thermique par rayonnement est couplé à la combinaison des équations de conservation d'énergie et la divergence de flux radiatif. Les résultats montrent les changements du champ de température en fonction des paramètres de la cellule et avec inclusion des effets de rayonnement thermique (Tableau II.20).

Tableau II.17: Modèle thermique [20]

<b>Région01 : la couche d'électrolyte + les deux Electrodes Equation d'énergie: Modèle Radiatif</b>	
Equation de transfert de chaleur radiatif	$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + (1 - \omega_\lambda) I_{b\lambda} + \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I(S_i) \phi(S_i, S) d\Omega_i$
Coefficient d'extinction spectrale	$\beta_\lambda = k_\lambda + \sigma_\lambda$
Epaisseur optique spectrale	$\tau_\lambda = \int_0^s \beta_\lambda ds$
/	$\omega_\lambda = \frac{\sigma_\lambda}{\beta_\lambda}$
Flux de chaleur radiatif	$qr = \int_0^\infty \int_{4\pi} I_\lambda(s) s d\lambda d\Omega$
<b>Equation d'énergie: couplage Conduction - Rayonnement</b>	
$q_{tot}(z) = q_{cond}(z) + q_{rad}(z) = -k \frac{dT}{dz} - k_r \frac{dT}{dz} = -\left(k + \frac{16\sigma n^2 T^3}{3\beta}\right) \frac{dT}{dz}$	
Conductivité thermique effective	$k_{tot} = \left(k + \frac{16\sigma n^2 T^3}{3\beta}\right)$
Coefficient d'extinction de Rosseland	$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{4\sigma T^3} \int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda} \frac{dI_{b\lambda}}{dT} d\eta$
Conductivité radiatif de Rosseland	$k_r = \frac{16\sigma n^2 T^3}{3\beta}$
Source de chaleur radiative	$S = -\nabla \cdot q_r$
<b>Région02: Canaux des Gaz Equation d'énergie: Modèle Radiatif</b>	
Equation d'énergie: couplage Conduction –convection-Rayonnement	
$q_{conv} + q_{rad} = q_{cond} \rightarrow h(T_b - T_\infty) + q_{rad} = -k \frac{dT}{dn}$	
<b>Région03 : Isolateur-plats d'interconnexions Equation d'énergie: Modèle Radiatif</b>	
$\cos \theta \frac{dI}{ds} = -\beta I + kn^2 I_b + \frac{\sigma}{2} \int_0^\pi I(S_i, \theta') \sin \theta' d\theta'$	
<b>Equation d'énergie: couplage Conduction –Rayonnement</b>	
$\frac{d}{dx} \left[ -k_c \frac{dT}{dx} + q_r \right] = 0$	

Tableau II.18: Modèle thermique [23]

<b>Equation d'énergie : partie solide</b>	
$\lambda_{cell} \left( \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{solide}}{\partial y^2} \right) + \Sigma \dot{Q}_{cell} = 0$	
Source de chaleur volumique	$\Sigma \dot{Q}_{cell} = Q_{convection} + Q_{radiation}$
<b>Equation d'énergie : partie fluide</b>	
$\Sigma H_i c p_i \left( v_x \frac{\partial T_{gaz}}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_{gaz}}{\partial y} \right) = \frac{h_{gaz}}{L} [T_{flange} - T_{gaz}] + \frac{h_{gaz}}{L} [T_{cell} - T_{gaz}]$	

Tableau II.19: Modèle thermique [22]

<b>Equation d'énergie: couplage conduction-convection-rayonnement</b>	
$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \left( v (\rho_f \vec{E}_f + p) \right) = \nabla \left[ k_{eff} \nabla T - \left( \sum_i h_i j_i \right) + \left( \tau \vec{v} \right) \right] + S_f^h$	
Tenseur de tension	$\tau = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} \right]$
Flux des espèces diffusées	$\vec{j}_i = - \sum_{j=1}^{N-1} \rho D_{ij} \nabla Y_j - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$

Tableau II.20: Modèle thermique [24]

<b>Approximation du Flux Radiatif</b>	
Flux de Rosseland pour	$q_r = k_R \nabla T$
Conductivité thermique Rosseland	$k_r = \frac{16\sigma n^2 T^3}{3\beta}$
Modèle des deux flux de Schuster-Schwartzchild $\tau \gg 1$	$q_R(z) = C_1 e^{2kz} + C_2 e^{-2kz}$ $C_2 = -\sigma (T_{bottom}^4 - T^4)$ $C_1 = -\sigma (T_{top}^4 - T^4) e^{2kL}$

### III.2. Paramètres Physiques et les Propriétés Thermiques et Thermo radiatives

Les tableaux II.21 – II.27 donnent les propriétés des électrodes, Conductivité thermique des constituants des cellules SOFC, les dimensions, conditions de fonctionnement et paramètres

physiques de la pile SOFC, conductivité électrique des constituants, les propriétés thermiques des matériaux constituant la cellule SOFC et Propriétés thermiques des réactifs.

Tableau. II. 21: Propriétés des électrodes

<i>Référence</i>	<i>Porosité (%)</i>	<i>Tortuosité</i>	<i>Perméabilité (<math>m^2 Pa^{-1} s^{-1}</math>)</i>
[03]	A = 46	A = 4.50	A = $1.7.10^{-10}$
	C = 46	C=3.00	C = $1.7.10^{-10}$
[06]	A = 30	A = 8.50	/
	C = 30	C =2.50	/
[07]	A= 50	A = 3.00	A = $1.0.10^{-6}$
	C= 50	C =3.00	C = $1.0.10^{-6}$
[15]	A= 48	A =1.5	A = $1.57.10^{-12}$
	C= 48	C =1.5	C = $1.57.10^{-12}$

Tableau. II. 25: Propriétés thermiques des matériaux constituant la cellule SOFC

<i>Référence</i>	<i>Densité du matériau [<math>kg/m^3</math>]</i>	<i>Chaleur spécifique [<math>kJ kg^{-1} K^{-1}</math>]</i>
[02]	$\rho_{TPB} = 633.73$	$Cp_{TPB} = 0.574$
[03]	C = 6000	C= 0.9
	A = 6200	A = 0.65
	E = 5560	E = 0.3
	Interconnecteur = 7700	Interconnecteur = 0.8
[04]	C = 4930	C = 0.623
	A = 4460	A = 0.623
	E = 5710	E = 0.623
[06]	C = 4640	C = .37
	A = 4760	A = 0.37
	E = 4700	E = 0.1
	Interconnecteur = 8030	Interconnecteur = 0.3
[11]	C= 6600	C= 0.4
	A= 6600	A= 0.4
	E= 6600	E= 0.4
	Interconnecteur = 6600	Interconnecteur = 0.4

Tableau. II. 22: Conductivité thermique des constituants des cellules SOFC;  $\lambda$  [ $W/km$ ]

<i>Composants</i>	$\lambda_{Anode}$	$\lambda_{Cathode}$	$\lambda_{Electrolyte}$	$\lambda_{Interconnexion}$
<i>Référence</i>				
[24]	05.84	01.86	02.16	00.10
[16]	03.70	00.80	02.30	/
[03]	06.20	09.60	02.70	09.60
[04]	11.00	06.00	02.70	01.10
[02]	06.23	09.60	02.70	/
[14]	03.00	03.00	03.00	/
[07]	02.00	02.00	02.00	02.00
[06]	11.00	02.37	02.70	02.02
[11]	02.00	02.00	02.00	02.00
[20]	1.86	5.84	2.16	20.0

Tableau. II. 23: Conditions de fonctionnement et paramètres physiques de la pile SOFC

<i>Paramètres de Fonctionnement</i>					
<i>Référence</i>	$T$ [ $^{\circ}C$ ]	$I$ [ $Am^{-2}$ ]	$E$ [ $V$ ]	$P$ [ $W$ ]	<i>Utilisation de carburant [%]</i>
[13]	886	1740	0.650	94.30	79.50
	900	5392	0.350	157.40	79.70
[02]	1173	/	0.682	/	80.00
[03]	1179.2	3332	0.682	/	83.60
[09]	900	3000	/	/	85.00
[05]	1073-1123	/	0.61	200.00	85.00
[14]	895-999	3045	0.6	149.50	79.70
	892-1010	3045	0.6	152.40	81.20
	896-1003	3002	0.6	150.20	80.00
[15]	973.15	2440	0.7	/	85.00

Tableau. II. 27: Dimensions générales de la cellule

<i>Référence</i>	<i>Dimensions Générales [m]</i>	<i>Epaisseur [m]</i>
[19]	Hauteur de cellule = $4.5 \cdot 10^{-3}$	Cathode = $0.04 \cdot 10^{-3}$
	Largeur de cellule = $3.8 \cdot 10^{-3}$	Anode = $0.04 \cdot 10^{-3}$
	Longueur du canal = $2.8 \cdot 10^{-3}$	Electrolyte = $0.15 \cdot 10^{-3}$
	Hauteur du canal d'air = $1.5 \cdot 10^{-3}$	Interconnecteur = $2 \cdot 10^{-3}$
	Hauteur de canal du combustible = $0.4 \cdot 10^{-3}$	
[03]	Ni-YSZ/YSZ/LMS	Cathode = $5 \cdot 10^{-5}$
	Longueur de cellule = $2 \cdot 10^{-2}$	Anode = $2 \cdot 10^{-3}$
	Hauteur du canal = $1 \cdot 10^{-3}$	Electrolyte = $2 \cdot 10^{-5}$
	Largeur du canal = $1 \cdot 10^{-3}$	Interconnecteur = $2 \cdot 10^{-3}$
[14]	Ni-YSZ/YSZ/LMS	Cathode = $2.2 \cdot 10^{-3}$
	Longueur de cellule = $1.5 \cdot 10^{-3}$	Anode = $1 \cdot 10^{-4}$
	Surface active = $834 \cdot 10^{-4}$	Electrolyte = $4 \cdot 10^{-5}$
	Diamètre extérieur d'anode = $22 \cdot 10^{-3}$	Interconnecteur = $85 \cdot 10^{-6}$
[09]	Surface active = 0.01	Cathode = $5 \cdot 10^{-5}$
	Longueur de cellule = 0.1	Anode = $5 \cdot 10^{-5}$
	Largeur du canal = $3 \cdot 10^{-3}$	Electrolyte = $15 \cdot 10^{-5}$
	Hauteur du canal = $1 \cdot 10^{-3}$	Interconnecteur = $25 \cdot 10^{-4}$
[20]	Hauteur de cellule = $10 \cdot 10^{-2}$	Cathode = $75 \cdot 10^{-6}$
	Largeur de cellule = $5 \cdot 10^{-3}$	Anode = $500 \cdot 10^{-6}$
	Dimensions des canaux = $2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}$	Electrolyte = $15 \cdot 10^{-6}$
		Interconnecteur = $5 \cdot 10^{-3}$

Tableau. II. 24: Conductivité électrique des constituants des cellules SOFC

<i>Conductivité Electrique <math>\sigma</math> [<math>\Omega^{-1}\text{m}^{-1}</math>]</i>			
<i>Référence</i>	<i>Anode</i>	<i>Cathode</i>	<i>Electrolyte</i>
[05]	$1.117.10^7 \exp\left[\frac{1392}{T}\right]$	$1.232.10^4 \exp\left[\frac{-600}{T}\right]$	$3.401.10^4 \exp\left[\frac{-10350}{T}\right]$
[11]	$\frac{95.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1150}{T}\right]$	$\frac{42.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1200}{T}\right]$	$\frac{3.34.10^4}{T} \exp\left[\frac{-10300}{T}\right]$
[06]	$\frac{90.10^7}{T} \exp\left[\frac{-1150}{T}\right]$	$\frac{40.10^7}{T} \exp\left[\frac{-1200}{T}\right]$	$\frac{3.34.10^4}{T} \exp\left[\frac{-10300}{T}\right]$
[04]	$\frac{95.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1150}{T}\right]$	$\frac{42.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1200}{T}\right]$	$\frac{3.34.10^4}{T} \exp\left[\frac{-10300}{T}\right]$

Tableau II. 26: Propriétés thermiques des réactifs

<i>Référence</i>	<i>Air</i>	<i>Fuel</i>
[02]	$h_a = 1322.8$ [W/ m <sup>2</sup> K]	$h_f = 2987$ [W/ m <sup>2</sup> K]
[23]	$h_a = 2500-15000$ [W/ m <sup>2</sup> K]	$h_f = 1000-8000$ [W/ m <sup>2</sup> K]
[16]	$h_a = 181$ [W/ m <sup>2</sup> K]	$h_f = 215$ [W/ m <sup>2</sup> K]
	$\rho_a = 0.399$ [kgm <sup>-3</sup> ]	$\rho_f = 0.255$ [kgm <sup>-3</sup> ]
	$Cp_a = 1.129$ [kgm <sup>-3</sup> ]	$Cp_f = 1.673$ [kgm <sup>-3</sup> ]

#### II.4.2. Propriétés Thermo radiatives

Pour un milieu linéaire, le coefficient d'absorption spectrale, l'indice de réfraction, le coefficient spectraux de dispersion et la fonction de dispersion de phase fournissent un ensemble complet de propriétés phénoménologiques nécessaires pour modéliser la propagation de l'énergie radiative. En outre, l'émissivité et la réflectivité doivent être fournies afin de préciser les conditions aux limites [20]. La détermination des propriétés radiatives des matériaux concernés s'effectue soit par le biais des méthodes expérimentales ou par des modèles prédictifs. La connaissance précise de ces propriétés en fonction de la longueur d'onde et de la température est actuellement le plus

grand obstacle pour prévoir le transfert de chaleur radiatif dans les électrodes et l'électrolyte des systèmes SOFC.

A  $T= 973\text{C}$ , l'indice de réfraction  $n= 1.6$  la longueur d'onde  $1.4 \mu\text{m} < \lambda < 6.1\mu\text{m}$ . Le coefficient d'absorption "  $k$  " d'électrolyte forme d'YSZ peut être calculé à partir de

$$T_r = e^{-kL} \quad (\text{II.5})$$

L'épaisseur optique  $\tau$  est donnée par la formule suivante, avec  $L$ : l'épaisseur d'électrolyte.

$$\tau = k.L \quad (\text{II.6})$$

Les propriétés optiques des électrodes sont ainsi calculé a partir de l'expression d'épaisseur optique pour  $\tau \gg 1$ . Notant que les propriétés optiques d'anode dépend de la distribution de nickel dans la couche d'YSZ ce qui augment l'absorption de la chaleur par le milieu [20].

Une synthèse bibliographique nous a permis d'avoir les formules donnant les propriétés radiatives, l'émissivité et coefficient de dispersion, les propriétés radiatives d'YSZ en fonction de la longueur d'onde et les coefficients d'absorbions des gaz sont dans les tableaux (Tableau II.28-II.31). La variation de la transmittance et la reflectance en fonction de la longueur d'onde et la variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde sont donnés par (a) et (b) de la Figure. II. 2.

Tableau II.28: Formules donnant les propriétés radiatives [16,20]

<i>Paramètre</i>	<i>Expression</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Expression</i>
Coefficient d'absorption spectrale	$k = \frac{4\pi K}{n\lambda}$	Coefficient d'extinction spectrale	$\beta_\lambda = k_\lambda + \sigma_\lambda$
Epaisseur optique spectrale	$\tau_\lambda = \int_0^s \beta_\lambda ds$	Coefficient d'adsorption	$K = -\frac{n\lambda \ln[\tau]}{4\pi d}$
Transmittance	$T_r = \frac{(1-\rho)^2 \tau^2}{1-\rho^2 \tau^2}$	Réfectivité	$R = \rho \left[ 1 + \frac{(1-\rho)^2 \tau^2}{1-\rho^2 \tau^2} \right]$

Tableau. II. 31: Coefficients d'absorbions des gaz [ $\text{cm}^{-1}\text{bar}^{-1}$ ] [20]

Coefficient d'absorption $\text{H}_2\text{O}$	0.10	Coefficient d'absorption $\text{CO}$	0.30
Coefficient d'absorption $\text{CO}_2$	0.30	Coefficient d'absorption $\text{CH}_4$	0.40

Tableau. II. 29: Emissivité et Coefficient de dispersion

<b>Coefficients de dispersion YSZ [m<sup>-1</sup>]</b>				
<b>Référence</b>	<b><math>\beta</math> [m<sup>-1</sup>]</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\sigma_s+k</math> [m<sup>-1</sup>]</b>	<b><math>\sigma_s+k / \sigma_s</math></b>
<b>[20.30]</b>	$\beta = 160$ $0.0 < \lambda < 3.5$	0.9	/	/
	$\beta = 110$ $3.5 < \lambda < 5.0$			
	$\beta = 50$ $5.0 < \lambda < \infty$			
<b>[16]</b>	$\beta = 10260$ [m <sup>-1</sup> ] $\lambda \geq 3\mu\text{m}$	0.9	500	0
	$k = 260$ [m <sup>-1</sup> ] $\lambda \geq 3\mu\text{m}$		$1.02 \cdot 10^4$	0
	$\sigma_s = 1.10^4$ [m <sup>-1</sup> ] $\lambda \geq 3\mu\text{m}$		$1.03 \cdot 10^4$	0.97

Tableau. II. 30: Propriétés radiatives d'YSZ en fonction de la longueur d'onde [20]

<b>Coefficient d'absorption et Indice de réfraction d'YSZ [20]</b>					
$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$K$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$n$	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$K$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$n$
1.0	175	1.38	5.5	50	1.85
1.5	165	1.79	6.0	40	1.84
2.0	163	1.90	6.5	34	1.82
2.5	162	1.80	7.0	35	1.79
3.0	159	1.83	7.5	47	1.75
3.5	148	1.86	8.0	65	1.71
4.0	121	1.88	8.5	79	1.67

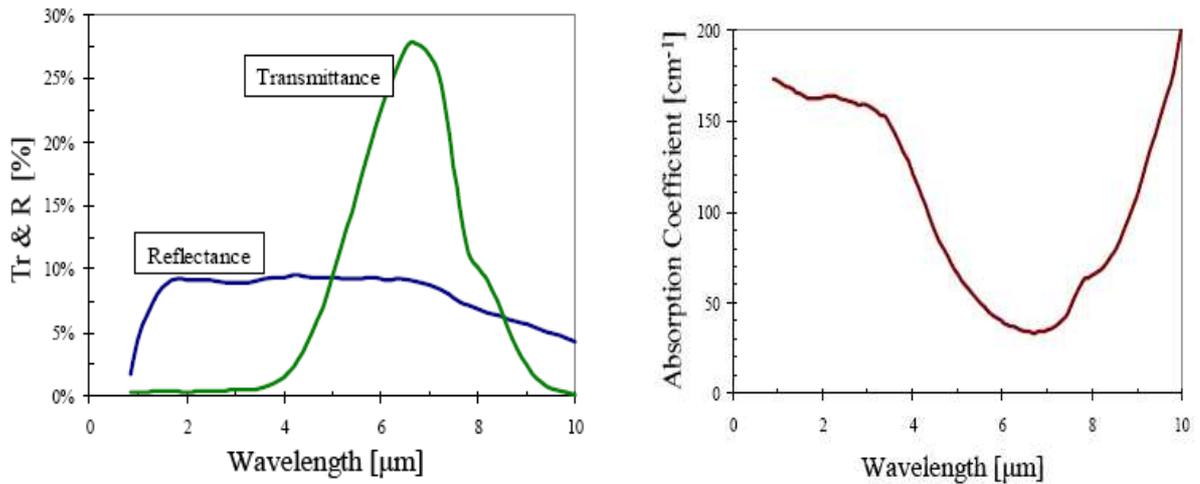


Figure. II. 2: (a) Variation Transmittance et la reflectance en fonction de la longueur d'onde. (b) Variation coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [20]

## *Chapitre III*

### *Modélisation Mathématique et Résolution Numérique*

## Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les équations mathématiques régissent les phénomènes de transfert thermique dans une cellule SOFC, classé en deux modèles notamment ; le premier porte sur un modèle conducto-radiatif monodimensionnel englobe l'électrolyte solide SOFC; et le deuxième est un modèle couplé bidimensionnel englobe la structure PEN-SOFC. L'effet des pertes ohmiques est considéré comme un terme source additionnel correspondant à la source de chaleur volumique due à la polarisation ohmique. Les deux approximations de Rosseland et de Schuster-Schwartzchild sont utilisées pour simuler l'effet de transfert de chaleur radiatif. La méthode des volumes finis et les méthodes et les schémas numériques utilisés lors de la résolution des équations sont aussi présentés.

## I. Modèle Physique

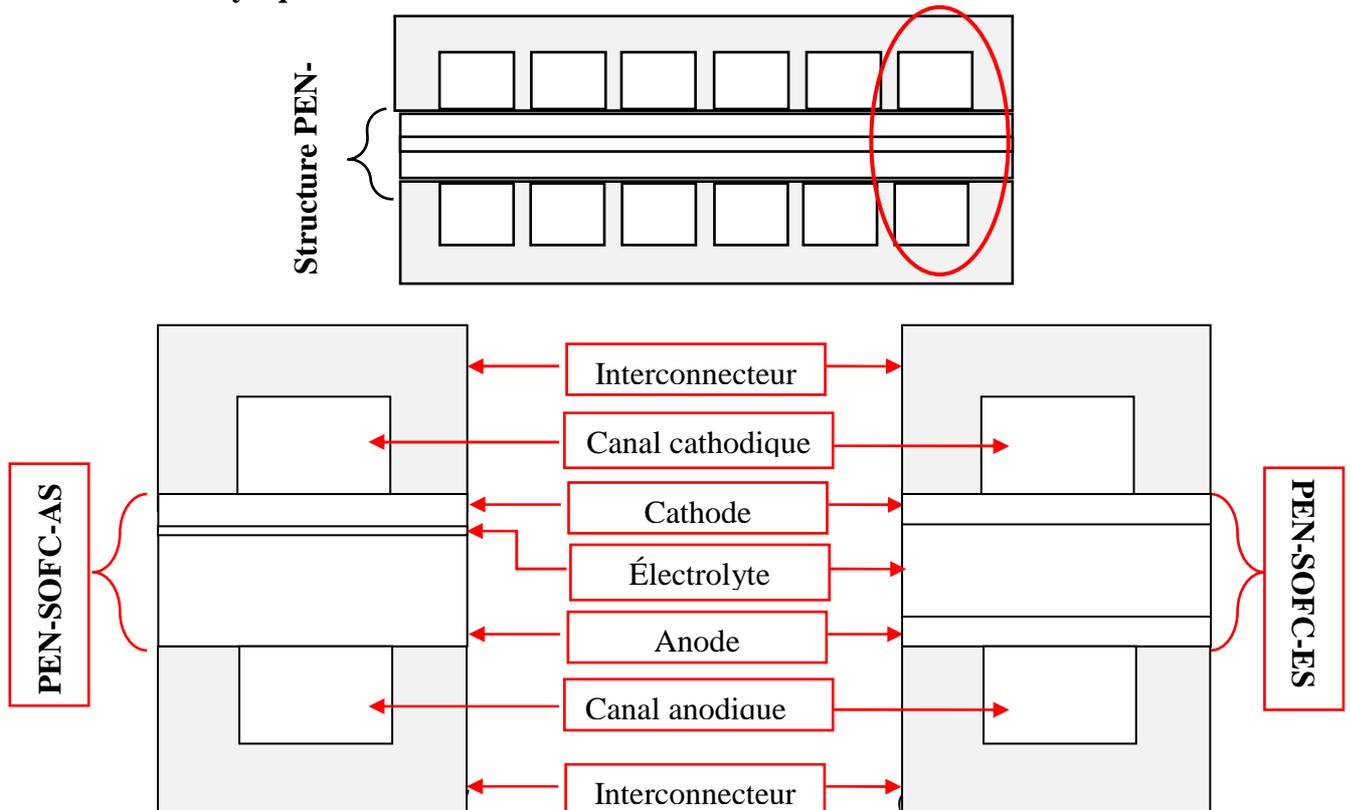


Figure.III.2: Cellule élémentaire d'une pile SOFC, (a) configuration anode supporté SOFC-AS, (b) configuration électrolyte supporté SOFC-ES

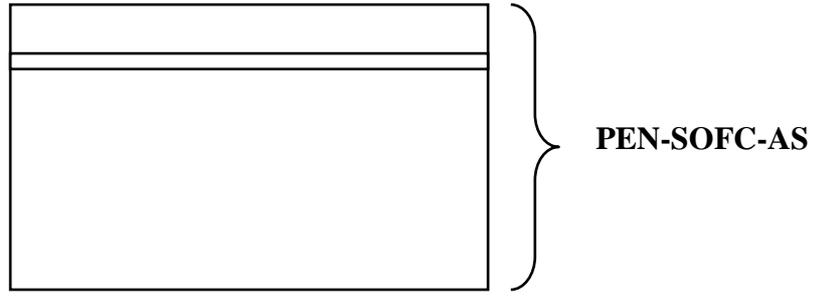


Figure.III.3: PEN-SOFC domaine de conduction, convection et rayonnement

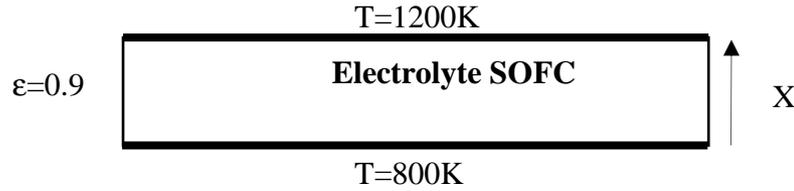


Fig.III.4: Electrolyte SOFC domaine de conduction et radiation

## II. Modélisation Mathématique des Phénomènes du Transfert Radiatif SOFC

Les méthodes connues sous le nom de: Approximation de Rosseland et Approximation Schuster-Schwartzchild donnant des formes simplifiées de solutions. 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 de conduction, elle permet aussi de réduire le temps de calcul et de minimiser les erreurs commises lors de l'intégration de l'équation de transfert de chaleur radiatif ETR.

### II.1. Approximation de Rosseland

Le flux de chaleur radiatif échange à travers les deux électrodes d'une pile SOFC est approximé comme étant un flux diffusif par l'intermédiaire d'une conductivité radiative dite la conductivité radiative de Rosseland.

$$q_{rad} = -K_R \nabla T \quad (III.1)$$

Où la conductivité thermique radiatif de Rosseland est donnée par :

$$K_{R,an} = \frac{16n^2\sigma T^3}{3\beta_R} \quad (III.2)$$

La source radiative est donnée en dérivant l'expression (III.1) suivant les deux directions

$$S_{rad} = -\nabla q_{rad} \quad (III.3)$$

### II.2. Approximation de Schuster-Schwartzchild

Les effets des échanges radiatifs sont significatifs pour des électrolytes plus épais le modèle à double flux ou l'approximation de Schuster-Schwartzchild est utilisée pour approximer le flux de chaleur radiatif à travers l'électrolyte d'YSZ. Le flux de chaleur radiatif échangé à travers la surface d'électrolyte peut être approximer comme suit: [20,16]

En fonction d'épaisseur optique :

$$q_{rad} = \sigma n^2 (T^4 - T_w^4) \left[ e^{-2(\tau_L - \tau)} - e^{-2\tau} \right] \quad (III.4)$$

En fonction de coefficient d'absorption  $k$  :

$$q_{rad} = C_1 e^{2kL} + C_2 e^{-2kx} \quad (III.5)$$

$C_1$  et  $C_2$  sont les constantes de Schuster-Schwartzchild, sont données par :

$$\begin{aligned} C_1 &= -\sigma (T_{top}^4 - T^4) e^{-2kx} \\ C_2 &= \sigma (T_{bot}^4 - T^4) \end{aligned} \quad (III.6)$$

La divergence de flux radiatif sur la direction de propagation de flux radiatif est donnée par :

$$S_{rad,ele} = -\nabla q_{rad} = \left[ 2k \sigma C_1 + 4\sigma T^3 e^{2kL} \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{2kx} - \left[ 2k \sigma C_2 + 4\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{-2kx} \quad (III.7)$$

Ces deux approximations, de Rosseland et de Schuster-Schwartzchild sont utilisées pour simuler les effets des échanges de chaleur radiatif à travers les deux électrodes et la couche d'électrolyte SOFC respectivement. En supposant que les matériaux constituant l'électrolyte et les électrodes poreuses de SOFC sont des milieux linéaire non homogènes semi-transparent.

### III. Equations de Modélisation

#### Hypothèses

Pour écrire les équations fondamentales régissant les différents phénomènes de transport au sein de domaine d'étude choisi on a supposé que :

- ↪ Le régime est instationnaire ;
- ↪ Les fluides sont supposés comme étant des fluides incompressibles;
- ↪ Toutes les variables admettent des valeurs constantes sur chaque volume de contrôle;
- ↪ On a considéré que la source de chaleur ohmique, on a négligé l'effet de toutes autres sources;
- ↪ On a considéré les effets des échanges radiatifs au sein des électrodes et l'électrolyte;
- ↪ On a négligé les échanges radiatifs avec l'extérieur et vers les plats d'interconnexions;

#### III.1. Modèle Conducto-Radiatif Monodimensionnel

L'énergie est transportée par deux mécanismes conduction et radiation dans l'électrolyte, en négligeant l'effet de toute source de chaleur et en considérant que l'évolution stationnaire de température s'effectue selon une seule direction X. L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein d'électrolyte tient compte de deux flux: diffusif et radiatif prend la forme suivante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff,ele} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_{T,ele} \quad (III.8)$$

L'expression de flux de chaleur radiatif en fonction d'épaisseur optique est donné par: (III.4)

$$q_{rad} = \sigma n^2 (T^4 - T_w^4) \left[ e^{-2(\tau_L - \tau)} - e^{-2\tau} \right]$$

Il s'agit alors d'un problème de conduction rayonnement dont la résolution d'équation d'énergie s'effectue par la méthode des volumes finis.

## III.2. Modèle Couple Bidimensionnel

### III.2.1. Electrolyte

L'énergie est transportée par deux mécanismes conduction et radiation dans l'électrolyte, la perte d'énergie sous forme de chaleur est due à la perte ohmique. L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein d'électrolyte tient compte de deux flux: diffusif et radiatif prend la forme suivante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff,ele} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eff,ele} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{i}{\sigma_{ele}} + \left[ 2k\sigma C_1 + 4\sigma T^3 e^{2kx} \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{2kx} + \left[ 2k\sigma C_2 + 4\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right] e^{-2kx} \quad (III.9)$$

### III.2.2. Electrode

#### III. 2.2.1. Equation de continuité

L'équation de continuité est une représentation mathématique de la notion fondamentale de la dynamique des fluides c'est la conservation de la masse.

$$\frac{\partial \rho \varepsilon U}{\partial x} + \frac{\partial \rho \varepsilon V}{\partial y} = 0 \quad (III.10)$$

#### III. 2.2.2. Loi de Darcy

Les gradients de pression sont proportionnels aux vitesses d'écoulement pour chacun des pores des électrodes poreux. L'équation qui explique la résistance de l'écoulement est la suivante:

$$U = -\varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{\partial P}{\partial x}, V = -\varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (III.11)$$

#### III. 2.2.3. Equation de Pression

En substituant l'équation (III.09) dans l'équation (III.08) on trouve l'équation de poisson de pression suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \varepsilon \frac{\mu}{k} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \Rightarrow \Delta P = 0 \quad (\text{III.12})$$

### III. 2.2.4. Equation de conservation d'Énergie

#### ✓ Anode

L'équation globale qui regist le transfert de chaleur au sein d'anode tient compte de trois modes de transport: diffusif, convectif et radiatif prend la forme suivante:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho C_p u)_{fuel} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho C_p v)_{fuel} T \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\lambda_{eff,an} + K_{R,an}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda_{eff,an} + K_{R,an}) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{i}{\sigma_{an}} \quad (\text{III.13})$$

#### ✓ Cathode

L'équation globale qui régit le transfert de chaleur au sein de cathode tient compte les trois modes de transport: diffusif, convectif et radiatif prend la forme suivante:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho C_p u)_{air} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho C_p v)_{air} T \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\lambda_{eff,ca} + K_{R,ca}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda_{eff,ca} + K_{R,ca}) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{i}{\sigma_{ca}} \quad (\text{III.14})$$

### III. 2.2.5. Equation de conservation des espèces

#### Hydrogène

L'effet de densité de courant sur la consommation de l'hydrogène dans l'anode est pris en considération par un terme additionnel, dans l'équation de bilan de masse, qui est le terme source. L'équation de conservation de la masse d'hydrogène dans l'anode de la pile, tient compte de deux flux, diffusif et convectif et prend la forme suivante: (III.15)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho u)_{fuel} X_{H_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho v)_{fuel} X_{H_2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff,H_2} \frac{\partial X_{H_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff,H_2} \frac{\partial X_{H_2}}{\partial y} \right) + S_{H_2,an}$$

#### ✓ Vapeur d'eau

La masse de la vapeur d'eau est transportée par diffusion et convection dans l'anode de la pile. L'effet de densité de courant sur la production de la vapeur d'eau dans l'anode sont pris en considération par un terme additionnel de la source dans l'équation de bilan de masse, l'équation de la conservation de masse d'eau est donnée par: (III.16)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( (\rho u)_{fuel} X_{H_2O} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\rho v)_{fuel} X_{H_2O} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff,H_2O} \frac{\partial X_{H_2O}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff,H_2O} \frac{\partial X_{H_2O}}{\partial y} \right) + S_{H_2O,an}$$

#### ✓ Oxygène

La masse de l'espèce oxygène est transportée par diffusion et convection dans la cathode de la pile. L'effet de densité de courant sur la consommation de l'oxygène dans la cathode est pris en considération par un terme additionnel dans la source dans l'équation de bilan de masse, l'équation de conservation de masse d'oxygène est donnée par: (III.17)

$$\frac{\partial}{\partial x}((\rho u)_{air} X_{O_2}) + \frac{\partial}{\partial y}((\rho v)_{air} X_{O_2}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff,O_2} \frac{\partial X_{O_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff,O_2} \frac{\partial X_{O_2}}{\partial y} \right) + S_{O_2,ca}$$

Tableau.III.1: Termes sources correspondants à l'équation d'énergie

Paramètre	Electrolyte	Cathode	Anode
Conductivité Electrique [ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]	$\sigma_{ele} = 3.34.10^4 \exp\left[\frac{-10300}{T}\right]$	$\sigma_{ca} = \frac{42.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1200}{T}\right]$	$\sigma_{an} = \frac{95.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1150}{T}\right]$
Source Ohmique [W/m <sup>3</sup> ]	$S_{ohm,ele} = \frac{i}{\sigma_{ele}}$	$S_{ohm,ca} = \frac{i}{\sigma_{ca}}$	$S_{ohm,an} = \frac{i}{\sigma_{an}}$
flux radiatif [W]	$q_{rad} = C_1 e^{2kL} + C_2 e^{-2kx}$	$q_{rad} = -K_{R,ca} \nabla T$	$q_{rad} = -K_{R,an} \nabla T$
Source Radiatif [W/m <sup>3</sup> ]	$S_{rad,ele} = -\nabla q_{rad}$	$S_{rad,ca} = -\nabla q_{rad,ca}$	$S_{rad,an} = -\nabla q_{rad,an}$
Source Total [W/m <sup>3</sup> ]	$S_{T,ele} = S_{ohm,ele} + S_{rad,ele}$	$S_{T,ca} = S_{ohm,ca} + S_{rad,ca}$	$S_{T,an} = S_{ohm,an} + S_{rad,an}$

Tableau.III.2: Termes sources correspondants à l'équation de conservation des espèces

Source Massique	source massique d'oxygène	source massique de la vapeur d'eau	Source massique d'hydrogène
Cathode	$S_{O_2,ca} = -\frac{M_{O_2} j}{2F}$	/	/
Anode	/	$S_{H_2O,an} = -\frac{M_{H_2O} j}{2F}$	$S_{H_2,an} = -\frac{M_{H_2} j}{2F}$

#### IV. Méthode des Volumes Finis pour un Couplage Convection Diffusion

Les méthodes de volumes finis sont adaptées aux équations de conservation et utilisées en mécanique des fluides depuis plusieurs décennies. Le principe consiste à découper le domaine

en des volumes de contrôle; (Fig.III.3) on intègre ensuite l'équation de conservation sur les volumes de contrôle, on approche les flux sur les bords du volume de contrôle par une technique de différences finies. Dans les problèmes où l'écoulement de fluide joue un rôle significatif, nous devons tenir compte de la convection. L'équation instationnaire de convection diffusion peut être tirée à partir d'équation de transport générale pour une propriété  $\Phi$  comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho\phi) + \text{div}(\rho\bar{u}\phi) = \text{div}(\Gamma.\text{grad}(\phi)) + S_\phi \quad (\text{III.18})$$

L'intégration de l'équation de transport sur un volume de contrôle donne :

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dV + \int_A \bar{n}(\rho\bar{u}\phi) dA = \int_A \bar{n}(\Gamma.\text{grad}(\phi)) dA + \int_V S_\phi dV \quad (\text{III.19})$$

Le problème principal que nous rencontrons dans la discrétisation des termes de convection est le calcul des valeurs de la propriété  $\Phi$  sur les faces du volume de contrôle et sur son flux convectif à travers ces limites. La technique de différentiation centrée est utilisée pour discrétiser le terme de diffusion et le terme source, il semble évident d'essayer d'utiliser cette technique pour les termes convectifs. Le phénomène de diffusion influence sur la distribution de la propagation de la propriété et de ses gradients dans toutes les directions, alors que la convection ne montre son influence que dans le sens de l'écoulement. Dans ce qui suit, on ne s'intéresse pas à la manière d'évaluer la vitesse sur les faces.

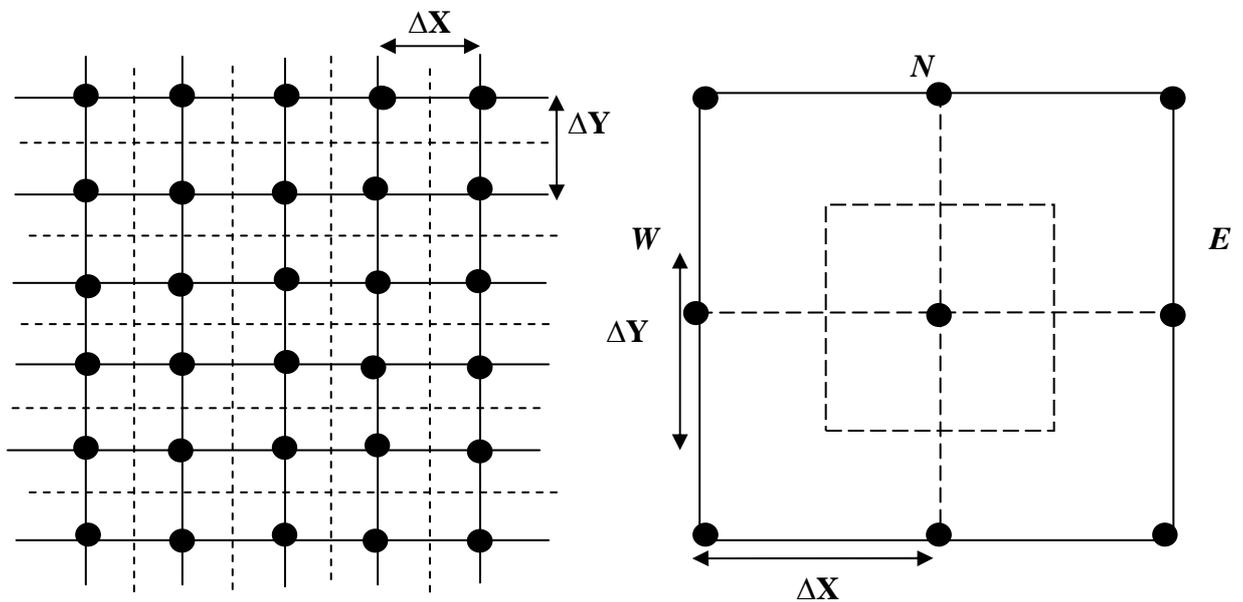


Figure. III.5: Volume de contrôle bidimensionnel élémentaire

#### IV.1. Génération du Maillage

La première étape consiste à diviser le domaine en volumes de contrôles discrets. Les limites ou les faces du volume de contrôle sont positionnés à mi distances des points nodaux qui lui sont adjacents. Chaque point nodal P est entouré par un volume de contrôle ou une cellule, Nous utilisons les quatre points noté: W, S, E, N voisin de point principale P .Notant aussi  $P_{ij}$ . Nous considérons un volume de contrôle bidimensionnel élémentaire suivant, A est la section transversale représentant la face du volume de contrôle  $\Delta V$ , il s'agit de 7000 nœuds.

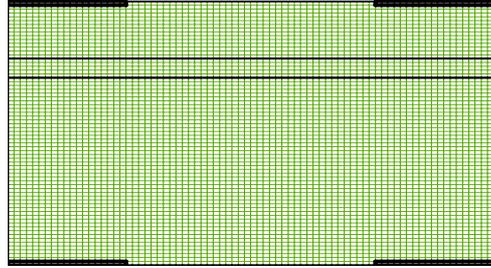


Figure.III.6:Présentation du maillage

#### IV. 2.Conditions Initial et aux Limite

Les conditions imposées au temps  $t = 0$  sont appelées condition initial, sont les éléments qui décrivent l'état du système à l'état de départ. On définit comme conditions initiales les éléments nécessaires à la détermination de la solution complète et si possible unique d'équation de transport d'une propriété  $\Phi$ , C'est ce qui permet de déterminer les coefficients de solution. Elle exprimé comme suit :  $\Phi(t=0, x, y) = \Phi_0$ . Les conditions imposées au temps  $t \neq 0$  sont appelées conditions aux limites, sont les valeurs que prennent les solutions d'équation de transport sur les frontières du domaine de volume de contrôle. On a choisi la condition de Dirichlet sous la forme  $\phi = \phi_0$  à l'entre du volume de contrôle, et la condition de Neumann

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ à la sortie du volume de contrôle.}$$

#### Conditions Initial pour $t = 0$

Les conditions de température ; de pression et des concentrations des espèces  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H_2$  pour  $t=0$  sont donné comme suit:

$$t = 0 \begin{cases} T(t = 0, x, y) = T_a \\ P(t = 0, x, y) = P_a \\ C_{O_2}(t = 0, x, y) = 0 \\ C_{H_2O}(t = 0, x, y) = 0 \\ C_{H_2}(t = 0, x, y) = 0 \end{cases}$$

#### ✓ Conditions aux Limités pour $t \neq 0$

Les conditions de température de pression et des concentrations des espèces  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H_2$  pour  $t \neq 0$  et sur toutes les frontières de domaine de calcul sont donné comme suit :

❖ **Canal Cathodique:**

$$t \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} T_{O_2} = T_{0,O_2} \\ P_{O_2} = P_{0,O_2} \\ C_{H_2O} = C_{0,H_2O} \\ C_{O_2} = C_{0,O_2} \\ C_{H_2} = 0 \end{array} \right.$$

❖ **Interface cathode – Interconnecteur:**

$$t \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ C_{H_2O} = 0 \\ C_{O_2} = 0 \\ C_{H_2} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

❖ **Canal Anodique:**

$$t \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial y} = 0 \\ T = T_{H_2} \\ P = P_{H_2} \\ C_{O_2} = 0 \\ C_{H_2} = C_{0,H_2} \end{array} \right.$$

❖ **Interface Anode – Interconnecteur:**

$$t \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ C_{O_2} = 0 \\ C_{H_2} = 0 \\ \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

❖ **Partie Solide**

$$t \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial y} = 0 \\ C_{O_2} = 0 \\ C_{H_2} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

Le schéma suivant représente les distributions des conditions aux limites sur le domaine étudié.

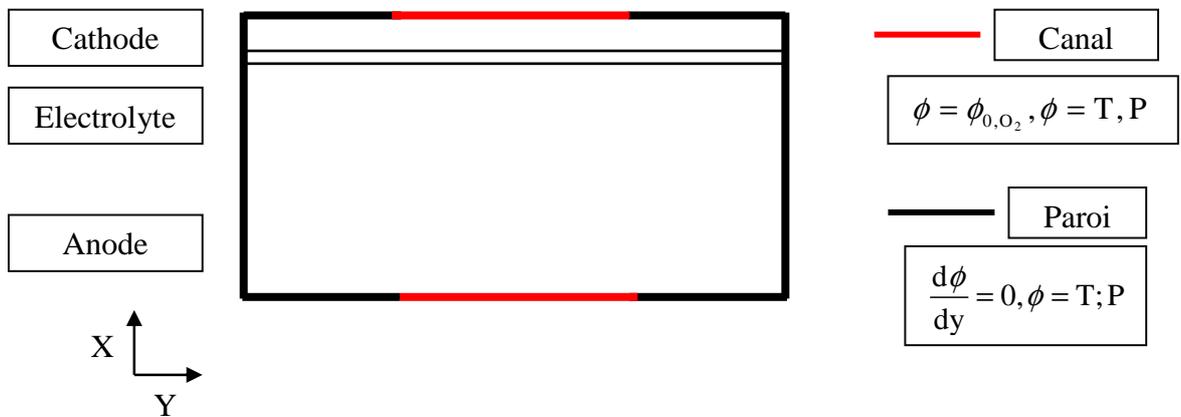


Figure. III.7: Présentation des conditions initial et aux limites

### IV.3. Discrétisation par la Méthode des Volume Finis

L'équation discrétisée a une interpolation physique claire. Elle dit que la différence entre les flux totale quittant et entrant le volume de contrôle est égal à la génération volumique de propriété  $\Phi$ . La discrétisation de l'équation (III.19) consiste à intégrer chacun de ses termes sur un volume de contrôle défini précédemment afin d'obtenir des équations algébriques linéaires pour chaque variable. Comme le domaine de calcul est grand, il contient un nombre important de volume de contrôle de faible dimensions, donc on peut faire l'hypothèse que toutes les variables admettent des valeurs constantes sur chaque volume de contrôle.

L'intégration de chaque terme de l'équation de transport convection-diffusion (III.19) sur le volume de contrôle et entre deux temps successifs donne:

#### ❖ Discrétisation de Terme de Stockage

Terme d'accumulation ou terme de stockage, correspond à l'augmentation de l'énergie interne du corps au cours de temps.

$$\int_{VC} \int_t^{t+\Delta t} \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho T) \right) dt dx dy = (\rho T) \Big|_t^{t+\Delta t} \cdot \Delta x \cdot \Delta y = \left( (\rho T)_p^{t+\Delta t} - (\rho T)_p^t \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad (III.20)$$

### ❖ Discrétisation de Terme Convectif

Suivant X

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial \rho U T}{\partial x} \right) dx dy dt = (\rho \phi U) \Big|_w^e \cdot \Delta y \cdot \Delta t = \left( (\rho U T)_e - (\rho U T)_w \right) \cdot \Delta y \cdot \Delta t \quad (III.21)$$

En introduisant le flux massique convectif par unité de surface « F » sur les faces de volume de contrôle, donc l'équation (III.19) devient: (III.22)

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial \rho U T}{\partial x} \right) dx dy dt = (F_e T_e - F_w T_w) \cdot \Delta t \quad (III.22)$$

Suivant Y

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial \rho V T}{\partial y} \right) dy dx dt = (\rho V T) \Big|_s^n \cdot \Delta x \cdot \Delta t = \left( (\rho V T)_n - (\rho V T)_s \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (III.23)$$

En introduisant le flux massique convectif par unité de surface « F » sur les faces de volume de contrôle, donc l'équation (III.23) devient: (III.24)

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial \rho V T}{\partial y} \right) dy dx dt = (F_n T_n - F_s T_s) \cdot \Delta t \quad (III.24)$$

**Tableau. III.3: Flux massiques convectifs**

$F_e$	$F_w$	$F_n$	$F_s$
$\rho U_e \cdot \Delta y$	$\rho U_w \cdot \Delta y$	$\rho V_n \cdot \Delta x$	$\rho V_s \cdot \Delta x$

### ❖ Discrétisation de Terme Diffusif

Suivant X

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) dx dy dt &= \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_w^e \cdot \Delta y \cdot \Delta t = \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \cdot \Delta y \cdot \Delta t \\ &= \left( \Gamma_e \frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} - \Gamma_w \frac{T_P - T_W}{\delta x_{WP}} \right) \cdot \Delta y \cdot \Delta t = \left( \frac{\Gamma_e \cdot \Delta y}{\delta x_{PE}} \cdot (T_E - T_P) - \frac{\Gamma_w \cdot \Delta y}{\delta x_{WP}} \cdot (T_P - T_W) \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (III.25)$$

En introduisant le terme qui représente la conduction de la diffusion « D » sur les faces de volume de contrôle, donc l'équation (III.25) devient: (III.26)

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right) dx dy dt = (D_e \cdot (\phi_E - \phi_E) - D_w (\phi_P - \phi_W)) \cdot \Delta t \quad (\text{III.26})$$

Suivant Y

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right) dx dy dt &= \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \Big|_s^n \Delta x \cdot \Delta t = \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \cdot \Delta t \\ &= \left( \Gamma_n \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} - \Gamma_s \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta y_{SP}} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta t = \left( \frac{\Gamma_n \cdot \Delta x}{\delta y_{PN}} \cdot (\phi_N - \phi_P) - \frac{\Gamma_s \cdot \Delta x}{\delta y_{SP}} \cdot (\phi_P - \phi_S) \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

En introduisant le terme qui représente la conduction de la diffusion « D » sur les faces de volume de contrôle, donc l'équation (III.27) devient: (III.28)

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \left( \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right) dx dy dt = (D_n \cdot (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S)) \cdot \Delta t \quad (\text{III.28})$$

#### ❖ Discrétisation de terme source

L'effet des pertes de chaleurs de type Ohmique sur le profil de température dans les électrodes poreuses et dans l'électrolyte solide de SOFC est étudié. Ces pertes sont prises en considération dans le terme source de l'équation générale de l'énergie. En générale le terme source correspondant à la source volumique de propriété  $\Phi$ .

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} (S_\phi) dv dt = S_\phi \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t = (S_p \cdot T_p + S_u) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t \quad (\text{III.29})$$

Après une substitution dans l'équation de transport-diffusion et en appliquant un schéma implicite pour le temps, on obtient la forme discrétisée donné par l'équation (III.30):

Tableau. III. 4: variable de la conduction de diffusion

$D_n$	$D_s$	$D_e$	$D_w$
$\frac{\Gamma_n \cdot \Delta x}{\delta y_{NP}}$	$\frac{\Gamma_s \cdot \Delta x}{\delta y_{SP}}$	$\frac{\Gamma_e \cdot \Delta y}{\delta x_{PE}}$	$\frac{\Gamma_w \cdot \Delta y}{\delta x_{WP}}$

$$\begin{aligned} a_P^0 (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) + (F_e T_e^{t+\Delta t} - F_w T_w^{t+\Delta t}) + (F_n T_n^{t+\Delta t} - F_s T_s^{t+\Delta t}) &= (D_e \cdot (T_E^{t+\Delta t} - T_P^{t+\Delta t}) - D_w (T_P^{t+\Delta t} - T_W^{t+\Delta t})) \\ &+ (D_n \cdot (T_N^{t+\Delta t} - T_P^{t+\Delta t}) - D_s (T_P^{t+\Delta t} - T_S^{t+\Delta t})) + (S_p \cdot T_P^{t+\Delta t} + S_u) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \end{aligned}$$

Le schéma employé pour la discrétisation des termes convectifs est le schéma hybride ce schéma est la combinaison des deux schémas, schéma centrée et schéma Upwind. On sait que le schéma de différences centrées est utilisé que pour des valeurs de nombre de Peclet  $|Pe| \leq 2$  et que le schéma Upwind surestime la diffusion pour les grandes nombre de Peclet, le schéma propos une solution qui consiste à utiliser:

- ❖ le schéma de différences centrées pour  $|Pe| \leq 2$
- ❖ le schéma Upwind avec diffusion négligée pour  $|Pe| > 2$

Le schéma Hybride peut être représenté par trois droites de telle façon, par exemple pour le coefficient :

- ✓ pour  $Pe < -2, \frac{a_E}{D_E} = -Pe$
- ✓ pour  $-2 \leq Pe \leq 2, \frac{a_E}{D_E} = 1 - \frac{Pe}{2}$
- ✓ pour  $Pe > 2, \frac{a_E}{D_E} = 0$

- ✓ notant que le nombre de pecllet est égale à  $P = \frac{F}{D} = \frac{(\rho u_i)(\delta x_i)}{\Gamma}$

Sous forme générale on peut écrire le coefficient comme  $a_E = \left\| -F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0 \right\|$

De la même façon l'équation de discrétisation pour le schéma Hybride s'écrit:

$$a_p \cdot T_p^{t+\Delta t} = a_w \cdot T_w^{t+\Delta t} + a_e \cdot T_E^{t+\Delta t} + a_s \cdot T_S^{t+\Delta t} + a_n \cdot T_N^{t+\Delta t} + \rho \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta t} \cdot T_p^t + S_u \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad (III.31)$$

Tableau. III.5: Coefficients de schéma Hybride

$a_w$	$a_e$	$a_s$	$a_n$
$\max(F_w, D_w + \frac{F_w}{2}, 0)$	$\max(-F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0)$	$\max(F_s, D_s + \frac{F_s}{2}, 0)$	$\max(-F_n, D_n - \frac{F_n}{2}, 0)$

❖ **Discrétisation de l'équation de pression**

La forme générale de l'équation de poisson:

$$\nabla(\Gamma \cdot \nabla(P)) + S_\phi = 0 \quad (III.32)$$

L'intégration de l'équation (III.29) sur le volume de contrôle donne l'équation:

$$\int_{VC} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial}{\partial x} (P) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial}{\partial y} (P) \right) + S_{\phi} \right) .dv = 0 \quad (III.33)$$

L'équation (III.32) présente l'équation de discrétisation de l'équation (III.33) elle est donné par :

$$a_p.P_p = a_w.P_w + a_e.P_e + a_s.P_s + a_n.P_n + S_{\phi}.\Delta x.\Delta y \quad (III.34)$$

Figure. III.6: Coefficients d'équation de pression

$a_w$	$a_e$	$a_s$	$a_n$	$a_p$
$D_w$	$D_e$	$D_s$	$D_e$	$D_w + D_e + D_s + D_n - S_{\phi} \Delta x .\Delta y$

#### IV.4. Résolution d'un System d'équations Algébriques

Les équations discrétisées doivent être écrites en chaque point nodal. Pour les points situés à la frontière l'équation générale devra être modifiée pour introduire les conditions aux limites. est le fait que les variables dépendent les unes des autres, une méthode itérative est nécessaire pour arriver a une finale. Plusieurs techniques numériques sont utilisées pour assurer la stabilité de la solution ainsi que la convergence, et la méthode de *Gauss Seidel* et l'une des ces méthodes. Elle consiste à calculer  $T_{I,J}^{k+1}$  à partir d'une estimation de solution  $T_{I,J}^k$  à l'itération  $k$  comme suit :

$$a_p.T_{I,J}^{k+1} = a_w.T_{I-1,J}^{k+1} + a_e.T_{I+1,J}^k + a_s.T_{I,J-1}^{k+1} + a_n.T_{I,J+1}^k + b_{I,J} \quad (III.35)$$

Si la condition n'est pas vérifiée, on pose que  $\phi_{I,J}^k = \phi_{I,J}^{k+1}$  et on recalcule jusqu'à la convergence. Le processus itératif est contrôlé par un test de convergence sur la variable  $\Phi$ . On arrête les itérations lorsque les valeurs de la variable  $\Phi$  restent pratiquement constantes entre deux itérations. Ceci se traduit par le critère de convergence relatif pour chaque variable défini par :

$$\left| \frac{(T_{I,J}^{k+1} - T_{I,J}^k)}{T_{I,J}^{k+1}} \right| \leq \epsilon \quad (III.36)$$

$\epsilon$  est le critère de convergence. Cette condition doit être vérifiée sur l'ensemble des nœuds du maillage. Le choix de  $\epsilon$  dépend de la précision qu'on cherche et des entre  $10^{-4}$  et  $10^{-3}$  sont généralement choisies.

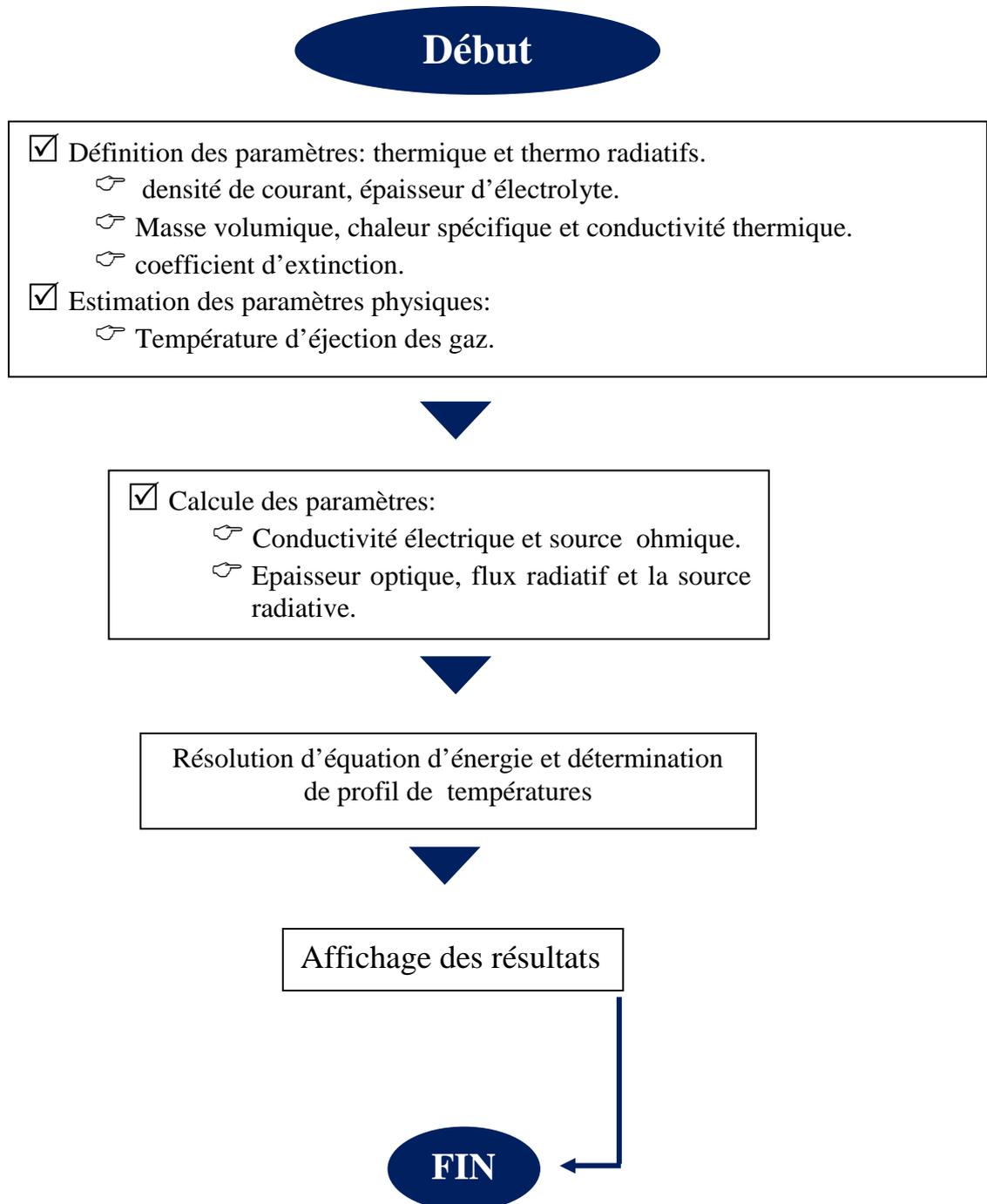
De manière générale, le transport de masse est fonction de la température, de la pression et de la concentration des espèces. Les réactifs doivent diffuser au travers de la porosité des électrodes d'où l'importance de la microstructure et de la géométrie de celles-ci. Notant que ; la polarisation de réaction Elle apparaît quand la réaction d'électrode est influencée par une

réaction chimique, ce qui est le cas quand la cinétique d'apport des réactifs ou de départ des produits au voisinage de l'électrode avant ou après la réaction de cellule, est faible. Ce type de polarisation est similaire au phénomène de polarisation de concentration précédemment expliqué, à haute température cette polarisation de réaction est normalement faible.

#### IV.5. Paramètres Utilisés

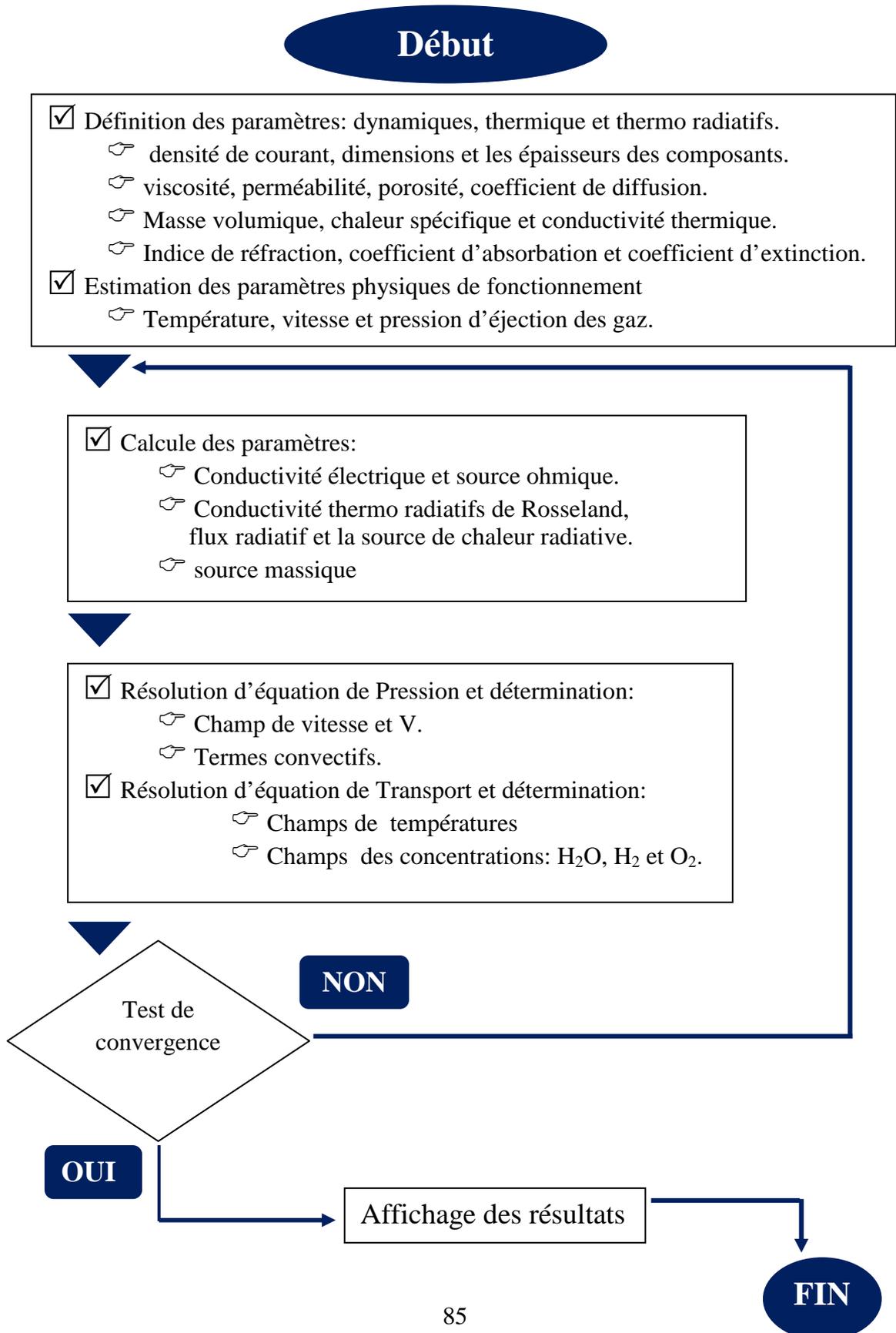
Tableau. III.7: Données thermiques, dynamiques et thermo radiatives utilisé

Propriété	Unité	Référence	Cathode	Anode	Electrolyte
Chaleur spécifique	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[03]	573	595	606
Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	[03]	6000	6200	5560
Perméabilité	[m <sup>2</sup> ]	[15]	10 <sup>-20</sup>	10 <sup>-20</sup>	10 <sup>-25</sup>
Viscosité	[PI]	[20]	10 <sup>-5</sup>		
Porosité	[%]	[03]	40	40	0
Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]	/	15000		
Conductivité thermique	[W/km]	[07]	02.00	02.00	02.00
Epaisseur PEN-SOFC-AS	[µm]	[20]	150	500	50
Epaisseur PEN-SOFC-ES	[µm]	[20]	100	300	300
Composition des réactifs	[%]	[20]	Hydrogéné: 80 % H <sub>2</sub> + 20 %H <sub>2</sub> O		
			Air: 21% O <sub>2</sub> +79% N <sub>2</sub>		
Indice de réfraction	/	[20]	YSZ n=1.8 pour λ= 2.5 µm		
Longueur d'onde	[µm]	[20]	2.5		
Coefficient d'absorption	[cm <sup>-1</sup> ]	[20]	162		
Coefficient d'extinction	[cm <sup>-1</sup> ]	[20]	160		
Conductivité Electrique	[Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]	[03]	Electrolyte $\sigma_{ele} = 3.34.10^4 \exp\left[\frac{-10300}{T}\right]$		
			Cathode $\sigma_{ca} = \frac{42.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1200}{T}\right]$		
			Anode $\sigma_{an} = \frac{95.10^6}{T} \exp\left[\frac{-1150}{T}\right]$		

**ORGANIGRAMME I****MODELE: CONDUCTION-RAYONNEMENT**

## ORGANIGRAMME II

### MODELE COUPLE: CONDUCTION-CONVECTION-RAYONNEMENT



*Chapitre IV*  
*Resultats et Discussion*

## *Chapitre IV: Resultats et Discussion*

---

### *Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

#### **Introduction**

La section suivante présente un ensemble complet des résultats constatés à partir d'une modélisation numérique bidimensionnelle utilisant la méthode des volumes finis. Les résultats principaux régissant le comportement thermique de la pile SOFC, dans lesquelles on a étudié l'effet de transfert de chaleur radiatif sur le champ de la température et la température globale de fonctionnement. Dans ce cadre on a étudié la distribution spatiale de la température avec et sans tenir compte l'effet de transfert thermique radiatif, on a montré l'effet des différents paramètres physiques, géométriques et radiatifs sur le champ de température. Un ensemble complet de résultats constatés à partir de deux types de modèle mathématique:

Dans le premier modèle ? il s'agit d'un modèle monodimensionnel conducto radiatif englobe l'électrolyte de la pile SOFC. les résultats obtenus régissant: l'effet de l'indice de réfraction du milieu et l'épaisseur optique (effet d'épaisseur de l'électrolyte et le coefficient d'absorption) sur le profil de température. A travers le deuxième modèle, il s'agit d'un modèle couplé bidimensionnel pour deux configurations géométriques différentes notamment; la configuration anode supporte PEN-SOFC-AS et la configuration électrolyte supporte PEN-SOFC-ES, l'effet de transfert radiatif est pris en considération, afin de quantifier son effet sur le champ de température et la température globale de fonctionnement de la cellule. L'effet de température de fonctionnement et la densité du courant sont étudiés pour les deux configurations géométriques PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES. Le comportement dynamique: champ de pression et le comportement massique: champs des concentrations d'espèces, sont aussi donnés et les résultats sont discutés.

#### **I. Modèle Conducto-Radiatif Monodimensionnel**

##### **I.1. Effet d'épaisseur spectrale optique**

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. 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. Le cas du transfert conducto-radiatif au sein d'électrolyte SOFC milieu non diffusant à géométrie plane, milieu qui est contenu entre deux surfaces isothermes maintenues à des températures différentes, dont températures des surfaces supérieures et inférieures d'électrolyte sont fixées à 1200K et 800K respectivement, L'approximation de Schuster et Schwartzchild est utilisée pour un électrolyte mince  $\tau_L \ll 1$ . Le profil de température est donné pour différentes valeurs d'épaisseur optique spectrale  $\tau$  ;  $\tau = \{0.001, 0.1, 0.075 \text{ et } 0.24\}$ . Pour  $\tau_L = 10^{-2} \text{ m}$ ,  $n=1.8$  et pour un coefficient d'absorption d'YSZ  $k=162\text{cm}^{-1}$ . L'épaisseur optique  $\tau$  représente un facteur adimensionnel, qui est égale au produit de l'épaisseur d'électrolyte  $L$  et le coefficient d'absorption  $k$ , dont l'augmentation de l'épaisseur d'électrolyte amène à l'augmentation de la valeur de  $\tau$ . Une comparaison des résultats obtenus montre que l'augmentation d'épaisseur optique spectrale amène a une variation significative et un écart important de température (*Figure IV.1.*).

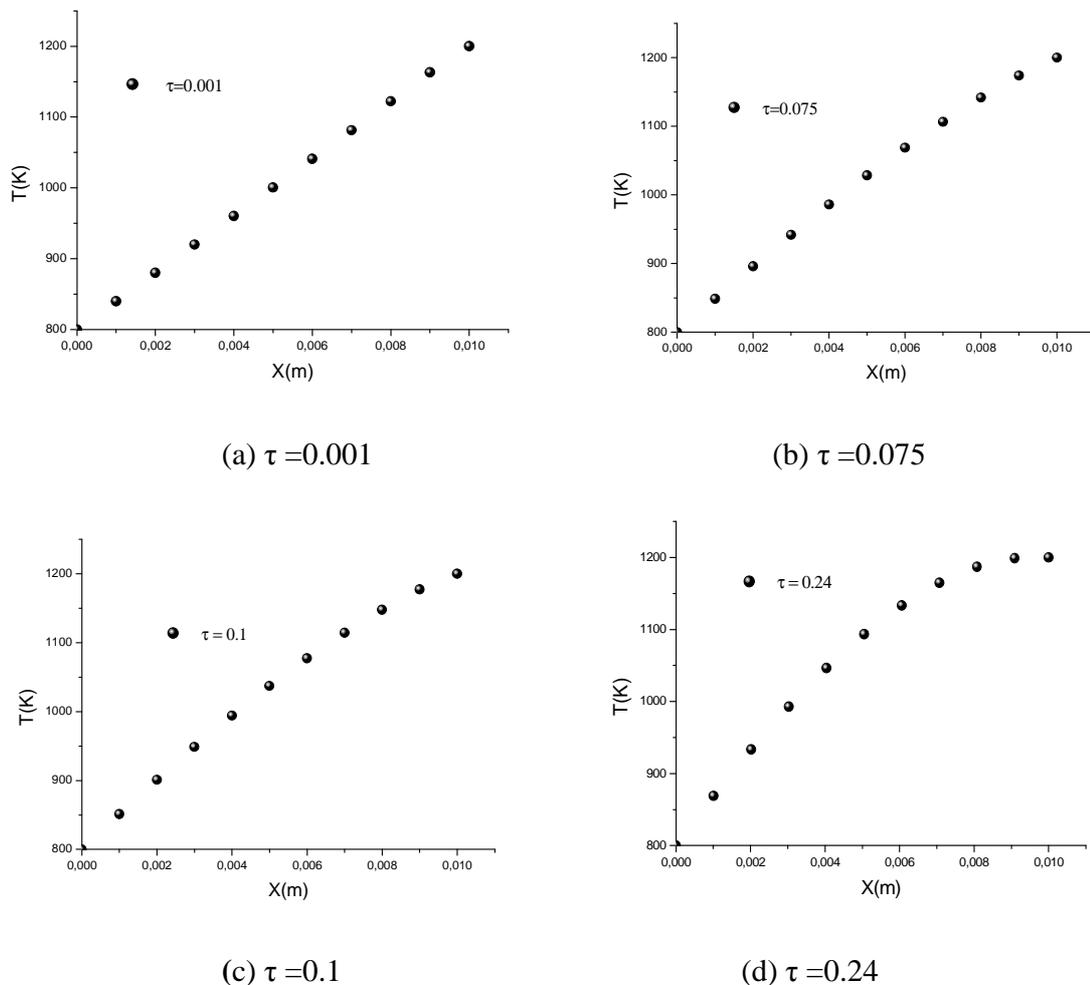


Figure IV.1. Effet d'épaisseur spectrale optique sur le profil de température

## I.2. Effet d'indice de réfraction

L'électrolyte conducteur ionique de la pile SOFC composé de YSZ supposé comme étant un milieu isotrope, homogène, gris et semi-transparent dont l'émissivité des surfaces d'électrolyte est  $\varepsilon=0.9$ . Les propriétés thermo radiatives d'YSZ présentent une variation spectrale importante avec la longueur d'onde et l'indice de réfraction du milieu. **(Fig.a.IV.2)** L'augmentation d'indice de réfraction de milieu conduit à une diffusion de chaleur. **(Fig.b.IV.2)**

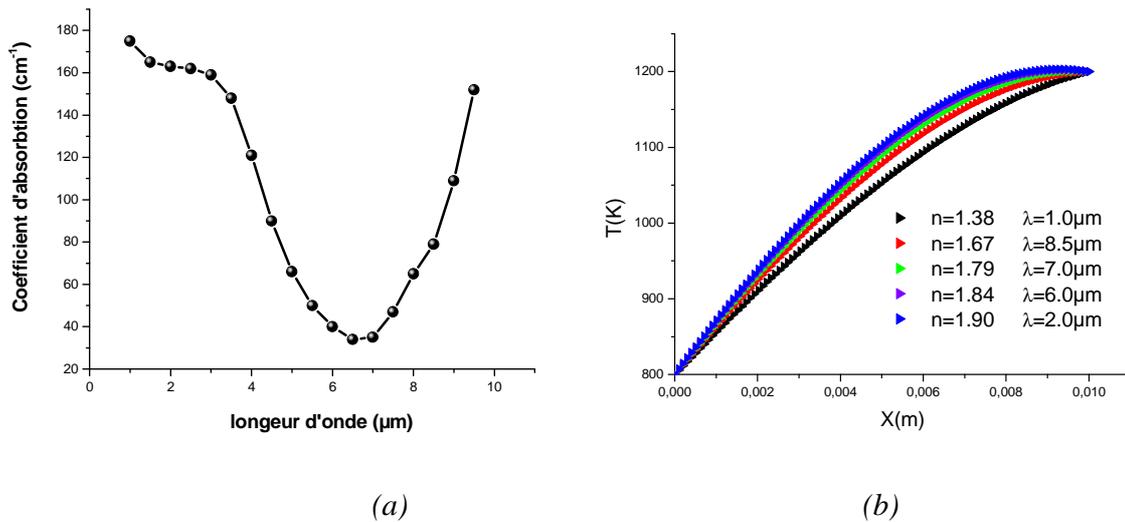


Figure. IV.2. (a) variation de coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde, (b) Profil de température pour différentes valeurs d'indice de réfraction

## II. Modèle couple Bidimensionnel

La section suivante présente un ensemble de résultats constatés à partir d'une modélisation numérique bidimensionnelle utilisant la méthode des volumes finis. Les résultats principaux régissant le comportement thermique de la structure PEN-SOFC pour deux configurations géométriques: configuration anode supporté PEN-SOFC-AS et électrolyte supporté PEN-SOFC-ES. Dans ce cadre on a étudié la distribution spatiale de la température avec et sans tenir compte de l'effet de transfert thermique radiatif, et on a montré l'effet des différents paramètres physiques, géométriques et radiatifs sur le champ de température et la température globale de la cellule SOFC. Les comportements dynamiques et massiques sont aussi représentés par les champs de pression, et de vitesse ainsi que la distribution massique des réactifs et la production de l'eau côté anodique.

### II.1. Comportement Dynamique

Le comportement dynamique est étudié en montrant la distribution spatiale de pression pour un gradient de pression nul  $\Delta P=0$  bar. Les pressions d'injection des réactifs à l'entrée des canaux

sont égales, dont la valeur est  $P_{H_2}=P_{O_2}=2\text{bar}$ . Une répartition spatiale similaire et une symétrie remarquable du champ de pression dans toutes les parties de la structure PEN-SOFC, dont les valeurs maximales de pression se situent à l'entrée des canaux d'injection des réactif, puis sa valeur décroît d'une façon minime jusqu'à l'électrolyte. Notant ici que l'existence de variation entre les pressions d'injection implique un gradient de pression et une inhomogénéité du champ de pression. (Fig. IV.3)

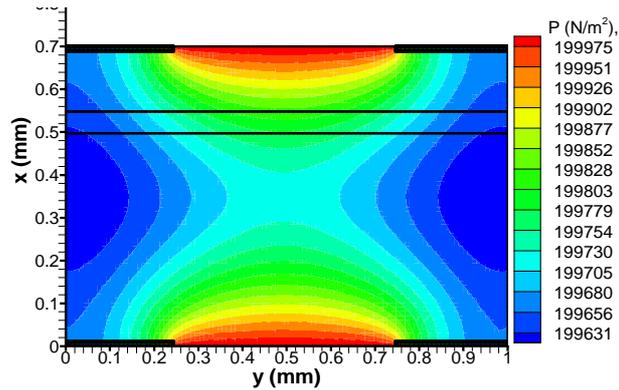


Figure. IV.3: Champ de pression pour  $\Delta P=0$  (bar)

## II.2. Comportement thermique

Les résultats régissant le comportement thermique nous permettent de représenter la distribution bidimensionnelle de la température, en prenant en considération l'effet de transfert radiatif sur le champ de température et les paramètres opérationnels de la cellule SOFC. Les résultats sont donnés sous forme des champs et des profils de température, montrant et quantifiant l'effet de transfert radiatif. Les résultats sont obtenus dans le plan parallèle à l'écoulement des réactifs, en tenant compte de l'effet de la source ohmique qui est la source de chaleur dominante responsable de dégagement de chaleur au sein de la structure PEN-SOFC et on a négligé l'effet de toute autre source de chaleur tels que: la source de concentration, la source d'activation et la source chimique. La distribution de la chaleur est étudiée en fonction de plusieurs paramètres tels que les conditions de fonctionnement de température, la densité du courant et les paramètres géométriques, où on a montré son effet sur le champ de température en tenant compte de l'effet du transfert radiatif. Les résultats principaux sont donnés pour deux configurations géométriques principales de la cellule SOFC planaire ; la première configuration c'est la configuration anode supportée qui représente la configuration la plus utilisée et la mieux adaptée à cause de l'épaisseur réduit d'électrolyte et la haute conductivité électrique, la deuxième configuration c'est la configuration

électrolyte supportée, elle est caractérisée par une haute conductivité ionique mais aussi l'augmentation d'épaisseur d'électrolyte provoque une dissipation très importante d'énergie causée par l'effet joule ou autrement la perte ohmique.

### II.2.1. Effet de Température de Fonctionnement

L'évolution spatiale du champ de température sous l'effet de la température de fonctionnement est représentée dans les figures ci-dessous. Les résultats sont donnés dans le plan perpendiculaire à l'écoulement des réactifs et sous une densité de courant de  $15000\text{A/m}^2$ , pour deux configurations géométriques de la structure PEN-SOFC: la première configuration c'est l'anode supportée PEN-SOFC-AS et la deuxième c'est la configuration électrolyte supporté PEN-SOFC-ES, la température de fonctionnement varie et prend les valeurs suivantes: pour les températures intermédiaires: 873K, 973K et pour les hautes températures: 1073K, 1173K, 1273K, où intervient l'effet de rayonnement thermique. Les champs de température sont donnés avec et sans l'effet de transfert radiatif, ce qui simplifie l'analyse des résultats.

#### II.2.1.1. Configuration Anode Supporté

La configuration anode supportée de la structure PEN-SOFC-AS est la configuration notamment la plus utilisée, dans laquelle l'épaisseur de l'anode est le plus important par rapport aux autres composantes. Cette configuration a l'avantage qu'elle nécessite un électrolyte très mince et qu'elle à une haute conductivité électrique et donc une meilleure densité de puissance. Les épaisseurs de la structure PEN-SOFC-AS utilisés sont respectivement:  $500\mu\text{m}$  pour l'anode,  $50\mu\text{m}$  pour l'électrolyte et  $150\mu\text{m}$  pour la cathode, dont la longueur de la structure est de 1mm. Pour les températures intermédiaires de 873K, 973K et en absence des effets thermo radiatifs, la présence de la réaction électrochimique amène à une forte diffusion de champs de température, les températures maximales situées dans l'électrolyte et le dépasse vers la cathode dont les valeurs sont de l'ordre de 876.52K et de 974.14K respectivement. L'augmentation de la température est due à la présence de la source ohmique causée par le passage de courant électrique à travers les électrodes. La présence des effets radiatifs augmente considérablement la diffusion thermique ce qui réduit la température maximale jusqu'à 876.09K et 973.87K respectivement, qui reste toujours située dans l'électrolyte de la structure PEN-SOFC. (Figure. IV.4, 5, 6, 7)

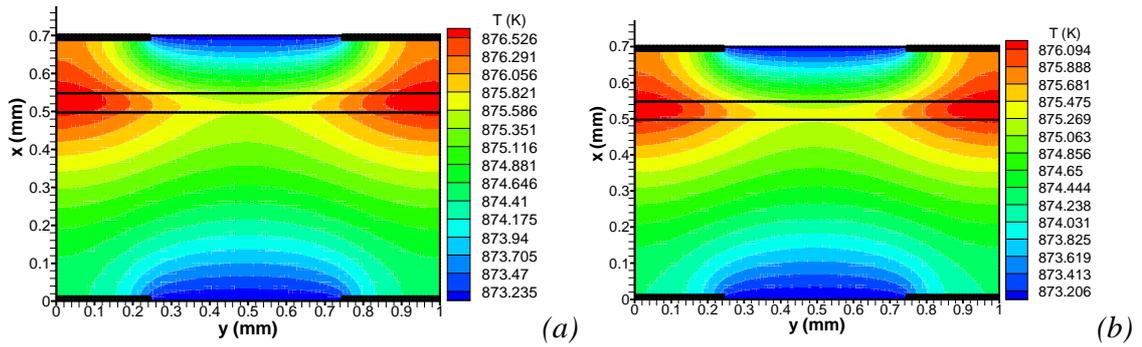


Figure. IV.4: Champs de température pour PEN-SOFC-AS  $T = 873K$

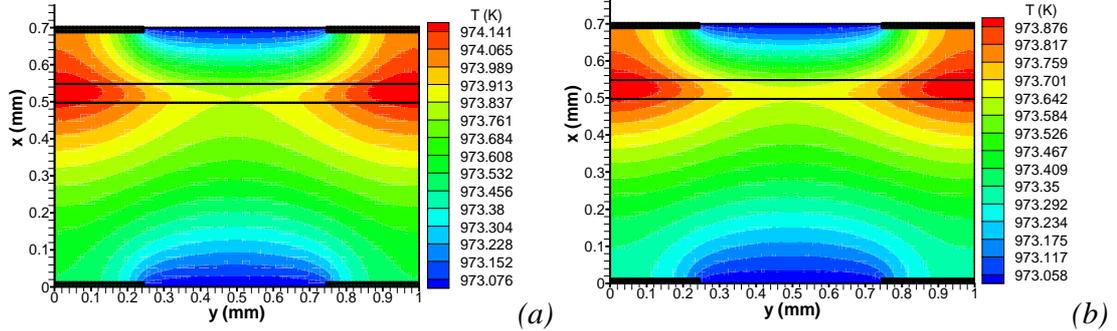


Figure. IV.5: Champs de température pour PEN-SOFC-AS  $T = 973K$

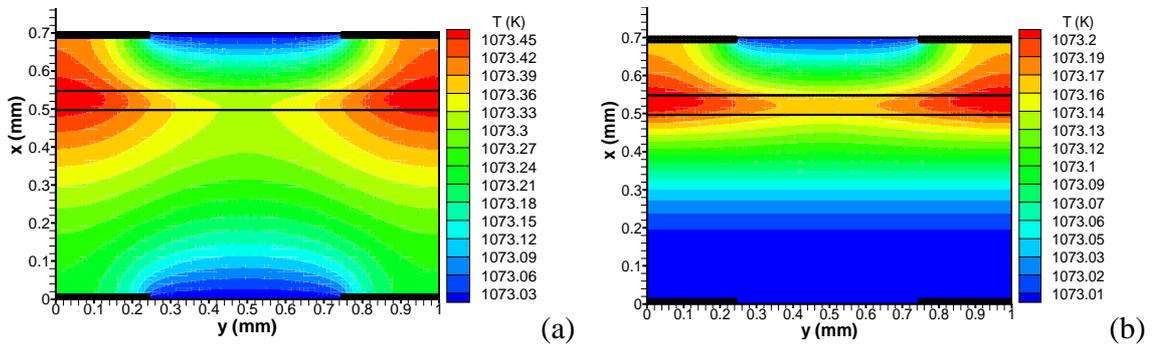


Figure. IV.6: Champs de température pour PEN-SOFC-AS  $T = 1073K$

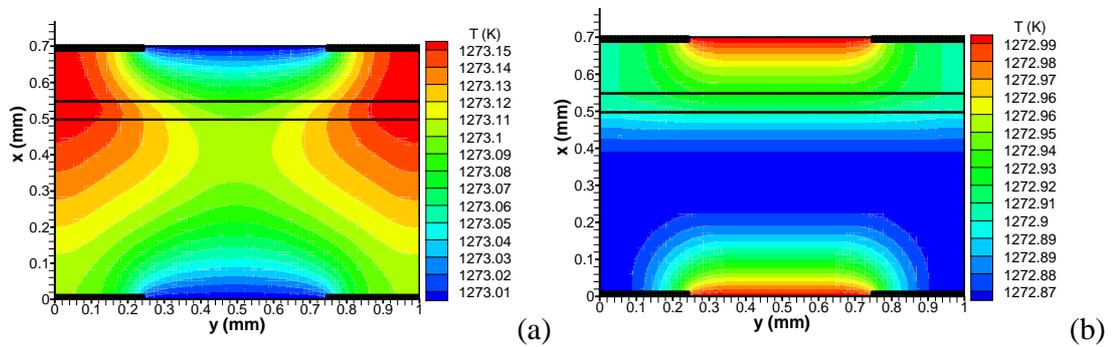


Figure. IV.7: Champs de température pour PEN-SOFC-AS  $T = 1273K$   
 (a) sans radiation (b) avec radiation

Pour les hautes températures de fonctionnement, notamment pour: 1073K, 1173K et 1273K dans le plan parallèle à l'écoulement et en absence d'effet de transfert radiatif, la présence de la réaction électrochimique sous une densité de courant de  $15000\text{A/m}^2$  amène à une forte diffusion de champs de température qui s'effectue loin des canaux. Les températures maximales sont de l'ordre de 1073.45K, 1173.21K situées à l'électrolyte et le dépasse vers la cathode de la structure PEN-SOFC, aussi elle est de 1273.23K située à l'électrolyte et le dépasse vers les électrodes.

Pour les températures 1073K, 1173K, 1273K, une faible augmentation de température maximale causée par la source ohmique peut être expliquée par l'effet d'agitation thermique et l'augmentation de la conductivité électrique due à la haute température de fonctionnement qui conduit à une faible dissipation d'énergie par l'effet joule et les pertes ohmiques. Pour la température de 1073K, l'effet des échanges radiatifs augmente considérablement la diffusion thermique à travers les électrodes et réduit la température maximale jusqu'à 1073.2K. Pour la température de 1173K l'effet des échanges radiatifs augmente la diffusion thermique vers les interfaces et réduit la température maximale jusqu'à 1172.99K, cette température est toujours située à l'électrolyte et les températures des canaux restent constantes dont la valeur est de 1173K. Pour la température de 1273K, l'effet des échanges radiatifs réduit la diffusion thermique et amène à une température maximale de l'ordre de 1272.99K située aux canaux.

Tableau. IV. 1: Effet de température de fonctionnement

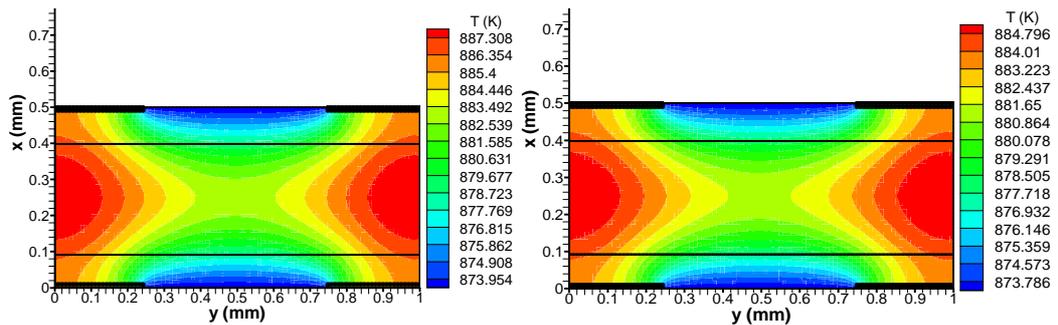
<b><i>T (K)</i></b>	<b><i>Configuration Anode Supporté</i></b>		<b><math>\Delta T_{MAX}</math> (K)</b>
	<b><i>Sans radiation</i></b>	<b><i>Avec radiation</i></b>	<b><math>\Delta T</math> (K)</b>
<b>873</b>	3.29	2.80	0.49
<b>973</b>	1.06	0.81	0.25
<b>1073</b>	0.42	0.19	0.23
<b>1173</b>	0.20	0.07	0.13
<b>1273</b>	0.14	0.12	0.02

Pour les trois hautes températures, l'effet de radiation thermique sur le champ de température est clairement obtenu où la différence entre les deux températures maximales pour les deux cas avec et sans effet de rayonnement thermique est de l'ordre de 0.3K alors que on peut négliger l'effet de radiation thermique sur la température de fonctionnement. Pour les trois températures de fonctionnement 1073K, 1173K, 1273K, la différence entre les deux températures maximales

obtenues avec et sans effet de transfert radiatif est de l'ordre 0.3K. Pour une meilleure compréhension on représente le facteur  $\Delta T = T_{MAX} - T_{MIN}$  pour chaque température de fonctionnement les résultats sont donnés dans le tableau (Tab. IV.1).

**II.2.1.2. Configuration Electrolyte Supporté**

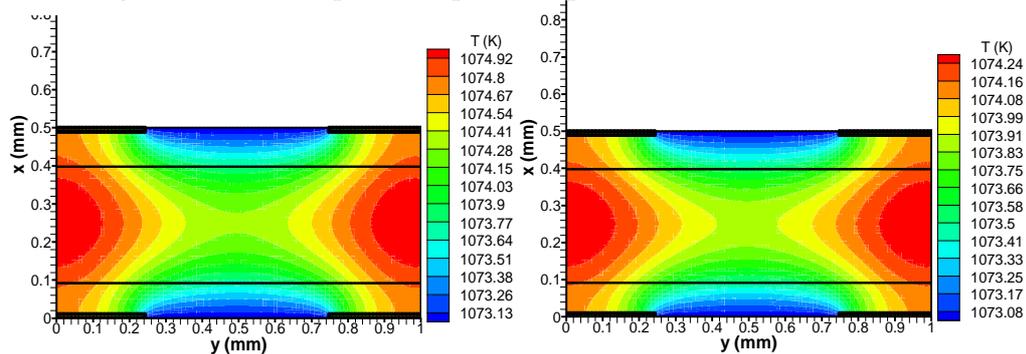
Il s'agit d'une deuxième configuration de la structure PEN-SOFC, c'est la configuration électrolyte supporté PEN-SOFC-ES, dans laquelle l'épaisseur d'électrolyte est le plus grand par rapport aux autres composants, alors une conductivité ionique très importante mais aussi une forte dissipation d'énergie par effet joule. Les épaisseurs de la structure PEN-SOFC-ES utilisée sont: 100µm pour l'anode, 300µm pour l'électrolyte et 100µm pour la cathode, avec une longueur de structure de 1mm. L'effet de température de fonctionnement sur le champ de température en présence des effets thermo radiatives est étudié pour deux types de température de fonctionnement: pour les températures intermédiaires tel que: 873K et pour les hautes températures de fonctionnement tels que 1073K et 1273K. (Figure. IV.8, 9, 10, 11)



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.8: Champs de température pour PEN-SOFC-ES T=873K



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.9: Champs de température pour PEN-SOFC-ES T=1073K

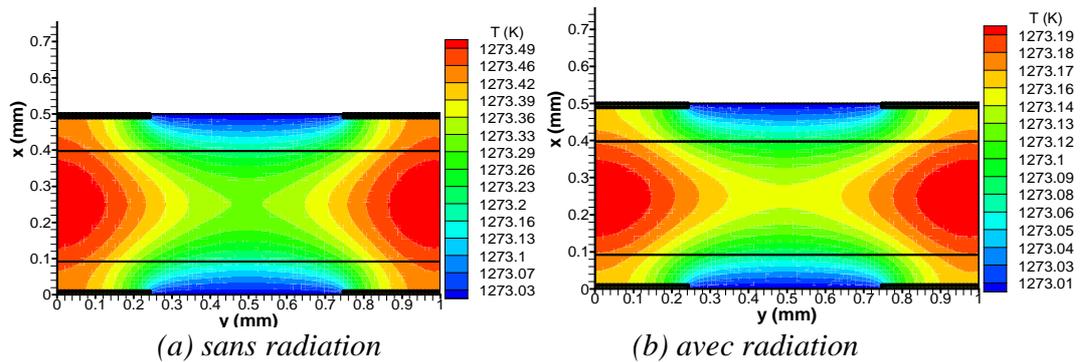


Figure. IV.10: Champs de température pour PEN-SOFC-ES  $T=1273K$

Sous une température intermédiaire de fonctionnement 873K et en absence des effets thermo radiatifs au sein de la structure PEN-SOFC de configuration électrolyte supporté, le champ de température montre une élévation de température très importante qui arrive jusqu'à 887.308K situé à l'électrolyte PEN-SOFC, cette dernière est due à la surtension ohmique et à l'augmentation d'épaisseur d'électrolyte, où la dissipation d'énergie sous forme de chaleur et par l'effet Joule est importante. La présence des effets thermo radiatifs amène à une température maximale de 884.796K, une diminution importante de température de l'ordre 3.49K est causée par le transfert radiatif. Pour les hautes températures de fonctionnement tels que: 1073K et 1273K et en absence des effets thermo radiatives, les champs de températures montrent une faible augmentation de température due à la surtension ohmique. La température maximale atteinte par la cellule est de 1074.97K et 1273.49K, respectivement, cette température est distribuée dans une grande partie dans l'électrolyte de la structure PEN-SOFC de configuration d'électrolyte supporté, Cette faible élévation de température est due au phénomène d'agitation thermique causé par les hautes températures de fonctionnement. La présence des effets thermo radiatifs réduit la température maximale jusqu'à 1074.24K et 1273.19 K pour les deux températures 1073K et 1273K, respectivement, dont la diminution de température est de l'ordre 0.68K et 0.3K est causée par le transfert radiatif. (Tableau. IV.2)

L'effet de température de fonctionnement sur le champ de température en présence et en absence des effets thermo radiatifs est étudié pour deux configurations SOFC, où les résultats sont donnés dans le plan perpendiculaire à l'écoulement des réactifs. Pour les deux configurations géométriques de la structure PEN-SOFC: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES.

Tableau. IV.2: Effet de température de fonctionnement

<i>Configuration Electrolyte Supporté <math>\Delta T_{MAX}</math> (K)</i>			
<i>T(K)</i>	<i>Sans radiation</i>	<i>Avec radiation</i>	<i><math>\Delta T</math> (K)</i>
<b>873</b>	13.35	11.01	02.34
<b>1073</b>	01.79	01.16	0.63
<b>1273</b>	0.46	0.18	0.28

L'élévation de température est due à la perte ohmique, cette augmentation de température est significative pour les températures intermédiaires de fonctionnement 873K et amène à une température maximale de 876.52K pour la structure PEN-SOFC-AS et de 887.30K pour la structure PEN-SOFC-ES. Notant ici que l'augmentation d'épaisseur d'électrolyte SOFC augmente considérablement la surface de dissipation d'énergie thermique causée par la migration des ions et le passage des espèces chimiques et électriques. Pour les hautes températures de fonctionnement, l'élévation de température sous l'effet Joule à moins d'effet où la température maximale atteinte sous une température de 1273K est de 1273.49K pour la structure PEN-SOFC-ES et de 1273.15K pour la structure PEN-SOFC-AS. Pour les hautes températures de fonctionnement l'effet d'agitation thermique réduit les pertes d'énergie causées par la migration des ions à travers l'électrolyte et le passage des électrons à travers les électrodes.

Pour les températures intermédiaires de fonctionnement la présence des effets thermo radiatifs, n'a pas un effet significatif sur les champs de température et la distribution spatiale de température dans les différentes couches de la structure PEN-SOFC, où on a obtenu des champs de température similaires pour les deux cas si en négligeant l'effet de transfert radiatif et si on considère son effet. Concernant l'effet de transfert radiatif sur la température globale de la structure PEN-SOFC, la présence de phénomènes thermo radiatifs conduit à une minimisation de température, cette diminution est importante dans le cas d'une PEN-SOFC-ES que dans le cas d'une PEN-SOFC-AS. Pour les hautes températures de fonctionnement l'effet de transfert radiatif sur le champ de température est très évident, une distribution spatiale de température complètement différente est obtenue dans le cas où on prend l'effet de rayonnement thermique en considération. Cette variation de distribution de température est clairement obtenue dans le cas d'une structure PEN-SOFC-AS que pour la structure PEN-SOFC-ES.

Tableau. IV.3: Effet de température de fonctionnement pour les deux configurations du PEN-SOFC: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES

$\Delta T_{MAX} (K)$						
$T(K)$	PEN-SOFC-AS			PEN-SOFC-ES		
	Sans radiation	Avec radiation	$\Delta T (K)$	Sans radiation	Avec radiation	$\Delta T (K)$
<b>873</b>	3.29	2.80	0.49	13.35	11.01	02.34
<b>1173</b>	0.20	0.07	0.13	01.79	01.16	0.63
<b>1273</b>	0.14	0.12	0.02	0.46	0.18	0.28

L'effet de transfert de chaleur par rayonnement sur la température globale de la cellule est étudié pour les deux configurations géométriques: PEN-SOFC -AS et PEN-SOFC-ES, une faible diminution de température est obtenue pour les deux géométries PEN-SOFC, sauf que cette diminution est plus grande dans le cas d'une PEN-SOFC-ES que d'une PEN-SOFC-AS, de tel sorte qu'on peut négliger l'effet de transfert radiatif sur la température globale de la cellule. (Tableau. IV.3)

### II.2.2. Effet de densité du courant

L'effet de densité du courant sur le champ de température est très net à cause de la proportionnalité entre l'augmentation de la densité du courant et les différentes sources de chaleur, ainsi que la distribution de la température. On représente dans ce qui va suivre l'effet de densité de courant sur le champ de température en tenant compte de l'effet de transfert de chaleur par rayonnement. Les résultats sont obtenus pour deux configurations géométriques de la structure PEN-SOFC: la première configuration c'est l'anode supporté PEN-SOFC-AS et la deuxième c'est la configuration électrolyte supporté PEN-SOFC-ES, sous différentes températures de fonctionnement: 873K, 1000K et 1273K. On fait varier à chaque fois la valeur de densité du courant  $I$  ( $A/m^2$ ), en considérant les trois valeurs de densité du courant, notamment pour:  $I=10000$  ( $A/m^2$ ),  $I=15000$  ( $A/m^2$ ) et  $I=20000$  ( $A/m^2$ ).

#### II.2.2.1. Configuration anode Supporté

##### ❖ T =873K

En absence d'effet de transfert radiatif et pour une température de 873K, l'augmentation de la densité du courant correspond à une forte diffusion thermique et une augmentation de la température due à la source ohmique, la température maximale est de l'ordre de 874.64K pour  $I=10000A/m^2$ , de 876.52K pour  $I=15000A/m^2$  et de 879.00K pour  $I=20000A/m^2$ . Dans tous les cas la température maximale est située à l'électrolyte et le dépasse vers la cathode. Notant ici que l'augmentation de température est due à la source ohmique qui dépend principalement à la densité du courant et la conductivité électrique. En général la présence d'effet de radiation thermique augmente la diffusion thermique en augmentant la densité du courant pour  $I=15000A/m^2$  et  $I=20000A/m^2$ , il conduit à une diminution de température maximale atteinte par la cellule, dont la valeur est de 876.09 K et 878.37K pour  $I=15000A/m^2$  et  $I=20000A/m^2$  respectivement. Pour une densité de courant de  $I=10000A/m^2$  la diffusion thermique a moins d'effet sur la température maximale qui est de l'ordre de 874.37 K pour  $I=10000A/m^2$ . (Figure. IV.11, 12,13).

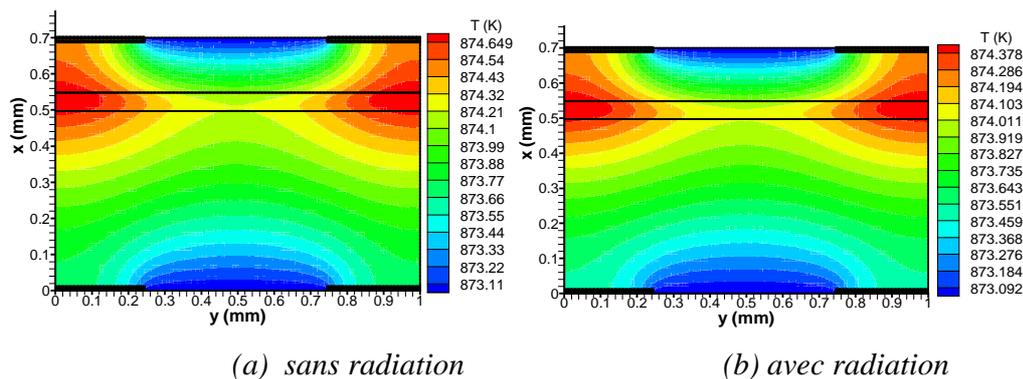


Figure. IV.11: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=873K$  et  $I=10000A/m^2$

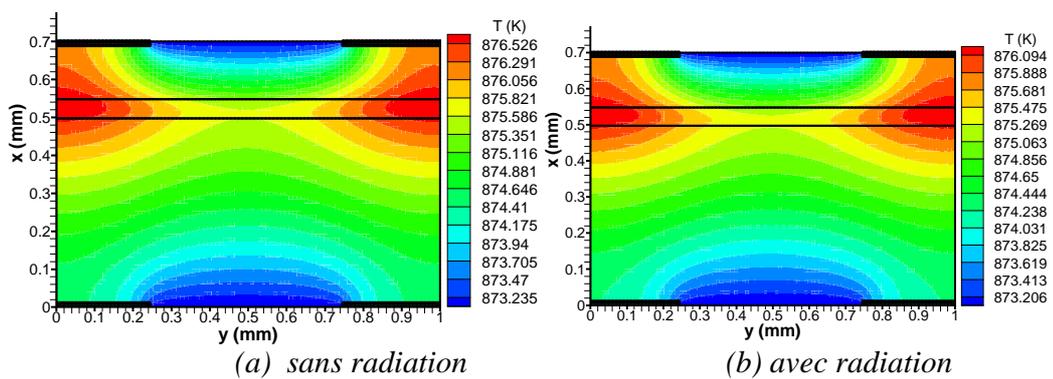
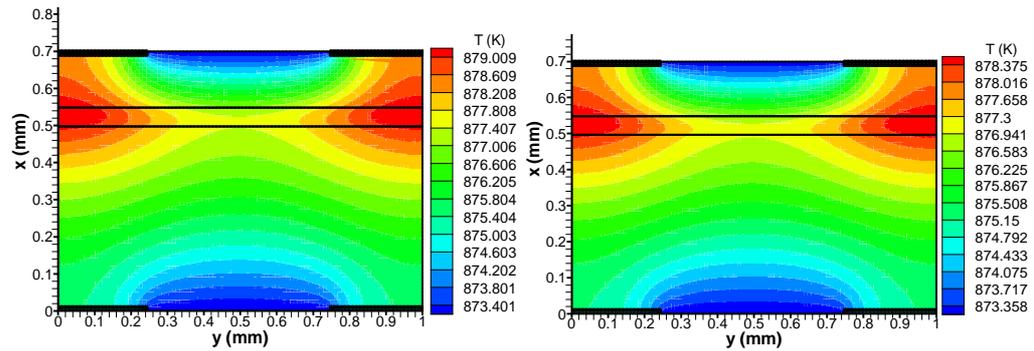


Figure. IV.12: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=873K$  et  $I=15000A/m^2$



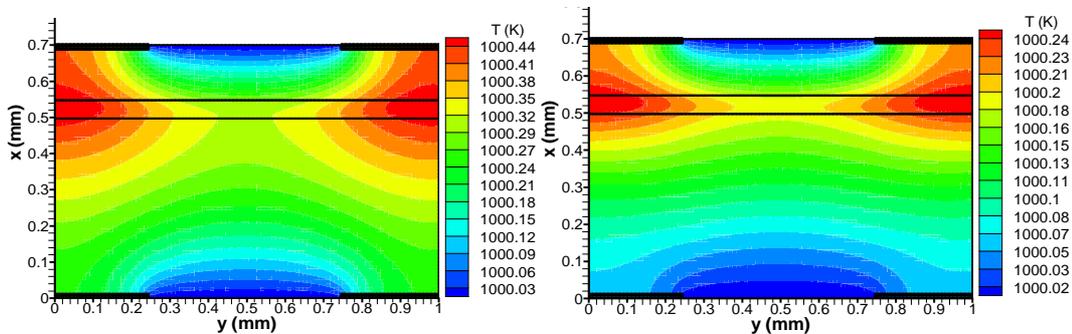
(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.13: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=873K$  et  $I=20000A/m^2$

❖ **T=1000**

Pour une température de 1000K, en absence d'effet de transfert radiatif, la diffusion de champs de température et la température maximale atteinte par la cellule dépend de la densité du courant ; dont la valeur est de 1000.40 K, 1000.88K et 1001.5 K pour  $I=10000A/m^2$ ,  $I=15000A/m^2$  et  $I=20000A/m^2$  respectivement situées à l'électrolyte de la structure PEN-SOFC. Ces valeurs de températures maximales sont très importantes par rapport aux deux premiers cas. La présence d'effet de radiation thermique augmente la diffusion thermique en augmentant la densité du courant et conduit à la diminution de la température maximale atteinte par la cellule, dont la valeur est de 1000.24 K et 1000.64K et de 1001.17K pour  $I=10000A/m^2$ ,  $I=15000A/m^2$  et  $I=20000A/m^2$  respectivement. L'augmentation de la densité du courant correspond à une augmentation de la température due à la source ohmique causée par l'effet Joule, la présence de transfert radiatif augmente la diffusion de chaleur et amène à une diminution de la température mais d'une façon modérée, notant ici que les résultats trouvés sont donnés dans le plan parallèle à l'écoulement des réactifs de la structure PEN-SOFC. (Figure IV.14, 15, 16).



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.14: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1000K$  et  $I=10000A/m^2$

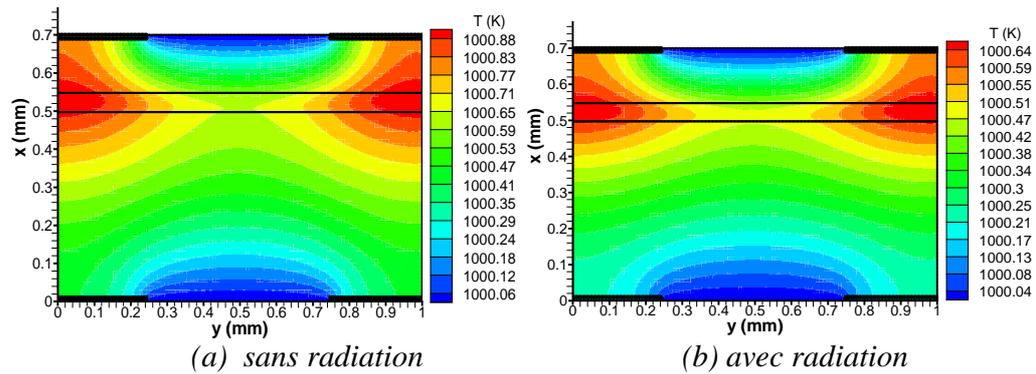


Figure. IV.15: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1000K$  et  $I=15000A/m^2$

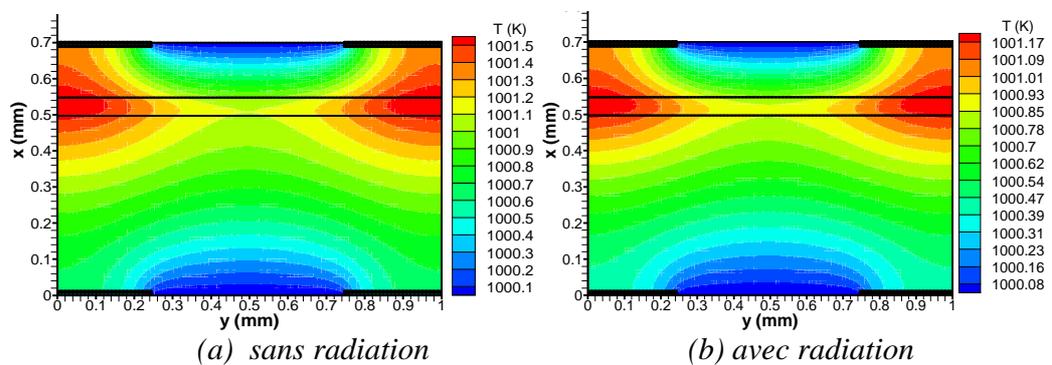


Figure. IV.16: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1000K$  et  $I=20000A/m^2$

❖  $T = 1273K$

En absence d'effet de transfert radiatif et pour une haute température de fonctionnement de l'ordre de 1273K, l'augmentation de la densité du courant correspond à une faible augmentation de température et conduit à une forte diffusion thermique, la température maximale est de l'ordre de 1273.10K pour  $I=10000A/m^2$  située aux deux côtés de la cathode et pour  $I=15000A/m^2$  la température maximale est de 1273.15K située à l'électrolyte et le dépasse vers la cathode, elle est aussi de l'ordre de 1273.22K pour  $I=20000A/m^2$ . Cette température est située à l'électrolyte et aux électrodes. La présence de transfert radiatif entraîne une faible diffusion du champ de température, l'augmentation de la densité du courant augmente l'effet de la diffusion thermique mais d'une façon modérée, la température maximale est de 1272.99K pour  $I=10000A/m^2$  et elle prend la valeur de 1272.99K pour  $I=15000A/m^2$ . cette température est située dans les deux cas à l'entrée des canaux, mais pour une densité du courant de  $I=20000A/m^2$  la température maximale est toujours de 1272.99K située dans les entrées des canaux de la structure PEN-SOFC-AS. (Figure IV.17, 18, 19)

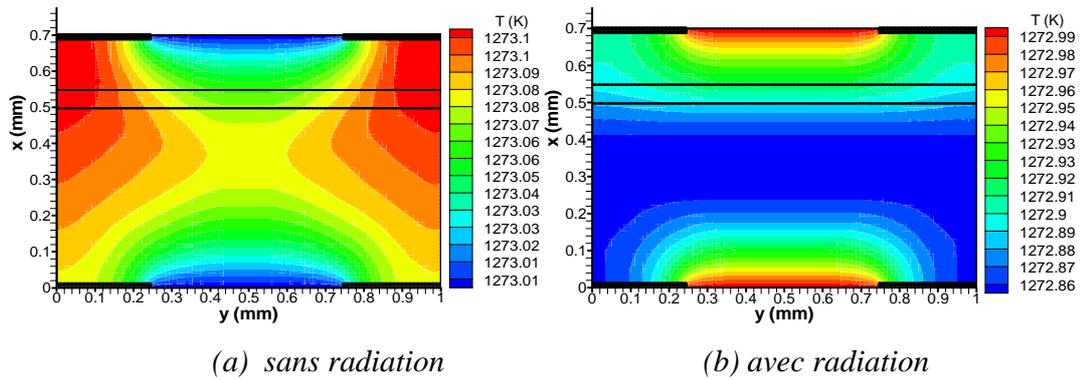


Figure. IV.17: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1273K$  et  $I=10000A/m^2$

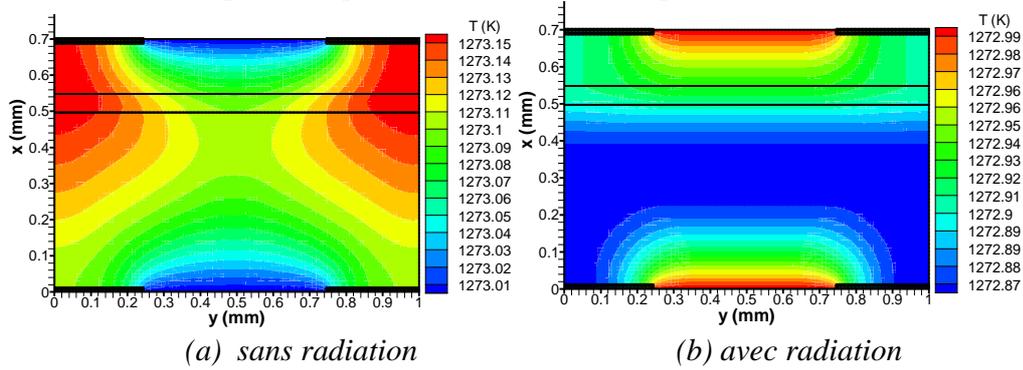


Figure. IV.18: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1273K$  et  $I=15000A/m^2$

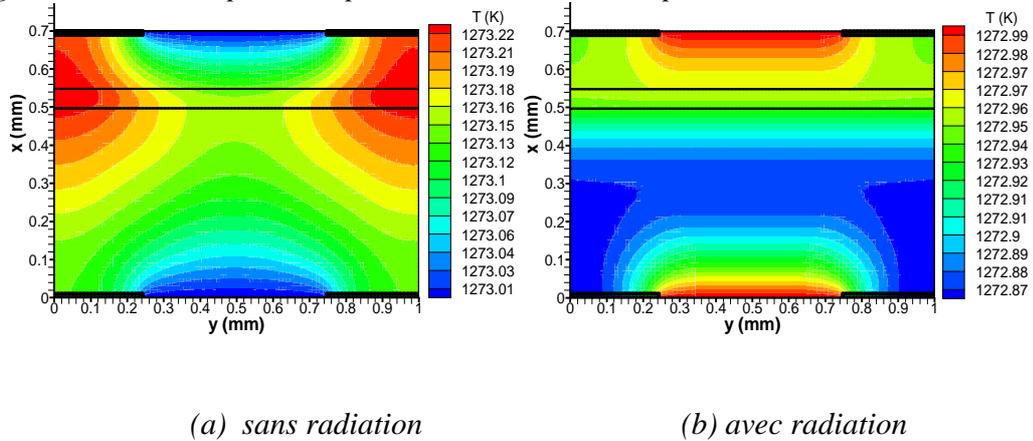


Figure. IV.19: Champs de température PEN-SOFC-AS pour  $T=1273K$  et  $I=20000A/m^2$

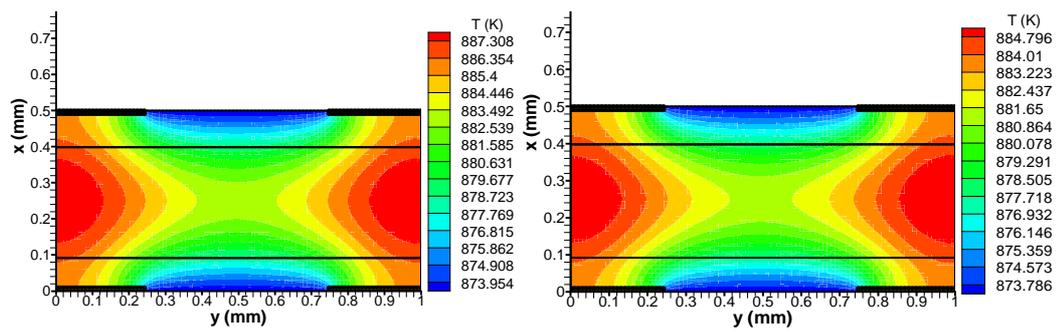
Les résultats obtenus régissant l'effet de la densité du courant sur le champ de température au sein de la structure PEN-SOFC-AS en présence et en absence de l'effet de transfert de chaleur radiatif sont illustrés dans le tableau (Tableau. IV.4).

Tableau. IV.4: Effet de densité de courant sur le champ de température pour en présence des effets de transfert radiatif pour une PEN-SOFC-AS

<b>Configuration Electrolyte Supporté PEN-SOFC-AS</b>				
<b>T (K)</b>	<b>I (A/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\Delta T = T_{MAX} - T_{MIN}</math></b>		
		<b>Sans radiation</b>	<b>avec radiation</b>	<b><math>\Delta T(K)</math></b>
<b>873</b>	<b>10000</b>	1.53	1.28	0.25
	<b>15000</b>	3.29	2.89	0.40
	<b>20000</b>	5.60	5.02	0.58
<b>1000</b>	<b>10000</b>	0.41	0.22	0.19
	<b>15000</b>	0.82	0.60	0.22
	<b>20000</b>	1.4	1.09	0.31
<b>1273</b>	<b>10000</b>	0.09	0.13	-0.04
	<b>15000</b>	0.14	0.12	0.02
	<b>20000</b>	0.21	0.12	0.09

II.2.2.2. Configuration Electrolyte Supporté

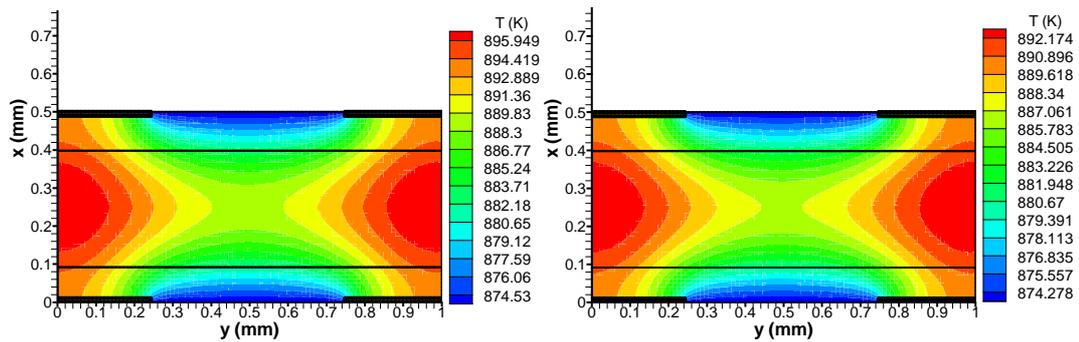
❖ T=873K



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.20: Champs de température PEN-SOFC-ES pour T=873K et I=15000A/m<sup>2</sup>

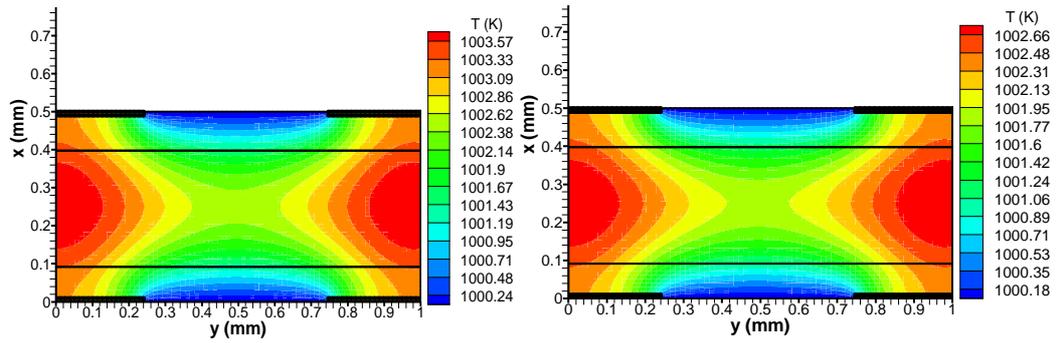


(a) sans radiation (b) avec radiation  
 Figure. IV.21: Champs de température PEN-SOFC-ES pour  $T=873K$  et  $I=20000A/m^2$

Pour une configuration PEN-SOFC-ES sous une température de 873K et en absence de l'effet de transfert radiatif, une élévation de température très importante due à la perte ohmique ; cette élévation de température augmente considérablement avec l'augmentation de la densité du courant  $I$ . Pour une température de fonctionnement de 873K, la température maximale atteinte par la structure PEN-SOFC-ES est de 887.30K sous une densité du courant de  $15000A/m^2$  et elle est de 895.94K sous une densité du courant de  $20000A/m^2$ . La présence des effets de transfert radiatif sert à transporter la chaleur produite par la source ohmique, alors une diminution importante de la température est obtenue dans le cas où on a pris en considération l'effet de transfert radiatif, la chute de température causée par le transfert radiatif amène à des températures maximales de l'ordre de: 884.79K sous une densité du courant de  $15000A/m^2$  et 892.17K sous une densité du courant de  $20000A/m^2$ . (Figure IV.20 et 21)

#### ❖ $T=1000K$

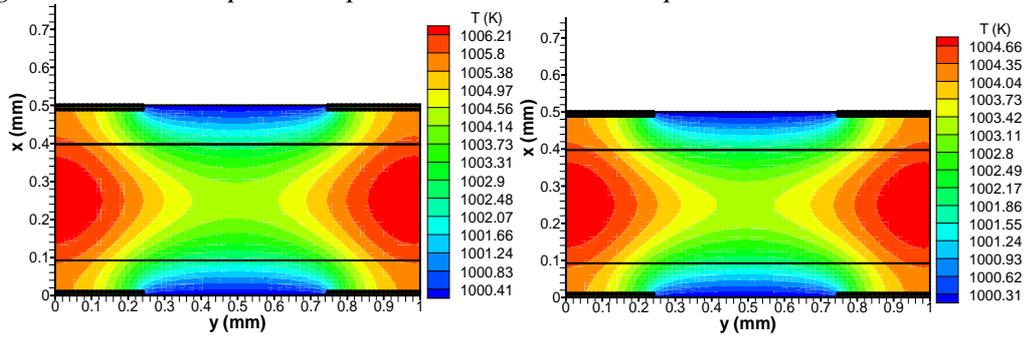
La même configuration PEN-SOFC-ES mais cette fois si sous une température de fonctionnement de 1000K. En absence d'effet de transfert radiatif, une augmentation importante de la température est due toujours à la surtension ohmique, dont la température maximale atteinte par la structure PEN-SOFC-ES est de 1003.57K sous une densité du courant de  $15000A/m^2$  et 10006.21K sous une densité du courant de  $20000A/m^2$ . La présence des effets de transfert radiatif réduit la température maximale jusqu'à 1002.66K sous une densité du courant de  $15000A/m^2$  et 1004.66K sous une densité du courant de  $20000A/m^2$ . (Figure IV.22 et 23)



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.22: Champs de température PEN-SOFC-ES pour  $T=1000K$  et  $I=15000A/m^2$

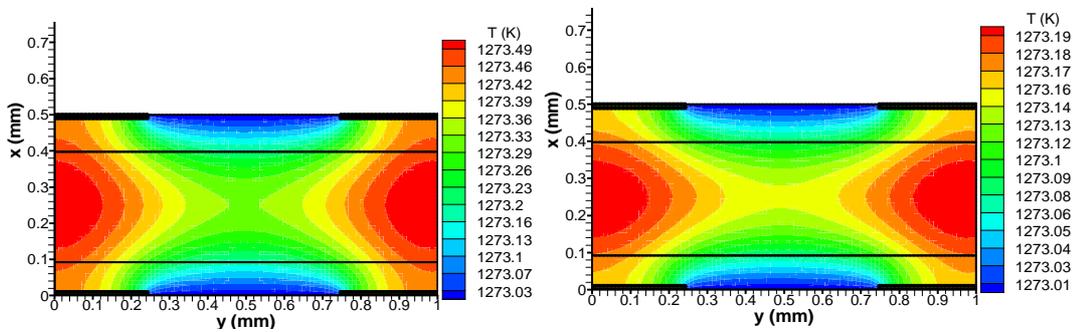


(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.23: Champs de température PEN-SOFC pour  $T=1000K$  et  $I=20000A/m^2$

❖  $T=1273K$



(a) sans radiation

(b) avec radiation

Figure. IV.24: Champs de température PEN-SOFC-ES pour  $T=1273K$  et  $I=15000A/m^2$

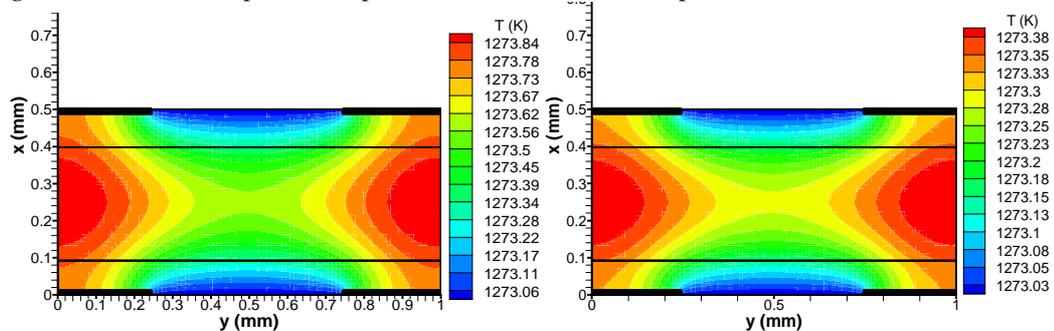


Figure. IV.25: Champs de température PEN-SOFC-ES pour  $T=1273K$  et  $I=20000A/m^2$

Sous l'effet d'une haute température de fonctionnement 1273K et en absence d'effet de transfert radiatif, une faible élévation de la température due à la source ohmique. L'augmentation de la densité du courant conduit toujours à l'augmentation de la température maximale atteinte par la structure PEN-SOFC-ES, pour  $I=15000\text{A/m}^2$  la température maximale est de 1273.49K, pour  $I=20000\text{A/m}^2$  la température maximale est de 1273.84K. La présence des effets de transfert radiatif réduit la température d'une façon modérée jusqu'à 1273.19K pour  $I=15000\text{A/m}^2$  et 1273.38K pour  $20000\text{A/m}^2$ . (Figure IV.24 et 25)

Tableau. IV.5: Effet de densité du courant sur le champ de température en présence des effets de transfert radiatif pour une PEN-SOFC-ES

Configuration Electrolyte Supporté PEN-SOFC-ES				
T (K)	I (A/m <sup>2</sup> )	$\Delta T = T_{MAX} - T_{MIN}$		
		Sans radiation	avec radiation	$\Delta T(K)$
873	15000	13.36	11.01	2.35
	20000	21.41	17.90	3.51
1000	15000	3.33	2.48	0.85
	20000	5.80	4.35	1.45
1273	15000	0.46	0.18	0.28
	20000	0.78	0.35	0.43

L'effet de la densité du courant sur le champ de température est illustré dans le *Tableau IV.5*. L'augmentation de la densité du courant amène à une élévation de température due à la source ohmique, où la dissipation d'énergie intervient sous forme de chaleur, cette dissipation d'énergie thermique causée d'une part par le passage des électrons à travers les électrodes, ainsi que la migration des ions d' $O^2$  à travers l'électrolyte, et d'autre part par la résistance thermique causée par le contact entre les électrodes et l'électrolyte du structure PEN-SOFC.

L'effet de transfert de chaleur par rayonnement sur le champ de température et sur la température globale, est très significatif pour des configurations géométriques PEN-SOFC à électrolyte épais et pour des densités de courants élevées. Pour les températures intermédiaires 873 K-973K l'effet de transfert radiatif intervient seulement sur la température globale, mais non pas sur les champs de température. Par contre pour les hautes températures 1000-1273K ; l'effet de

rayonnement thermique intervient beaucoup sur le champ de température et la distribution spatiale des températures de la structure PEN-SOFC, mais son effet sur la température globale reste toujours modéré ce qui conduit à la négligence de l'effet du rayonnement thermique sur la température globale du PEN-SOFC sauf pour des structures PEN-SOFC à électrolyte supporté ou pour des structures PEN-SOFC fonctionnant sous une densité de courant élevée.

Tableau. IV.6: Effet de densité du courant pour les deux configurations du PEN-SOFC: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES

$\Delta T(K) = \Delta T(\text{sans radiation}) - \Delta T(\text{avec radiation})$			
$T (K)$	$I (A/m^2)$	<i>PEN-SOFC-ES</i>	<i>PEN-SOFC-ES</i>
<b>873</b>	15000	0.40	2.35
	20000	0.58	3.51
<b>1000</b>	15000	0.22	0.85
	20000	0.31	1.45
<b>1273</b>	15000	0.02	0.28
	20000	0.09	0.43

### II.3. Comportement Massique

Le comportement massique de la structure PEN-SOFC est étudié en représentant les champs et les profils de concentration des espèces chimiques: les concentrations d' $H_2$  et d' $H_2O$  coté anodique ainsi que la concentration d' $O_2$  coté cathodique. Les champs de concentrations sont représentés sous l'effet d'un seul paramètre qui influence sur la distribution des réactifs et la production de la vapeur d'eau, c'est bien sous l'effet de la densité du courant et pour deux configurations géométriques: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES respectivement.

#### II.3.1. Concentration de la Vapeur d'Eau

Pour les deux configurations géométriques: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES et en absence de réaction électrochimique ( $I=0A/m^2$ ) la diffusion d'eau apparaît dans les canaux. Une fois la réaction électrochimique existe ( $I=10000A/m^2$ ) la production de l'eau à l'état de vapeur se fait à l'interface anode-électrolyte, dont l'augmentation de la densité du courant conduit à l'augmentation de la concentration de la vapeur d'eau. (Figure IV.26,27,28)

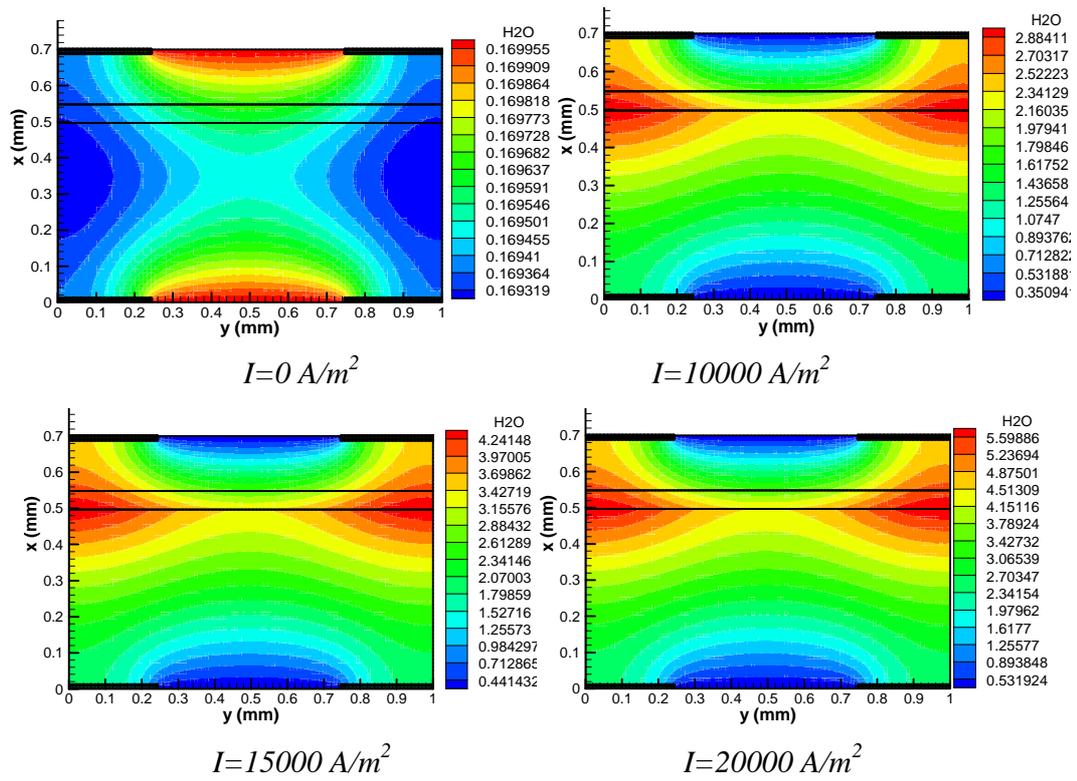


Figure IV.26: Champs de concentration d'H<sub>2</sub>O pour PEN-SOFC-AS

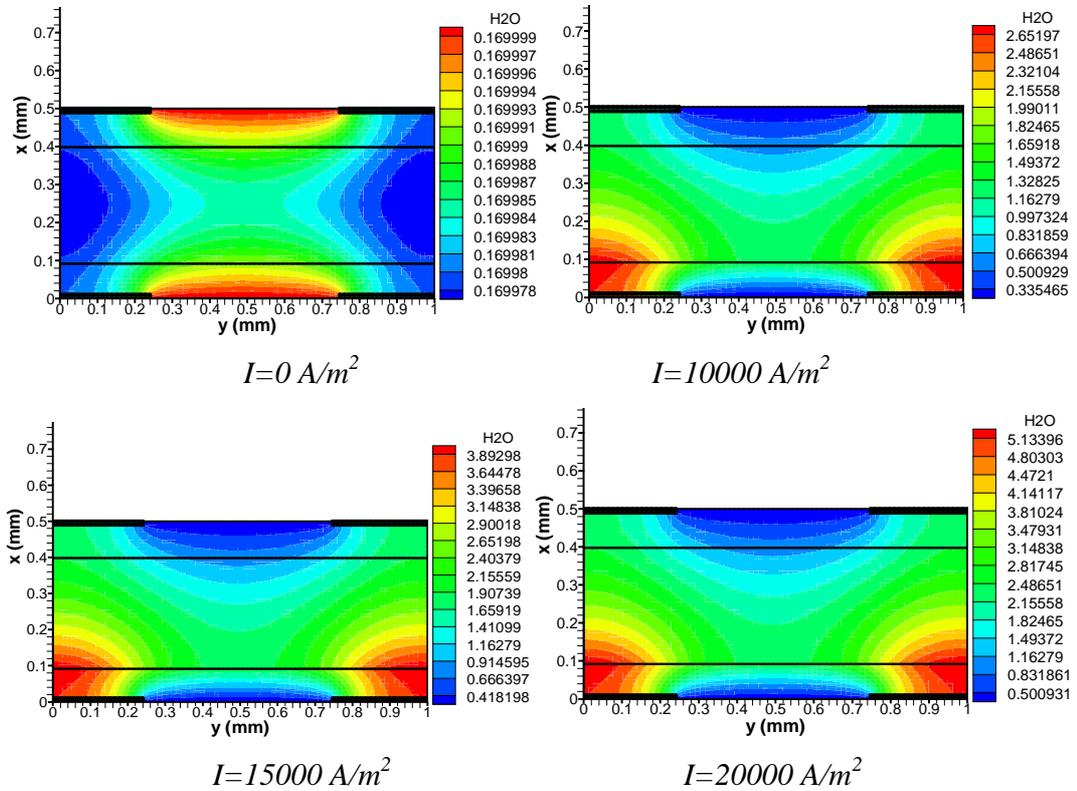
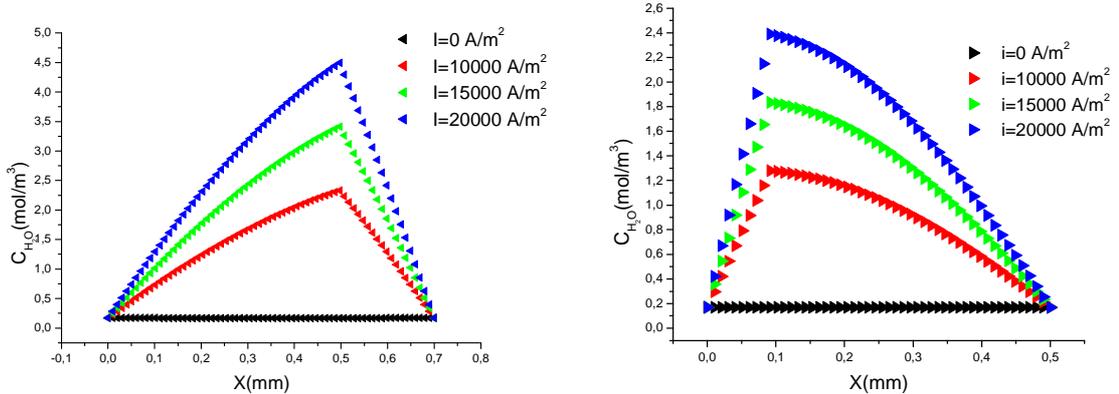


Figure. IV.27: Champs de concentration d'H<sub>2</sub>O pour PEN-SOFC-ES



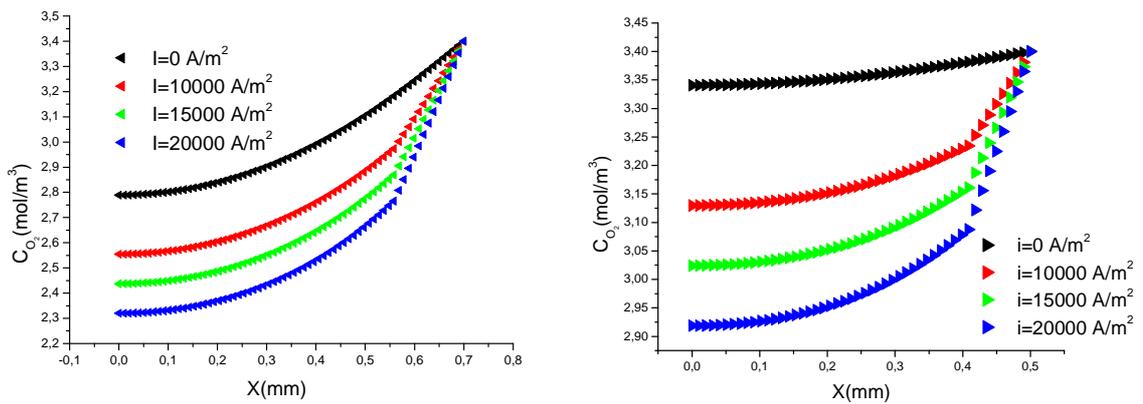
(a) PEN-SOFC-AS

(b) PEN-SOFC-ES

Figure. IV.28: Profile de concentration d' $H_2O$

### II.3.2. Concentration d'oxygène

L'effet de la densité du courant sur la concentration d' $O_2$  est étudié pour deux configurations géométriques: PEN-SOFC-AS et PEN-SOFC-ES respectivement. Une proportionnalité inverse est obtenue, dans laquelle l'augmentation de la densité du courant amène à une diminution de la concentration d'oxygène. Les champs de concentration d' $O_2$  obtenus pour une structure PEN-SOFC-ES sont complètement différents à celles obtenus pour une structure PEN-SOFC-AS. Ainsi que les valeurs des concentrations d' $O_2$  décroissent de  $3.36 mol/m^3$  à  $0 A/m^2$  jusqu'à  $3.33 mol/m^3$  à  $20000 A/m^2$  pour une structure PEN-SOFC-AS et, de  $3.39 mol/m^3$  à  $0 A/m^2$  jusqu'à  $3.35 mol/m^3$  à  $20000 A/m^2$  pour une structure PEN-SOFC-ES. (Figure IV.29,30,31)



(a) PEN-SOFC-AS

(b) PEN-SOFC-ES

Figure. IV.29: Profile de concentration d' $O_2$

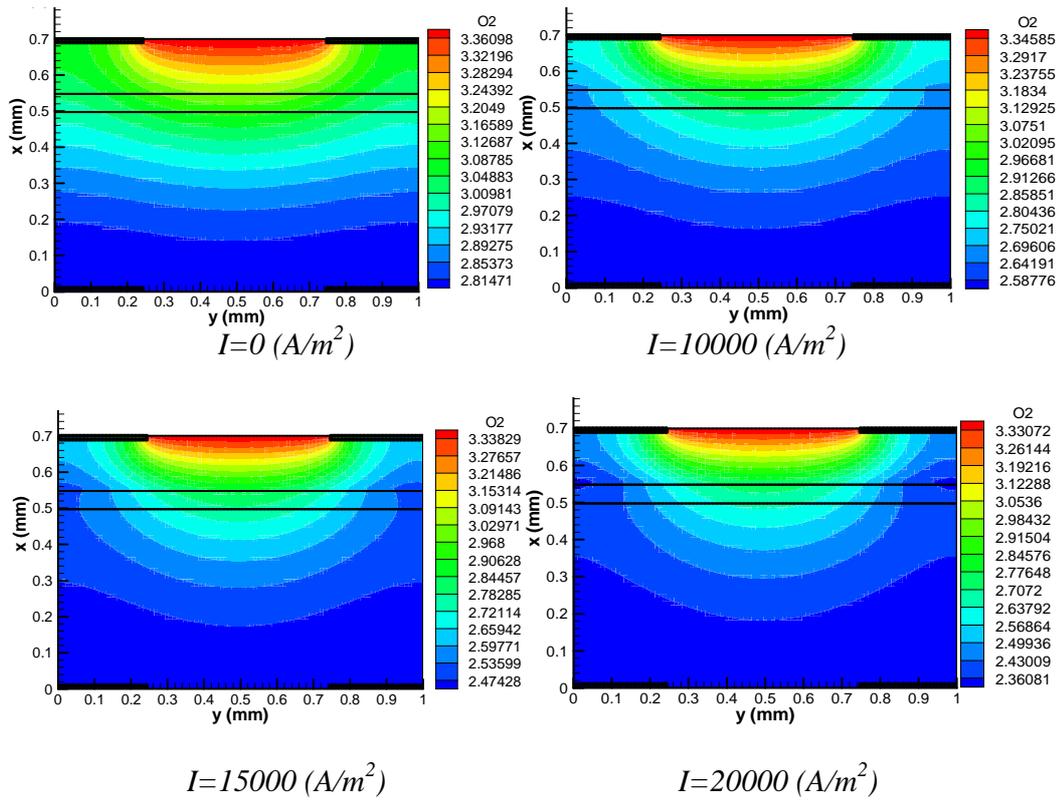


Figure IV.30: Champs de concentration d' $H_2O$  pour PEN-SOFC-AS

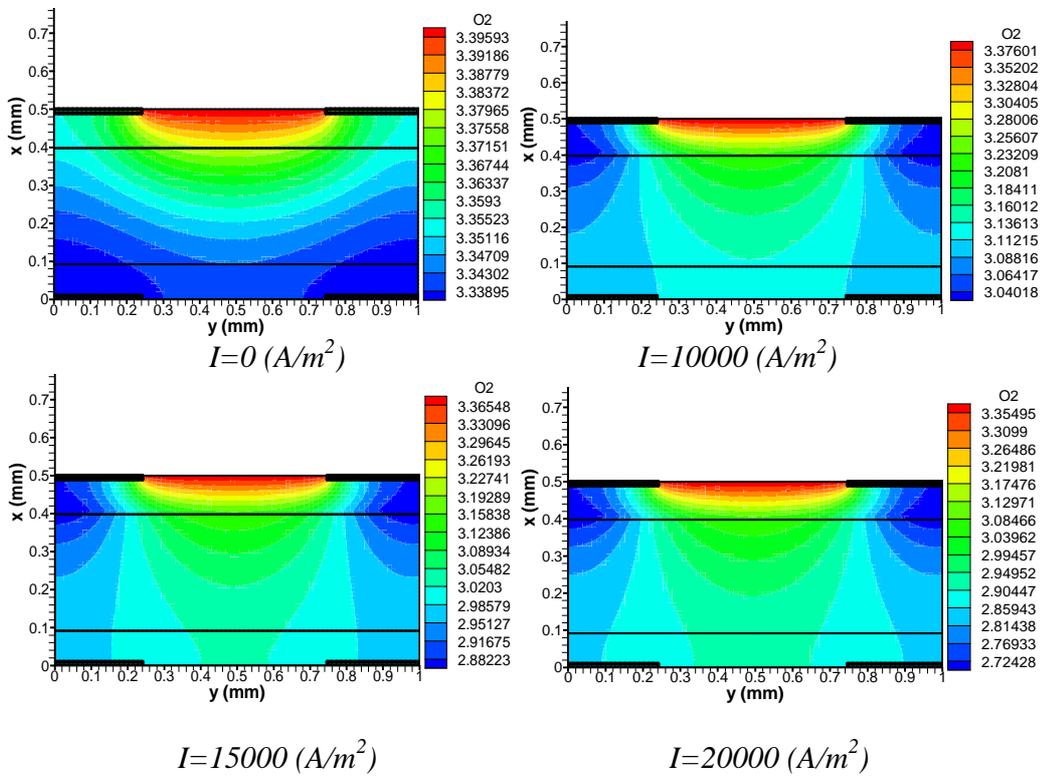
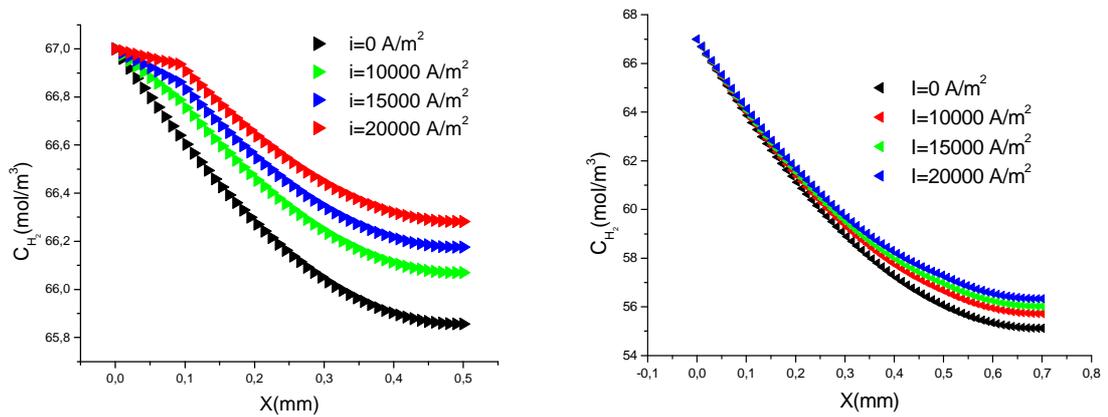


Figure IV.31: Champs de concentration d' $H_2O$  pour PEN-SOFC-ES

### II.3.3. Concentration d'hydrogène

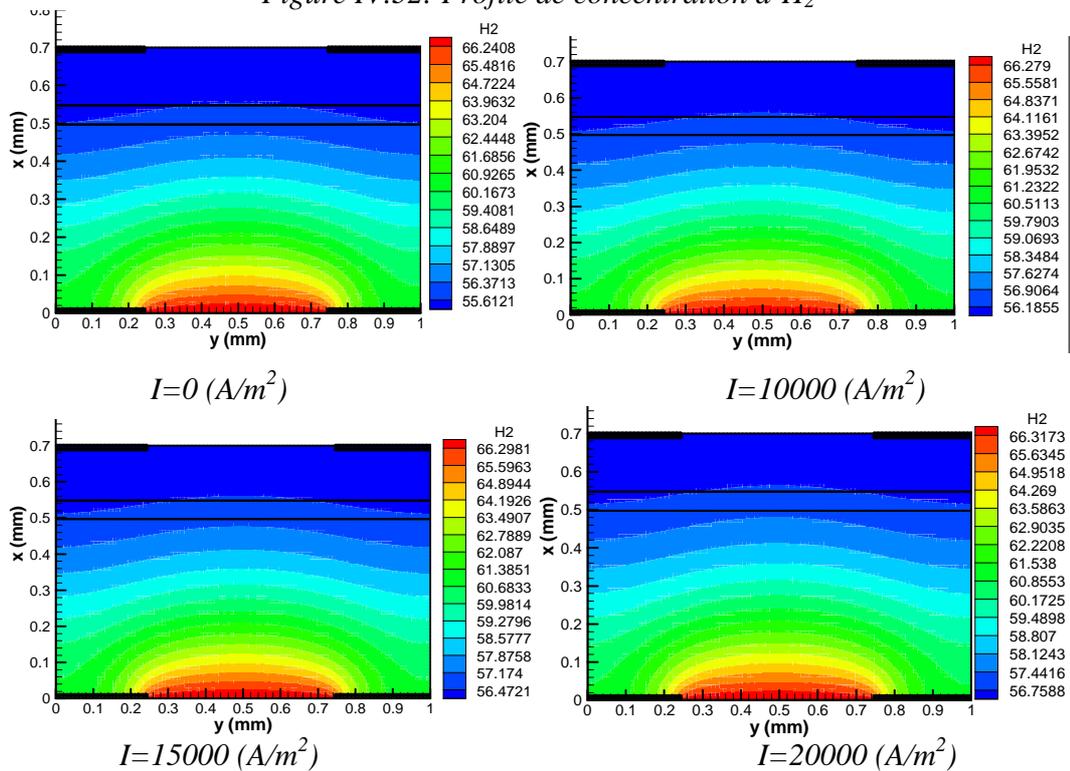
L'augmentation de la densité du courant amène à une augmentation de la concentration d'H<sub>2</sub>. Les concentrations d'H<sub>2</sub> obtenues pour la configuration PEN-SOFC-ES sont importantes par rapport à celle obtenu la configuration géométrique PEN-SOFC-AS. (Figure IV.32,33,34)



(a) PEN-SOFC-AS

(b) PEN-SOFC-ES

Figure IV.32: Profile de concentration d'H<sub>2</sub>



$I=0 (A/m^2)$

$I=10000 (A/m^2)$

$I=15000 (A/m^2)$

$I=20000 (A/m^2)$

Figure IV.33: Champs de concentration d'H<sub>2</sub> pour PEN-SOFC-AS

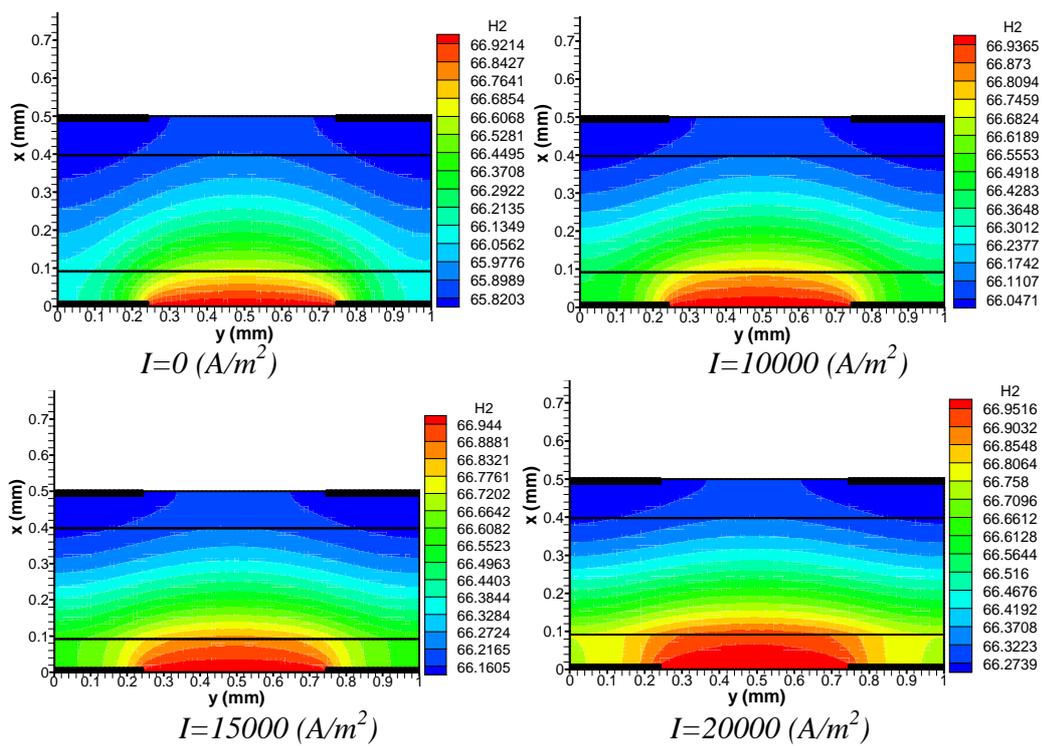


Figure IV.34: Champs de concentration d'H<sub>2</sub> pour PEN-SOFC-ES

## *Conclusion Générale*

# Conclusion Générale

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

Les piles à combustible à électrolyte solide plus connues sous l'acronyme de SOFC (Solide 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 (-anode), siège des réactions électrochimiques. Le cœur de pile est lui-même enserré par deux interconnecteurs 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; 1000-1300 K, car imposée par le régime de fonctionnement de l'électrolyte qui est, pour les piles SOFC de 1<sup>ère</sup> génération, une céramique de zircone-yttrée ( $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ ).

L'objectif du travail de recherche présent dans ce mémoire été de contribuer à l'étude d'un mode de transport d'énergie thermique dite «le rayonnement thermique». Ce mode de transport intervient dans la pile SOFC à cause de sa haute température de fonctionnement et, qui contrairement à la conduction et à la convection ne nécessite pas la présence d'un support matériel solide ou fluide. Ce transfert fait intervenir également un autre mécanisme qui est le rayonnement électromagnétique.

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'intérêts 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. Cette méconnaissance induit une absence de prise en compte de ce phénomène. La connaissance précise de ces propriétés en fonction de la longueur d'onde et de la température est actuellement le plus grand obstacle à la juste prévoir de transfert de chaleur radiatif dans électrodes et l'électrolyte des systèmes SOFC.

Les résultats montrent que l'effet de transfert de chaleur par rayonnement sur la distribution spatiale de la température est significatif pour un électrolyte épais. Cela est due à la nature semi transparent d'YSZ qui permet le transport des ondes électromagnétiques à travers

l'électrolyte SOFC et entre les surfaces électrolyte-électrode. Par contre la nature opaque des électrodes SOFC amène à négliger l'effet de rayonnement thermique dans les électrodes.

Pour les températures intermédiaires de fonctionnement 773-973K, la présence des sources de chaleur; dans ce cas la source dominante est celle 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. Dans ce cas l'effet de transfert radiatif sur la température globale de la cellule est très évident. Pour les hautes températures de fonctionnement; 1073-1273K, l'effet de l'agitation thermique réduit considérablement l'élévation de température due à la source ohmique. Dans ce cas, l'effet de rayonnement thermique intervient fortement sur le champ de température et la distribution spatiale de température, mais son effet sur la température globale de la cellule peuvent être négligé.

L'effet des paramètres géométrique est clairement obtenu, dont les effets thermo radiatifs sont significatif pour une configuration géométrique à électrolyte supporté PEN-SOFC-ES que celle à anode supporté PEN-SOFC-AS. Ce la est toujours dû à la nature du milieu. La densité de courant est proportionnelle à la source ohmique est la génération volumique de chaleur due à l'effet Joule. En augmentant l'effet de la source ohmique l'effet de rayonnement thermique sur le gradient de température intervient. Tous dépend de la température de fonctionnement et de la valeur de la densité de courant.

L'analyse du transfert de chaleur par rayonnement est toujours limitée par les difficultés liées à la connaissance des propriétés thermo radiatifs correspondant aux milieux et aux matériaux constituant la cellule SOFC. Ces derniers changes typiquement avec l'indice de réfraction du milieu et montrent une variation spectrale significatif avec la longueur d'onde et une dépendance direct avec la température du milieu.

Le comportement massique de la structure PEN-SOFC est aussi étudié. Les champs de concentrations sont représentés sous l'effet d'un seul paramètre qui influence sur la distribution des réactifs et production de la vapeur d'eau; c'est bien l'effet de la densité de courant. Une proportionnalité remarquable entre l'augmentation de la densité du courant et de la diffusion des réactifs  $O_2$  et  $H_2$  où l'augmentation de la densité du courant amène à une augmentation de la concentration d' $H_2$ , d' $H_2O$  et une diminution de la concentration d' $O_2$ . L'effet de la densité de courant sur les champs de concentration est significatif pour une configuration à électrolyte supporté PEN-SOFC-ES que pour une anode supporté PEN-SOFC-AS.

# *References*

# References

---

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

- [01] 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.
- [02] P. Dokamaingam, S. Assabumrungrat, A. Soottitantawat, I. Sramala, N. Laosiripojana . Modeling of SOFC with indirect internal reforming operation: Comparison of conventional packed-bed and catalytic coated-wall internal reformer. *international journal of hydrogen energy* 34(2009)410-421.
- [03] QiushengWang, LijunLi, ChengWang,. Numerical study of thermoelectric characteristics of a planar solid oxide fuel cell with direct internal reforming of methane. *Journal of Power Sources* 186 (2009) 399–407.
- [04] Y. Mollayi Barzi, M. Ghassemi, M.H. Hamed. Numerical analysis of start-up operation Of a tubular solid oxide fuel cell. *international journal of hydrogen energy* 34 (2009)2015-2025.
- [05] 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.
- [06] A. Chaisantikulwat, C. Diaz-Goano, E.S. Meadows. Dynamic modelling and control of planar anode-supported solid oxide fuel cell. *Computers and Chemical Engineering* 32 (2008) 2365–2381.
- [07] Florian P. Nagel, Tilman J. Schildhauer, Serge M.A. Biollaz, AlexanderWokaun. Performance comparison of planar, tubular and Delta8 solid oxide fuel cells using a generalized finite volume model. *Journal of Power Sources* 184 (2008) 143–164.
- [08] 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.
- [09] Marco Sorrentino, Cesare Pianese, Yann G. Guezennec. A hierarchical modeling approach to the simulation and control of planar solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 180 (2008) 380–392.

# References

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

- [10] N. Govindarajua, W.N. Liub, X. Sunb, P. Singhb, and R.N. Singha. A modeling study on the thermomechanical behavior of glass-ceramic and selfhealing glass seals at elevated temperatures. *Journal of Power Sources* 2008.
- [11] R. Bove. *Modeling Solid Oxide Fuel Cells Methods. Procedures and Techniques*, 2008 Springer Science.
- [12] Xiao-juan Wu, Xin-jian Zhu, Guang-yi Cao, Heng-yong Tu. Dynamic modeling of SOFC based on a T-S fuzzy model. *Simulation Modelling Practice and Theory* 16 (2008) 494–504.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] J.J. Hwang, P.Y. Chen. Heat/mass transfer in porous electrodes of fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 2315–2327.
- [16] 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.
- [17] Pedro Nehter. Two-dimensional transient model of a cascaded micro-tubular solid Oxide fuel cell fed with methane. *Journal of Power Sources* 157 (2006) 325–334.
- [18] Roberto Bove, Stefano Ubertini. Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, Techniques and results. *Journal of Power Sources* 159 (2006) 543–559.
- [19] Christoph Stiller, Bjørn Thorud, Steinar Seljebø, Øistein Mathisen, Havard Karoliussen, Olav Bolland. Finite-volume modeling and hybrid-cycle performance of planar and tubular solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 141 (2005) 227–240.
- [20] David L. Damm, Andrei G. Fedorov. Radiation heat transfer in SOFC materials and components. *Journal of Power Sources* 143 (2005) 158–165.

# References

---

*Contribution à l'Etude du Transfert de Chaleur Radiatif dans une pile à combustible à oxyde solide*

- [21] Tae Won Song, Jeong Lak Sohn, Jae Hwan Kim, Tong Seop Kim, Sung Tack Roa, Kenjiro Suzuki. Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model. *Journal of Power Sources* 142 (2005) 30–42.
- [22] N. Autissier, D. Larrain, J. Van herle, D. Favrat. CFD simulation tool for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 131 (2004) 313–319.
- [23] D. Larrain, J. Van herle, F. Mare'chal, D. Favrat. Thermal modeling of a small anode supported solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources* 118 (2003) 367–374.
- [24] 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.
- [25] Jinlinang yuan, masoud rokni, bengt sundén. 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.
- [26] 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.

## Résumé

Dans ce travail, on a étudié l'effet du transfert de chaleur radiatif sur la distribution de la température de la structure PEN-SOFC. La dissipation d'énergie par effet joule est la source dominante responsable du dégagement de chaleur au sein de la configuration étudiée. Un modèle numérique bidimensionnel basé sur la méthode des volumes finis a été développé. Les méthodes dites "méthode des approximations" sont utilisées pour approcher le flux de chaleur radiatif dans chaque partie de la structure PEN-SOFC. Les paramètres étudiés sont: la température des gaz, la densité du courant et les dimensions.

## Abstract

In this work, we studied the radiate heat transfer effect on temperature distribution in the structure- PEN-SOFC SOFC PEN. The energy dissipation by Joule effect is the dominant source responsible for the heat release in the studied configuration. A two-dimensional numerical model based on the finite volume method has been developed. The methods called "approximations method" are used to approximate the radiate heat flux in each part of the structure PEN-SOFC. The parameters studied are: the gas temperature, current density and dimensions.

## المخلص

في هذه الدراسة قمنا بدراسة تأثير الانتقال الحراري بالإشعاع على التوزيع الحراري في الخلية الوقودية ذات الأكسيد الصلب. أخذنا بعين الاعتبار فعل الضياع الطاقوي الحراري بفعل جول الذي يمثل المصدر الأول و الهام المسؤول عن توليد الحرارة في هذا الجزء. لهذا الغرض قمنا بتطوير نموذج رقمي يعتمد على طريقة الحجوم المنتهية، أين تم اعتماد الطرق التقريبية لإيجاد التدفق الحراري الإشعاعي في كل جزء من البنية الصلبة للخلية الوقودية ذات الأكسيد الصلب. درسنا فعل المتغيرات الفيزيائية: درجة حرارة المتفاعلات و كثافة التيار، و كذا فعل المتغيرات الهندسية على التوزيع الحراري مع الأخذ بعين الاعتبار فعل الانتشار الحراري بالإشعاع.