

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

Mémoire de magister

En génie mécanique

Spécialité énergétique

Simulation bidimensionnelle pour la cathode d'une pile à
Combustibles PEMFC

Par

Abdelaziz OULBANI

Devant le jury :

Dr. Semmar D.	Maitre de conférence	Université de Blida	Président
Dr. Hamid A	Maitre de conférence	Université de Blida	Examineur
Dr. Khellaf A	Directeur de recherche	CDER	Examineur
Pr. Ait Messaouden N.	Professeur	Université de Blida	Rapporteur

Blida 2013

RESUME

Dans cette étude, nous avons fait la simulation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons coté cathode en utilisant un model bidimensionnel basé sur

L'Etablissement des équations de mouvement (Navier Stokes), de continuité, de conservation d'espèces, pour la couche de diffusion nous avons l'analogie avec les milieu poreux humide pour établir les équations, négliger la convection.

Nous avons étudié l'influence du paramètre géométrique rapport épaisseur sur longueur de la couche diffusion.

Il existe configuration pour laquelle la concentration en vapeur d'eau élevée, cette quantité est nécessaire pour l'hydratation de la membrane

المخلص

في هذا العمل ، قمنا بدراسة خلية وقود ذات غشاء مبادل للبروتونات جهة المصعد باستعمال نموذج ذو بعدين على أساس معادلات الحركة و الاستمرارية و حفظ العناصر بالنسبة لطبقة التوغل اخترنا المقارنة مع مجال مجوف لتأسيس المعادلات إهمال السرعة. درسنا التأثير الهندسي (سمك علي الطول) طبقة التوغل كثافة، توجد حالة تكون فيها بخار الماء اكبر، كمية لازمة لتبلبل الغشاء

REMERCIEMENTS

Nous remercions en première lieu notre dieu qui nous a donné la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance a monsieur NOUR EDDINE AIT MESSOUDANE d'avoir joué pleinement son rôle de promoteur en étant à nos cotés tout au long de l'étude de notre projet. Les conseils et les orientations nous ont guidés jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à messieurs les membres de jury d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Nous remercions aussi les membres de la bibliothèque de l'institute de mécanique de l'université SAAD DAHLAB de Blida ainsi que tous ses personnels de nous avoir accueillis chez eux et mettre à notre disposition les moyens qui ont permis la réalisation de ce travail.

TABLE DE MATIERES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
Liste des illustrations, graphiques et tableaux.....	5
INTRODUCTION	6
1. GENERALITE.....	8
1.1.Introduction.....	8
1.2. l'histoire de la pile à combustible.....	8
1.3.Premières applications.....	9
1.4. Principes de fonctionnement	10
1.5.Renouveau.....	10
1.6.Différent types de piles à combustible.....	11
1.6.1.Les piles à combustible à membrane polymère ou échangeuse de protons .PEMFC.....	11
1.6.2.Les piles à combustible Oxyde Solide SOFC	15
1.6.3.Pile à Combustible au Méthanol DFMC	18
1.6.4.Les piles à carbonate fondu MCFC.....	21
1.6.5.les piles à acide phosphorique (PAFC)	22
2. ELECTROCHIMIE APPLIQUEE AUX PILES A COMBUSTIBLES.....	24
2.1.Electrochimie et électrochimie appliqué aux piles à combustible type (PEMFC)	24
2.1.3.Travail électrique théorique.....	25
2.1.4.Cinétiques des réactions.....	26
2.1.5.Densité de courant	27
2.1.6.Equation de Butler- Volmer.....	27
2.1.7.Equation de Tafel	28
2.1.8.Polarisateur ohmique.....	29
2.1.9.Polarisation de concentration.....	30
2.1.10.Gestion thermique.....	31
3. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	32
1. L'effet des paramètres physiques.....	32
2. L'effet de la géométrie des canaux.....	35
4. MODELISATION ET ETUDE NUMERIQUE.....	44
Mode Physique.	44
Hypothèses	45
Modèle mathématique.....	45
Avec les variables sans dimension.....	45
L'équation de l'énergie.....	46
L'équation de conservation de l'espèce.....	47
Discretisation.....	48
Etape de l'algorithme simple.....	49

Conditions aux limites	50
Domaine de calcul.....	52
Condition d'entrée coté <i>AB</i>	53
Paramètres physiques et géométriques.....	54
Dont l'expression discrétisée est.....	55
On obtient un système (explicite) d'équations	56
Model pour la couche de diffusion GDL	56
Chapitre V : RESULTAT ET DESCUSION.....	64
Champ dynamique dans le canal et la couche de diffusion.	64
Profil de champ de température pour une valeur de $\varepsilon=0.2$	
Profil de champ de concentration pour l'oxygène $\varepsilon=0,2$	65
Profil concentration pour la vapeur d'eau $\varepsilon=0,2$	66
Profil de saturation $\varepsilon=0,2$	67
Profil de température adimensionnelle pour $\varepsilon=0.13$	67
Profil de champ de saturation pour $\varepsilon=0.13$	68
Champ de température pour $\varepsilon=0,08$	69
Champ de concentration de vapeur pour $\varepsilon=0,08$	70
Champ de saturation pour $\varepsilon=0,08$	70
Champ de temperature pour $\varepsilon=0.05$	71
Profil de concentration de vapeur pour $\varepsilon=0.05$	71
Profil de saturaion pour $\varepsilon=0.05$	72
CONCLUSION	73
APENDICE.....	74
REFERENCE.....	75

LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

- Figure 1.1 Christian Friedrich Schonbien
 Figure 1.2 William Robert Gove
 Figure 1.3 Austin A40
 Figure 1.4 schéma de principe d'une pile à combustible
 Figure 1.5 pile à membrane échangeuse de protons
 Figure 1.7 zone de triple contact
 Figure 1.8 gestion de l'eau
 Figure 1.9 Evacuation de la chaleur par un stock
 Figure 1.10 plaque bipolaire
 Figure 1.11 quelques exemples de configuration de canaux
 Figure 1.12 schèmes de principe d'une pile SOFC
 Figure 1.13 structure tubulaire – détails
 Figure 1.14 structure tubulaire
 Figure 1.15 les cellules élémentaires sont empilées sous forme de plaques
 Figure 1.16 cellule élémentaire
 Figure 1.17 tension en fonction de densité de courant
 Figure 1.18 pile à combustible type MCFC
 Figure 2.1 réaction à l'interface anodique
 Figure 2.1 $I=F(E)$
 Figure 2.3. différentes polarisations d'une pile à combustible
 Figure 2.3 rendement d'une pile à combustible
 Figure 4.1 champ dynamique dans le canal
 Figure 4.2 profile de champ de température, $\varepsilon=0.2$
 Figure 4.3 profile de champ concentration de l'oxygène
 Figure 4.4 profile du champ concentration pour la vapeur d'eau , $\varepsilon=0.2$
 Figure 4.5 profile de saturation $\varepsilon=0.2$
 Figure 4.6 profile de température $\varepsilon=0.13$
 Figure 4.7 profile de champ de vapeur, $\varepsilon=0.13$
 Figure 4.8 profile de champ de saturation $\varepsilon =0.13$
 Figure 4.9 profile de champ de température, $\varepsilon=0.08$
 Figure 4.10 profile de champ de concentration de vapeur=0.08
 Figure 4.11 profile de saturation, $\varepsilon=0.08$
 Figure 4.12 profile de température, $\varepsilon=0.05$
 Figure 4.13 profile de champ vapeur, $\varepsilon=0.05$
 Figure 4.14 profile de saturation, $\varepsilon=0.05$

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

- a_j^{ref} : Densité de courant volumique de référence
 C_{ref} : Concentration molaire de référence
 C_k : Concentration de l'espèce K
 D_k : Coefficient de l'espèce K
 $D_{\text{eff } k}$: Coefficient de diffusion effectif de l'espèce de diffusion k
 F : Constante de Faraday
 h_c : Hauteur du canal
 h_d : Hauteur de la couche de diffusion
 h_m : Hauteur de la membrane
 J_a : Courant volumique anodique
 J_c : courant volumique cathodique
 K_m : Perméabilité de la membrane
 K_c : Perméabilité de canal
 K_d : perméabilité de la couche de diffusion
 U : composante x de la vitesse
 V : composante y de la vitesse
 u : relatif à l'oxygène
 v : relatif à la vapeur
 k_{eff} : conductivité thermique effective
 L : longueur de la pile
 P : pression
 R : constante des gaz parfaits
 S_u : terme source de l'équation de mouvement
 S_k : terme source de l'équation de l'espèce
 T : température
 t : temps
 U : composante longitudinal de la vitesse
 V : composante transversale de la vitesse
 x : abscisse
 y : ordonné
 Pr : nombre de Prandtl

Re : nombre de Reynolds

Se : nombre de Schmidt

ε_d : porosité de la couche de diffusion

ε_c : porosité de la couche du catalyseur

ε_m : porosité de la membrane

σ_m : Conductivité électrique de la membrane

σ_c : conductivité électrique de la catalyseur

α_a : coefficient de transfert anodique

α_c : coefficient de transfert cathodique

η_a : surtension d'activation de la l'anode

η_c : surtension de l'activation de la cathode

ρ : Masse volumique

INTRODUCTION

La pile à combustible convertit l'énergie chimique en électricité, elle est essentiellement constituée de stack de cellules élémentaires relié par des connecteurs.

A l'anode arrive le combustible (l'hydrogène, le méthanol ... etc.) à la cathode le comburant (l'air, l'oxygène pure).

L'un des critère important pour classifie les piles a combustible est leurs température de fonctionnement, pour les pile de type PEMFC elle est de l'ordre 80°C , pour les SOFC (Solide Oxyd Fuel Cell) et MOFC (Molten Fuel Cell) elle varie entre 600 et 1000°C.

Les piles a combustibles constituée une vraie alternative aux problèmes d'effet de serre et autres émissions de gaz néfaste pour l'environnement.

L'hydrogène devenue une source d'énergie d'avenir car il est très abondant, on peut obtenir à partir de l'hydrocarbure des algues maritimes ...etc., il est non polluant et sa combustion produit de l'eau.

Cependant il reste quelque contraintes à surmonté pour généralisée la pile a combustible parmi ces contraintes en peut citer le problème de stockage de l'hydrogène liée a sa faible densité et les coûts élevés de certain composants (membrane, catalyseur ... etc.)

Dans notre travail on s'intéresse aux types des piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) dont l'une des caractéristiques importantes et sa température de fonctionnement de l'ordre de 80°C qui ne pose pas de problème thermique.

Un modèle numérique 2D a été étudié pour l'écoulement de gaz dans les canaux, la consommation d'oxygène le champ thermique le champ de vapeur d'eau et la saturation dans la couche de diffusion GDL (Gas Diffuser Layer).

Une fois choisi le modèle mathématique, les équations discrétisées sont résolue par différence finis.

L'effet de la géométrie sur les différents profiles a été analysé.

Des codes MATLAB ont été retenus pour les calculs

Le mémoire comprend les chapitres :

Chapitre 1 : généralités :

Présentation générale des différents types des piles à combustible et présentation du modèle physique et électrochimique d'une pile PEMFC en particulier ;

Chapitre 2 : électrochimie appliquée aux piles

Rappel de différentes lois d'électrochimie appliquées aux piles à combustibles.

Chapitre 3 : recherche bibliographique

Recherche bibliographique sur la modélisation numérique de la pile, concernant l'effet du type d'écoulement des gaz et les différentes géométries des canaux sur la performance de la pile PEMFC;

Chapitre 4 : études numériques

On expose les modèles mathématiques et leurs discrétisation et les choix de méthodes

Numériques choisies pour leurs résolutions.

Chapitre 5 : résultat et discussion

On expose les résultats (champs et profiles) avec leurs discussions, effet des paramètres géométriques

CHAPITRE 1 GENERALITES

1.1. Introduction :

Les piles à combustibles sont des systèmes qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique dont le mécanisme est différent des piles conventionnelles ou les composés chimique nécessaires à la production d'électricité sont intégrés à la pile (ou la batterie), dans les piles à combustibles ces composés sont fournis en continu, et les produits éliminés en continue.

Les produits de combustions sont essentiellement de l'eau et de la chaleur, donc pas de pollution pour l'environnement, en plus c'est une source d'énergie inépuisable comme l'oxygène, l'hydrogène est abondant et non polluent.

Il existe plusieurs types de piles à combustibles, dont les caractéristiques essentielles sont l'électrolyte et la température de fonctionnement. Par exemple, les piles à membrane échangeuse de protons PEMFC (qui fera l'objet de notre travail), AFC (Alcaline Fuel Cell) et PAFC (PHOSPHORICACID Fuel CELL) fonctionnent par des températures de 60°C à 100° C contrairement aux piles SOFC (Solide Oxyde Fuel Cell) qui fonctionnent à des températures de 600°C à 1000°C.

1.2. L'histoire de la pile à combustible :

C'est en 1830 que le suisse **Christian Schönbein** (1799-1868), alors professeur à l'université de Bâle, qui a découvert l'effet de la pile à combustible.

Quelques temps après, l'anglais **William Robert Grove** (1811-1896) a amélioré la pile à combustible. Il travaillait sur l'électrolyse lorsque lui vint l'idée que si l'on pouvait séparer l'eau en hydrogène et oxygène en en fournissant l'électricité (électrolyse) la réaction inverse devait être possible.

En 1839 il publia un article ou il mentionne la possibilité de produire un courant électrique par réaction de l'hydrogène et l'oxygène.



Figure1.1-Christian Friedrich Schonbein
(Photo originale de 1860 – source : possession familiale d'Utf bossel).



Figure1.2-William Robert Grove présentant une de ses premières piles à combustible

(Source :Woking Borough Council-Peinture murale de la piscine de Woking [Royaume-Uni] par Allan Potter)

Beaucoup de développement suivi. On peut citer F.W Oswald qui a contribué beaucoup en posant les bases théoriques des piles à combustibles.

W.H. Nernst (1864-1941) Prix Nobel pour ses travaux en thermodynamique appliqués aux cellules à combustibles.(Equation de Nernst).

1.3. Premières applications :

Parmi les premières applications on peut citer l'Austin A40 de Union Carbide (1970) alimenté en hydrogène gazeux.



Figure1.3-Austin A40

(source : professeur K. Korbscler)

1.4. Principes de fonctionnement :

En générale une pile à combustible se compose d'un électrolyte contenu entre deux électrodes poreuses permettant le passage des gaz. Le courant produit est conduit par les électrodes, exemple (pile à hydrogène).

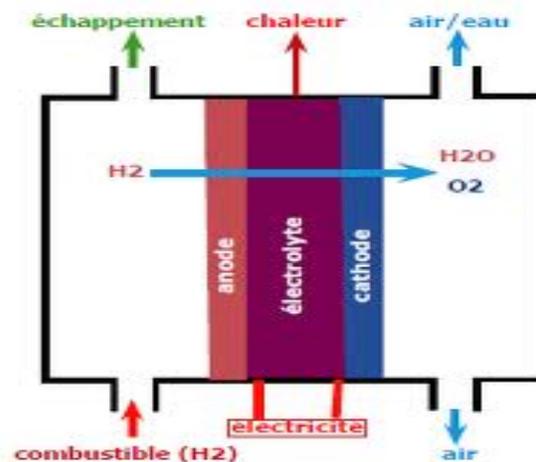


Figure1.4 : schéma de principe de fonctionnement de la pile à hydrogène
A l'anode l'hydrogène est décomposé :



Les deux électrons circulent vers l'extérieur à travers l'électrode.

Les ions H^+ vont traverser l'électrolyte (dans ce cas la membrane) et aller vers la cathode.

Les électrons du circuit extérieur venant de l'anode arrivent à la cathode où a lieu la réaction (oxydation de l'oxygène).



Bilan globale :



En 1967 Union Carbide a fabriqué un deux-roues avec un moteur électrique alimenté par une pile à combustible.

1.5. Renouveau :

Les problèmes de pollutions (émissions des gaz à effet de serre CO_2) sont la principale cause qui a entraîné l'intérêt pour la recherche de sources d'énergie renouvelable tel que la pile à combustible.

D'autres facteurs expliquent ce regain d'intérêt ; on peut citer l'abondance de l'hydrogène (pour les piles PEMFC), technologie relativement facile et domaines d'applications variés. Déjà quelques entreprises fabriquent des véhicules hybrides à piles à combustibles ; d'autres applications intéressantes se développent : téléphonie mobiles, informatique etc.....

1.6. Différent types de piles à combustible :

Selon la nature de l'électrolyte il existe plusieurs types de piles à combustible.

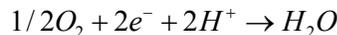
3.6.1. Les piles à combustible à membrane polymère ou échangeuse de protons PEMFC : dans ce type de pile on utilise pour l'électrolyte une membrane échangeuse d'ions, d'où le nom PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

Les réactions chimiques :

1)- **A l'anode :**



2)- **A la cathode :**



3)- **La réaction globale étant :**

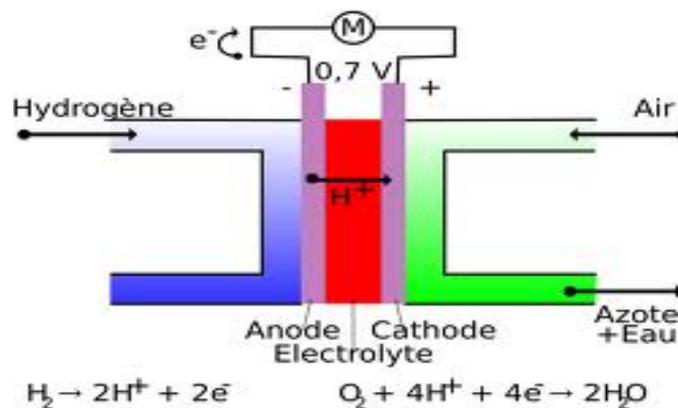
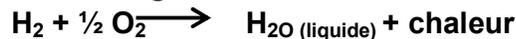


Figure1.5 : pile à membrane échangeuse de protons

Composants :

- **Electrolyte :** membrane fine polymère (50 à 200 Mm)
- **Catalyseur :** en platine sous forme de fines particules déposés à l'interface électrode/membrane.
- **Electrodes :** poudre de carbone déposée sur un support.

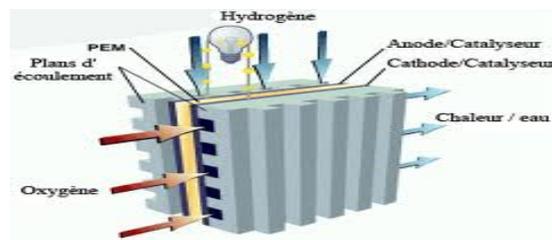


Figure1.6 cellule élémentaire d'une pile avec plaques bipolaires

Electrolyte :

Son rôle principal est de laisser circuler les ions de l'anode vers la cathode, et d'empêcher les pertes de courant (les électrons).

la membrane : la plus courante est faite en Nafion.

La principale caractéristique d'une membrane est sa conductivité ionique (exprimée

en siemens cm^{-2}), elle dépend surtout de son état d'hydratation (humidité).

- un taux trop faible augmente la résistance et freine la circulation ionique, alors qu'un taux trop élevé entraîne le blocage des sites de catalyse.

Le taux d'humidité exprime la contenance en eau par groupe sulfonique SO_3^- ($\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3$). Pour le Nafion ce taux est de 15 à 20 (moles d'eau par groupe).

- Electrode :

Les caractéristiques essentielles sont :

- Conductivité électrique.
- Porosité (pour la diffusion des gaz).
- Stabilité.

- Catalyseur :

Fine couche (généralement en platine) déposée à l'interface électrode/membrane dont le but principal est d'accélérer les réactions chimiques ; il est déposé en générale sur un support de particules fines de carbone de l'électrode.

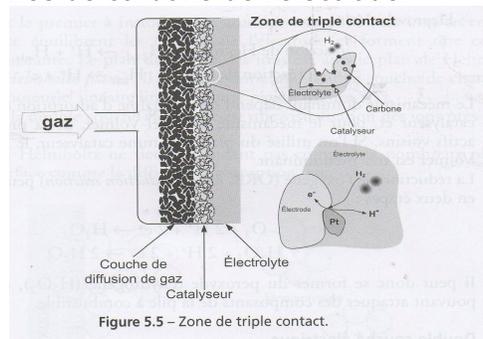


Figure1.7 Zone de triple contact

Il est sensible à la présence d'autres éléments chimiques surtout le monoxyde de carbone CO.

Couche de diffusion de gaz : communément appelée G.D.L (Gaz Diffusion Layer) dont le rôle est :

- Laisser circuler les gaz vers la membrane et le catalyseur.
- Assurer la circulation du courant.
- Evacuer la chaleur des réactions.

- Conditions de fonctionnement :

- La pile à combustible à hydrogène fonctionne à une température de l'ordre de 80°C , à une pression ordinaire de 1 à 3 bars.
- Elle est alimentée à l'air ou à l'oxygène pur.
- La stœchiométrie en générale varie de 1 à 5.
- L'alimentation est généralement humidifiée pour avoir une hydratation de la membrane.
- Tension délivrée 0,6 à 0,95V.
- Rendement 40 à 60%.

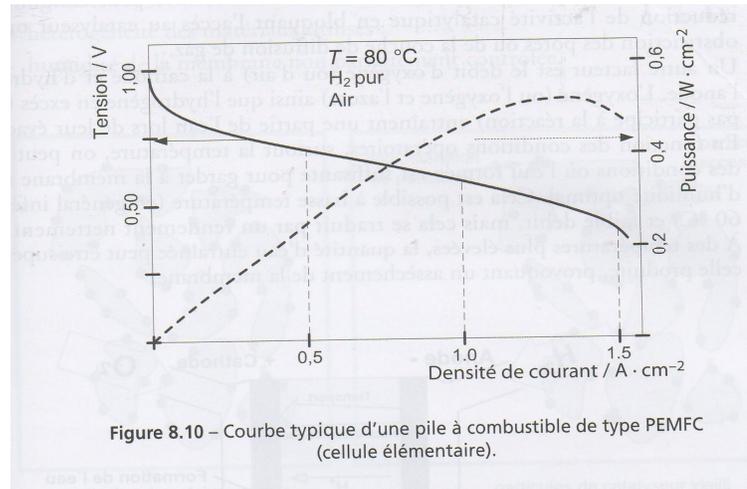


Figure1.8

- Gestion de l'eau :

L'eau est produite à la cathode suite à la réaction oxygène/hydrogène et va diffuser à travers l'électrode et éliminé du côté cathode. Elle diffuse aussi vers l'anode à travers la membrane à cause des gradients de concentrations. Il y a aussi une quantité qui est entraînée par les ions H^+ (électro – osmose^o) du côté anodique vers l'anode, il en résulte une distribution non homogène de l'eau (pauvre en eau du côté anode).

Pour remédier à ce problème en générale on humidifie l'hydrogène.

- Les problèmes thermiques :

Les réactions chimiques aux surfaces de catalyseur libèrent la chaleur qui doit être évacuée pour un bon fonctionnement pour éviter d'endommager la pile.

- Applications :

Les temps de démarrage et réponse rapide permettant aux piles PEMFC des domaines d'applications variés comme :

- Les centrales électriques.
- Moteurs pour véhicules.
- Vaisseaux spatiales etc.....

- Les plaques bipolaires :

Dans un stack plusieurs cellules à combustible sont empilées pour former un module.

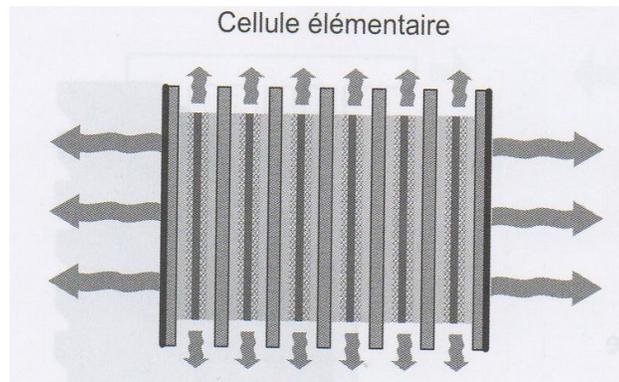
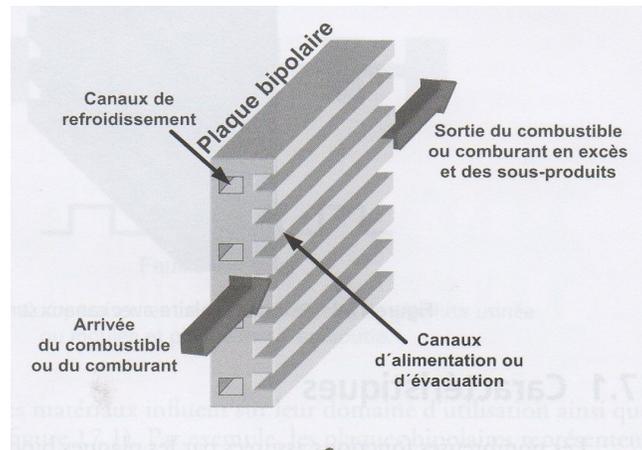


Figure 1.9 Evacuation de la chaleur par un stack

Les plaques bipolaires assurent la liaison entre cellules, collecte le courant, assurent le support mécanique, thermique, et permettent aux différents fluides de circuler à travers les canaux.



Structure des canaux :

Il existe des configurations pour les canaux :

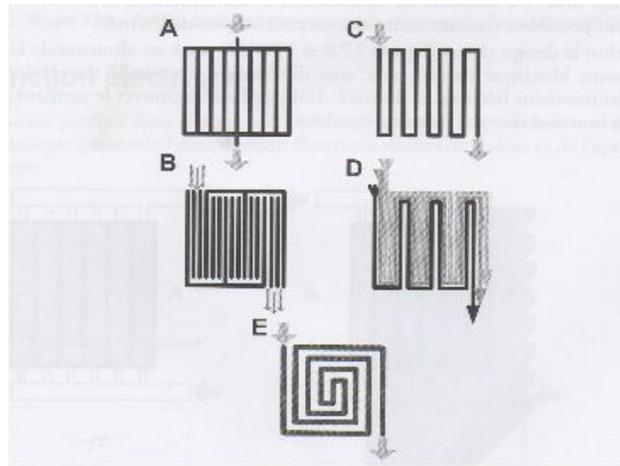


Figure 1.11 Quelques exemples de configuration de canaux

- Canaux parallèles (B)
- Canaux en forme de serpents (C)
- Canaux droit (A)
- Canaux en forme de spirale (E)
- Plusieurs canaux parallèles et en serpents (D).

1.6.2. Les piles à combustible Oxyde Solide SOFC : dans ce type de pile l'électrolyte est un mélange d'oxyde de zirconium et l'yttrium Y_{2O_3} (.....10%) et fonctionnent à très haute température 700 à 1000°C.

Les réactions :

1- A l'anode :



2- A la cathode :



3- La réaction globale :

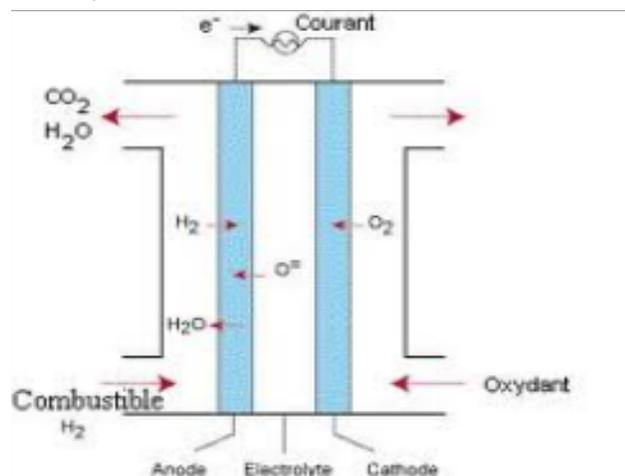


Figure 1.12 schéma de principe d'une pile SOFC

- Avantage :
 - Rendement électrique élevé.
 - Cout moins cher des catalyseurs
- Inconvénients :
 - Résistance des matériaux (températures hautes).
 - Temps de démarrage lent.
 - Evacuation de la chaleur.
- Applications :
 - Utilisé surtout pour les applications stationnaires.
- Dans ces piles c'est les ions O_2^- qui traversent l'électrolyte.
- La tension délivrée dépend de la température, et des premiers partiels de l'oxygène.
- La tension théorique est de 0,95V avec hydrogène et oxygène purs conforme à l'équation de Nernst.

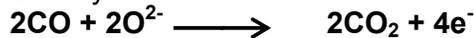
$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_H \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right)$$

Dans ces piles l'hydrogène est obtenu généralement par reformage du méthane à l'eau.

Selon les réactions :



Et l'oxydation du CO.



Structure et technologies:

- Structure tubulaire: l'ensemble électrodes/membrane a la forme d'un tube formé à une extrémité. Les deux électrodes sont faits d'un matériau poreux. Une bande appelée bande d'interconnexion est fixée le long du tube.
- En pratique les cellules tubulaires sont assemblées en série parallèle et mises en contact.

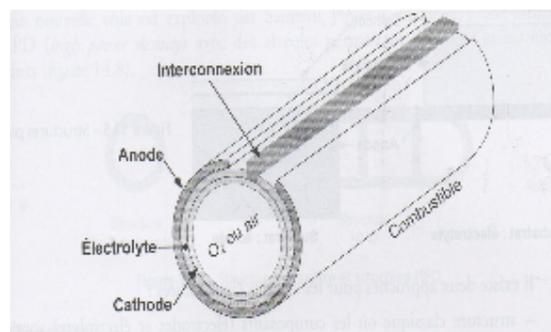


Figure 1.13 Structure tubulaire -Détails

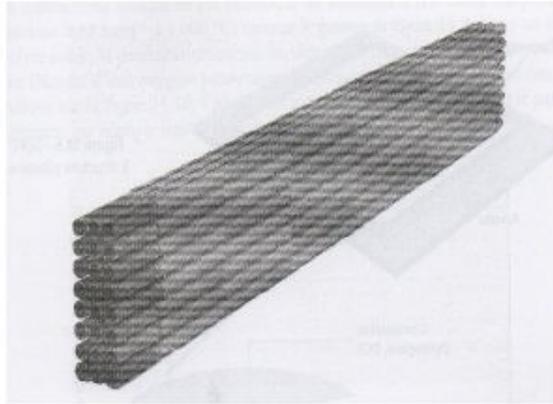


Figure 1.14 Structure tubulaire

- **Configuration plane :**

Dans ce type il existe deux variantes : anode servant de substrat ou électrolyte servant de substrat. La puissance est de l'ordre de $0,5\text{W}/\text{Cm}^2$ pour une cellule fonctionnant à 970°C avec air/hydrogène.

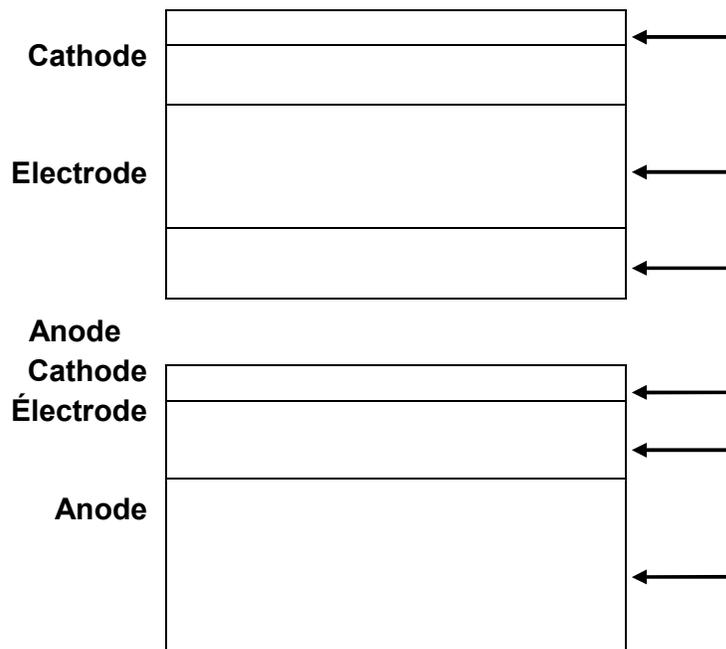


Figure 1.15 : Les cellules élémentaires sont empilées sous forme de plaques.

- **Gestion de l'eau :**

L'eau est produit sous forme de vapeur peut être utilisé par le chauffage ou l'entraînement de turbine.

- **Résumé des caractéristiques principales :**

- Température 900 à 1000°C
- Pression 1 à 10 bar
- Tension 0,7 à 1,15 V
- Rendement électrique 0,60
- Durée de vie supérieure à 30 000 heures.

1.6.3. Pile à Combustible au Méthanol DFMC : la pile à combustible DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) utilise le méthanol comme combustible à l'anode.

- **Les deux demi réactions :**

1)- à l'anode :



2)- à la cathode:



3)- d'où la réaction globale:



Q: chaleur libérée par la réaction.

La tension vaut :

$$E = 1,213\text{V}$$

En fonctionnement la tension est plus basse, les surtensions élevées à cause de la cinétique lente des réactions.

- **Structure élémentaire :**

de même type qu'une pile à hydrogène ;

- Membrane de 50 à 200 Mm.
- Catalyseur en platine.
- Electrodes poudre en carbone sur support.

- **Electrolyte :**

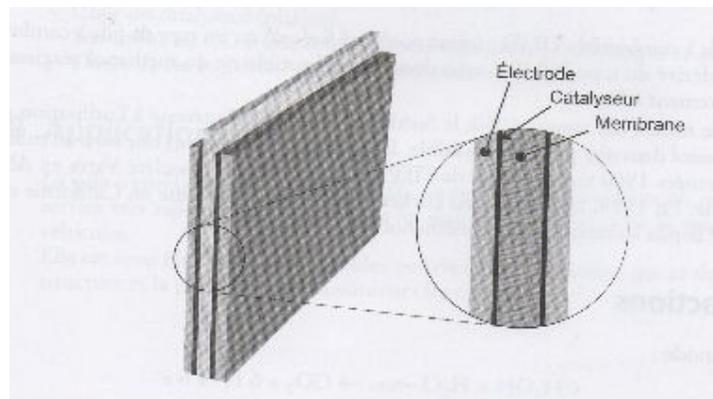


Figure1.16 Cellule élémentaire :

La membrane est de même type PEMFC dont l'inconvénient principale est qu'elle n'est pas totalement imperméable au méthanol qui soluble dans l'eau et diffuse donc vers la cathode ; un effet qui diminue les performances de la pile et se traduit par une perte d'énergie, empoisonnement du catalyseur côté cathode.

Les électrodes :

Elles constituent un support pour le catalyseur et sont formées en poudre de carbone.

Catalyseur :

Sont fabriqués en platine généralement. Elle résiste moins aux attaques du méthanol.

Couche de diffusion des gaz GDL :

Fabriqués à base de carbone (sous fibres de fibres) d'épaisseur de 0,2 à 0,4 mm et une porosité élevée.

- **Fonctionnement et caractéristiques principales :**

La densité de courant dépend de la tension.

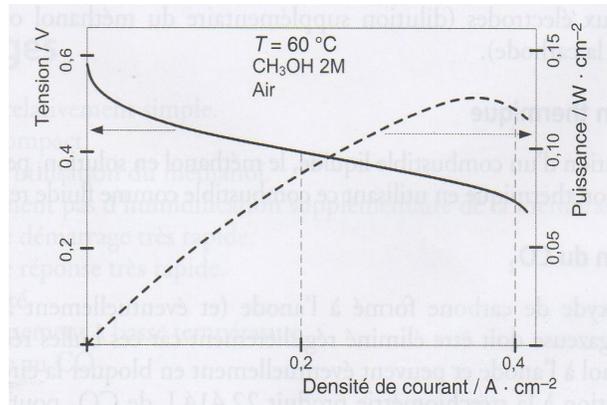


Figure 1.17 : tension en fonction de densité de courant

- Température minimale 60°C
- Pression 1 à 3 bar
- Rendement électrique 30 à 50%
- Densité de courant de l'ordre de 200m A.cm⁻²
G = - 702,5 KJ/mol

Et

$$H = - 726 \text{ KJ/mol}$$

A l'état standard.

- Rendement théorique 96,7%

- **Avantages et inconvénients :**

Les principaux avantages sont ;

- Fonctionnement à basse température.
- insensibilité au CO₂.
- utilisation facile du méthanol.
- Temps de déménagement rapide.

Les inconvénients majeurs sont liés aux :

- cout de la membrane (quelques centaines d'Euros/m²)
- les pertes à la diffusion du méthanol à travers la membrane.
- Production de CO₂.
- Rendement réel faible.

- **Application :**

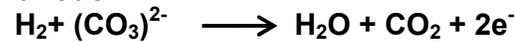
Les piles DMFC on les trouve surtout dans les applications portables (téléphonie, informatique) qui nécessitent de faibles puissances et petit volume.

4.6.4. Les piles à carbonate fondu MCFC :

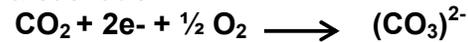
(Molton Carbonat Fuel Cell) dans ces piles, les ions carbonates $(\text{CO}_3)^{2-}$ circulent dans l'électrolyte.

- **réactions :**

1)- à l'anode :



2)- à la cathode:



3)- Réaction globale :



On remarque un transfert de CO_2 .

Le potentiel de Nernst est :

$$E = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{CO}_2} / \text{Cath}}{P_{\text{CO}_2} / \text{Anod}} \right)$$

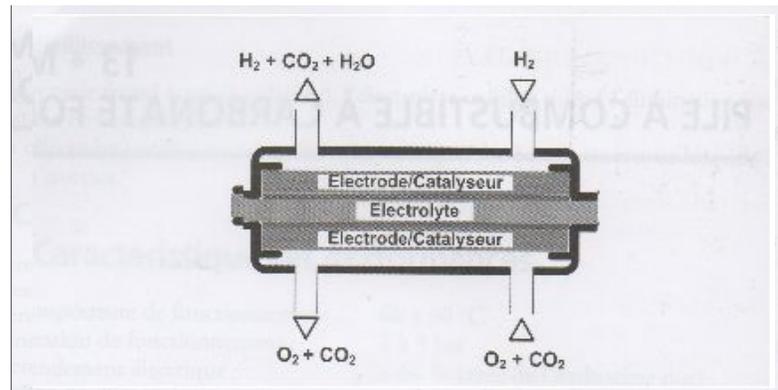


Figure 1.18 Pile à combustible type MCFC

- **Fonctionnement:**

La pile de type MCFC fonctionne à des températures de l'ordre 700°C.

- **Combustible et comburant :**

Le combustible est l'hydrogène obtenu à partir des réactions d'hydrocarbures dans la même pile.

Le comburant est un mélange de CO_2 et O_2 .

- **Gestion de l'eau :**

L'eau est produite sous forme de vapeur à l'anode.

- **Caractéristique des piles MCFC :**

- Température de 600 à 700°C
- Pression 1 à plusieurs bar
- Tension 0.7 à 0.90 V
- Densité de courant 200 mA/cm²
- Durée de vie plusieurs milliers d'heures
- Rendement électrique 55%

- **Remarque :**

Malgré ces bonnes performances la pile MFCF possède quelques inconvénients :

- Temps de démarrage long.
- Usure des électrodes.
- Gestion du CO_2 .
- Faible densité de courant.

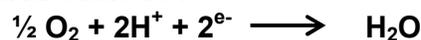
1.6.5.les piles à acide phosphorique (PAFC) : (Phosphoric Acide Fuel Cell) c'est une pile qui fonctionne à 200°C, elle utilise un électrolyte à acide phosphorique stabilisé dans une matrice en carbure de silicium qui possède une bonne conductivité ionique ainsi qu'une bonne solubilité à l'oxygène.

- **Les réactions :**

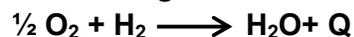
1)- à l'anode :



2)- à la cathode :



3)- la réaction globale :



- **Combustible et comburant :**

L'hydrogène est utilisé à l'anode, l'oxygène ou l'air à la cathode.

L'hydrogène est produit par décomposition d'hydrocarbures (cogénération).

- **Gestion de l'eau :**

L'eau est formée sous forme de vapeur et éliminée à la cathode.

Caractéristiques principales :

- Température 200°C
- Pression 1 à 8 bar
- Rendement électrique 0.5 à 0.8 V
- Densité de courant 800mA/cm²

- **Avantages et inconvénients :**

Les avantages majeurs sont ;

- Cogénération et faible sensibilité au CO_2

Les inconvénients sont ;

- Temps de démarrage.
- Régénération de l'acide phosphorique.
- Contrôle de la température.

CHAPITRE 2 ELECTROCHIMIE APPLIQUEE A LA PILE A COMBUSTIBLE

2.1. Electrochimie et électrochimie appliqué aux piles à combustible type (PEMFC) :

Dans les cellules à piles à combustible à hydrogène l'énergie chimique est convertie en énergie électrique.

2.1.1. Réactions :

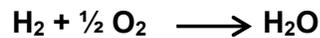
1)- à l'anode :



2)- à la cathode :



3)- globalement :



2.1.2. Chaleur de réaction :

La combustion de l'hydrogène est une réaction exothermique, ce qui signifie que la réaction globale doit :



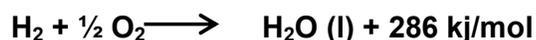
La chaleur de réaction chimique (enthalpie) est égale à la différence des enthalpies de formation des produits et des réactifs.

$$\Delta H = (h_f)\text{H}_2\text{O} - (h_f)\text{H}_2 - \frac{1}{2} (h_f)\text{O}_2$$

L'enthalpie de l'eau liquide à 25°C est -286 kJ/mol, l'enthalpie de formation des éléments purs et par définition zéro, ceci implique :

$$\Delta H = (h_f)\text{H}_2\text{O} - 0 - 0 = - 286 \text{ kJ/mol}$$

ce qui donne dans les conditions standards :



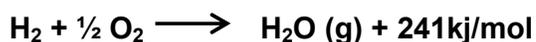
Remarque:

Cette réaction est valable seulement à 25°C et une pression atmosphérique avec production d'eau liquide.

Dans le cas où l'eau produite est sous forme de vapeur :

$$\Delta H = 241 \text{ kJ/mol}$$

La réaction globale dans ce cas :



2.1.3. Travail électrique théorique:

Energie de Gibbs: à cause du caractère de la réaction chimique, une partie de l'énergie est sous forme de chaleur, le reste, appelé énergie de Gibbs est transformé en énergie électrique (théorique), la quantité d'énergie libre ΔG est :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Où ΔS est la variation d'entropie produits/réactifs.

$$\Delta S = (S_f)_{H_2O} - (S_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (S_f)_{O_2}$$

Pour l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 : $S_f = 0$

Pour l'eau vapeur : $\Delta G = 228,86 \text{ j/mol}$

Le travail électrique est donné : $W_{el} = q.E$

W_{el} : travail électrique (j/mol)

q : charge électrique (coulomb)

E : potentiel (volts)

La charge q est réalisée au nombre de charges transférées par mole de H_2 .

$$q = n.N_a e$$

N_a : nombre d'Avogadro

e : charge électrique.

ou : $N_a.e = F$: constante de Faraday.

$$F = 96,485 \text{ coulomb/électron-mol.}$$

et finalement :

$$W_{el} = n.F.E$$

sachant que : $W_{el} = -\Delta G$

Le potentiel théorique est :

$$E = \frac{-\Delta G}{nF}$$

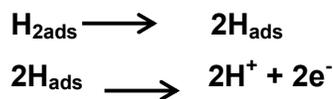
Pour cellule hydrogène/oxygène à 25°C :

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237,34}{2 \cdot 96,485}$$

$$E = 1,23 \text{ Volts}$$

2.1.4. Cinétiques des réactions :

C'est dans la zone de triple contact qu'a lieu la réaction d'hydrogène selon le mécanisme :



ads: adsorption

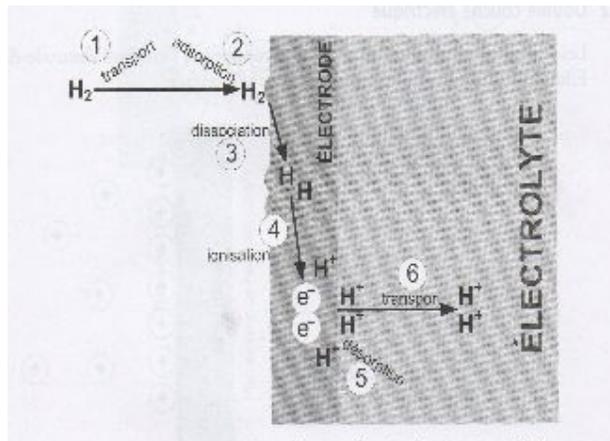


Figure 2.1. réaction à l'interface anodique(mécanisme simplifié)

- **Double couche électrique:**

Dans la zone interface électrode/électrolyte les ions en contact avec l'interface équilibrent les charges de l'électrode et forme une mince couche d'épaisseur constante appelée modèle de Helmholtz.

D'autres modèles plus complexes existent (Guy – Chapman) qui tiennent compte d'autre phénomènes.

- **Energie d'activation :**

Pour amorcer les réactions les molécules ont besoin de leurs énergies cinétiques, cette énergie doit être suffisante pour vaincre la barrière d'activation (seuil énergétique à franchir)

L'énergie perdue pour l'activation se traduit par :

- ✓ Une perte de tension appelé surtension.
- ✓ Le taux de réaction est donnée par la d'Arrhenius

$$K = A \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right)$$

K : constante de vitesse.

A : constante

Pour améliorer la cinétique des réactions on utilise des catalyseurs.

$$i = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha nF}{RT} n_{act}\right) - \exp\left(\frac{(1-\alpha) nF}{RT} n_{act}\right) \right)$$

2.1.5. Densité de courant :

En circuit ouvert, à chaque interface électrode/électrolyte règne un équilibre thermodynamique.

Les densités de charge côté anode i_a et côté cathode i_c sont égales :

$$\mathbf{i = i_a + i_c = 0}$$

et :

$$\mathbf{i_c = | i_a | = i_0}$$

i_0 : densité de courant d'échange, elle varie de quelques nano-ampères par Cm^2 à quelques ampères par Cm^2 .

Pour la pile à hydrogène/oxygène la densité de courant d'échange côté anode est supérieure à la densité de courant côté cathode.

2.1.6. Equation de Butler- Volmer :

En circuit fermé, la densité de courant i est fonction de la surtension d'activation :

$$i = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} \eta_{act}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) n F}{RT} \eta_{act}\right) \right)$$

Ou i_0 est la densité de courant d'échange.

Cette équation montre qu'on peut obtenir des courants d'échange élevé si on diminue la surtension η_{act} (rôle des catalyseurs).

n : nombre des électrons transférés.

α : coefficient de transfert de charge.

$$\alpha_{anode} + \alpha_{cathode} = 1$$

si α représente la coefficient de l'anode, alors $(1 - \alpha)$ est le coefficient de surtension cathodique.

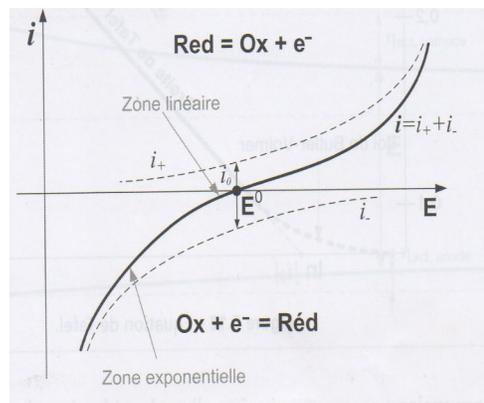


Figure2.2. $I=f(E)$

2.1.7. Equation de Tafel :

Pour des valeurs de surtensions élevées, le premier terme de l'équation de Butler-Volmer est négligée, on obtient une équation simplifiée :

$$i = i_0 \exp\left(\frac{\alpha n f}{RT} \eta_{act}\right)$$

ou :

$$\eta_{act} = -\frac{RT}{\alpha nF} \ln i_0 + \frac{RT}{\alpha nF} \ln i$$

$$\eta_{act} = A + B \ln(i):$$

C'est l'équation de Tafel η_{act} en fonction de $\ln(i)$ est une droite dont la pente B donne la valeur du coefficient α , et l'intersection à l'origine donne i_0 .

D'après l'équation précédente, de Tafel, on conclut qu'aux faibles surtensions l'équation de Butler-Volmer se simplifie en :

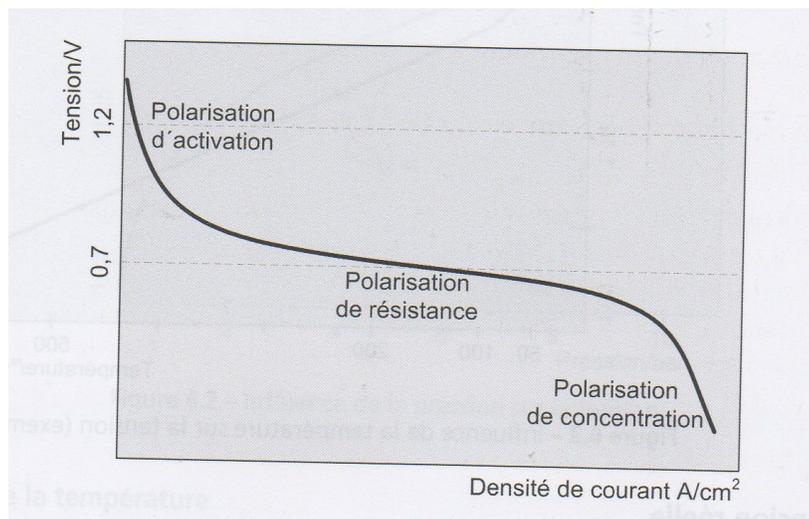
$$i = i_0 \left(\frac{nF}{RT} \eta_{act} \right)$$

La tension théorique dans les conditions standards est ΔE° reliée à l'énergie de Gibbs par la relation :

$$\Delta E_0 = -\frac{\Delta G^0}{n.F}$$

qui vaut **1,129V**.

Mais quand la pile débite la tension réelle diminue à cause de différentes polarisations.



Cette polarisation est due à l'énergie d'activation des réactions qui dépend de la cinétique de chaque réaction.

2.1.8. Polarisation ohmique :

La résistance interne de l'électrolyte entraîne une chute de tension aux bornes des électrodes (pertes ohmique) conforme à la loi d'Ohm :

$$\eta_{ohm} = R_{ohm} \cdot i$$

2.1.9. Polarisation de concentration :

Au fur et à mesure que les réactions sont consommées, un gradient de concentration s'établit et entraîne une diminution de la tension appelée polarisation de concentration donnée par la loi Nernst :

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right)$$

C_B : concentration loin de la surface du catalyseur.

C_S : concentration à la surface du catalyseur.

La tension réelle : d'après les paragraphes précédents on peut alors calculer la tension réelle E :

$$E = E^{\circ} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc}$$

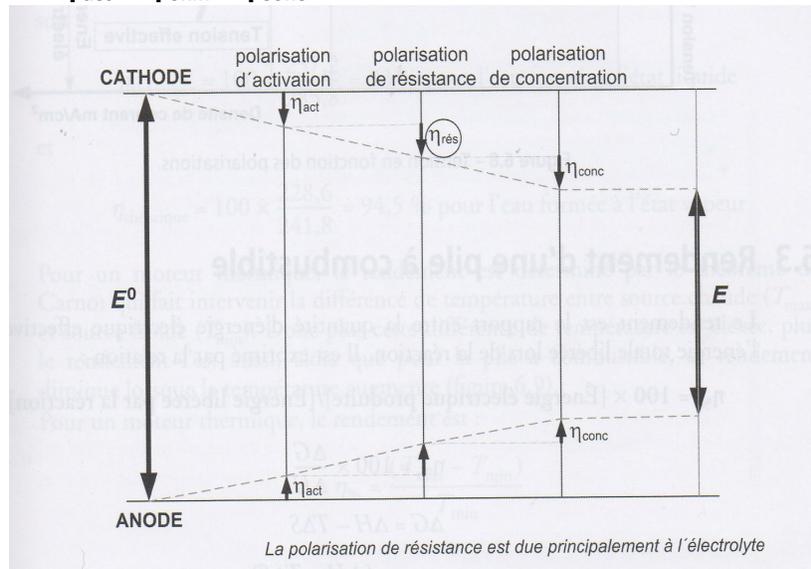
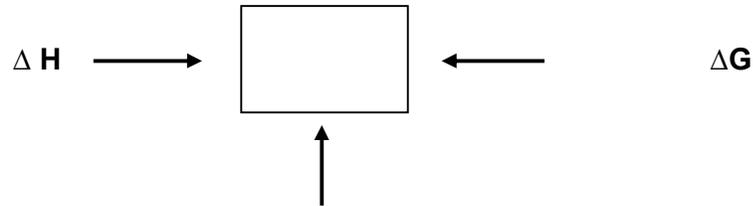


Figure 2. 3. différentes polarisations d'une pile à combustible

Le rendement est défini comme étant le rapport d'énergie amont/aval

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$



$$Q = T \cdot \Delta S$$

$$\eta = 237,34 / 286,02$$

$\eta = 83 \%$, pour l'eau formée à l'état liquide.

- 2.1.10. Gestion thermique :

La chaleur produite doit être évacuée pour maintenir une température optimale, on peut utiliser pour cela un refroidissement par circulation d'air.

CHAPITRE 3 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le type d'écoulement des gaz réactifs, la géométrie des canaux d'écoulement et le nombre de Reynolds ont une grande influence sur la performance d'une pile à combustible. Plusieurs chercheurs travaillent dans ce domaine afin d'optimiser la géométrie des canaux. Dans ce qui suit, une revue bibliographique et une analyse des expériences et des simulations numériques unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels.

1. L'effet des paramètres physiques

- **F. Barreras et al:** Une recherche expérimentale et numérique a été effectuée afin d'étudier la distribution d'écoulement dans une plaque bipolaire de canal parallèle d'une pile à combustible de type PEM commercial. À cet effet, la visualisation de l'écoulement en utilisant la fluorescence et le laser, pour les mesures du champ de vitesse par le cheminement de trace de colorant ont été appliquées. D' autre part, une simulation numérique bidimensionnelle de la distribution d'écoulement basé sur les équations de Navier-Stokes a été également effectuée. Les résultats obtenus à partir des études expérimentales et numériques ont été comparés. Les deux indiquent une distribution non homogène de l'écoulement à travers la plaque bipolaire, ce qui donne probablement une performance limitée de la conversion d'énergie de la pile à combustible. L'excellent accord entre les résultats expérimentaux et les prévisions numériques confirme la validité du code numérique pour étudier des variétés de conception dans le besoin de fabriquer réellement les plaques.

-**Wael ALIMI et al:** Présentent un modèle numérique bidimensionnel en régime permanent pour étudier l'influence des différents paramètres internes d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC). Le modèle tient compte simultanément des cinétiques électrochimiques, de la distribution du courant ainsi que des phénomènes de transport. Les restrictions considérées sont : Les mélanges gazeux sont parfaits, les écoulements sont monophasiques, incompressibles et laminaires ; les électrodes, les couches catalytiques et la membrane sont homogènes

et isotropes ; la cellule fonctionne à température constante (80°C) en régime permanent. Le modèle est basé sur un unique système d'équations de conservation valable dans les canaux d'alimentations, les couches de diffusion, les couches de catalyseurs ainsi que la membrane. Ce système d'équations est résolu numériquement selon la technique des volumes finis. Ils présentent la courbe de polarisation de la cellule, et montre les distributions du potentiel électrique dans la phase membranaire dans la direction transversale (direction x) qui englobe les couches catalytiques anodique et cathodique et la membrane pour différentes valeurs de la tension de la cellule V_{cell} (0,4 V, 0,6 V et 0,8V). Les profils montrent une variation décroissante du potentiel électrique dans les trois couches. On remarque que le potentiel membranaire est une fonction croissante de la tension V_{Cellule} appliquée.

- **Shiang-Wuu Perng a et al:** Présentent un modèle bidimensionnel pour étudier le transfert thermique dans le canal d'écoulement d'une PEMFC, en employant la méthode d'élément fini. Les restrictions prises sont : un gaz idéal, le modèle inclut seulement l'oxygène liquide, l'écoulement de fluide est instable, laminaire, incompressible, la couche GDL est homogène et isotrope. Le perfectionnement de transfert thermique a été analysé en installant transversalement une chicane et un cylindre rectangulaire pour contrôler le modèle d'écoulement dans le canal d'écoulement. Après cette étude, les auteurs déduisent qu'avec l'installation d'une chicane, une meilleure performance locale de transfert thermique est produite autour de la chicane quand l'effet de colmatage augmente; en revanche, une plus mauvaise performance locale de transfert thermique se produit dans la région descendant derrière la chicane avec une augmentation de l'effet de colmatage. Avec l'installation d'un cylindre rectangulaire, une meilleure performance locale de transfert thermique existe autour du cylindre rectangulaire, avec l'augmentation du secteur de colmatage; d'ailleurs, une meilleure performance locale de transfert thermique se produit dans la région maximale autour du cylindre. L'installation d'un bloc rectangulaire a une meilleure efficacité de transfert thermique que celle d'une chicane et influe sur le perfectionnement global du transfert thermique de la couche de catalyseur d'un système de PEMFC. Pour la chicane et le cylindre rectangulaire, l'efficacité du transfert thermique le long de la couche du catalyseur peut être augmentée par l'augmentation

du nombre de Reynolds de l'écoulement du canal principal.

M.G. Santarelli et al: Présentent une étude expérimentale consacrée à la caractérisation du comportement d'une cellule de carburant de type PEMFC avec la variation des valeurs de six paramètres de fonctionnement: la température de cellules; la température d'écoulement d'anode dans la saturation et les conditions sèches; la température d'écoulement de la cathode dans la saturation et les conditions sèches; et la pression de réactifs. La cellule de carburant utilisée pour les expériences est une PEMFC simple de 25 cm² de membrane de Nafion 115. La, une température plus élevée de cellules augmente la conductivité de membrane et la densité de courant d'échange avec une amélioration du comportement de la cellule.

Une augmentation de la température de saturation de réactif mène également à une meilleure performance, particulièrement dans le cas de basses et moyennes charges.

Avec une augmentation de la pression de fonctionnement de réactif, le maximum de la courbe de puissance décale à des densités de courant plus élevées, et ceci pourrait être lié au décalage correspondant de la densité de courant limiteuse. On a observé un effet combiné de l'humidification et de la pression de fonctionnement: l'augmentation de la pression de fonctionnement n'a pas offert une amélioration significative quand les réactifs étaient secs, tout en menant aux améliorations quand une humidification partielle (seulement à l'anode) a été adoptée. On a observé les meilleures améliorations dues à une augmentation de pression quand l'anode et la cathode sont humidifiées. En conclusion, quelques essais d'autres auteurs aux mêmes conditions d'opération ont été considérés, et une comparaison a été faite.

- **Hocine BEN MOUSSA et al:** Présentent un modèle bidimensionnel transitoire de l'écoulement de gaz dans les parties canal et couche de diffusion cathodique d'une pile à combustible (PEMFC). Le modèle k_{ϵ} pour modéliser le phénomène de turbulence dans le canal est choisi. Les équations, gouvernant le phénomène physique, ont été résolues par la méthode des volumes finis. Les canaux des gaz sont considérés comme un milieu continu, le régime d'écoulement considéré est régi par l'équation de Navier Stokes. Les couches de diffusion et catalyseur sont des milieux

poreux ; l'effet de la force exercée par le solide sur le fluide est caractérisé par un nouveau terme additionnel dans l'équation de mouvement. Le phénomène de turbulence est négligé dans les milieux poreux (les vitesses d'écoulement sont faibles). L'objectif de cette étude est de quantifier la concentration d'oxygène à la sortie de la couche de diffusion et de déterminer les conditions de performance de la pile. Les résultats numériques montrent l'effet du régime de l'écoulement et la nature du milieu poreux sur la distribution de gaz dans la couche de diffusion.

- **Rajesh Boddu et al** : Un modèle numérique tridimensionnel décrit des phénomènes de transport de chaleur et de masse et les écoulements des réactifs dans les canaux. L'influence des écoulements des réactifs sur la diffusion du gaz d'une pile à combustible de type PEM est étudié. En particulier, pour les pertes causées par le transport des masses, la conception des plaques bipolaires doivent être d'épaisseurs réduites et de faible masse et volume, les faces de contact devrait assurer une faible résistance de contact et un haut degré d'uniformité thermique et électrique tout en réduisant les chutes de pression. Dans cette étude, les auteurs supposent que l'écoulement est régulier, incompressible et turbulent. Les

équations de Navier-Stokes avec viscosité constante sont employées et résolus par le CFD pour analyser l'écoulement du gaz dans les canaux pour les modèles de plaque bipolaires. Les résultats d'une modélisation dynamique des plaques bipolaires avec différentes géométries des canaux serpentins, montrent que l'augmentation des nombres des canaux parallèles permet d'augmenter la surface efficace de contact avec une diminution de la pression.

2. L'effet de la géométrie des canaux :

-**H.C. Liu a et al**: L'étude est faite afin d'examiner le transport de gaz réactif et la performance d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton avec une géométrie conique du canal d'écoulement. Donc, une modélisation numérique bidimensionnelle a été faite sur la réduction de la profondeur du canal le long de la direction de l'écoulement. Le gaz réactif dans le canal conique peut être forcé accéléré dans la couche de diffusion afin d'augmenter la réaction électrochimique et d'augmenter ainsi la performance de la pile. Les effets de la formation de l'eau liquide

sur le transport de gaz sont pris en considération dans cette étude. Les auteurs ont conclu que l'application du canal conique d'écoulement dans une plaque bipolaire d'une pile à combustible de type PEM mène à une conséquence favorable dans le transport de carburant, la gestion de l'eau et la performance de la pile. Les effets peuvent être augmentés avec la diminution du rapport de cône de canal. Les effets bénéfiques du canal conique d'écoulement deviennent remarquables aux conditions de basse tension de fonctionnement ou de densité de courant élevées. Il est inévitable qu'une pénalité de la chute de pression accompagne l'utilisation des canaux coniques. Cependant, les résultats actuels révèlent que la perte de pression est tout à fait basse en général et le potentiel dans l'application pratique de cette nouvelle conception des canaux d'écoulement est encourageant.

- **Jenn-Kun Kuo et al:** Présentent un modèle bidimensionnel stationnaire pour étudier les effets de la flottabilité sur les caractéristiques d'écoulement de gaz, la distribution de la température, l'efficacité électrochimique de réaction et la performance d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) avec une conception de canal d'écoulement de gaz onduleuse. En général, les résultats de simulation, comparée à la géométrie droite d'un canal conventionnel d'écoulement de gaz, montrent que la géométrie onduleuse augmente le transport par la couche poreuse et améliore la distribution de la température dans le canal. En conséquence, la PEMFC a une efficacité d'utilisation de carburant améliorée et une augmentation du transfert thermique. On constate que l'effet de flottabilité augmente la vitesse des gaz réactifs dans les directions verticales et horizontales. Ceci augmente le taux auquel le gaz de l'oxygène est consommé dans la pile à combustible mais améliore la performance électrique de la PEMFC. Les résultats comparés au canal droit conventionnel d'écoulement de gaz, montrent que les canaux onduleux d'écoulement de gaz augmentent la tension de sortie et améliorent la densité de puissance maximale d'approximativement 39,5%.

Sungho Lee et al: Présentent un modèle bidimensionnel, qui s'intéresse principalement à l'étude paramétrique pour obtenir la conception optimale de la plaque bipolaire dans le système PEMFC pour automobiles. Pour cela, dans le cas d'un canal d'une géométrie droite et simple sans canaux de refroidissement, les auteurs ont

examinés les effets des paramètres de conception sur la performance de la PEMFC. Huit paramètres de conception géométriques des canaux et de la couche GDL des deux cotés cathodique et anodique sont choisis dans cette étude. Pour voir les effets de combinaison de 8 paramètres et pour réduire le nombre de calculs, la matrice d'essai de Taguchi L18 a été employée, donc il y a combinaison optimale entre les paramètres de conception la chute de pression dans la conception de système. Les conclusions tirées du calcul de CFD dans cette étude sont : les paramètres de conception géométriques dans la plaque bipolaire contribuent principalement à augmenter l'exécution du système en affectant la perte de concentration comme prévue. Les paramètres de conception devraient être choisis en considérant les effets sur l'exécution et la chute de pression dans le canal.

Shiang-Wuu Perng et al: Présentent un modèle bidimensionnel d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) ; comprenant le transport de masse et de quantité de mouvement de gaz carburant dans le canal d'écoulement et la GDL de côté cathodique. Le but de cette étude est de mesurer numériquement l'influence de l'installation d'un cylindre rectangulaire transversale long de la couche de diffusion de gaz (GDL) et dans le canal d'écoulement de gaz sur le perfectionnement d'exécution de la pile. Les effets du colmatage à des diverses tailles d'espace et de largeur du cylindre, sur le perfectionnement d'exécution de cellules ont été étudiés avec changement du rapport d'espace de 0.05 à 0.3 (pour le même cylindre) et les rapports de largeur-taille de 0,66 à 1,66 (pour le même rapport de taille et d'espace de cylindre). Pour résoudre ce problème, les auteurs supposent que le flux du fluide est instable, laminaire, et incompressible et l'eau dans l'électrode est sous forme de vapeur sementule. Les résultats prouvent que l'installation transversale d'un cylindre rectangulaire dans le canal d'écoulement du carburant augmente efficacement la performance des cellules d'une PEMFC. En outre, l'influence de la largeur du cylindre sur la performance des cellules est évidente, et le meilleur perfectionnement des cellules se produit au rapport 0,2 d'espace parmi les rapports d'espace de 0,05, 0,1, 0,2, et 0,3.

-Wei-Mon Yan et al: hauteur présentent un modèle tridimensionnel du canal droit d'écoulement conique dans la taille ou la largeur pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de carburant pour des cellules de carburant de PEM. Des canaux de carburant de

divers rapports de taille et de largeur cône sont numériquement analysés pour comprendre leurs effets sur des caractéristiques de transport de carburant et la performance de la cellule. Pour la simplicité, les hypothèses suivantes sont faites: écoulement laminaire et stationnaire ; gaz parfait et incompressible et le est système isotherme. Les résultats obtenus ont démontré que, avec les conceptions de canal coniques, la contraction du secteur d'écoulement le long du canal d'écoulement mène à l'augmentation de la vitesse de carburant et augmente ainsi le transport de carburant par des couches poreuses, les résultats indiquent également que la performance des cellules peut être améliorée par rapport décroissant de la taille du cône ou rapport croissant de la largeur du cône. Si la perte de puissance due à la chute de pression n'est pas considérée, la performance de la cellule de carburant avec les canaux coniques d'écoulement est uniformément améliorée avec des rapports de taille de cône faible et le rapport de largeur de cône grand. La perte de pression étant considéré, cependant, la meilleure performance peut être obtenue au rapport de taille de cône (A_z) de 0,5 et au rapport de largeur de cône (A_z) de 1,8 parmi les rapports de cône étudiés dans ce travail.

- **Dewan Hasan Ahmed et al:** Le CFD a été utilisé pour étudier la performance des piles à combustible de type PEM avec différentes géométries du canal aux densités de courant de fonctionnement élevées mais aux mêmes conditions de frontière. Un modèle tridimensionnel non-isotherme a été employé pour un canal de géométrie droite simple. D'abord, trois canaux de sections transversales différentes (rectangulaire, trapézoïdal et parallélogramme) ont été choisies avec la même taille du canal. Ils sont examinés la performance de la pile pour chaque type des canaux. Les simulations des trois sections transversales des différents canaux employant les mêmes conditions de frontière ont prouvé que parmi les paramètres géométriques des piles, la largeur de l'épaule est une des plus influentes en termes d'impact sur la performance des piles. Les simulations employant différents rapports de largeur de l'épaule du canal ont prouvé qu'aux densités de courant de fonctionnement élevées, les pertes ohmiques augmentent de manière significative avec la largeur décroissante d'épaule. En revanche, une plus petite largeur de l'épaule facilite la répartition des réactifs et aide à réduire les pertes de concentration. Les simulations ont révélés l'existence d'un rapport optimum de largeur d'canal-épaule qui donne la

tension la plus élevée de cellules dans des conditions de fonctionnement élevées de densité de courant. Cependant, dans de telles conditions de la performance de la pile diminue nettement avec la largeur décroissante de l'épaule, même lorsque les débits des réactifs et les vitesses d'admission sont augmentés.

- **Wei-Mon Yan a et al:** Présentent un modèle numérique tridimensionnel pour examiner les effets des réductions de la section d'écoulement du canal de sortie sur la performance de la pile à combustible à membrane échangeuse de proton et les phénomènes locaux de transport. Donc, Un champ serpentin d'écoulement avec des canaux de sortie ayant des tailles ou des longueurs modifiées a été conçu pour améliorer l'utilisation de réactif et l'enlèvement de l'eau liquide dans la pile à combustible. Les effets du rapport de contraction de la longueur et de la taille à l'entrée du canal sont inclus dans cette étude. Les résultats montrent comment les réductions des secteurs d'écoulement du canal de sortie augmentent les vitesses de réactif dans ces régions, ce qui augmente le transport de réactif, l'utilisation de réactif et l'enlèvement de l'eau de liquide ; donc, la performance de la pile est améliorée et rivalisée avec le champ serpentin conventionnel d'écoulement. Les résultats montrent également que la performance de la pile est améliorée par des incréments dans la longueur du secteur réduit d'écoulement, sans compter que de plus grandes décroissances dans le secteur d'écoulement de sortie. Si les pertes de puissance dues aux chutes de pression ne sont pas considérées, la performance des cellules avec les secteurs contractés d'écoulement du canal de sortie continue à s'améliorer pendant que les secteurs d'écoulement de sortie sont réduits et les longueurs des secteurs réduits d'écoulement sont augmentées. Quand les pertes de pression sont également prises en considération, la performance optimale est obtenue à un rapport de contraction de taille de 0,4 et à un rapport de contraction de longueur de 0,4 dans la conception actuelle.

- **Yuh Ming Fernga et al:** Présentent un modèle tridimensionnel et utilisent le CFD afin d'étudier les effets de différentes conceptions du canal d'écoulement sur la performance de la PEMFC. Les conceptions du canal d'écoulement utilisées dans cette étude incluent les canaux d'écoulement parallèles et serpentins, le simple-chemin et les canaux d'écoulement par trajets multiples, les canaux de profondeur uniforme et de

profondeur par étapes d'écoulement. Les hypothèses considérées sont : écoulement laminaire, la PEMFC est à l'état d'équilibre et isotherme, tous les gaz réactifs peuvent être considérés comme gaz idéaux et l'effet de gravité est négligé. Les résultats montrent que la performance de la PEMFC avec le canal d'écoulement serpentin est supérieure à celle de la PEMFC avec le canal à flux parallèle. La performance de la PEMFC avec des canaux d'écoulement à profondeurs par étapes est supérieure à celui de la profondeur uniforme, ce qui est confirmé par les données expérimentales.

S. Shimpalee et al : Ce travail étudié numériquement comment les canaux d'écoulement de géométrie serpentine avec de différentes sections canal/nervure affectent les distributions d'espèce et la performance pour des moteurs à véhicules et des moteurs stationnaires. De plus, l'influence du sens d'écoulement sur la performance et la distribution des espèces ont été également rapportées. Pour cela un modèle tridimensionnel stationnaire a été établi. Ce modèle utilise le solveur CFD, pour le calcul dans un état d'équilibre, multi espèce, multi phase et non isothermes. Trois configurations de champ d'écoulement et leurs effets sur la performance de cellules de carburant de PEM ont été choisis pour cette étude. Les courbes de performance et leurs paramètres relatifs comprenant la distribution locale de densité de courant pour ces configurations de champ d'écoulement ont été analysés. Après cette étude, les auteurs résultent que : la performance est légèrement plus haute pour le canal plus étroit avec un espacement de nervure plus large pour la condition stationnaire. L'uniformité globale des distributions est semblable pour toute la largeur de canal/nervure. Un canal plus large avec une nervure plus étroite montre des distributions locales non uniforme entre le canal et la nervure. La chute de pression augmente quand le secteur du canal est réduit. Pour la condition des moteurs à véhicules, la performance est meilleure pour le canal plus large avec un espacement plus étroit de nervure. Le sens d'écoulement est très sensible à la performance et à l'uniformité. Pour l'état stationnaire, l'écoulement de contre-courant montre que la performance est beaucoup inférieure et l'uniformité plus élevée que l'écoulement Co-courant. Pour l'état des moteurs à véhicules, l'écoulement de contre-courant montre une faible performance et uniformité que l'écoulement Co-courant.

P. T. Nguyen et al: présentent un modèle informatique tridimensionnel de pile à

combustible de type PEM avec des canaux d'écoulement serpentinaires. Ce modèle complet explique tous les phénomènes importants de transport dans la pile à combustible, telle que le transfert thermique, transfert de masse, cinétique d'électrode, et les champs potentiels de gaz dans la membrane et pose l'accouplement entre la densité de courant locale et la concentration d'oxygène. La suppression d'activation est entièrement mise en application en employant un nouvel algorithme pour obtenir les pertes potentielles à travers la pile. Pour les paramètres de couche de catalyseur indiqués dans cette étude, on constate que l'oxygène est consommé la plupart du temps à l'interface de GDL- catalyseur.

-Wei-Mon Yan a et al: Un champ d'écoulement serpentinaire a été conçu avec des canaux de sortie ayant modifié des tailles ou des longueurs pour améliorer l'utilisation de réactif et l'enlèvement de l'eau liquide dans une pile à combustible à membrane échangeuse de proton. Un modèle numérique tridimensionnel a été employé pour examiner les effets des réductions du secteur d'écoulement du canal de sortie sur la performance des cellules et les phénomènes locaux de transport. Le modèle suppose que le système est stationnaire; les réactifs d'admission sont des gaz idéaux; le système est isotherme; l'écoulement est laminaire et incompressible; les propriétés thermo-physiques des réactifs et des produits sont constantes. Les couches poreuses telles que la couche de diffusion, de catalyseur et la membrane sont isotropes. Les prévisions prouvent que les réductions des secteurs d'écoulement du canal de sortie augmentent les vitesses des réactifs dans ces régions, ce qui augmente le transport des réactifs, l'utilisation des réactifs et l'enlèvement de l'eau liquide; donc, la performance de la pile est améliorée et rivalise avec le champ d'écoulement serpentinaire conventionnel. Les prévisions prouvent également que la performance de la pile est améliorée par des incréments dans la longueur du secteur d'écoulement réduit, sans compter les grandes décroissances dans le secteur d'écoulement de sortie. Si les pertes de puissance dues aux chutes de pression ne sont pas considérées, la performance de la pile avec les secteurs d'écoulement contractés du canal de sortie continue à s'améliorer pendant que les secteurs d'écoulement de sortie sont réduits et les longueurs des secteurs d'écoulement réduits sont augmentées. Quand les pertes de pression sont également prises en considération, la performance optimale est obtenue à un rapport de contraction de taille de 0,4 et à un rapport de contraction de

longueur de 0,4 dans la conception actuelle.

-Mohammad Hadi Akbari et al: présentent un modèle tridimensionnel d'une cellule de carburant à membrane échangeuse de proton. La conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces, d'énergie et de charge sont développées. Pour étudier ces phénomènes, les auteurs ont supposés que l'écoulement du gaz est laminaire, instationnaire, non isotherme et incompressible, mais pas de densité constante et les champs d'écoulement des côtés anodique et cathodique sont modélés comme des canaux droits. Dans ce modèle, l'effet de la résistance de contact est également inclus. La solution numérique, par le CFD, est basée sur la méthode du volume fini. Dans ce travail, les effets des dimensions du canal d'écoulement sur la performance de cellules sont étudiés. Les résultats de simulation indiquent que l'augmentation de la largeur du canal améliorera la densité de courant limiteuse. Cependant, on observe qu'une taille optimal d'épaule des canaux d'écoulement existe pour ce que la performance de cellules est meilleure. Des courbes de polarisation sont obtenues pour différentes conditions de fonctionnement qui, en général, rivalisent favorablement avec les données expérimentales correspondantes. Un tel modèle de CFD peut être employé comme outil dans le développement et l'optimisation des cellules de carburant de PEM.

- Tang Yuan Chen et al: Dans cette recherche, l'influence du modèle d'écoulement sur la performance d'une micro-PEMFC a été étudiée expérimentalement. La recherche a été concentrée sur les impacts des angles de courbure et des dimensions de nervure des canaux d'écoulement de type serpentin sur la performance et étudient comment l'améliorer. La cellule de carburant utilisée pour ces expériences était une simple microPEMFC avec une membrane de 1.44 cm² de Nafion NRE-212. Dans cette étude, trois modèles avec différents angles de courbure sont fabriqués pour étudier l'influence des angles de courbure sur la performance de PEMFC. Les trois modèles étudiés sont, Ils ont 30⁰-150⁰, 60⁰- 120⁰ et 90⁰-90⁰, respectivement ; Le premier nombre représente le premier angle de courbure et le dernier représente le deuxième angle. Ces deux angles combinent pour faire un u tourné du canal d'écoulement. En outre, pour étudier l'influence de la dimension de nervure/canal sur la performance, trois modèles avec des dimensions différentes de

nervure/canal sont utilisées : 500/700 μm , 800/400 μm et 100/500 μm . l'expérience est faite à trois débits d'admission différents (20 $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$, 40 $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$, 60 $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$). Les courbes de polarisation et de puissance avec leurs débits d'admission ont été analysées et comparées, les auteurs résultent que le modèle 60⁰-120⁰ a amélioré la performance de la micro-PEMFC sous le débit d'admission 20 et 40 du 20 et 40 $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$ comparé à 90⁰-90⁰, La performance de la micro PEMFC diminue avec l'augmentation du débit d'admission, La performance est plus grande pour le canal plus large avec une configuration plus étroite de nervure. L'effet de la largeur nervure/canal montre plus grande sensibilité à la performance de la micro-PEMFC que les débits d'admission.

CHAPITRE 4 MODELISATION ET ETUDE NUMERIQUE

4.1 Model Physique :

Schématiquement une pile PEMFC est représenté en figure 1

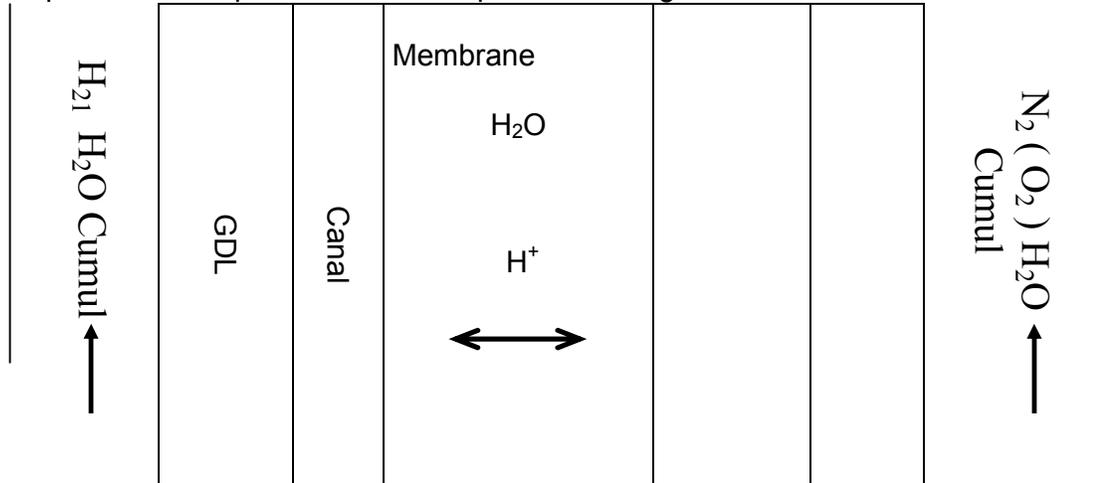


Figure 4.1 schéma simplifié de la pile

Un canal gazeux pour chaque électrode, une couche de diffusion coté anode GDL et une couche coté cathode et une couche catalyse (mince) pour chaque électrode

Pour notre étude, une électrode (cathode) est concernée constituée par le canal , la couche (très mince) de catalyse

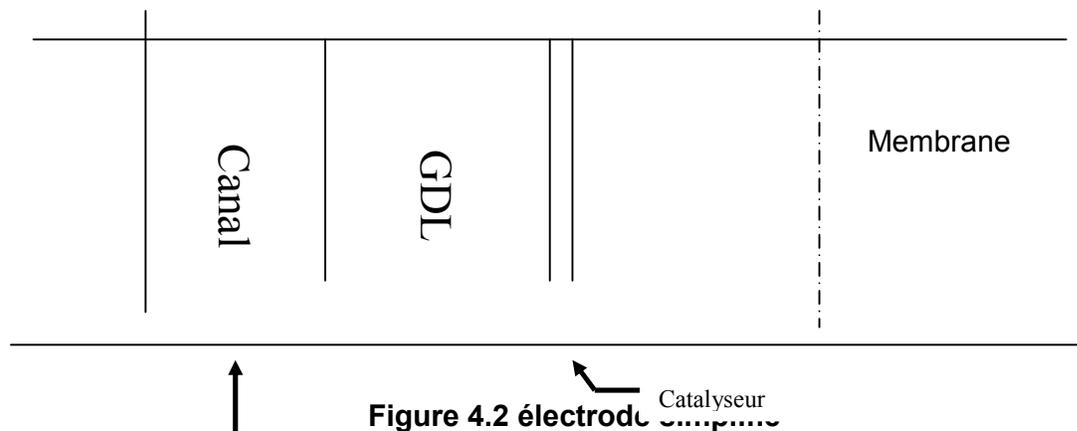


Figure 4.2 électrode simplifiée

Hypothèses :

1. le mélange fluide est laminaire.
2. le diffuseur, la couche de catalyse sont des milieux isotropes.
3. le mélange gazeux est considéré comme parfait et incompressible.
4. le volume liquide de l'eau est négligé.

4.2 Modèle mathématique :

Dans le canal de gaz, le mélange fluide est décrit par des équations de continuité et de Navier et Stokes sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Avec les variables sans dimensions :

$$\bar{U} = \frac{U}{U_\infty}, \quad \bar{V} = \frac{V}{U_\infty}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad P = \frac{P - P_\infty}{P_\infty U_\infty},$$

$$R_e = \frac{P_\infty U_\infty L}{\mu} \quad \text{le nombre de Reynolds}$$

L'équation de l'énergie :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{1}{R_e P_r} [\Delta \bar{T}] \quad \text{où} \quad \begin{cases} \Delta \bar{T} = \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \\ \bar{T} = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w} \\ P_r = \frac{\mu C_p}{K} \quad \text{nombre de Prandtl} \end{cases}$$

L'équation de conservation de l'espèce :

$$\frac{\partial X_K}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial X_K}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial X_K}{\partial y} = \frac{1}{R_e S_{C_K}} \left(\frac{\partial^2 X_K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_K}{\partial y^2} \right)$$

X_K : fraction molaire de l'espèce K

$$S_{C_K} = \frac{\mu}{\rho D_K} \quad \text{nombre de Schmidt}$$

D_K : coefficient de diffusion de l'espèce K

Pour la cathode K représente la vapeur d'eau , ou l'oxygène dans le diffuseur GDL (gas diffuser layer)

Les équations de continuité de quantité de mouvement et d'énergie sont légèrement modifiées pour tenir compte de la porosité de la couche de diffusion de la force de Darcy :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} &= 0 \\ \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} &= -\varepsilon^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\varepsilon}{R_e} \Delta \bar{U} - \frac{\varepsilon^2}{R_e \bar{K}} \bar{U} \\ \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} &= -\varepsilon^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\varepsilon}{R_e} \Delta \bar{V} - \frac{\varepsilon^2}{R_e \bar{K}} \bar{V} \end{aligned}$$

$$\bar{K} = \frac{K}{L^2} \quad ; \quad K : \text{perméabilité}$$

Le dernier terme $\left(-\frac{\bar{U}}{\bar{K}} ; -\frac{\bar{V}}{\bar{K}} \right)$ représente la force de Darcy .

On peut écrire une seule équation pour le domaine (canal + GDL) avec des paramètres propres pour chaque sous-domaines , une façon efficace pour l'écriture du programme et calcul par ordinateur .

ε vaut 1 dans le canal , et prend sa valeur réelle dans le milieu poreux

K valeur nulle dans le milieu poreux

$K = \infty$ dans le canal (une grande valeur pour les calculs)

Equation de conservation des espèces :

$$\frac{\partial X_K}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial X_K}{\partial X} + \bar{V} \frac{\partial X_K}{\partial Y} = \frac{\varepsilon^2}{R_e S_{CK}} \left(\frac{\partial^2 X_K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_K}{\partial y^2} \right) + S \frac{\varepsilon^2}{R_e S_{CK}}$$

S terme source qui est nul sauf pour la mince couche catalytique ou il vaut :

$$\begin{aligned} S_K &= -\frac{1}{2F} j_a \frac{\rho L^2}{\mu C_{tot}} \quad \text{pour l'hydrogène} \\ S_K &= -\frac{1}{4F} j_c \frac{\rho L^2}{\mu C_{tot}} \quad \text{pour l'oxygène} \end{aligned}$$

et

$$S_K = -\frac{1}{2F} j_c \frac{\rho L^2}{\mu C_{tot}} \quad \text{pour } H_2O$$

Où j_a , j_c sont donnés par la loi de Butler – Volmer .

Discrétisation :

On remarque que pour calculer les équations de transport, il faut d'abord calculer les équations de quantité de mouvements pour obtenir le champs de vitesse ; pour cela les équations de Navier et Stokes légèrement modifiées pour tenir compte du milieu poreux sont résolues

Les équations de Navier et Stokes (quantité de mouvements et continuité):

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -\varepsilon^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\varepsilon}{R_e} \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) - \frac{\varepsilon^2}{R_e K} \bar{U}$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = -\varepsilon^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\varepsilon}{R_e} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) - \frac{\varepsilon^2}{R_e K} \bar{V}$$

Pour la résolution de ces équations, on a retenu la méthode dite Simple ; (semi- implicit méthode for pressure linked equations) dont le maillage (staggered grid) est présentée dans la figure

La pression est calculée aux points

$(i-1; j)$, $(i; j)$, $(i+1; j)$, $(i; j+1)$, $(i; j-1)$, $(i+1; j)$etc

Les vitesses aux points $\left(i-\frac{1}{2}; j\right)$, $\left(i+\frac{1}{2}; j\right)$, $\left(i; j+\frac{1}{2}\right)$, $\left(i; j-\frac{1}{2}\right)$,etc

Pour l'équation de continuité avec dérivée centrale :

$$\frac{U_{i+\frac{1}{2};j} - U_{i-\frac{1}{2};j}}{\Delta x} + \frac{V_{i;j+\frac{1}{2}} - V_{i;j-\frac{1}{2}}}{\Delta y} = 0$$

Etape de l'algorithme simple :

1. choisir un champ initial P^* aux points intérieurs et un champ (ρU^*) et (ρV^*) arbitraire
2. résoudre pour $(\rho U^*)^{n+1}$ et $(\rho V^*)^{n+1}$ aux points intérieurs :

$$\left(\rho U^*\right)_{i+\frac{1}{2};j}^{n+1} = \left(\rho U^*\right)^n + A^* \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(P_{i+1;j}^* - P_{i;j}^*\right)$$

$$\left(\rho V^*\right)_{i;j+\frac{1}{2}}^{n+1} = \left(\rho V^*\right)_{i;j+\frac{1}{2}}^n + B^* \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(P_{i;j+1}^* - P_{i;j}^*\right)$$

Où

$$A^* = - \left[\frac{\left(\rho U^2\right)_{i+\frac{3}{2};j}^n - \left(\rho U^2\right)_{i-\frac{1}{2};j}^n}{2\Delta x} + \frac{\left(\rho U\bar{V}\right)_{i+\frac{1}{2};j+1}^n - \left(\rho U\bar{\bar{V}}\right)_{i+\frac{1}{2};j-1}^n}{2\Delta y} \right]$$

$$+ \mu \left[\frac{U_{i+\frac{3}{2};j}^n - 2U_{i+\frac{1}{2};j}^n + U_{i-\frac{1}{2};j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{U_{i+\frac{1}{2};j+1}^n - 2U_{i+\frac{1}{2};j}^n + U_{i-\frac{1}{2};j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right]$$

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \left(V_{i,j+\frac{1}{2}}^n + V_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right)$$

$$\bar{\bar{V}} = \frac{1}{2} \left(V_{i,j-\frac{1}{2}}^n + V_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n \right)$$

Et

$$B^* = - \left[\frac{\left(\rho V\bar{U}\right)_{i+1;j+\frac{1}{2}}^n - \left(\rho V\bar{\bar{U}}\right)_{i-1;j+\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} + \frac{\left(\rho V^2\right)_{i;j+\frac{3}{2}}^n - \left(\rho V^2\right)_{i;j-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta y} \right]$$

$$+ \mu \left[\frac{V_{i+1;j+\frac{1}{2}}^n - 2V_{i;j+\frac{1}{2}}^n + U_{i-1;j+\frac{1}{2}}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{V_{i;j+\frac{3}{2}}^n - 2V_{i;j+\frac{1}{2}}^n + V_{i;j-\frac{1}{2}}^n}{(\Delta y)^2} \right]$$

$$\bar{U} = \frac{1}{2} \left(U_{i+\frac{1}{2};j}^n + U_{i+\frac{1}{2};j+1}^n \right)$$

$$\bar{\bar{U}} = \frac{1}{2} \left(U_{i-\frac{1}{2};j}^n + U_{i-\frac{1}{2};j+1}^n \right)$$

Conditions aux limites :

Pour les vitesses on applique la condition de Neumann à la sortie et condition de vitesse nulles aux parois et vitesse spécifiée à l'entrée voir (J. Anderson) in computationnel fluide dynamique

Pour la pression , une condition (approximation raisonnable) de Neumann $\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 0$ aux parois et P' (correction de pression) nulle à l'entrée et à la sortie

3. utiliser les valeurs ρU^* et ρV^* obtenues à l'étape 2 et résoudre pour P' (correction de pression)

$$aP'_{i;j} + bP'_{i+1;j} + bP'_{i-1;j} + cP'_{i;j+1} + cP'_{i;j-1} + d = 0$$

$$a = 2 \left[\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \right]$$

$$b = -\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

$$c = -\frac{\Delta t}{(\Delta y)^2}$$

$$d = \frac{1}{\Delta x} \left[(\rho U^*)_{i+\frac{1}{2};j} - (\rho U^*)_{i-\frac{1}{2};j} \right] + \frac{1}{\Delta y} \left[(\rho U^*)_{i;j+\frac{1}{2}} - (\rho U^*)_{i;j-\frac{1}{2}} \right]$$

4. calculer P^{n+1} aux points intérieurs

$$P_{i;j}^{n+1} = (P^*)_{i;j}^n - \alpha P'$$

α étant un facteur de relaxation

5. les $P_{i;j}^{n+1}$ deviennent les nouvelles valeurs $(P^*)_{i;j}^n$, retour a l'étape 2 et répéter les étapes 2 à 5 , ce processus itératif est répété jusqu'à convergence ($d \approx 0$)

Un code Matlab à été retenu pour les calcul

Une fois le champ de vitesse obtenu on peut facilement résoudre pour le transport des espèces

Conditions aux limites et initiales pour la cathode.

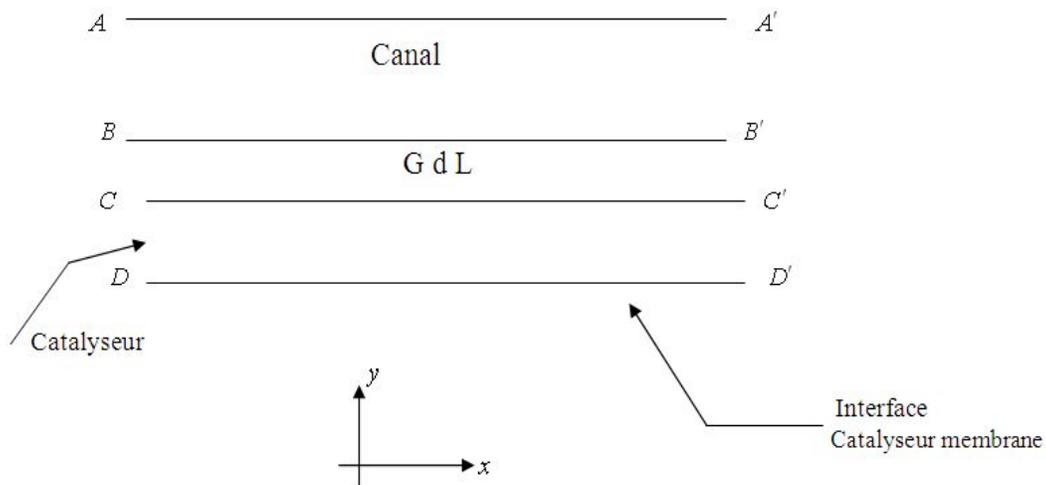
- Conditions initiale à $t = 0$:

$$\bar{U} = 0, \quad \bar{V} = 0, \quad \bar{P} = 1$$

$$X_{O_2} = 0, \quad X_{HO_2} = 0, \quad X_{HO_2} = 0$$

- Conditions aux limites
à l'entrée du canal, une condition de Dirichlet est appliquée, une de Newman (gradients nuls) sur les parois solides, la condition de Newman est appliquée.

- Domaine de calcul :



$$X_{HO_2} = 0,1 \times 35,55 \quad mol / m^3$$

$$X_{HO_2} = 3,55 \quad mol / m^3$$

$$X_{O_2} = 35,55 \quad mol / m^3$$

- à la sortie des canaux d'écoulement des gaz coté $A'B'$:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \bar{V}}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial X_{O_2}}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial X_{HO_2}}{\partial X} = 0$$

- extrémité CC'

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = 0 & , \quad \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = 0 & , \quad \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = 0 & , \quad \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial X_{O_2}}{\partial x} = 0 & , \quad \frac{\partial X_{HO_2}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial X_{H_2}}{\partial x} = 0 & , \quad \frac{\partial X_{HO_2}}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

Extrémité BD , B'D' :

$$\bar{U} = 0, \quad \bar{V} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial X_{O_2}}{\partial x} = \frac{\partial X_{O_2}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial X_{H_2O}}{\partial x} = \frac{\partial X_{H_2}}{\partial y} = 0$$

- Paramètres physiques et géométriques :

α_a	Coefficient de transfert (anode)	$\frac{1}{2}$
α_c	Coefficient de transfert (cathode)	$\frac{1}{2}$
η_a	Surtension (anode)	0,35v
η_c	Surtension (cathode)	0,35v
μ	Viscosité dynamique	2×10^{-6}
K_d	Perméabilité	$1,7 \times 10^{-11}$
S_c	Nombre de Schmidt	0,42
U_{in}	Vitesse d'entrée	0,01
Pr	Nombre de Prandtl	0,7
Re	Nombre de Reynolds	200
L	Longueur de pile	20 mm
h_c	Hauteur canal	2 mm
ε_d	Porosité GDL	0,4
h_{GDL}	Hauteur GDL	1 mm

La couche de catalyse est considérée comme très mince (même porosité de GDL)

- Les termes sources (Cathode)

$$S_{O_2} = -\frac{J_c}{4F} \quad ; \quad S_{H_2O} = \frac{J_c}{2F}$$

$$\text{ou} \quad : \quad J_c = \frac{X_{O_2}}{X_{O_2}^{ref}} \left(e^{\frac{\alpha_a F}{RT} R_c} - e^{-\frac{\alpha_c F}{RT} R_c} \right)$$

Discrétisation des équations de transport de espèces

$$\frac{\partial X_K}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial X_K}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial X_K}{\partial y} = \frac{\varepsilon^2}{\text{Re} S_{ck}} \left(\frac{\partial^2 X_K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_K}{\partial y^2} \right) + S_{ck}$$

Dont l'expression discrétisée est :

$$\frac{X_k^{n+1} - X_k^n}{\Delta t} + \bar{U}(i,j) \frac{X_k(i+1,j) - X_k(i,j)}{\Delta x} + \bar{V}(i,j) \frac{X_k(i,j+1) - X_k(i,j)}{\Delta y} =$$

$$= \frac{\varepsilon^2}{\text{Re} S_{ck}} \left(\frac{X_k(i+1,j) - 2X_k(i,j) + X_k(i-1,j)}{(\Delta x)^2} \right) - \left(\frac{X_k(i,j+1) - 2X_k(i,j) + X_k(i,j-1)}{(\Delta y)^2} \right) + S(i,j)$$

Si $\Delta x = \Delta y = h$ le second terme devient :

$$\frac{\varepsilon^2}{\text{Re} S_{ck}} \left(\frac{X_k(i+1,j) + X_k(i-1,j) + X_k(i,j+1) + X_k(i,j-1) - 4X_k(i,j)}{h^2} \right) + S(i,j)$$

Ou S est le terme source : $S_{O_2} = -\frac{J_c}{4F}$; $S_{H_2O} = \frac{J_c}{2F}$; $S_{H_2} = -\frac{J_c}{2F}$

On obtient un système (explicite) d'équations :

$$X_k^{n+1} = AX_k^n \quad \text{ou} \quad n : \text{le niveau de temps } t$$

$$n+1 : \text{le niveau de temps } t + \Delta t$$

$$X_k^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\Delta x} \bar{U}(i,j) [X_k(i+1,j)^n - X_k(i,j)^n] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \bar{V}(i,j) [X_k(i,j+1)^n - X_k(i,j)^n] + \frac{\Delta t \varepsilon^2}{\text{Re} S_{ck}} \frac{L(X_k)}{h^2} + X_k^n + S(i,j)$$

Ou

$$L(X_k) = X_k(i+1,j) + X_k(i-1,j) + X_k(i,j+1) + X_k(i,j-1) - 4X_k(i,j)$$

Model pour la couche de diffusion GDL :

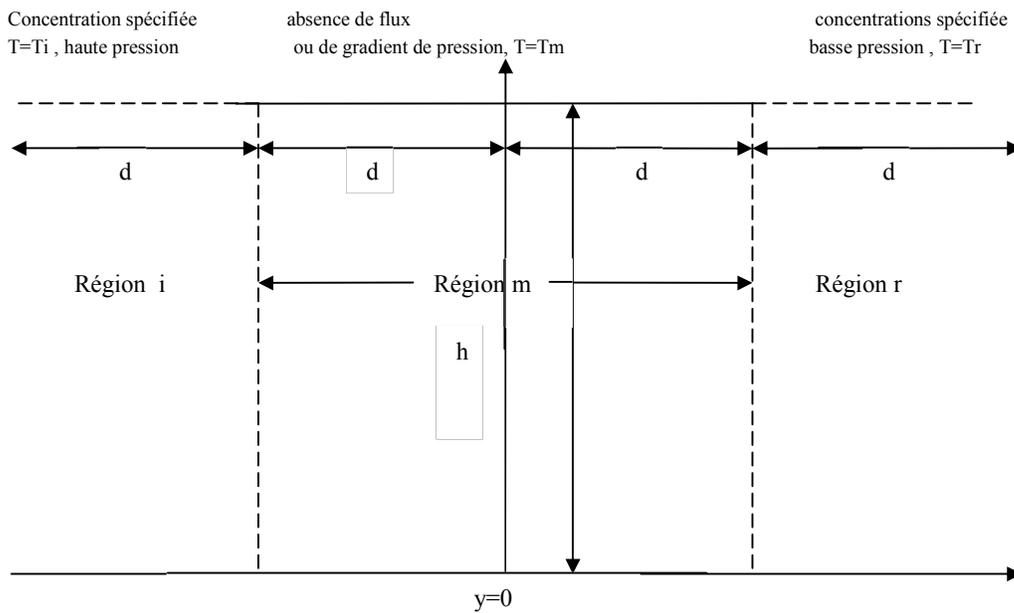


Figure 4.4 GDL

Le processus physique est le même que le phénomène de transport de l'eau dans un milieu poreux non saturé et est régi par la loi de Richard :

$$V_\theta = K_\theta(\theta)\nabla\psi \tag{1}$$

- V_θ : conductivité hydraulique
- ψ : potentiel
- θ : fraction volumique de l'eau

La loi de conservation :

$$\nabla \cdot V_\theta = \Sigma$$

Σ : terme source qui tient compte de la condensation de l'eau.

En combinant les deux formules :

$$\nabla \cdot (-K_\theta(\theta)\nabla\psi) = \Sigma \tag{2}$$

Le coefficient de diffusion de l'eau : $D_\theta(\theta) = k_\theta(\theta) \frac{d\psi}{d\theta}$ (3)

Il vient :

$$\nabla [D_\theta(\theta)\nabla\theta] + \Sigma = 0 \tag{4}$$

Le taux d'évaporation est :

$$\text{Evapor.} \propto \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)\theta \dots\dots\dots(5)$$

E_A : énergie d'activation

R : constante des gaz parfait

Le taux de condensation

$$\text{Condens.} \propto \bar{v} \dots\dots\dots(6)$$

\bar{v} : concentration relative de la vapeur d'eau

Relation de Stefan- Maxwell

En introduisant les constantes de proportionnalité, β_θ pour l'évaporation et β_v pour la condensation il vient :

$$\beta_\theta \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)\theta + \beta_v v = \Sigma \dots\dots\dots(7)$$

=

$\Sigma \quad 7$

$$\nabla[D_\theta(\theta)] - \beta_\theta \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)\theta + \beta_v v = 0 \dots\dots\dots(8)$$

8

Pour le cas du gaz oxygène la loi de Stefan-Maxwell est appliquée :

$$\nabla[D_u(\theta)\nabla u - uV_g] = 0 \dots\dots\dots(9)$$

V_g : vitesse de la phase gazeuse.

D_u : coefficient de diffusion de l'oxygène.

L'évolution de la phase vapeur est donnée par :

$$\nabla[D_v(\theta)\nabla v - vV_g] + v_l[\beta_\theta \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)\theta + \beta_v v] = 0 \dots\dots\dots$$

(10)

D_v : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau.

Pour la température en plus de la loi Fourier pour la conduction ,on tient compte de la chaleur latente de condensation

$$\nabla[k(\theta)\nabla T] + \rho_{\theta}L[\beta_{\theta} \exp(-\frac{E_A}{RT})\theta + \beta_v v] = 0 \dots\dots\dots$$

(11)

k : conductivité thermique.

ρ_{θ} : densité de l'eau liquide.

L : chaleur latente.

Dans le cas où seul la phase vapeur est présente, tous les termes en θ sont négligés.

La loi de Darcy :

La couche de diffusion étant un milieu poreux, la vitesse est donnée par loi de Darcy

$$V_g = -\frac{k_g(\theta)}{\mu} \nabla p \dots\dots\dots(12)$$

k_g : perméabilité de la couche de diffusion GDL

L'équation de continuité :

$$\nabla V_g = 0 \text{ combinée avec l'équation (11)}$$

On obtient :

$$\frac{k_g(\theta)}{\mu} \nabla \cdot \nabla p = 0 \quad 11$$

L'équation (7) devient :

$$D_u \nabla[\nabla(u) - \nabla(uV_g)] = 0$$

$$\nabla u + \frac{k_g(\theta)}{\mu D_u} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 0$$

Pour la vapeur :

$$\nabla v + \frac{k_g(\theta)}{\mu D_v} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 0$$

Et l'équation (9) devient :

$$\nabla^2 T = 0$$

En introduisant les variables sans dimensions :

$$x = \frac{x}{d}, \quad y = \frac{y}{d}, \quad X_{H_2O} = \frac{v}{v_i}, \quad X_{O_2} = \frac{u}{u_i}$$

$$T = \frac{T - T_\infty}{T_l - T_\infty}$$

$$p = \frac{2p - (p_l - p_r)}{p_l + p_r}$$

En tenant compte du paramètre de perturbation $\varepsilon = h/d \ll 1$, on aboutit au système d'équations :

$$(\varepsilon^2 \frac{\partial^2 X_{O_2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_{O_2}}{\partial y^2}) + P_e (\varepsilon^2 \frac{\partial X_{O_2}}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial X_{O_2}}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y}) = 0$$

$$P_e = \frac{k_g (p_l - p_r)}{2\mu D_u} : \text{Nombre de Peclet.}$$

Une équation similaire pour la vapeur d'eau où X_{O_2} est remplacée par X_{H_2O} , et pour la

$$\text{température : } \varepsilon^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Dans le cas où la convection est négligée, la vapeur est sous forme de vapeur, la pression

constante et flux constant on a l'ensemble des équations :

$$\varepsilon^2 \frac{\partial^2 X_{O_2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_{O_2}}{\partial y^2} = 0$$

$$\varepsilon^2 \frac{\partial^2 X_{H_2O}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_{H_2O}}{\partial y^2} = 0$$

$$\varepsilon^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Ou sous forme discrète :

$$\varepsilon^2 \left[\frac{X_{O_2}(i+1, j) - 2X_{O_2}(i, j) + X_{O_2}(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \right] + \frac{X_{O_2}(i, j+1) - 2X_{O_2}(i, j) + X_{O_2}(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

$$\varepsilon^2 \left[\frac{X_{H_2O}(i+1, j) - 2X_{H_2O}(i, j) + X_{H_2O}(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \right] + \frac{X_{H_2O}(i, j+1) - 2X_{H_2O}(i, j) + X_{H_2O}(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

$$\varepsilon^2 \left[\frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \right] + \frac{T(i, j+1) - 2T(i, j) + T(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

Chaque équation constitue un système linéaire facile à résoudre par une simple méthode itérative.

En examinant les conditions aux limites avec une pression constante, le point $x=0$ est un axe de symétrie, en utilisant la région $-2 \leq x \leq 0$:

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, y) = 0$$

$$\frac{\partial X_{O_2}}{\partial x}(0, y) = 0$$

$$\frac{\partial X_{H_2O}}{\partial x}(0, y) = 0$$

A l'interface cathode-couche de catalyse, un flux constant est assumé :

$$D_u \frac{\partial u}{\partial n} = -D_u \frac{\partial u}{\partial y}(x, 0) = -q_u \text{ pour l'oxygène}$$

Une équation similaire pour la vapeur d'eau :

$$D_v \frac{\partial v}{\partial n} = -D_v \frac{\partial v}{\partial y}(x, 0) = -q_v$$

Pour la température :

$$k_c \frac{\partial T}{\partial y}(x, 0) = -q_r$$

En réarrangeant on obtient finalement :

$$D_u \frac{u_l}{h} \frac{\partial X_{O_2}}{\partial y}(x, 0) = q_u$$

$$\frac{\partial X_{O_2}}{\partial y}(x, 0) = q_u \varepsilon^2$$

$$q_u \varepsilon^2 = \frac{q_u h}{D_u u_l}$$

$$\frac{\partial X_{H_2O}}{\partial y}(x, 0) = -q_v \varepsilon^2$$

$$-q_v \varepsilon^2 = \frac{q_v h}{D_v v_l}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x, 0) = -q_r$$

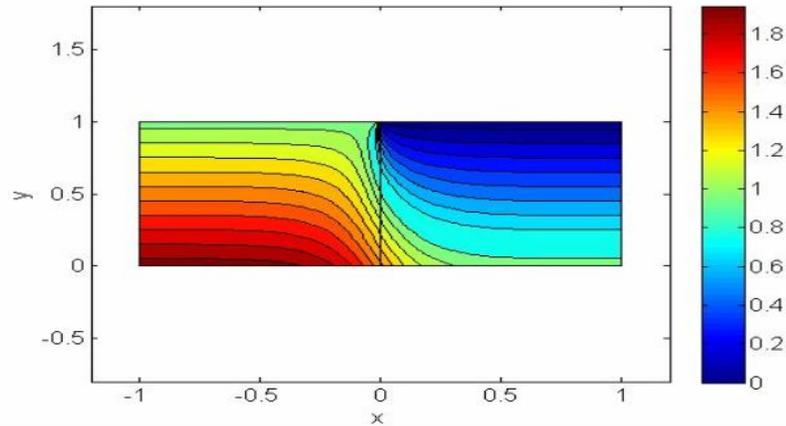
$$q_r = \frac{q_r h}{k_c (T_l - T_m)}$$

Pour déterminer les régions sursaturées on utilise l'équation de saturation S :

$$S(X_{H_2O}, T) = \frac{X_{H_2O} - X_{H_2O}^{sat}(T)}{X_{H_2O}^{sat}(T)}$$

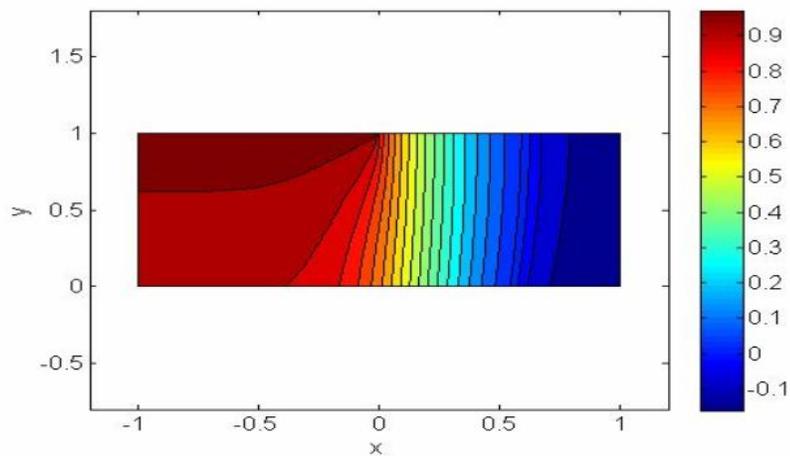
Si $S > 0$ alors l'eau liquide est présente.

CHAPITRE 5 RESULTATS ET DISCUSSIONS



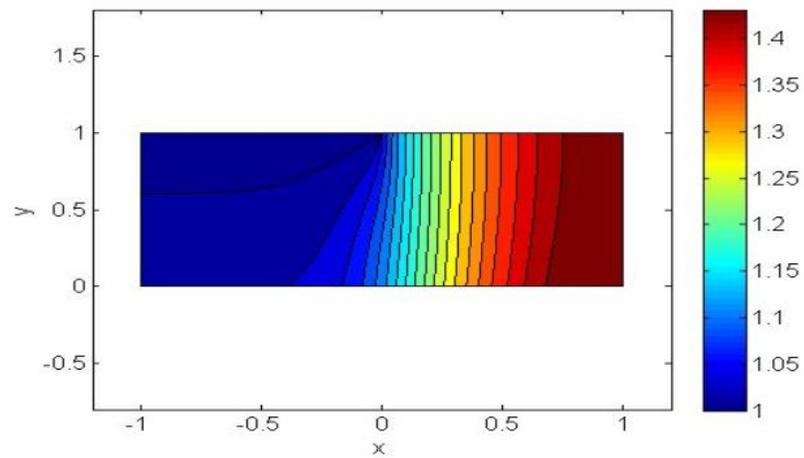
Profil de champ de température pour une valeur de $\varepsilon = 0,2$
Dans la couche diffusion coté cathode

La température adimensionnelle définie auparavant démunie depuis l'interface avec la couche de catalyse jusqu'au niveau supérieur dont le côté gauche est ouvert sur le canal des gaz. Le facteur géométrique ε est défini par h/d .



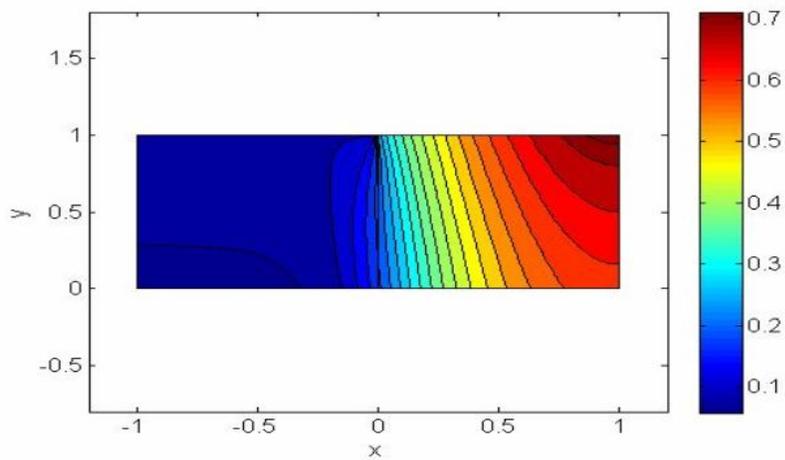
Profil de champ de concentration pour l'oxygène $\varepsilon = 0,2$

La concentration d'oxygène est maximale à l'arrivée (interface canal GDL) et démunie suite à la réaction avec l'hydrogène.



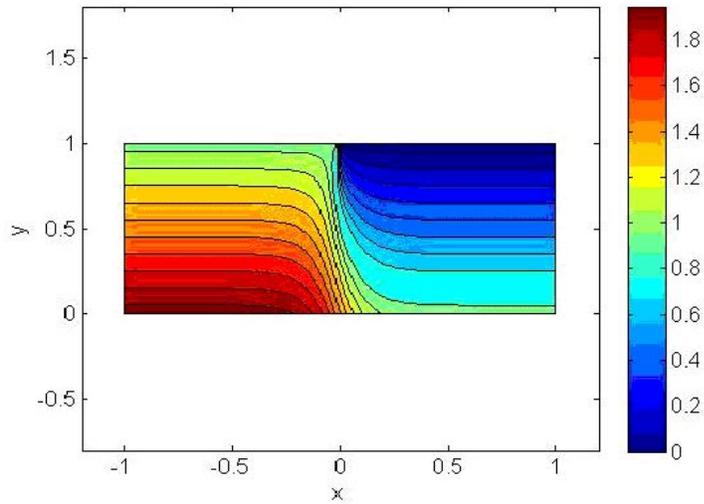
Profil concentration pour la vapeur d'eau $\varepsilon = 0,2$

Pour la vapeur d'eau on remarque une forte concentration loin du côté ouvert sur le canal et croit jusqu'à l'extrémité de la couche de diffusion. due à production d'eau par réaction chimique à la cathode.

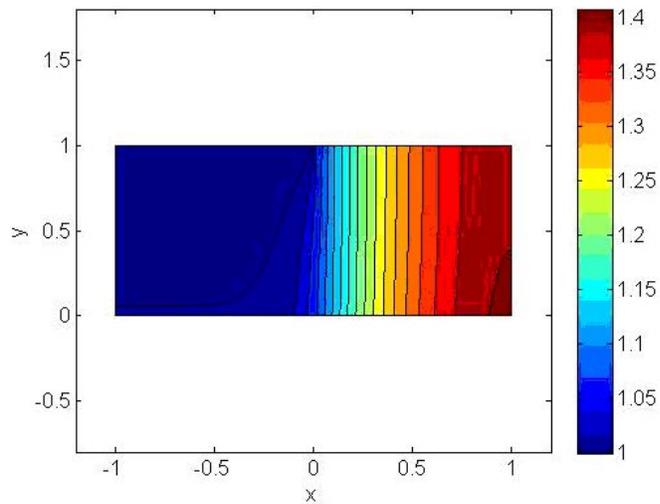


PrProfil de saturation $\varepsilon = 0,2$

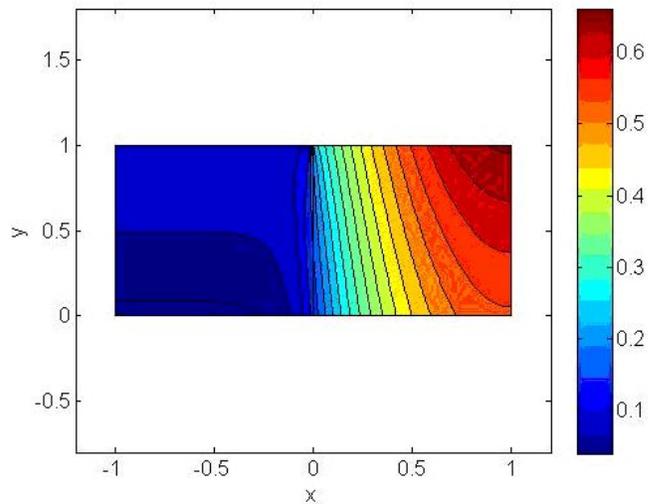
En accord avec le champ de vapeur, la saturation en eau est faible coté entrée interface canal-GDL et croit progressivement à droite interface sortie canal-GDL



Profil de température adimensionnelle pour $\varepsilon = 0,13$
 Pas de changement notable pour la température avec la nouvelle configuration géométrique caractérisée par le facteur ε .

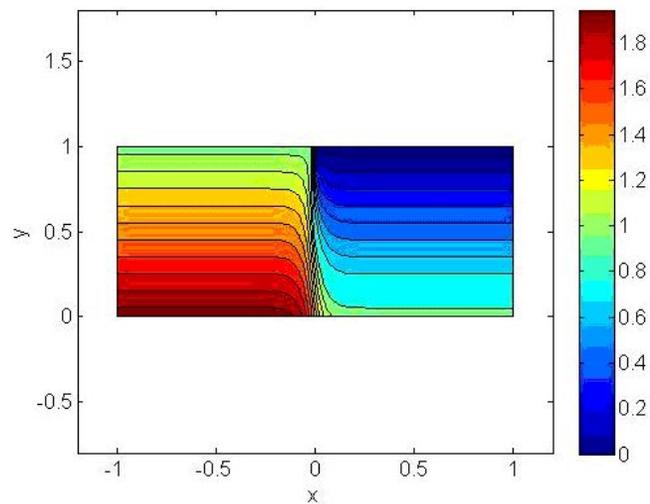


Profil de concentration pour la vapeur pour $\varepsilon = 0,13$
 Le profil de concentration pour la vapeur change légèrement pour la nouvelle de ε , forte concentration sortie interface membrane-couche da catalyse



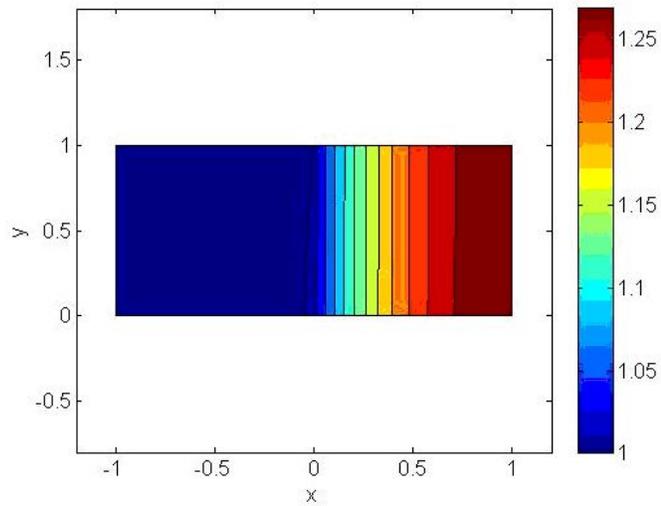
Profil de champ de saturation pour $\varepsilon = 0,13$

Leger changement pour le profil de saturation, on observe une diminution de sa valeur à la sortie et toujours inférieur à 1 c'est-à-dire pas de liquide.

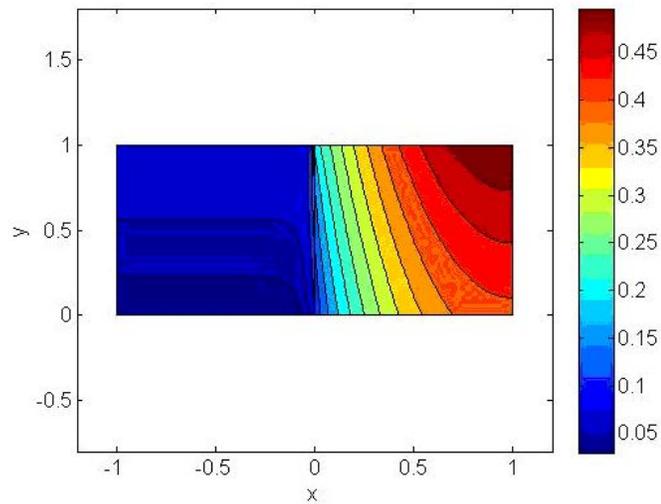


Champ de température pour $\varepsilon=0,08$

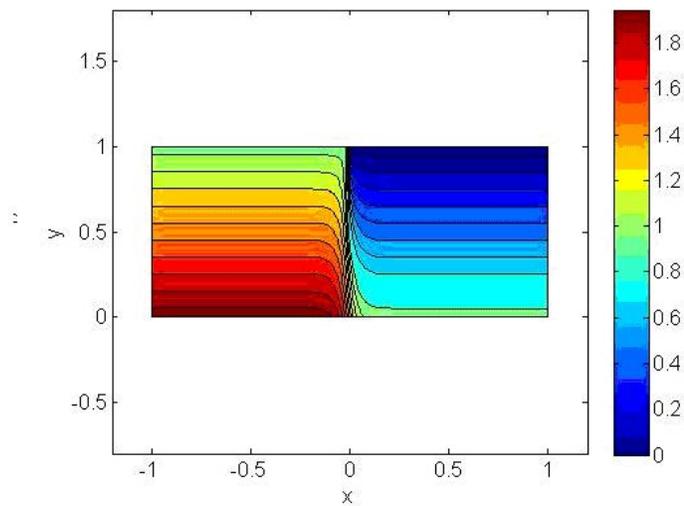
Le profil de température pour la nouvelle configuration est l'égerment modifié au centre de la couche de diffusion, on observe un fort gradient de T.



Champ de concentration de vapeur pour $\varepsilon=0,08$
 Pour la nouvelle configuration ε , le profil de concentration de vapeur est uniforme coté ouvert sur le canal et légère diminution à la sortie

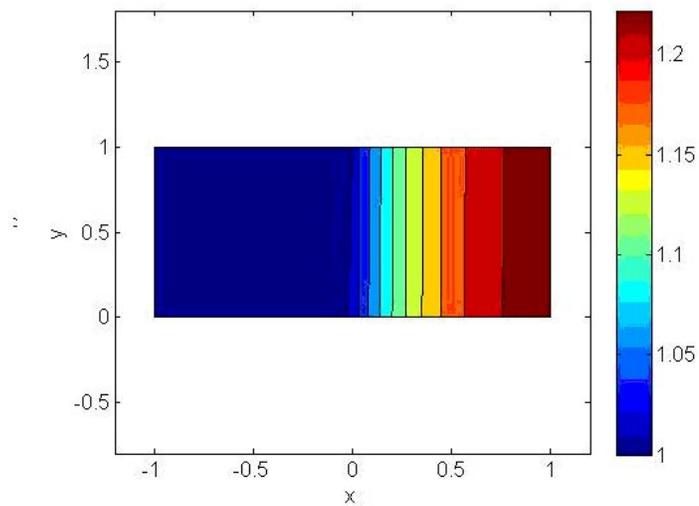


Champ de saturation pour $\varepsilon=0,08$
 En accord avec le champ de vapeur, S est démunie à la sortie et plus fort à l'interface canal – couche de diffusion



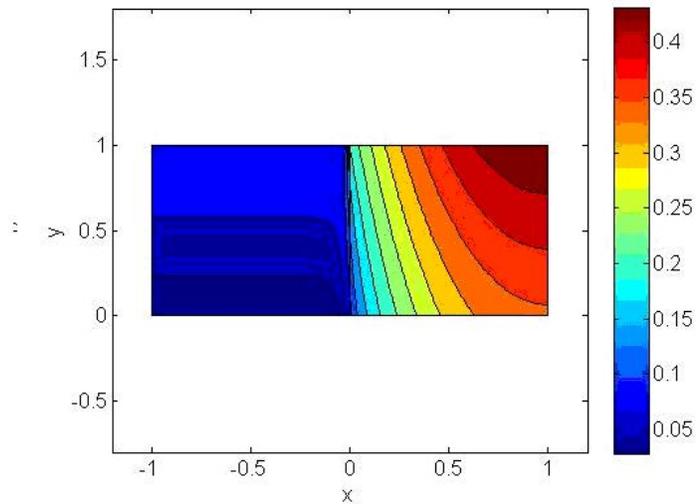
Champ de température pour $\varepsilon=0.05$

Le profil de température pour la nouvelle configuration est l'égerment modifié avec un fort gradient de température au centre.



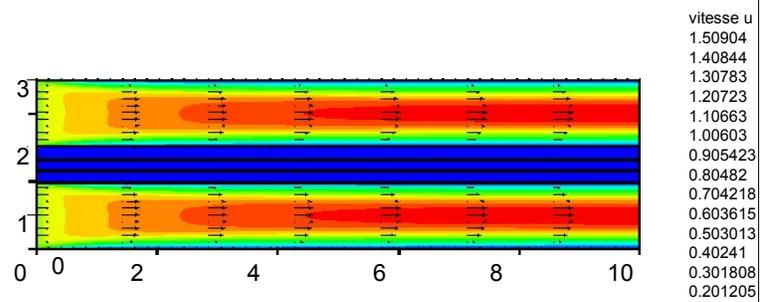
Profil de concentration de vapeur pour $\varepsilon=0.05$

Un champ toujours plus uniforme coté ouvert sur canal et légère diminution de production de vapeur pour cette configuration.

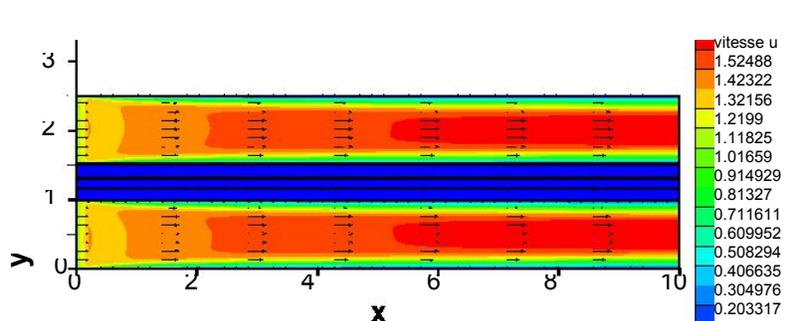


Profil de saturation pour $\varepsilon=0.05$

La valeur de saturation faibles à l'entrée et augmente à la sortie suite à la production par réaction chimique.



Re = 200, P = 1, hc = 1.



$Re = 600, P = 1, hc = 1.$

Figure 1 : Répartition du champ de vitesse pour différentes valeurs du nombre de Reynolds.

La figure 2 présente la vitesse horizontale (U) sous forme de profils transversaux pour quatre positions le long de la pile et pour deux valeurs du nombre de Reynolds. On remarque que les profils ont une forme parabolique pour les deux valeurs du nombre de Reynolds. On distingue que l'épaisseur de la couche limite est plus faible quand Re est petit.

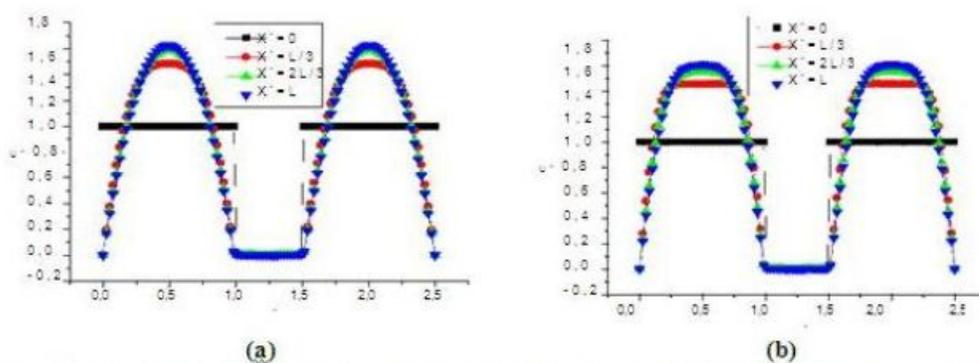


Figure 2 : Profil de vitesse horizontale pour différentes positions de la longueur (x) de la pile
pour : (a) $Re = 200$, (b) $Re = 600$.

Les figures 3 et 4 montrent l'effet de la pression d'admission et la hauteur du canal sur la répartition des champs de vitesse. D'après la figure 5, on constate que l'effet de la pression sur la vitesse d'écoulement est important que l'effet de la hauteur du canal.

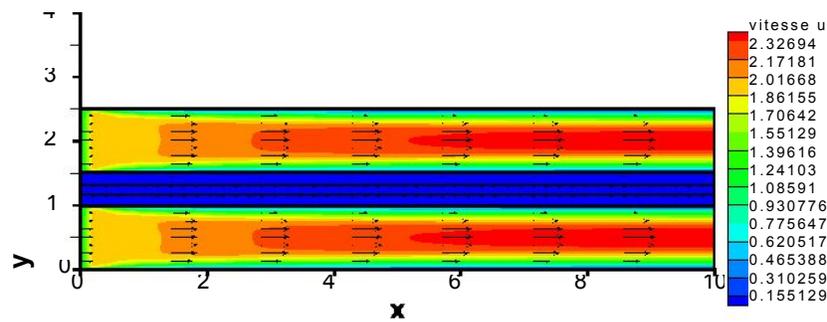


Figure 3 : Répartition du champ de vitesse pour une pression d'entrée $P=3$

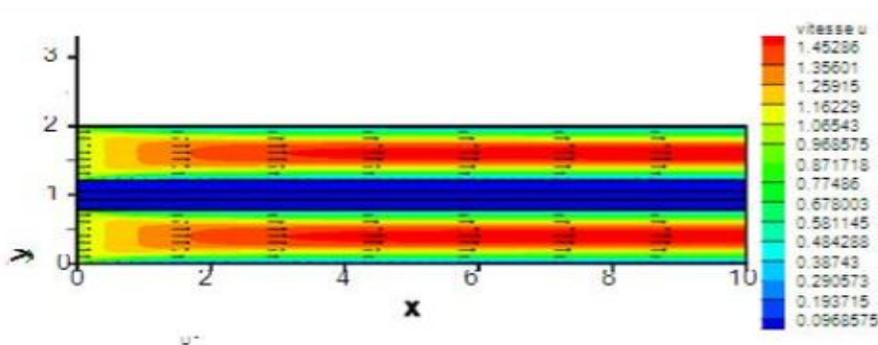


Figure 4 : Répartition du champ de vitesse pour une hauteur du canal $h_c=0.75$

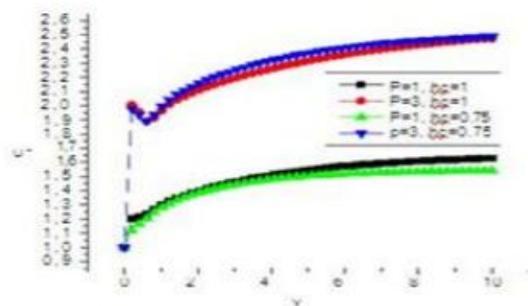


Figure 5 : profil de vitesses horizontales au milieu du canal suivant la longueur de la pile pour différentes valeurs de pression d'entrée et de hauteur de canal.

I.2 Profil du champ de vitesse verticale:

Les profils de vitesse dans toutes les parties de la cellule pour deux valeurs différentes du nombre de Reynolds sont montrés sur la figure 6, la vitesse prend des valeurs faibles dans toute la cellule sauf à l'entrée elle prend des valeurs négatives, donc, on peut dire qu'il a un décollement des gaz.

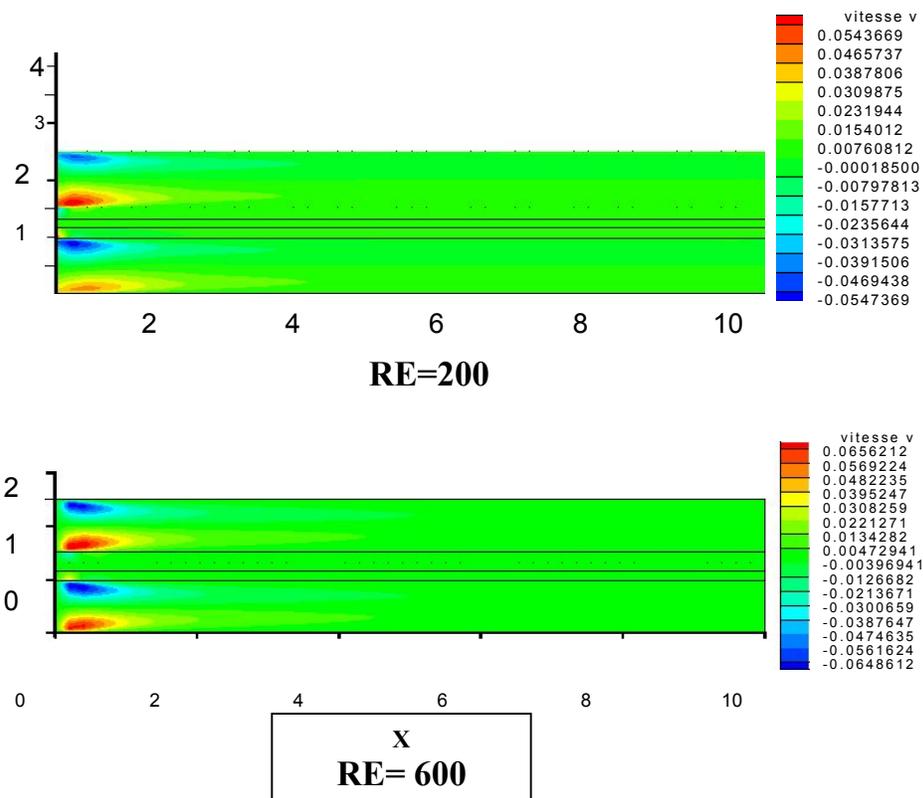


Figure 6 : Répartition de champs de vitesses verticales P=1, hc=1

I.3. Champs de pression:

La distribution des champs de pression présentée dans la figure 7, nous montre presque la linéarité de cette grandeur scalaire le long du canal, qu'est due à la faible hauteur de ce dernier.

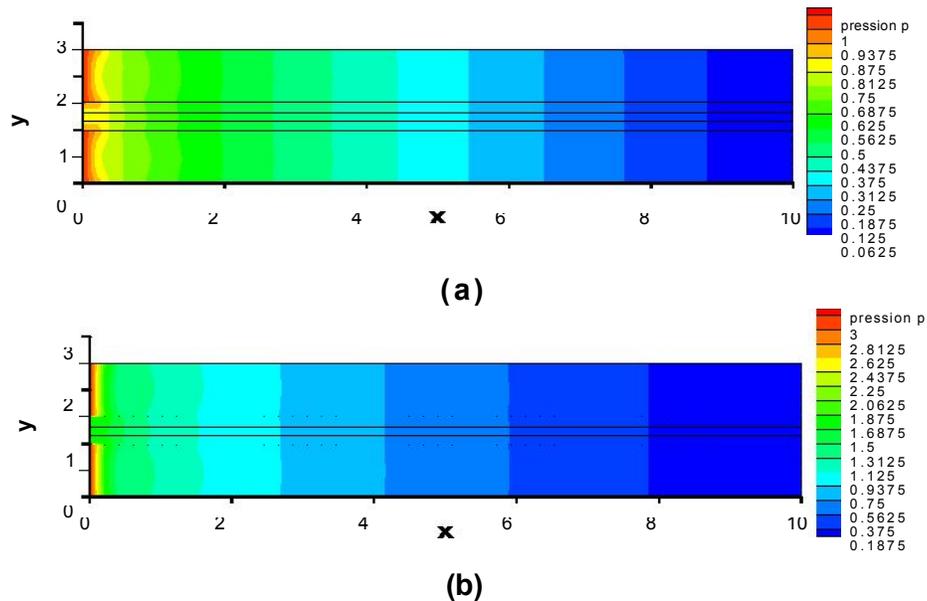


Figure 7 : Distribution des champs de pression, pour une pression d'entrée (a) $P = 1$, (b) $P = 3$.

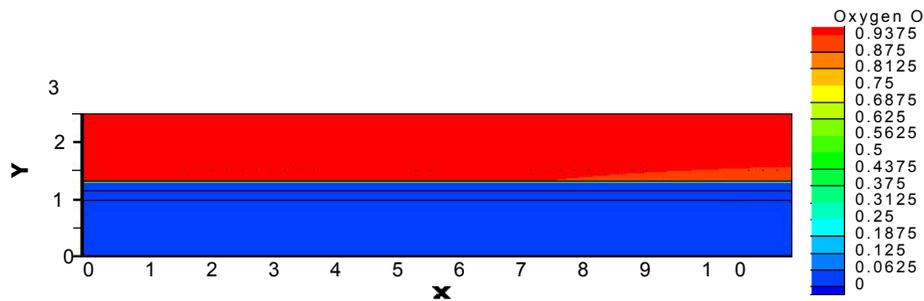
II. Effet de la pression d'entrée du canal et du nombre de Reynolds sur la consommation des réactifs.

II.1. Profils des champs de distribution d'oxygène

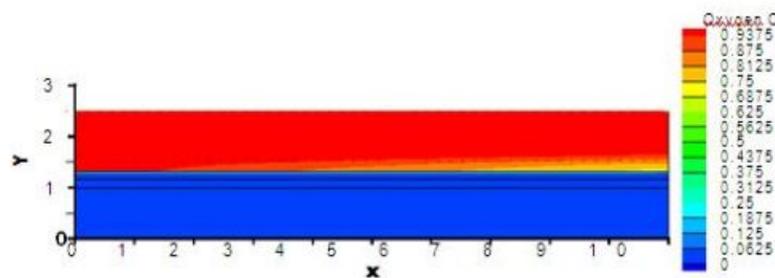
La limitation de transport d'oxygène a un grand effet sur la performance de la cellule de carburant PEM. Par conséquent, il est important de comprendre le comportement du transport d'oxygène dans le canal cathodique, la GDL, et la couche de catalyseur. Les figures 8 et 9 montrent la distribution d'oxygène dans tous les éléments de la cellule pour deux valeurs de pression d'admission $P = 1$ et $P = 2$, respectivement, et pour différents valeurs du nombre de Reynolds. Dans tous les cas, la concentration d'oxygène diminue graduellement de l'admission à la sortie, cela est dû à la consommation de l'oxygène à la couche de catalyseur. D'après ces figures,

on constate la concentration d'oxygène près de la sortie de la cellule est plus faible pour le nombre de Reynolds élevé par rapport a celui faible et cela pour les deux valeurs de pression.

- **Figure 8** : champs de distribution d'oxygène pour différents valeur du nombre de Reynolds.



(a)



(b)

Figure 9 : champs de distribution d'oxygène pour différents valeurs du nombre de Reynolds (a) $Re = 200$, (b) $Re = 600$.

II.2. profils de consommation et de concentration d'oxygène

Les champs de consommation et de concentration dans la couche catalyseur de l'oxygène sont présentés dans les figures 10 et 11 respectivement sous forme de profils en fonction de x pour différentes valeurs de pression et du nombre de Reynolds. La consommation de l'oxygène est clairement illustrée (Fig 10) et montre un gradient important de concentration entre Les deux extrémités de la pile (Fig 11).

La consommation d'oxygène augmente clairement avec

l'augmentation du nombre de Reynolds, par conséquent une diminution de concentration dans la couche catalyseur. On constate pour un nombre de Reynolds faible, la distribution d'oxygène dans le catalyseur est homogène. Les résultats obtenus montrent que la consommation d'oxygène est légèrement élevée pour $P = 3$ surtout près de la sortie de la pile.

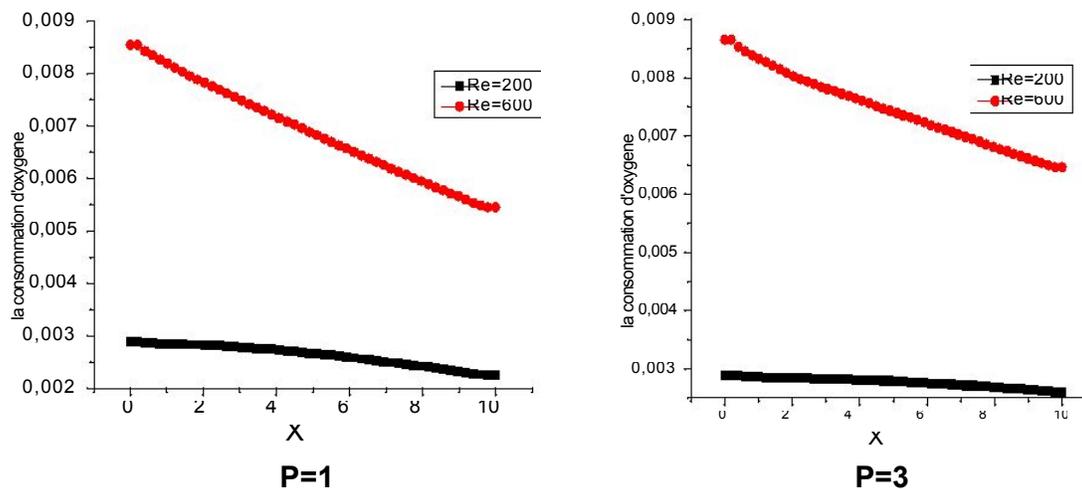


Figure 10 : profils de consommation d'oxygène pour différents valeurs de pression et de nombre

de Reynold.

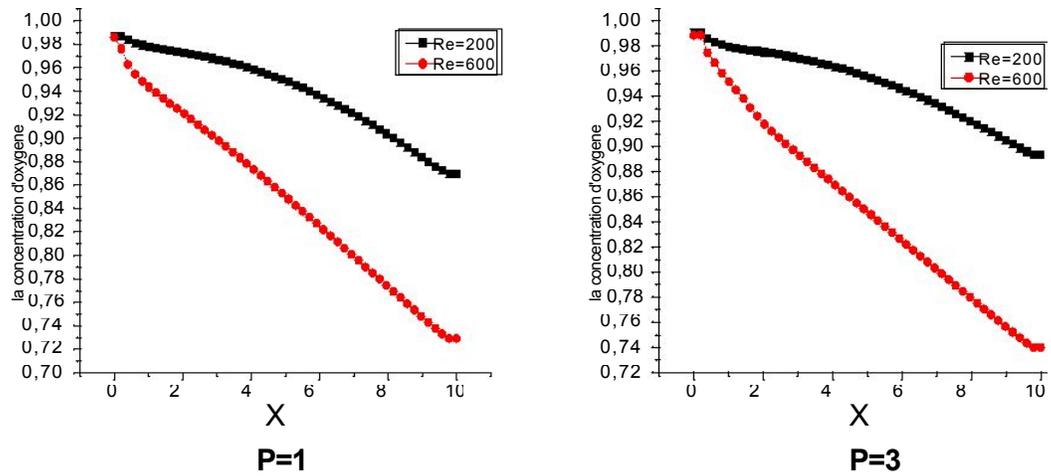


Figure 11: profils de concentration d'oxygène dans la couche catalyseur pour différents valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

CONCLUSION

Pour les différents profils de température l'influence de configuration caractérisée par ε montre un fort gradient au centre pour les faibles valeurs du facteur ε . Pour la vapeur une forte concentration à l'interface canal – couche de diffusion mais démunie quand ε diminue.

De même pour le champ de saturation, il varie lentement à l'entrée puis rapidement à la sortie mais toujours à l'unité les meilleures valeurs sont obtenues pour $\varepsilon = 0.2$, on peut suggérer des valeurs plus petites pour avoir des valeurs de S supérieures à 1, c'est-à-dire apparition de l'eau liquide nécessaire à l'hydratation du milieu.

Pour l'oxygène est toujours maximale à l'interface canal- GDL (arrivée) et faible à la sortie suite à la réaction avec l'hydrogène.

Pour le champ dynamique la vitesse d'entrée U_{in} est de l'ordre de 0.01, ceci pour maintenir le caractère laminaire de l'écoulement, et par suite l'hypothèse de négliger la convection dans la couche de diffusion GDL est acceptable.

La température influe sur le champ de saturation S , car quand T croît S décroît, pour provoquer l'apparition de liquide il est nécessaire de diminuer T en utilisant un courant de refroidissement à l'interface canal-plaque bipolaire.

REFERENCES

1. Tien-Chien Jen , Tuanzhou Yan , Shih-Hung Chan ,Chemical reacting phenomena in PEM fuel cell ,International Journal of Heat and Mass Transfer 4157-4168.
2. Mehdi seddiq , Hassan khaleghi , Masaud mirzaei , Numerical analysis of gas cross-over through the membrane in a proton exchange membrane fuel cell , journal of power sources 161(2006)371-379
3. E.Carcadea , H. Ene , D.B. Ingham , R Lazar , L. Ma , M. Pourkashanian , I. Sefanescu , Numerical simulation of mass and charge transfer for a PEM fuel cell , International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2005) 1273-1280
4. H.R. shabgard and M.J. Kermani, An Enhanced Numerical Method for solving Multi-Component Flow in the Cathode Electrode of PEM Fuel Cells , Department of Mechanical Engineering ,Amirkabil University of technology (Tehran Polytechnic) Tehran , Iran
5. M. ELSayed Youssef , Khairia E.AL- Nadi , Moataz H.Khalil , Lumped Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), International.J. Electrochem. Sci., 5 (2010) 267-277
6. Frano Barbir , PEM Fuel Cells , Theory and Practice , Elsevier academic press .2005
7. Marie-Cécile PERA, Systèmes Pile à Combustible Enjeux – Technologies Applications – Perspectives, 2004/2005.
- 8.Z.H Wang, C.Y Wang, K.S Chen, Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cell

- 9.** Julien Ramousse, transferts couples masse-charge-chaleur dans une cellule de pile à combustible à membrane polymère, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (*INPL*), novembre 2005.
- 10.** Wael ALIMI, Ridha CHOUIKH, Amenallah GUIZANI, modélisation des transferts de masse et de charges au sein d'une cellule à combustible de type pemfc, *13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007*
- 11.** Hocine BEN MOUSSA, Djamel HADDAD, Kafia OULMI, Bariza ZITOUNI, modélisation numérique de l'écoulement turbulent dans le canal et la couche de diffusion cathodique d'une pile a combustible (PEMFC), *Université de BATNA (Algérie)*.
- 12.** K. Kordesch et G. Simader, *Fuels Cells and Their Applications*, ed VCH (1996). *DMFC Fuel Cell Handbook* (5ème édition), EG&G Services, Parson, Inc. Sciences Applications International Corporation (CD ROM).
- 13.** Méziane Boudellal , *La pile à combustible structure, fonctionnement et applications*
Donod 2007
- 14.** James Larminie, Andrew Dicks, *fuel cell Systems explained*, second Edition, John wiley and sons Ltd, the Atrium, southernGate, Chichester, West sussex p0198SQ, England 2003.
- 15.** F. Barreras, A. Lozano, L. Valiño, C. Marí , A. Pascau, flow distribution in a bipolar plate of a proton exchange membrane fuel cell: experiments and numerical simulation studies, *Journal of Power Sources* 144 (2005) 54–66.
- 16.** H.C. Liu, W.M. Yan, C.Y. Soong, Falin Chenc, H.S. Chud , Reactant gas transport and cell performance of proton exchange membrane fuel cells with tapered flow field design, *Journal of Power Sources* 158 (2006) 78–87.

17.Jenn-Kun Kuo, Cha'o-Kuang Chen, The effects of buoyancy on the performance of a PEM fuel cell with a wave-like gas flow channel design by numerical investigation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 4166–4179.

Wael ALIMI, Ridha CHOUIKH, Amenallah GUIZANI, modélisation des transferts de masse et de charges au sein d'une cellule à combustible de type pemfc, *13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007*.

18.Sungho Lee, Heeseok Jeongb, Byungki Ahnb, Taewon Limb, Youngjin Sona, Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances, *international journal of hydrogen energy* 33 (2008) 5691 – 5696.

19.Shiang-Wuu Perng , Horng-Wen Wub, Tswen-Chyuan Jue , Kuo-Chih Cheng, Numerical predictions of a PEM fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel, *Applied Energy* xxx (2008) xxx–xxx.

20.Shiang-Wuu Perng , Horng-Wen Wu, Heat transfer in a PEMFC flow channel, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 3579–3594.

21.Wei-Mon Yan, Hui-Chung Liu , Chyi-Yeou Soong, Falin Chen, C.H. Cheng, Numerical study on cell performance and local transport phenomena of PEM fuel cells with novel flow field designs, *Journal of Power Sources* 161 (2006) 907–919.

22.Dewan Hasan Ahmed, Hyung Jin Sung, Effects of channel geometrical configuration and shoulder width on PEMFC performance at high current density. *Journal of Power Sources* 162 (2006) 327–339.

23.M.G. Santarelli, M.F. Torchio, Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC, *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 40–51.

24.Wei-Mon Yan, Hui-Chung Liu, Chyi-Yeou Soong, Falin Chen, C.H. Cheng, Numerical study on cell performance and local transport phenomena of PEM fuel cells with novel flow field designs, *Journal of Power Sources* 161 (2006) 907–919.

25.Yuh Ming Fernga,, Ay Su, A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance, , International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 4466 4476

26. Numerical heat transfer and fluid flow, Suhas V. Patankar, Hemisphere publishing corporation.