



MÉMOIRE

Présenté au

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ENERGETIQUE APPLIQUEE

ECOLE DOCTORALE DES ENERGIES RENOUVELABLES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme

MAGISTÈRE EN PHYSIQUE

Option : Energies Renouvelables

Par

BELKACEM BOUZIDA SIHEM

Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC.

Soutenue publiquement le : 02/02/2011.....devant le jury composé de :

-BENMOUSSA	HOCINE	Pr	Université Batna	Président
-ZEROUAL	MOSTEFA	MCA	Université Batna	Rapporteur
-MOUMMI	NOUREDDINE	MCA	Université Biskra	Examineur
-AGOUDJIL	BOUDJAMAA	MCA	Université Batna	Examineur .

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant ces deux années d'études.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur [Zeroual Mostefa](#), le docteur au département de physique d'avoir accepté d'être le directeur de ce mémoire. Je le remercie pour m'avoir proposé un sujet de recherche passionnant, pour ces conseils et pour la relecture de ce manuscrit.

J'exprime ainsi toute ma reconnaissance à monsieur [Ben Moussa Hocine](#), professeur au département de mécanique à l'université de Batna, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de soutenance.

Je suis extrêmement honorée que monsieur [Moummi Nouredine](#), docteur à l'université de Biskra, et monsieur [Agoudjil Boudjamaa](#), docteur à l'université de Batna, aient accepté d'être examinateurs de ce travail.

Mes plus vifs remerciements aux personnes qui ont contribué au bon déroulement et à l'aboutissement de ce mémoire.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE 1:

Généralité sur les Piles à Combustible

1. Introduction.....	4
2. Historique des piles à combustible	4
3. Fonctionnement générale d'une pile à combustible.....	5
4. Les différents types de piles à combustible.....	6
5. Pile à combustible à membrane échangeuse de proton.....	8
5.1. Principe de fonctionnement	8
5.2. Structure d'une cellule et description détaillé des éléments de cœur	9
5.3. La géométrie des canaux	13
5.4. Forme, dimensions, et espacement du canal.....	15
6. Performance	16
7. Les applications d'une pile PEM	18
8. Les avantages et les inconvénients d'une pile à combustible.....	18

CHAPITRE 2

Recherche bibliographie

1. Effet des paramètres physiques.....	21
2. Effet de la géométrie des canaux.....	24

CHAPITRE 3

Etude Numérique

1. Introduction	32
2. Le modèle physique.....	32
3. Hypothèses.....	33
4. Modèle mathématique.....	34
5. Equation de pression.....	39
6. Conditions initiales et aux limites.....	41
7. Résolution des équations par la méthode des volumes finis.....	43
7.1. Principe de la méthode des volumes finis.....	43

7.2.	Application à l'intégration d'une équation de transport-diffusion.....	45
7.3.	Discrétisation des différents termes de l'équation de transport-diffusion..	46
7.4.	Discrétisation de l'équation de pression.....	46
7.5.	Résolution du système d'équations.....	48

CHAPITRE 4

Résultats et discussions

I.	Champs dynamique.....	53
I.1.	Profils de la vitesse horizontal.....	53
I.2.	Profils de la vitesse vertical.....	56
I.3.	Champ de pression.....	57
II.	Effet de la pression d'entrée du canal et de nombre de Reynolds sur la consommation des réactifs.....	57
II.1.	Profils des champs de distribution d'oxygène.....	57
II.2.	profils de consommation et de concentration d'oxygène	59
II.3.	Profils des champs de distribution d'hydrogène.....	61
II.4.	profils de consommation et de concentration d'hydrogène.....	62
II.5.	Profils des champs de distribution de l'eau.....	63
II.6.	profils de production et de concentration d'eau.....	65
III.	Effet de la hauteur du canal sur la consommation des réactifs.....	66
III.1.	Profils des champs de distribution d'oxygène.....	66
III.2.	profils de consommation et de concentration d'oxygène.....	68
III.3.	Profils des champs de distribution d'hydrogène.....	69
III.4.	profils de consommation et de concentration d'hydrogène.....	70
III.5.	Profils des champs de concentration de l'eau.....	71
III.6.	profils de production et de concentration de l'eau	73
	Conclusion.....	75

Nomenclature

$a j^{ref}_0$	Densité de courant volumique de référence	[A/m ³]
C_{ref}	Concentration molaire de référence	[mole/m ³]
C_k	Concentration de l'espèce k	[mole/m ³]
D_k	Coefficient de diffusion de l'espèce k	[m ² /s]
D_k^{eff}	Coefficient de diffusion effectif de l'espèce k	[m ² /s]
F	Constante de Faraday	[C/mole]
h_c	Hauteur du canal	[m]
h_d	Hauteur de la couche de diffusion	[m]
h_m	Hauteur de la membrane	[m]
J_a	Courant volumique anodique	[A/m ³]
J_c	Courant volumique cathodique	[A/m ³]
K_m	Perméabilité de la membrane	[m ²]
K_d	Perméabilité de la couche de diffusion	[m ²]
K_c	Perméabilité de la couche de catalyseur	[m ²]
k^{eff}	Conductivité thermique effective	[W/m.K]
L	Longueur de la pile	[m]
P	Pression	[N/m ²]
R_{gaz}	Constante des gaz parfaits	[J/mole.K]
S_U	Terme source de l'équation de mouvement	/
S_k	Terme source de l'équation de l'espèce	/
T	Température	[K]
t	temps	[s]
U	Composante longitudinale de la vitesse	[m/s]
V	Composante transversale de la vitesse	[m/s]
x	Abscisse	[m]

y	Ordonné	[m]
Pr	Nombre de Prandtl	/
Re	Nombre de Reynolds	/
Sc	Nombre de Schmidt	/
*	Adimensionnalité	/
ε_d	Porosité de la couche de diffusion	/
ε_c	Porosité de la couche de catalyseur	/
ε_m	Porosité de la membrane	/
σ_m	Conductivité électrique de la membrane	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]
σ_c	Conductivité électrique du catalyseur	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]
α_a	Coefficient de transfert anodique	[V]
α_c	Coefficient de transfert cathodique	[V]
η_a	Surtension d'activation de l'anode	[V]
η_c	Surtension d'activation de la cathode	[V]
ρ	Masse volumique	[Kg.M-3]

Introduction générale

Introduction

L'énergie est aujourd'hui un problème majeur pour notre civilisation : la demande croissante nous conduit vers un épuisement certain des ressources naturelles, alors que nous en sommes plus que jamais dépendants, c'est pourquoi il est nécessaire de trouver des alternatives crédibles pour les années futures, nous assistons ainsi depuis quelques années au développement de nouveaux moyens de production dits « propre ». En effet, l'environnement est également au cœur de nos préoccupations, du fait d'un problème de pollution sans précédent causé par une utilisation exagérée des ressources. Ce fait est aujourd'hui reconnu, tant par les scientifiques que par les industriels, à quelques nuances chronologiques près et la solution c'est de prédire à d'autres sources d'énergies renouvelables et nouvelles. Renouvelables, car inépuisables, nouvelles, car même si ses sources d'énergie existent depuis la nuit des temps, mais leurs exploitations techniques ne sont révélées qu'à la fin du dix-neuvième siècle pour certaines.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

L'hydrogène est régulièrement cité comme un vecteur d'énergie d'avenir car il est très abondant dans notre univers, c'est un carburant non polluant et non toxique dont la combustion ne rejette que de l'eau. Il est léger et énergétique, sa densité d'énergie (120 MJ/kg) est élevée comparée à celle de l'essence (45 MJ/kg). Sa densité d'énergie volumique est en revanche plus faible ; en effet un litre d'essence équivaut, sur le plan énergétique, à 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars.

Pour que la filière hydrogène se développe dans les prochaines années, il faudra lever de nombreux verrous technologiques dans le domaine des piles à combustible, alimentées à

Introduction

l'hydrogène ou au gaz naturel (avec transformation locale en hydrogène), que ce soit pour les applications d'électricité et de chaleur dans les installations fixes, pour les transports collectifs ou individuels ou pour les produits nomades. Les développements et recherches en cours permettent d'envisager des premiers marchés pour la production d'électricité et de chaleur.

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique des carburants par des réactions électrochimiques en électricité. La pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs formant ainsi un stack. L'anode est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol,...) alors que la cathode est alimentée par le comburant (oxygène). Il existe différents types de piles qui se différencient généralement selon la nature de leur électrolyte. Une autre caractéristique utilisée pour classer les piles est leur température de fonctionnement. On distingue en effet les piles à basse température PEMFC, DMFC, AFC (Alkaline Fuel Cell) et PAFC (Phosphoric Acid fuel Cell) qui fonctionnent entre 60 et 100°C et les piles à hautes températures SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) et MOFC (Molten Fuel Cell) qui fonctionnent entre 600 et 1000°C.

En ce qui concerne notre travail, on s'intéresse à une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM). Cette dernière est considérée actuellement comme étant la mieux adaptée pour le secteur d'automobile. Ses points forts sont une dynamique relativement rapide comparée à d'autres types de piles et une température de fonctionnement basse de 70 à 100°C ce qui facilite son intégration dans un véhicule sans isolation thermique spécifique.

Dans cette étude, on a fait une modélisation numérique, bidimensionnelle et transitoire de phénomène de l'écoulement des gaz dans les canaux pour voir son influence sur la consommation des réactifs dans une pile à combustible à membrane échangeuse de protons. De cela, les objectifs de notre travail sont:

- 1- La modélisation mathématique des phénomènes de l'écoulement des gaz dans les différentes parties de la cellule pour les deux cotés anodique et cathodique a été faite.
- 2- Les équations bidimensionnelles et transitoires qui gouvernent les phénomènes physiques sont résolues numériquement par la méthode des volumes finis.
- 3- voir l'effet de la pression, du nombre de Reynolds et de la hauteur du canal sur la consommation des réactifs.

Introduction

Un programme basé sur la méthode des volumes finis a été réalisé pour simuler le système d'équations.

Selon ces objectifs, ce mémoire comporte les chapitres suivants:

Chapitre 1 : présentation générale des différents types des piles à combustible et présentation du modèle physique et électrochimique d'une pile PEMFC en particulier ;

Chapitre 2 : 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 3 : modélisation mathématique des différentes parties de la cellule a été présentée en suite la résolution du système des équations par la méthode des volumes finis a été donnée aussi dans ce chapitre ;

Chapitre 4 : on expose les résultats obtenu dans le plan parallèle au sens de l'écoulement (les champs et les profils), avec leurs discussions. L'effet des paramètres physiques sur la consommation des réactifs a été présenté aussi.

Chapitre 1

Généralités sur les piles à combustible

1. Introduction :

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique de la réaction d'un carburant et d'un oxydant (habituellement hydrogène et l'oxygène) en électricité. Contrairement aux batteries, qui sont des dispositifs de stockage d'énergie, les piles à combustible sont considérés comme une énergie nette, sans émissions des produits polluants et nocifs, mais produisant de l'eau et de la chaleur. Selon la température de fonctionnement, on peut distinguer plusieurs types des piles à combustible, chaque type ayant ses propres caractéristiques.

Nous ne nous intéresserons ici qu'aux piles de type PEMFC. Ce type de pile est actuellement très étudié car les applications sont multiples autant dans le domaine stationnaire que dans le domaine automobile et portable.

2. Historique des piles à combustible

En 1839 William GROVE décrit la première pile à combustible (figure 1). Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène.

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels. Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux (NASA : les années 60, APOLLO : 1968). L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et à améliorer les différents composants de la pile. En 1970, Du Pont met au point la membrane Nafion, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC. Malgré quelques réussites, les piles

Généralités sur les piles à combustible

restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop importants pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France, seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les états Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt.

Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés.

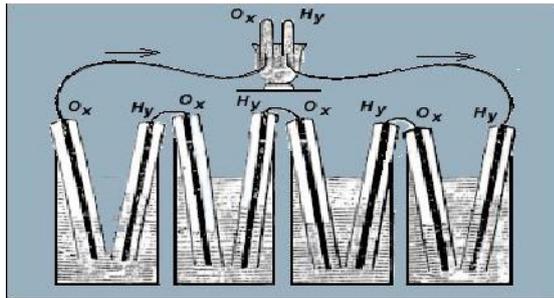


Figure 1 : La pile de W.Grove.

3. Fonctionnement générale d'une pile à combustible

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène (ou méthane) et d'oxygène (figure2).

La réaction d'oxydo-réduction se produit au sein d'un générateur électrochimique élémentaire, appelé cellule ou EME (Electrode-Membrane-Electrode), constitué de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par une membrane, électrolyte solide ou liquide permettant le passage des ions. Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer la

Généralités sur les piles à combustible

réaction d'oxydation de l'hydrogène (ou méthane) d'un côté, la réduction de l'oxygène de l'autre côté.

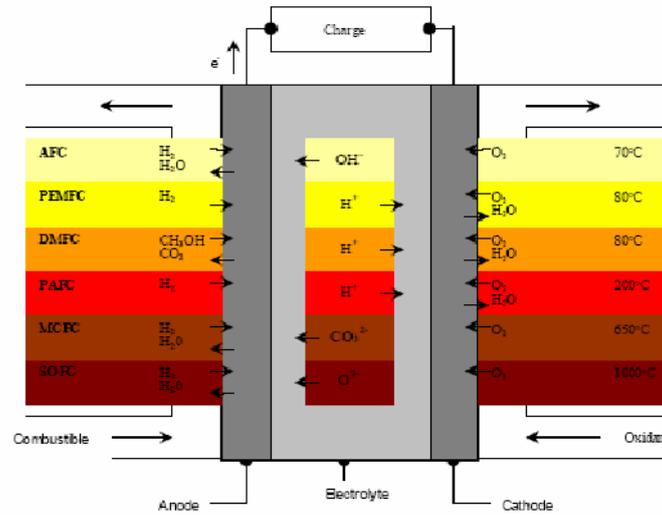


Figure 2 : Principe de fonctionnement des différents types des piles.

4. Les différents types de piles à combustible

Selon la nature de l'électrolyte utilisé, on distingue plusieurs types des piles à combustible. Chaque type a ses propres caractéristiques chimiques et mécaniques, ainsi qu'une température de fonctionnement.

Généralités sur les piles à combustible

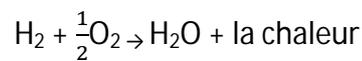
Abréviation / caractéristique	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom en anglais	Alkaline Ful Cell	Proton exchange membrane FC	Direct méthanol Ful Cell	Phosphorique acide Ful Cell	Molten carbonate Ful Cell	Solide oxide Ful Cell
Électrolyte	Solution KOH (liquide)	Membrane polymère (solide)	Membrane polymère (solide)	Acide phosphorique (liquide)	Li ₃ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice de LiAlO ₂ (liquide)	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃ (solide)
Catalyseur	Pt	Pt	Pt	Pt	Carbonates de lithium ou de potassium	Ni
Ion mobile dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Température	60-80 °C	60-100 °C	60-100 °C	180-220 °C	600-660 °C	700-1000 °C
	Piles à combustible à faible température				Piles à combustible à forte température	
combustible	H ₂ pur	H ₂ pur ou reformé	Méthanol	H ₂ pur ou reformé	H ₂ pur ou reformé	H ₂ et CO pur ou reformé
Oxydant	O ₂ pur	Air	Air	Air	Air	Air
Domaine d'application	Spatial, transport (sous-marin)	Electronique portable, transport, cogénération	Electronique portable	Transport, cogénération	Cogénération, Production généralisée d'électricité	Cogénération, Production généralisée d'électricité, transport
Rendement électrique	55-60%	32-40%	15-25%	40-45%	50% 55% avec réutilisation de la chaleur	45-50% 60% avec réutilisation de la chaleur

Tableau 1: comparaison entre les différents types de pile à combustible.

5. Pile à combustible à membrane échangeuse de proton

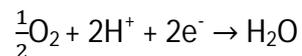
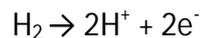
5.1. Principe de fonctionnement

Les piles PEMFC fonctionnent selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est utilisé comme carburant et l'oxygène (ou l'air) sert de comburant. Le principe de fonctionnement des piles consiste à récupérer l'énergie de combustion de l'hydrogène pour la convertir en énergie électrique. La réaction globale se produisant dans la pile peut s'écrire :



Afin de récupérer l'énergie dégagée par la réaction, il est nécessaire de dissocier la réaction totale en deux demi-réactions, séparées spatialement par un électrolyte. L'électrolyte d'une pile PEMFC est une membrane polymère imperméable aux gaz, isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode. Cet électrolyte permet le passage de protons sans être conducteur électronique, donc sans passage d'électrons.

Les électrodes (anode et cathode) sont les lieux des demi-réactions électrochimiques suivantes :



Ces demi-réactions sont catalysées, à l'aide de platine en général, pour augmenter les cinétiques de réactions, relativement lentes aux faibles températures de fonctionnement de la pile. A l'anode, l'hydrogène se dissocie en protons et en électrons. Les protons traversent alors l'électrolyte pour se recombiner à la cathode avec les molécules d'oxygène, et ainsi former de l'eau. Les électrons circulent dans un circuit externe pour boucler le circuit électrique. Le schéma de fonctionnement est donné sur la figure (4).

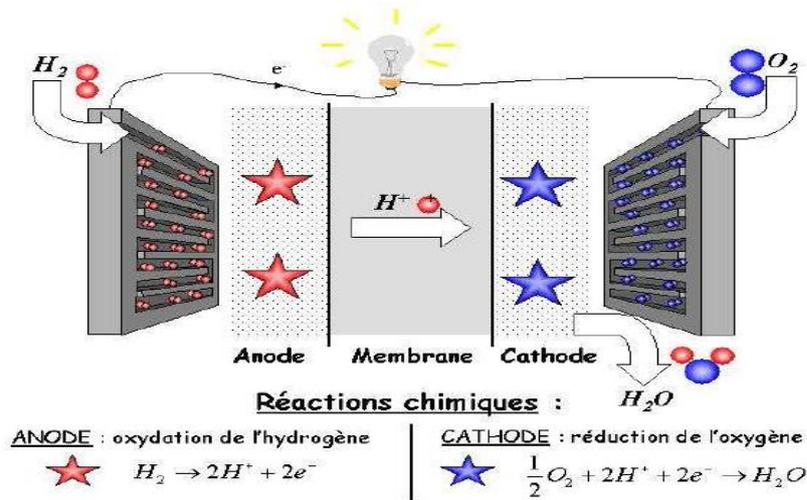


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.

5.2. Structure d'une cellule et description détaillé des éléments de cœur

Le cœur d'une cellule à combustible est constitué de quatre éléments, chaque élément a des caractéristiques spécifiques (mécanique, chimique, électrique) compatibles avec ses rôles. On retrouve au centre l'électrolyte (membrane), sur lequel sont déposées les électrodes anodiques et cathodiques, et à l'extérieur de l'empilement, les plaques bipolaires (figure5).

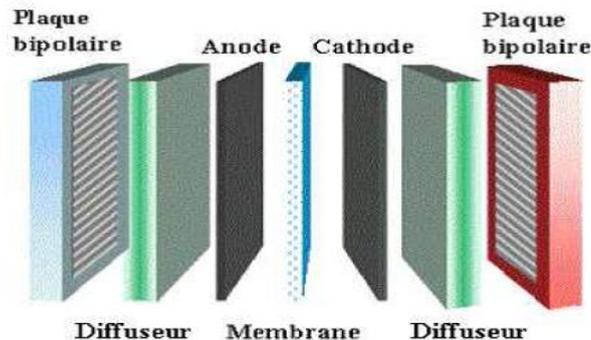


Figure 5 : Principaux constituants de la PEMFC.

5.2.1. L'électrolyte

L'électrolyte est une membrane solide d'épaisseur 100µm environ, La surface de la membrane nécessaire dans une pile est fonction de sa puissance désirée. Elle fonctionne à des températures entre 60⁰C et 100⁰C et à des pressions entre 1 et 5 bars, Au delà de ces conditions leurs performances commencent à se dégrader. Pour une meilleure performance la

membrane doit être humidifiée ce qui implique que l'air et l'hydrogène soient suffisamment humidifiés pour maintenir la membrane hydratée. Cette membrane doit posséder les propriétés suivantes :

- Une bonne conductivité protonique ;
- Une faible conductivité électrique ;
- Imperméable pour les gaz (hydrogène, oxygène) ;
- Avoir une bonne tenue mécanique face aux contraintes thermiques, de pression et d'hydratation.

Le matériau le plus couramment employé est le Nafion, c'est un matériau à matrice perfluorée sulfonique.

5.2.2. Diffuseur

Le diffuseur est situé entre la couche de catalyseur et les plaques bipolaires ; Les couches de diffusion de gaz (GDL) sont les couches extérieures du MEA (membrane electrode assembled). Elles fournissent le contact électrique entre les électrodes et les plaques bipolaires et distribuent les réactifs aux couches de catalyseur. Elles permettent également à l'eau produite de sortir de la surface d'électrode et de permettre le passage de l'eau entre les électrodes et les canaux d'écoulement.

La GDL est faite d'un matériau poreux et électriquement conducteur. Les milieux de diffusion se composent souvent d'une seule couche de diffusion de gaz ou de structure composée d'une couche de diffusion de gaz et d'une couche microporeuse. La plupart des modèles dans la littérature incluent seulement les couches de diffusion de gaz. La GDL peut être traitée avec un fluoropolymère et d'un charbon noir pour améliorer la gestion de l'eau et les propriétés électriques. Ces types de matériaux favorisent la diffusion efficace des gaz réactifs entre la membrane et les électrodes. Les épaisseurs de diverses couches de diffusion de gaz varient entre 0,001 7 et 0,04 centimètres, la densité varie entre 0,21 et 0,73 g/cm² et la porosité change entre 70% et 80%. Les matériaux les plus généralement utilisés comme GDL sont le tissu de carbone et le papier carbonique.

5.2.3. Les électrodes

Les électrodes anodique et cathodique sont les lieux des réactions d'oxydo-réduction ; à l'anode l'hydrogène est oxydé à l'aide du catalyseur (généralement du platine) et à la cathode, les protons H^+ qui migrent de l'anode vers la cathode à travers la membrane se recombinent avec les molécules d'oxygènes pour former de l'eau. Les électrodes doivent être assurer les fonctions suivantes :

- Transférer les protons résultant de l'oxydation d'hydrogène du côté anodique vers le côté cathodique pour la réduction de l'oxygène via la membrane ;
- Evacuer les électrons produits à l'anode puis redistribuer à la cathode par le circuit extérieur ;
- assurer une bonne conductivité ionique électronique.

Pour cela, les catalyseurs sont constitués d'un mélange intime de carbone (conducteur électronique), d'électrolyte (conducteur protonique) et de platine (catalyseur). Ces zones de triple contact, comme illustré sur la figure 6, sont nécessaires à leur bon fonctionnement.

A l'heure actuelle, les catalyseurs utilisés sont des alliages de platine, la teneur en platine sur les électrodes est généralement de l'ordre de 0.4 à 0.6 mg.cm^{-2} .

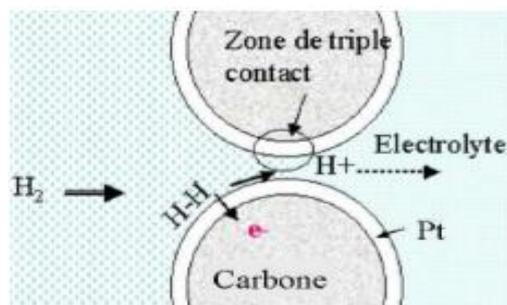


Figure 6 : Zone de triple contact.

5.2.4. Les plaques bipolaires

Dans une cellule à combustible, il n'y a aucune plaque bipolaire (seulement des plaques à simple face), mais dans un stack de plusieurs PAC, il y'a au moins une plaque bipolaire. Les plaques bipolaires ont des rôles multiples dans la pile :

- Distribuent le carburant et l'oxydant dans la cellule ;
- Séparent les différentes piles dans le stack ;
- Rassemblent le courant ;
- Portent l'eau loin de chaque cellule ;
- Humidifient les gaz, et maintiennent les cellules fraîches.

Afin d'assurer simultanément ces fonctions, des matériaux et des conceptions spécifiques sont employés pour les plaques bipolaires.

La plupart des plaques bipolaires des piles à combustibles de type PEM sont faits en graphite imprégné de résine. Le graphite plein est fortement conducteur, chimiquement inerte, et résistant à la corrosion mais cher et coûteux. Les canaux d'écoulement sont typiquement usinés ou électrochimiquement gravés à l'eau-forte dans les surfaces des plaques bipolaires de graphite ou d'acier inoxydable. Cependant, ces méthodes ne sont pas appropriées à la production en série, raison par laquelle de nouveaux matériaux et processus de fabrication des bipolaires sont sujets de recherche actuellement.

5.3. La géométrie des canaux

La géométrie des canaux d'écoulement a un effet sur les vitesses d'écoulement des gaz réactifs et le transfert de masse, et donc, sur la performance de la pile à combustible. Par conséquent, modéliser les canaux du champ d'écoulement est utile en tenant compte du transfert de masse, de la chute de pression, et de la gestion optimale de l'eau de la pile à combustible. Parmi ces géométries :

Les points disposés en carré (figure 7 a), n'est pas optimale pour une distribution égale des gaz qui peuvent circuler à travers la pile par n'importe quel chemin possible. Le résultat est que certains chemins peuvent être bloqués (formation d'un bouchon de liquide) et

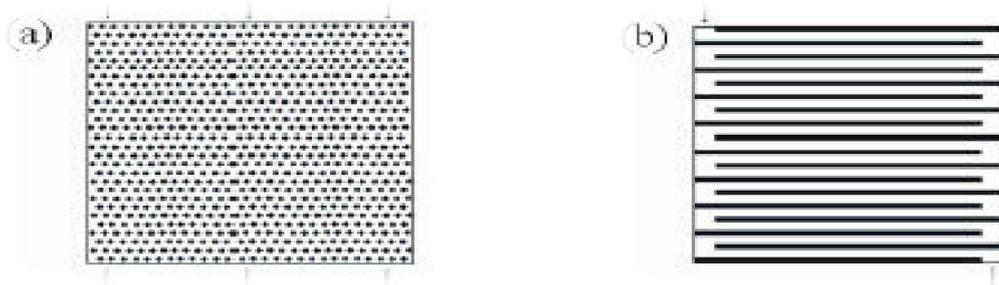
ainsi la distribution de courant dans l'électrode n'est pas homogène. L'avantage de cette géométrie est que la baisse de pression est minimale durant le trajet.

Les serpentins (figure 7b), Le canal d'écoulement serpentin est continu du début à la fin. L'avantage du canal serpentin d'écoulement est qu'il atteint le secteur actif entier de l'électrode en éliminant des domaines d'écoulement stagnant. L'inconvénient d'écoulement serpentin est l'épuisement du réactif par la longueur du canal, de sorte qu'une quantité proportionnée du gaz doit être fournie pour éviter des pertes excessives de polarisation.

Le canal stratifié (interdigitaed) (figure 7c), L'écoulement des réactifs pour la conception stratifiés du canal d'écoulement est parallèle à la surface d'électrode. Souvent, les canaux d'écoulement ne sont pas continus de l'entrée jusqu'à la sortie de la plaque. Les canaux d'écoulement sont morts-finis, ce qui force l'écoulement de réactif, sous pression, de passer par la couche poreuse de réactif pour atteindre les canaux d'écoulement reliés à la tubulure de la pile.

La structure en cascade (figure 7d), utilise des canaux fermés ce qui provoque des bouchons par formation de gouttelettes d'eau. Cette structure souffre aussi de fortes différences de pressions.

La structure parallèle (figure 7e), Cette structure utilise également des canaux fermés ce qui provoque des bouchons par formation de gouttelettes d'eau. Cette structure souffre aussi de fortes différences de pression.



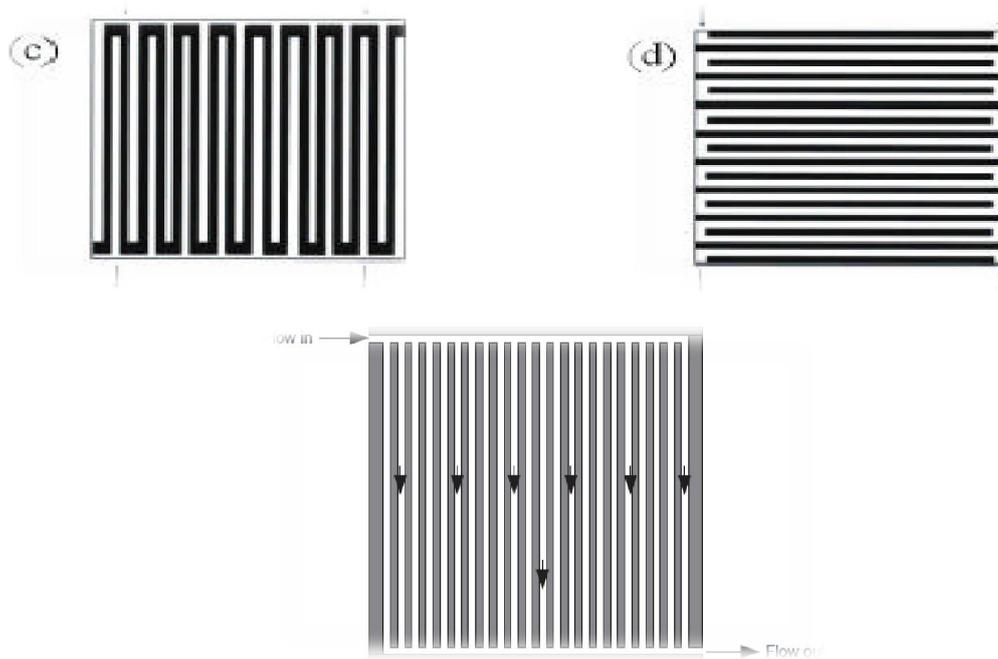


Figure 7 : Schémas des différentes géométries des canaux.

5.4. Forme, dimension, et espacement du canal:

Les canaux d'écoulement sont en général de forme rectangulaire, mais il y a d'autres formes telles que les formes trapézoïdale, triangulaire, et circulaire. Le changement de la forme du canal peut avoir une affecter l'accumulation de l'eau dans la pile, et par conséquent sur le carburant et les débits d'oxydant. Par exemple, dans des canaux arrondis, l'eau condensée forme un film au fond du canal, et dans des canaux coniques, l'eau forme des petites gouttelettes. La forme et la taille des gouttelettes de l'eau sont également déterminées par l'hydrophobicité et l'hydrophilicité des milieux et des murs poreux du canal.

Les dimensions des canaux sont habituellement aux environs de 1 millimètre. Les simulations ont constaté que les dimensions optimales de canal pour des piles de macro fuel (pas cellules de carburant de MEMS) sont de 1,5, 1,5, et 0,5 millimètres pour la profondeur de canal, la largeur, et l'espace entre les canaux, respectivement. Ces dimensions dépendent de la conception et de la taille des stack. Les dimensions des canaux affectent les débits du carburant et d'oxydant, la chute de pression, la génération de la chaleur et de l'eau, et la puissance développée dans la pile à combustible. Des canaux plus larges permettent un plus grand contact du carburant à la couche du catalyseur, ont moins de chute de pression et

permettent une évacuation plus efficace de l'eau. Cependant, si les canaux sont trop larges, il n'y aura pas assez de soutien de la couche de MEA. Si l'espacement entre les canaux d'écoulement est également large, ceci augmente la conductivité électrique de la plaque mais réduit le secteur exposé aux réactifs, et favorise l'accumulation de l'eau.

6. Performance

La caractéristique principale d'une pile à combustible est de transformer directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique, le complément étant perdu sous forme de chaleur. Le travail électrique W_{elec} fourni par la pile correspond au déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre les deux niveaux de potentiel auxquels se situent les électrodes. Il est égal à la variation d'enthalpie libre ΔG au cours de la réaction chimique :

$$W_{elec} = -\Delta G$$

Si l'anode est au potentiel E_a et la cathode au potentiel E_c et si la réaction produit n électrons par mole de combustible oxyde, ce travail s'exprime par :

$$W_{elec} = -nF(E_a - E_c)$$

F : le nombre de Faraday

En théorie, le travail maximum W_{max} que la pile peut fournir est donc :

$$W_{MAX} = -\Delta G = nF(E_a - E_c)_{MAX}$$

Ceci signifie que la tension maximale de la pile en circuit ouvert vaut :

$$(E_a - E_c)_{MAX} = -\frac{\Delta G}{nF}$$

Le rendement électrique d'une pile à combustible est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite W_{elec} de l'énergie chimique apportée par les réactifs, et l'énergie thermique qui serait libérée par la réaction :

$$\eta_{elec} = \frac{W_{elec}}{\Delta H}$$

Généralités sur les piles à combustible

Le rendement énergétique maximal est le rapport entre le travail maximal théorique W_{\max} fourni par une pile (c'est-à-dire qui fonctionnerait de manière réversible) et la variation d'enthalpie au cours de la réaction :

$$\eta_{rev} = -\frac{W_{MAX}}{\Delta H}$$

ΔH : La variation de l'enthalpie.

Pour une pile à combustible fonctionnant en hydrogène et oxygène, les enthalpies de formation de l'eau à 25°C sont de -285 kJ/mol (d'hydrogène) et -242 kJ/mol (d'oxygène). Selon que l'eau est formée respectivement sous forme liquide ou gazeuse, le rendement théorique maximal, à 25°C, est donc de 83% si l'eau formée est liquide et de 95% dans le cas de vapeur d'eau. En pratique, la tension U de la pile est inférieure à la valeur maximale, à cause de l'irréversibilité des réactions, de la chute ohmique et de la diffusion des réactifs jusqu'aux sites catalytiques. Le rendement électrique réel peut s'écrire en fonction de la tension U :

$$\eta_{elec} = -\frac{nFU}{\Delta H}$$

Cette expression peut se ramener à un rapport de tension, par exemple, à 25 °C :

$$\eta_{elec} = \frac{U}{1.48V} \quad \text{Pour l'eau liquide}$$

Ou 1,48 V correspondent à la tension qui devrait être obtenue si le système était efficace à 100%. Ainsi, plus la tension de la pile est élevée, meilleur est le rendement en électricité. Comme toute l'énergie non convertie en électricité est perdue sous forme de chaleur, à l'inverse, plus la tension de la pile est basse, plus la pile produit de la chaleur. Ceci pose de nombreux problèmes pour la conception des cellules puisqu'il est nécessaire d'évacuer une grande quantité de chaleur dans un système que l'on souhaite le plus compact possible.

7. Les applications d'une pile PEM

La pile PEM fonctionne à basse température et est donc simple à utiliser. Cette basse température et l'utilisation d'un électrolyte solide ne posent pas de problèmes de fabrication (dilatation de parties du système, corrosion...). Elle a donc attiré l'attention des industriels dans différents secteurs où ces propriétés sont un atout important (applications portables, transport automobile, petites cogénérations...).

▪ **Pour les applications portables :** la pile PEM alimentée en hydrogène pur est destinée à remplacer les batteries afin de donner une autonomie supérieure et un rechargement instantané par remplacement du réservoir de carburant.

▪ **Dans le domaine des transports :** la pile PEM présente l'avantage de n'émettre aucun polluant au niveau du véhicule si elle utilise de l'hydrogène pur et peut aider au développement des véhicules hybrides.

▪ **Les applications stationnaires :** sont aussi concernées par les piles PEM. Essentiellement en petite et moyenne puissance où la basse température de fonctionnement et les possibilités de fonctionner en régime variable sont des avantages. Elles sont alors généralement alimentées en gaz naturel, l'hydrogène étant produit par reformage.

8. Les avantages et les inconvénients d'une pile à combustible

8.1. Avantages

Les avantages, sont variés, les plus communs pour les différents types sont suivants :

- **Efficacité :** les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands. Ceci est très important dans le cas des petits systèmes locaux de production d'énergie nécessaire à la production combinée de chaleur et systèmes d'alimentation.
- **Simplicité :** Les éléments d'une pile à combustible sont très simples, avec peu ou pas de pièces mobiles. Cela peut conduire à une grande fiabilité et à long terme des systèmes durables.

- Faibles émissions : Le sous-produit de la réaction principale des piles à combustible, lorsque l'hydrogène est le combustible, est l'eau pure, ce qui signifie qu'une pile à combustible peut être essentiellement «zéro émission». Ceci est leur principal avantage lorsqu'elles sont utilisées dans les véhicules, puisqu'il y a une exigence de réduction de véhicule émissions, et même de les éliminer dans les villes. Toutefois, il convient de noter que, Actuellement, les émissions de CO₂ sont presque toujours impliqués dans la production d'hydrogène ce qui est nécessaire en tant que combustible.

- Silence : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur.

8.2. Inconvénients

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement :

- Coût trop élevé de production et de maintenance ;
- Durée de vie trop faible ;
- Gestion thermique délicate ;
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène.

Chapitre 2

Recherche 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 [1]:** 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 variantes de conception dans le besoin de fabriquer réellement les plaques.

- **Wael ALIMI et al [4]:** 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_{cellule} (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 [7]** : 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 [10] : 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 [16]** : 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 $k-\varepsilon$ 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 [18]** : 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 résolues 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 serpentinés, 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 et al [2] : 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 [3] : 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 ondulée. En général, les résultats de simulation, comparés à la géométrie droite d'un canal conventionnel d'écoulement de gaz, montrent que la géométrie ondulée 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 [5]** : 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 [6]** : 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 coté 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 seulement. 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 [8] : 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 [9] : 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 [11]** : 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 modifié 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 rivalisé 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 [12]** : 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

multiplés, 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 [13] : 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 [14] : présentent un modèle informatique tridimensionnel de pile à combustible de type PEM avec des canaux d'écoulement serpents. 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 [15] : Un champ d'écoulement serpentin 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 serpentin 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 [17] : 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 modélisés 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'épaulement 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 [19]** : 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 micro-PEMFC avec une membrane de 1.44 cm^2 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 30^0-150^0 , 60^0-120^0 et 90^0-90^0 , 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 utilisée : $500/700\mu\text{m}$, $800/400\mu\text{m}$ et $100/500\mu\text{m}$. l'expérience est faite à trois débits d'admission différents ($20 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $40 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $60 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les courbes de polarisation et de puissance avec leurs débits d'admission ont été analysées et comparées, les auteurs résultent que le modèle 60^0-120^0 a amélioré la performance de la micro-PEMFC sous le débit d'admission 20 et 40 du 20 et $40 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ comparé à 90^0-90^0 , 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 3

Etude numérique

1. Introduction

Ce travail établit un modèle bidimensionnel et transitoire d'une cellule élémentaire de carburant de type PEMFC pour simuler les phénomènes d'écoulement de gaz dans toutes les parties de la cellule : la membrane, les deux catalyseurs (la couche catalyseur est considéré comme étant une interface entre la membrane et la couche de diffusion), les deux couches de diffusion de gaz et les deux canaux de côté anodique et cathodique. Donc, les équations de quantité de mouvement, de continuité et de conservation des espèces sont résolues, par la méthode des volumes finis, au niveau de toutes les parties de la cellule. Ce modèle étudie l'influence du nombre Reynolds, la pression d'entrée et la hauteur du canal sur la consommation des réactifs.

2. Le modèle physique

La figure (1a) montrée un schéma en 3D d'une cellule de carburant ; la figure (1b) illustre le modèle physique bidimensionnelle à étudier, qui présente une coupe longitudinale dans le sens de l'écoulement.

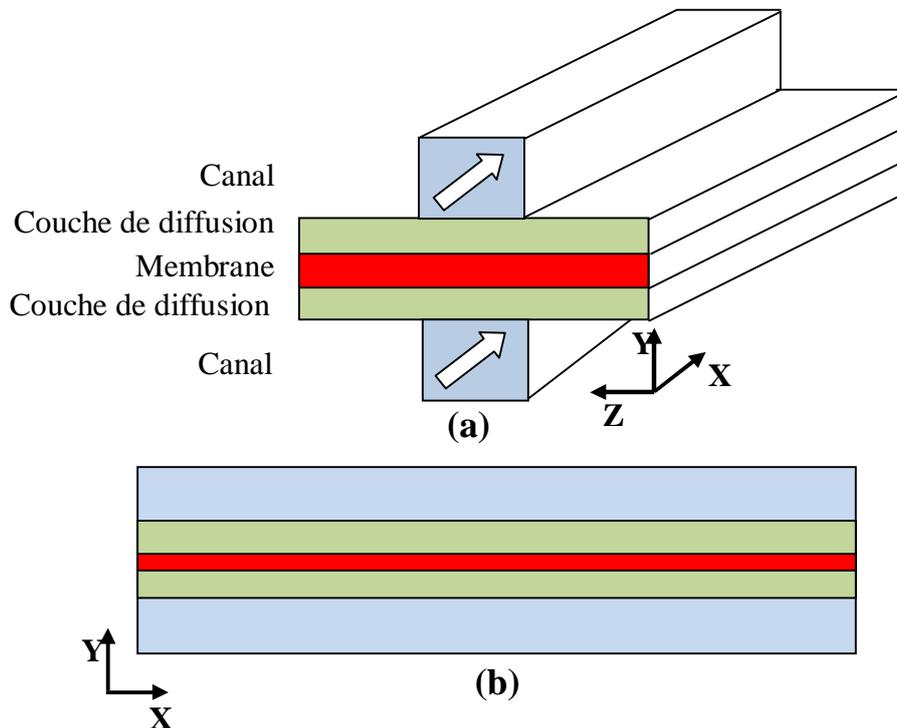


Figure 1 : présentation du domaine d'étude de la cellule de carburant

Tableau 1 : les paramètres physiques et géométriques de la cellule.

Symbole	Signification	Valeur
α_a	Coefficient de transfert anodique	0.5
α_c	Coefficient de transfert cathodique	0.5
η_a	Surtension dans le coté anodique	0.3V
η_c	Surtension dans le coté cathodique	0.3V
μ	Viscosité dynamique	2.10^{-6} Kg/m.s
k_d	La perméabilité de la couche de diffusion	$1,76.10^{-11}$ m ²
k_m	Perméabilité de la membrane	$1,58.10^{-18}$ m ²
ε_d	Porosité de la couche de diffusion	0.4
ε_m	Porosité de la membrane	0.28
C_{ref}	Concentration molaire de référence	35.55 mol/m ³
h_c	Hauteur du canal	1 mm
L	Longueur de la pile	10 mm
Pr	Nombre de Prandtl	0.707
Re	Nombre de Reynolds	200
Sc	Nombre de Schmidt	0.43

3. Hypothèses

- Gaz parfait ;
- L'écoulement dans les canaux est considéré laminaire, incompressible et instationnaire;
- L'eau dans les canaux d'écoulement de gaz et les couches de diffusion est considérée à la phase vapeur ;
- L'eau est produite sous forme de vapeur ;
- La couche de diffusion est homogène et isotrope ;
- La membrane est entièrement humidifiée de telle sorte que la conductivité ionique soit constante.

4. Modèle mathématique

Les équations qui régissent le problème sont sous forme adimensionnelle, pour cela on définit les paramètres de référence suivants :

- h : longueur de référence;
- U_∞ : vitesse de référence;
- h/U_∞ : temps de référence ;
- ρU_∞^2 : pression de référence ;
- C^{ref} : concentration de référence.

Donc, on peut définir les variables adimensionnelles comme suit :

$$x^* = \frac{x}{h}; y^* = \frac{y}{h}$$

$$U^* = \frac{U}{U_\infty}; V^* = \frac{V}{U_\infty}$$

$$t^* = \frac{tU_\infty}{h}; p^* = \frac{p}{\rho U_\infty^2}; C^* = \frac{C}{C^{\text{ref}}}$$

a. Canaux des gaz

Dans les canaux, le champ d'écoulement des gaz est obtenu en résolvant les équations de Navier-Stokes, c-à-d l'équation de continuité et les équations de quantité de mouvement :

- **Equations de la continuité**

L'équation de la continuité pour un écoulement incompressible, qui est valable pour tous les processus qui se passent à l'intérieur d'une cellule de carburant telle que le flux de fluide, la diffusion et les réactions électrochimiques, est écrite sous la forme suivante:

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

Ou sous forme adimensionnelle

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

- **Equations de la quantité de mouvement**

L'équation de la quantité de mouvement est écrite sous la forme suivante :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)$$

Ou sous forme adimensionnelle

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

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

- **Equations de la conservation des espèces**

Le bilan de matière est décrit par l'équation de transport de masse, pour l'espèce k , qui peut être écrite selon l'expression suivante :

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + U \frac{\partial C_k}{\partial x} + V \frac{\partial C_k}{\partial y} = D_k \left(\frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \right)$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial C_k^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial C_k^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial C_k^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re Sc} \left(\frac{\partial^2 C_k^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 C_k^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

L'indice inférieur k indique l'oxygène sur le côté de la cathode, l'hydrogène sur le côté de l'anode et la vapeur d'eau sur les deux côtés.

b. Couche de diffusion du gaz

La couche de diffusion du gaz est modélisée comme étant un milieu poreux, les équations de Navier-Stokes, de chaleur et du transport des espèces dans cette couche deviennent:

• **Equations de la quantité de mouvement**

$$\rho \varepsilon_d \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\varepsilon_d \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_d^2 \frac{\mu}{K_d} U$$

$$\rho \varepsilon_d \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\varepsilon_d \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_d^2 \frac{\mu}{K_d} V$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\varepsilon_d Re} \left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re Da_d} \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_d} U^*$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\varepsilon_d Re} \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re Da_d} \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_d} V^*$$

Les termes sources de l'équation de mouvement expliquent la résistance de l'écoulement (c'est-à-dire le terme de Darcy).

• **Équations de la conservation des espèces**

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + U \frac{\partial C_k}{\partial x} + V \frac{\partial C_k}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon} D_k^{eff} \left(\frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \right)$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial C_k^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial C_k^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial C_k^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon_d Re Sc} \left(\frac{\partial^2 C_k^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 C_k^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

Afin d'expliquer les contraintes géométriques du milieu poreux, les diffusivités sont corrigées en utilisant la formule de correction [Bernardi et Verbrugge, 1991]

$$D_k^{eff} = D_k \varepsilon^{1,5}$$

c. Couche de catalyseur

La couche de catalyseur est traitée comme une interface mince entre la membrane et les deux couches de diffusion des deux cotés anodique et cathodique, donc elle a les mêmes propriétés physiques de la GDL.

- **Equations de la quantité de mouvement**

$$\rho \varepsilon_c \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\varepsilon_c \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_c^2 \frac{\mu}{K_c} U$$

$$\rho \varepsilon_c \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\varepsilon_c \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_c^2 \frac{\mu}{K_d} V$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\varepsilon_c Re} \left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re} \frac{\varepsilon_c}{Da_c} U^*$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\varepsilon_c Re} \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re} \frac{\varepsilon_c}{Da_c} V^*$$

- **Equations de conservation des espèces**

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + U \frac{\partial C_k}{\partial x} + V \frac{\partial C_k}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon} D_k^{eff} \left(\frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \right) + S_k$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial C_k^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial C_k^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial C_k^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon_c Re Sc} \left(\frac{\partial^2 C_k^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 C_k^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_c} \frac{L}{U_\infty C_\infty} S_k$$

S_k : Le terme source pour l'espèce k

Dans le côté cathodique, les termes source pour l'oxygène et La production de l'eau sont donnés respectivement par :

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

Dans le côté anodique, le terme source pour l'hydrogène est donné par :

$$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2F}$$

Où la densité de courant volumique est définie par la formule de Butler-Volmer :

$$j_c = a j_0^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right) \left(e^{\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_c} - \frac{1}{e^{\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_c}} \right)$$

La densité de courant moyenne sera calculer par :

$$\bar{j} = \frac{1}{S} \int_S j \cdot dS$$

d. Membrane

- **Equations de la quantité de mouvement**

$$\rho \varepsilon_m \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\varepsilon_m \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_m^2 \frac{\mu}{K} U$$

$$\rho \varepsilon_m \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\varepsilon_m \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \varepsilon_m^2 \frac{\mu}{K} U$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\varepsilon_m Re} \left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re} \frac{\varepsilon_c}{Da_m} U^*$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\varepsilon_m Re} \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Re} \frac{\varepsilon_c}{Da_m} V^*$$

- **Equations de conservation des espèces**

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + U \frac{\partial C_k}{\partial x} + V \frac{\partial C_k}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon} D_k^{eff} \left(\frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \right)$$

Ou sous forme adimensionnelle

$$\frac{\partial C_k^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial C_k^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial C_k^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon_d Re Sc} \left(\frac{\partial^2 C_k^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 C_k^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

5. Equation de pression

La résolution des équations de Navier-Stokes présente une difficulté du fait que le champ de pression n'est pas connu et il n'existe pas d'équation gouvernante pour le champ de pression p .

L'astuce numérique que nous allons mettre en œuvre pour pallier à cette difficulté repose sur une méthode développée par (Cf. Peyret R. & Taylor T.D. ; 1983), cet astuce est basé sur un fractionnement du pas de temps. Réécrivons l'équation de conservation de la quantité de mouvement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon U) = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U U)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V U)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + S_U - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon V) = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U V)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V V)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + S_V - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial y} \end{cases}$$

On décompose le terme de stockage du temps t à $t + \frac{\Delta t}{2}$ et de $t + \frac{\Delta t}{2}$ à $t + \Delta t$, on trouve:

$$\begin{aligned} \frac{\rho \varepsilon U^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \rho \varepsilon U^t}{\Delta t} + \frac{\rho \varepsilon U^{t+\Delta t} - \rho \varepsilon U^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \\ = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U U)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V U)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + S_U - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho \varepsilon V^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \rho \varepsilon V^t}{\Delta t} + \frac{\rho \varepsilon V^{t+\Delta t} - \rho \varepsilon V^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \\ = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U V)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V V)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + S_V - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned}$$

On pose :

$$\frac{\rho \varepsilon U^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \rho \varepsilon U^t}{\Delta t} = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U U)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V U)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + S_U \quad (a)$$

$$\frac{\rho \varepsilon V^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \rho \varepsilon V^t}{\Delta t} = -\frac{\partial(\rho \varepsilon U V)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \varepsilon V V)}{\partial y} + \Gamma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + S_V \quad (b)$$

$$\frac{\rho \varepsilon U^{t+\Delta T} - \rho \varepsilon U^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} \quad (a1)$$

$$\frac{\rho \varepsilon V^{t+\Delta T} - \rho \varepsilon V^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial y} \quad (b1)$$

La résolution des deux équations (a) et (b) représente l'étape dite de prédiction, elle permet l'obtention d'un champ provisoire des vitesses $U^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ et $V^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ calculé uniquement à partir du champ U^t et V^t . Ce champ provisoire ne vérifie à priori pas l'équation de continuité.

On dérive les deux dernières équations (a1) et (b1) respectivement par rapport à x et à y d'où :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho U^{t+\Delta T} - \rho U^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho V^{t+\Delta T} - \rho V^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right) = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)$$

La sommation de ces deux dernières équations nous permet d'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho U^{t+\Delta T} - \rho U^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho V^{t+\Delta T} - \rho V^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right);$$

et

$$\frac{\partial(\rho U^{t+\Delta T})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^{t+\Delta T})}{\partial y} - \left(\frac{\partial(-\rho U^{t+\frac{\Delta t}{2}})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho V^{t+\frac{\Delta t}{2}})}{\partial y} \right) / \Delta t = -\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}$$

D'après l'équation de continuité on a :

$$\frac{\partial(\rho U^{t+\Delta T})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^{t+\Delta T})}{\partial y} = 0$$

Et l'équation de pression sera :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \left(\frac{\partial \left(-\rho U^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(-\rho V^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right)}{\partial y} \right) / \Delta t$$

La dernière étape de la méthode consiste évidemment à réinjecter le champ de pression, calculé ci-dessus, dans les équations (a1) et (b1) ce qui permet d'obtenir le champ de vitesse $U^{t+\Delta t}$ et $V^{t+\Delta t}$, celui-ci satisfait aussi bien l'équation de quantité de mouvement et l'équation de continuité. C'est l'étape de projection qui a donné son nom à la méthode :

$$\begin{cases} U^{t+\Delta T} = U^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \Delta t \\ V^{t+\Delta T} = V^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \Delta t \end{cases}$$

6. Conditions initiales et aux limites :

6.1. Conditions initiales

Tous les paramètres ont été initialisés dans les conditions ambiantes :

$$t^* = 0 \begin{cases} U^* = 0; \\ V^* = 0; \\ P^* = 1; \\ C_{O_2}^* = 0; \\ C_{H_2}^* = 0; \\ C_{H_2O}^* = 0. \end{cases}$$

6.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont appliquées à toutes les frontières externes du domaine de calcul (figure 2), la condition de Dirichlet est utilisée à l'entrée des canaux. A la sortie des canaux on suppose que les gradients, dans le sens de l'écoulement, des vitesses de pression et des concentrations des espèces sont nuls (condition de Neumann). Sur les parois des canaux et les extrémités de MEA, les conditions aux limites pour la pression, les vitesses et les concentrations des espèces sont aussi de type Neumann.

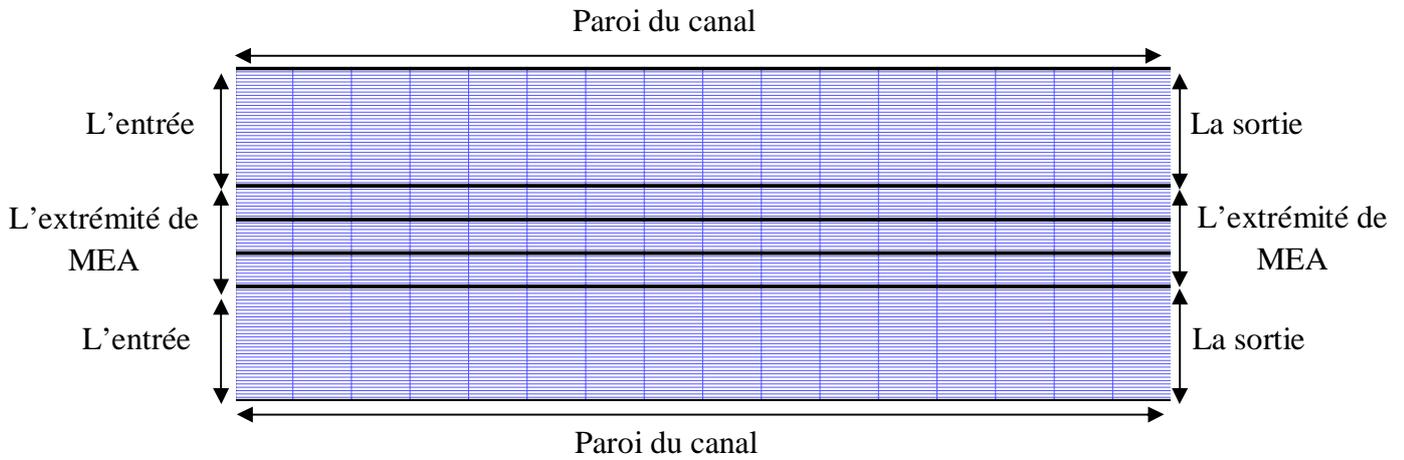


Figure 2 : présentation du maillage et des conditions aux limites dans le plan oxy.

6.2.1. Conditions d'entrée

Les valeurs des vitesses, des concentrations d'espèces, et de la pression d'admission à l'anode et à la cathode sont :

$$\begin{cases} U^* = 1; \\ V^* = 0; \\ P^* = 1; \\ C_{H_2O}^* = 0.1. \end{cases}$$

Sur le coté cathodique on a :

$$\begin{cases} C_{O_2}^* = 1; \\ C_{H_2}^* = 0. \end{cases}$$

Et sur le coté anodique on a :

$$\begin{cases} C_{O_2}^* = 0; \\ C_{H_2}^* = 1. \end{cases}$$

6.2.2. Conditions de sortie

A la sortie des canaux d'écoulement des gaz et pour toutes les variables, les conditions aux limites sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U^*}{\partial x^*} = 0 \\ \frac{\partial V^*}{\partial x^*} = 0 \\ \frac{\partial P^*}{\partial x^*} = 0 \\ \frac{\partial C_{O_2}^*}{\partial x^*} = 0 \\ \frac{\partial C_{H_2}^*}{\partial x^*} = 0 \\ \frac{\partial C_{H_2O}^*}{\partial x^*} = 0 \end{array} \right.$$

6.2.3. Parois des canaux et les extrémités de MEA

Sur les Parois des canaux et les extrémités de MEA, les conditions aux limites pour la pression, les vitesses et les concentrations des espèces sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} U^* = V^* = \frac{\partial P^*}{\partial x^*} = \frac{\partial C_{O_2}^*}{\partial x^*} = \frac{\partial C_{H_2}^*}{\partial x^*} = \frac{\partial C_{H_2O}^*}{\partial x^*} = 0 \\ U^* = V^* = \frac{\partial P^*}{\partial y^*} = \frac{\partial C_{O_2}^*}{\partial y^*} = \frac{\partial C_{H_2}^*}{\partial y^*} = \frac{\partial C_{H_2O}^*}{\partial y^*} = 0 \end{array} \right.$$

7. Résolution des équations par la méthode des volumes finis

7.1. Principe de la méthode des volumes finis

En analyse numérique, **la méthode des volumes finis** est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. Mais, contrairement à la méthode de différences finies qui utilise des approximations de dérivées, la méthode des volumes finis utilise, comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales.

On résout l'équation aux dérivées partielles de manière approchée sur un maillage. Ce maillage est constitué de volumes finis. Les volumes finis sont des petits volumes appelés **volume de contrôle** (en 3D), des surfaces en (2D) figure 3, des segments en (1D) dont la

réunion forme le domaine d'étude (figure 4), chacun de ces derniers volumes finis peuvent être construits autour de point d'un maillage initial. Chacun de ces derniers (volumes de contrôle) contient un nœud dit : « nœud principal ». Pour un nœud principal (P), les points E et W (E : Est, W: West (ouest)) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N : Nord (Northe), S : Sud (South)) sont ceux dans la direction Y. le volume de contrôle entourant (P) est montré par les lignes discontinues. Les faces de volume de contrôle sont localisées aux points (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y.

Un avantage pour la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non-structurés. En effet, la formulation d'une méthode de volumes finis ne tient compte d'aucune de la complexité du maillage, pour ce qui est de la discrétisation des lois de conservation. En revanche les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle déterminant pour ce qui est des flux diffusifs.

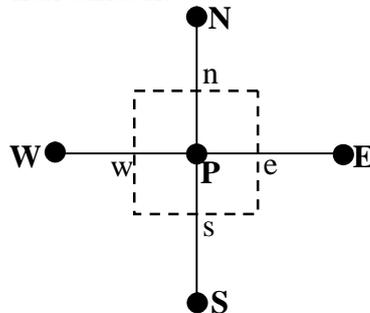


Figure 3 : volume de contrôle.

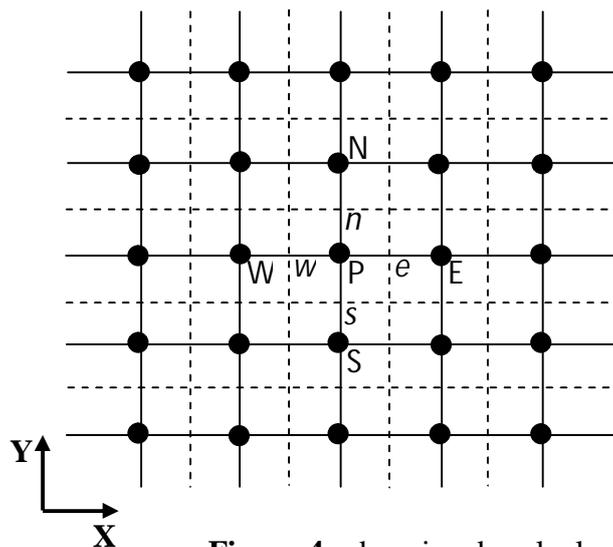


Figure 4 : domaine de calcul.

Le principe de discrétisation peut être illustré en considérant l'équation de transport par une grandeur scalaire ϕ , valable pour toutes les équations d'écoulement:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho\phi) + \text{div}(\varepsilon\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S_\phi$$

Le premier terme représente le terme d'accumulation, le deuxième, le troisième et le quatrième représentent successivement le terme convectif, le terme diffusif et le terme source.

7.2. Application à l'intégration d'une équation de transport-diffusion

L'intégration de l'équation de transport-diffusion sur le volume de contrôle (VC) doit et sur un pas de temps Δt , permettre de former un système d'équations linéaires liant entre elles les valeurs de la fonction ϕ aux points du maillage P_{ij} .

$$\begin{aligned} \iiint_{VC} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\varepsilon U\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\varepsilon V\phi) \right) dt dv \\ = \iiint_{VC} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial x}(\phi) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial y}(\phi) \right) + S_\phi \right) dt \end{aligned}$$

avec $dv = dx \cdot dy \cdot 1$

Pour aborder l'intégration de l'équation de transport, nous commençons par définir à l'intérieur du domaine de calcul un maillage constitué d'un réseau de points P_{ij} dans un repère cartésien.

L'approche du type volume de contrôle exige que l'on définisse autour du point P_{ij} un volume élémentaire sur lequel on va intégrer l'équation aux dérivées partielles. Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectifs doivent posséder une facette commune. Il s'en suit que la réunion de tous les volumes de contrôle couvre l'ensemble du domaine de calcul.

Cette propriété fondamentale nous permet de mettre en évidence des propriétés de conservation des flux locaux et globaux, propriétés d'un grand intérêt en ce qui concerne la résolution numérique des équations.

7.3. Discrétisation des différents termes de l'équation de transport-diffusion

- **Terme d'accumulation**

$$\iiint_{VC} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon \phi) \right) dt dv = (\rho \varepsilon \phi) \Big|_t^{t+\Delta t} \Delta x \Delta y = ((\rho \varepsilon \phi)^{t+\Delta t} - (\rho \varepsilon \phi)^t) \Delta x \Delta y$$

Terme convectif longitudinal

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \iiint_{VC} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho \varepsilon U \phi) \right) dv dt &= (\rho \varepsilon U \phi) \Big|_w^e \Delta y \Delta t = ((\rho \varepsilon U \phi)_e - (\rho \varepsilon U \phi)_w) \Delta y \Delta t \\ &= (F_e \phi_e - F_w \phi_w) \Delta t \end{aligned}$$

Avec : $F_e = \varepsilon \rho U_e \Delta y$, $F_w = \varepsilon \rho U_w \Delta y$

- **Terme convectif vertical**

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \iiint_{VC} \left(\frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon V \phi) \right) dv dt &= (\rho \varepsilon V \phi) \Big|_s^n \Delta x \Delta t = ((\rho \varepsilon V \phi)_n - (\rho \varepsilon V \phi)_s) \Delta x \Delta t \\ &= (F_n \phi_n - F_s \phi_s) \Delta t \end{aligned}$$

Avec : $F_n = \varepsilon \rho V_n \Delta x$, $F_s = \varepsilon \rho V_s \Delta x$

- **Terme diffusif suivant X**

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \iiint_{VC} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right) dv dt &= \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \Big|_w^e \Delta y \Delta t = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta t \\ &= \left(\Gamma \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} - \Gamma \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) \Delta y \Delta t \\ &= \left(\Gamma_e \frac{\Delta y}{\delta x_{PE}} (\phi_E - \phi_P) - \Gamma_w \frac{\Delta y}{\delta x_{WP}} (\phi_P - \phi_W) \right) \Delta t \\ &= (D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)) \Delta t \end{aligned}$$

Avec : $D_e = \Gamma_e \frac{\Delta y}{\delta x_{PE}}$, $D_w = \Gamma_w \frac{\Delta y}{\delta x_{WP}}$

• **Terme diffusif suivant Y**

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \iiint_{VC} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right) dv dt &= \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \Big|_s^n \Delta x \Delta t = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta t \\ &= \left(\Gamma \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} - \Gamma \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta y_{SP}} \right) \Delta x \Delta t \\ &= \left(\Gamma_n \frac{\Delta x}{\delta y_{PN}} (\phi_N - \phi_P) - \Gamma_s \frac{\Delta x}{\delta y_{SP}} (\phi_P - \phi_S) \right) \Delta t \\ &= (D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S)) \Delta t \end{aligned}$$

Avec : $D_n = \Gamma_n \frac{\Delta x}{\delta y_{PN}}$, $D_s = \Gamma_s \frac{\Delta x}{\delta y_{SP}}$

• **Terme source**

On considère que le terme source S_ϕ est linéaire par rapport à la grandeur ϕ .

$$\int_t^{t+\Delta t} \iiint_{VC} S_\phi dv dt = S_\phi \Delta x \Delta y \Delta t = S_P \phi_P + S_u$$

Après une substitution dans l'équation de transport et en appliquant un schéma implicite pour le temps, on obtient la forme discrétisée suivante :

$$\begin{aligned} a_P^0 (\phi_P^{t+\Delta t} - \phi_P^t) + (F_e \phi_e - F_w \phi_w) + (F_n \phi_n - F_s \phi_s) \\ = (D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)) + (D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S)) \\ + (S_P \phi_P + S_u) \Delta x \Delta y \end{aligned}$$

Avec : $a_P^0 = \varepsilon \rho \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}$

Le schéma en puissance est choisi pour la discrétisation des termes convectifs. Après un réarrangement on aura la forme finale:

$$a_P \cdot \phi_P^{t+\Delta t} = a_W \cdot \phi_W^{t+\Delta t} + a_E \cdot \phi_E^{t+\Delta t} + a_S \cdot \phi_S^{t+\Delta t} + a_N \cdot \phi_N^{t+\Delta t} + a_P^0 \cdot \phi_P^{t+\Delta t} + S_u \cdot \Delta x \Delta y$$

Les coefficients $a_i (i = w, s)$ et $a_j (j = e, n)$ sont donnés par :

$$a_i = D_i \cdot \max[0, (1 - 0.1 |Pe_i|)^5] + \max[F_i, 0]$$

$$a_j = D_j \cdot \max \left[0, (1 - 0.1 |Pe_j|)^5 \right] + \max[-F_j, 0]$$

$$ap\phi_P^{t+\Delta t} = aw\phi_W^{t+\Delta t} + ae\phi_E^{t+\Delta t} + as\phi_S^{t+\Delta t} + an\phi_N^{t+\Delta t} + a_p^0\phi_P^t + S_p \cdot \Delta x \Delta y$$

7.4. Discrétisation de l'équation de pression

L'équation de pression est une équation de transport dont le terme de stockage et les termes convectifs sont nuls : $\nabla(\Gamma \cdot \nabla(\phi)) + S_\phi = 0$,

Alors que sa forme discrétisée devient :

$$ap\phi_P^{t+\Delta t} = aw\phi_W^{t+\Delta t} + ae\phi_E^{t+\Delta t} + as\phi_S^{t+\Delta t} + an\phi_N^{t+\Delta t} + S_p \cdot \Delta x \Delta y$$

D'où les coefficients $ai (i = w, e, s, n)$ sont donnés par : $ai = Di$.

7.5. Résolution du système d'équations

Après la discrétisation de l'équation de transport, un système d'équations algébriques linéaires est obtenu. La complexité de la résolution et la taille des résultats dépendent de la dimensionnalité du problème, du nombre de nœuds de la grille et de la manière de discrétisation.

Dans ce travail on a utilisé la méthode ADI pour résoudre le système d'équations résultant de la discrétisation de l'équation de transport et la méthode itérative de Gauss-Jacobi pour résoudre celui résultant de la discrétisation de l'équation de poisson (équation de poisson).

- **Méthode ADI**

Cette méthode est proposée par *Peaceman* et *Rachford* en 1955. C'est une méthode à schéma implicite, elle est stable quelque soit la valeur de Δx et Δt . Cette méthode est largement utilisée dans la résolution des problèmes de la convection naturelle en régime transitoire. Le domaine de calcul est discrétisé selon un maillage uniforme suivant les deux directions de l'espace. Pour chaque pas de temps l'ADI donne lieu à deux systèmes matriciels tridiagonaux, pour les problèmes bidimensionnels. L'un résultant de la discrétisation implicite selon x et l'autre de la discrétisation explicite selon y; autrement dit, pour chaque étape de temps, la solution est obtenue en balayant le domaine de calcul dans la direction des x puis dans celle des y.

– 1^{er} direction

Pour un temps $t = t + \frac{1}{2}\Delta t$, l'ADI, consiste en une discrétisation implicite selon la direction des x et explicite selon la direction des y, nous permet d'écrire l'équation de transport pour un point P_{ij} du domaine sous la forme :

$$-aw_{i,j}\phi_{i-1,j}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} + ap_{i,j}\phi_{i,j}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} - ae_{i,j}\phi_{i+1,j}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = +as_{i,j}\phi_{i,j-1}^t + an_{i,j}\phi_{i,j+1}^t + +ap_{i,j}^0\phi_{i,i}^t + S_{P_{i,j}}\cdot\Delta x\Delta y$$

L'application de cette équation pour chaque point de l'ensemble des (N-1) points le long de chacune des (M-1) lignes parallèles à (OX), donne (N-1)(M-1) équation pour (N-1)(M-1) valeurs inconnus de ϕ pour un temps $t = t + \frac{1}{2}\Delta t$.

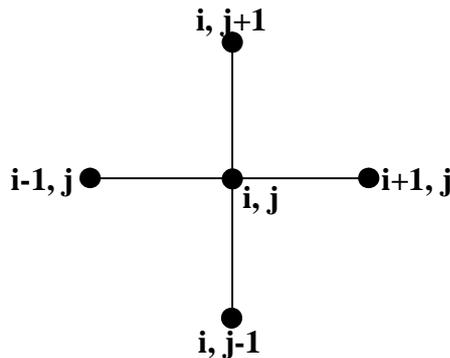
La solution sur tout le rectangle nous conduit à résoudre (M-1) systèmes indépendants. Chaque système contient (N-1) équations. Donc la solution de ces systèmes tridiagonaux est plus facile que la solution de ceux dans les méthodes implicites.

– 2^{ème} direction

Pour cette direction, la discrétisation, au temps $t = t + \Delta t$, sera implicite selon la direction des y et explicite selon la direction des x, l'équation de transport pour un point P_{ij} aura la forme :

$$-as_{i,j}\phi_{i,j-1}^{t+\Delta t} + ap_{i,j}\phi_{i,j}^{t+\Delta t} - an_{i,j}\phi_{i,j+1}^{t+\Delta t} = +aw_{i,j}\phi_{i-1,j}^{t+\Delta t} + ae_{i,j}\phi_{i+1,j}^{t+\Delta t} + ap_{i,j}^0\phi_{i,i}^{t+\Delta t} + S_{P_{i,j,k}}\cdot\Delta x\Delta y$$

Alors le nom ADI (alternative-direction-implicite) vient d'alterner la direction après chaque traversée, et implicite parce que nous n'obtiendrons pas les valeurs de ϕ directement, mais après la résolution d'un ensemble d'équation. La maille de calcul pour ce schéma est donné par :



- **Méthode de Jacobi**

La méthode de Jacobi consiste à donner aux inconnues les valeurs initiales $\phi_{i,j}^0$ pour calculer la valeur $\phi_{i,j}^1$ à partir :

$$\phi_{i,j}^1 = (aw_{i,j}\phi_{i-1,j}^0 + ae_{i,j}\phi_{i+1,j}^0 + as_{i,j}\phi_{i,j-1}^0 + an_{i,j}\phi_{i,j+1}^0 + b_{i,j})/ap_{i,j}$$

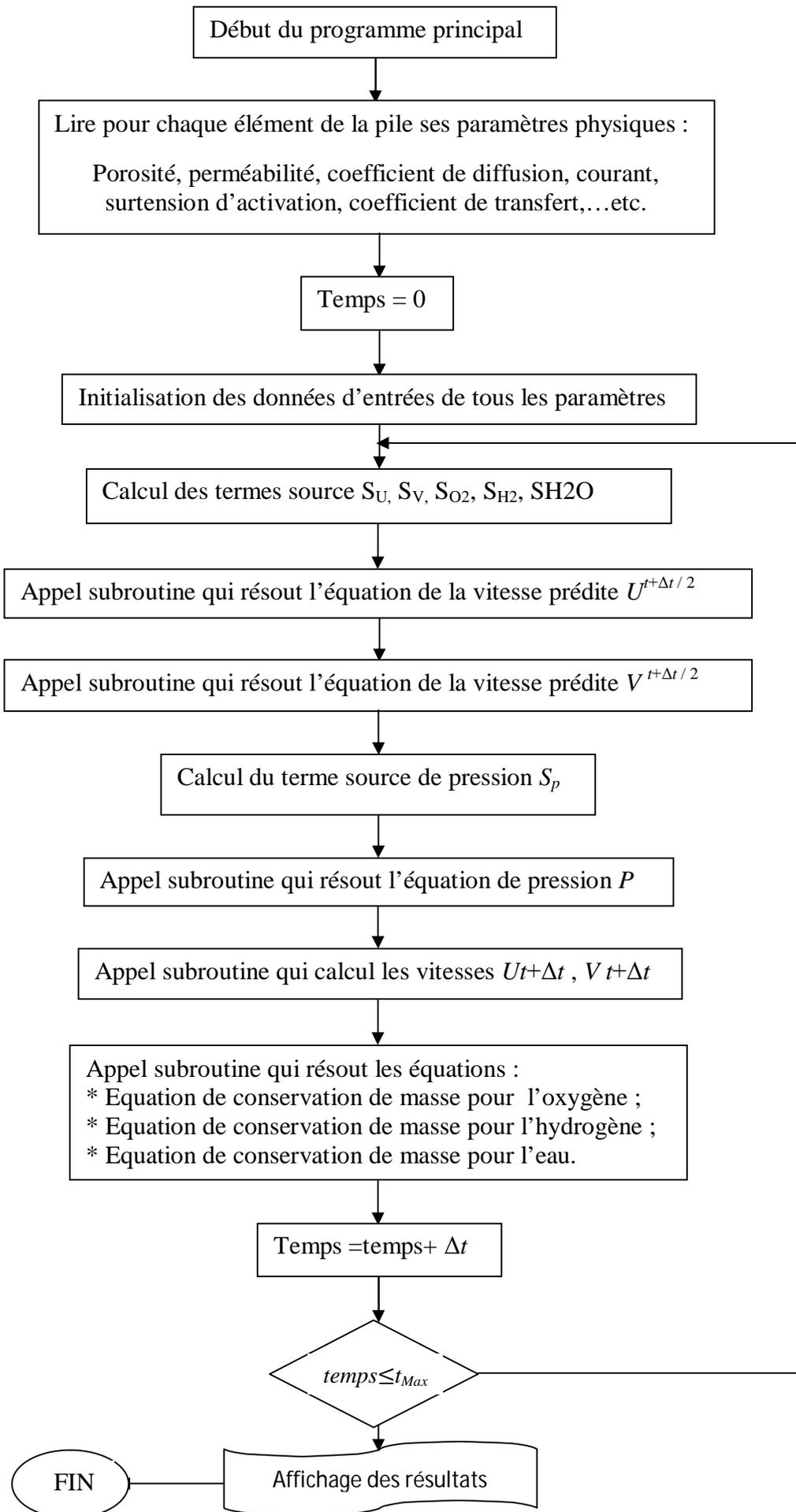
On refait les calculs jusqu'à l'itération k_{\max} , la méthode itérative de Jacobi s'écrit sous sa forme générale :

$$\phi_{i,j}^{k+1} = (aw_{i,j}\phi_{i-1,j}^k + ae_{i,j}\phi_{i+1,j}^k + as_{i,j}\phi_{i,j-1}^k + an_{i,j}\phi_{i,j+1}^k + b_{i,j})/ap_{i,j}$$

La condition de convergence est : $|\phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^k| \leq \varepsilon$

ε est le critère de convergence. Cette condition doit être vérifiée sur l'ensemble des nœuds du maillage. Le choix de ε dépend de la précision qu'on cherche et entre 10^{-8} et 10^{-9} sont généralement choisies. Si la condition n'est pas correct on pose que $\phi_{i,j}^k = \phi_{i,j}^{k+1}$, et on recalcule à la même formule jusqu'à vérifier la condition de convergence.

Etude numérique



Chapitre 4

Résultats et discussions

Résultats et discussions

Après la discrétisation des équations régissant les phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux et de transfert de masse dans toutes les parties de la pile à combustible, avec la supposition que le régime d'écoulement est laminaire. Les résultats représentant le comportement transitoire de la pile à combustible PEMFC sont présentés dans ce chapitre. Parmi les paramètres importants dont on a étudié leurs influences sur l'écoulement de gaz dans les canaux et sur la consommation des réactifs sont : le nombre de Reynolds, la pression d'entrée et la hauteur des canaux. On a présenté les champs dynamiques pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. L'effet de ces paramètres sur la consommation des réactifs et la production de l'eau a été étudié aussi.

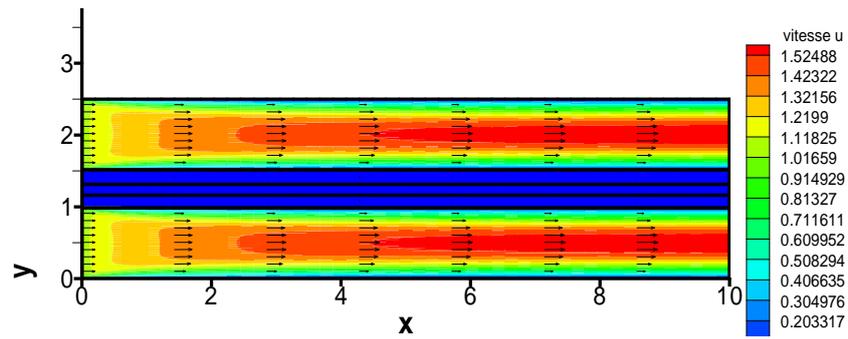
I. CHAMPS DYNAMIQUE

I.1. Profils des champs de vitesse horizontale

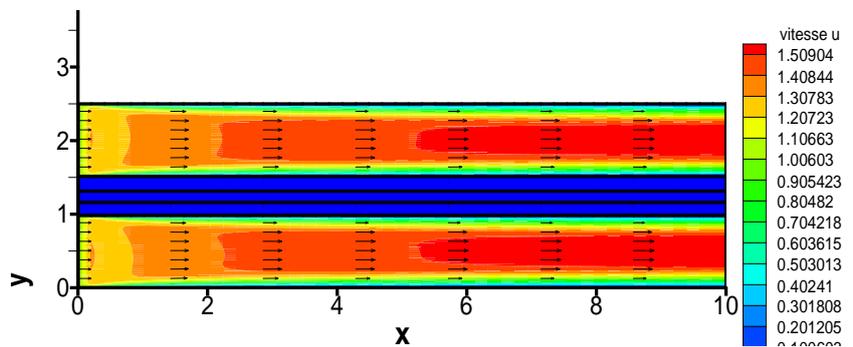
Dans cette étape on s'intéresse à étudier le comportement dynamique du profil de vitesse pour différents paramètres, tels que le nombre de Reynolds, la pression d'entrée et la géométrie des canaux.

Les profils de vitesse dans toutes les parties de la cellule pour deux valeurs différentes du nombre de Reynolds sont montrés sur la figure 1. La vitesse à l'entrée des canaux est uniforme, à cause de la viscosité une couche limite a été développée à la paroi du canal et à l'interface de la GDL, donc la vitesse à l'intérieure des canaux montre un profil entièrement développé où la vitesse la plus élevée est située au centre des canaux et ce profil est maintenu jusqu'à la fin des canaux. D'après ces champs de vitesse, on constate que cette dernière est très faible dans les milieux poreux (GDL, catalyseur, membrane) à cause de la force de Darcy.

Résultats et discussions



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



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

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.

Résultats et discussions

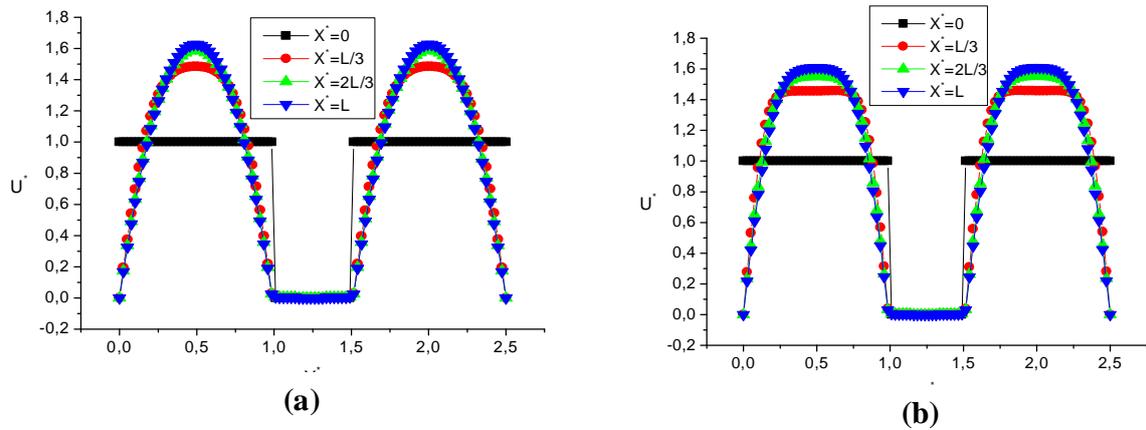


Figure 2 : Profil de vitesse horizontale pour différentes positions de la longueur (x) de la pile pour : (a) $Re = 200$, (b) $Re = 600$.

Les figures 3et 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.

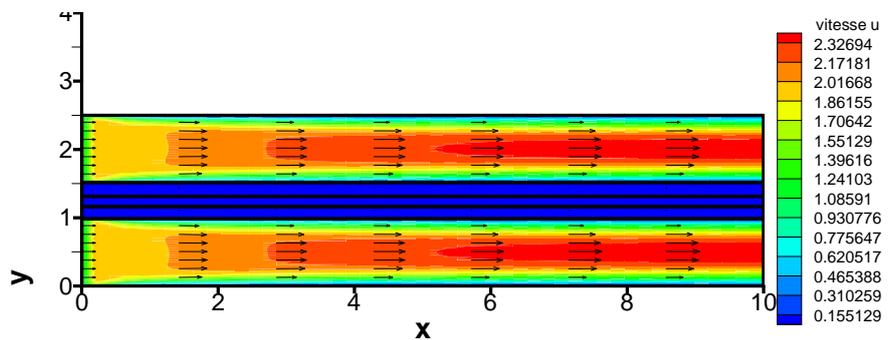


Figure 3 : Répartition du champ de vitesse pour une pression d'entrée $P=3$

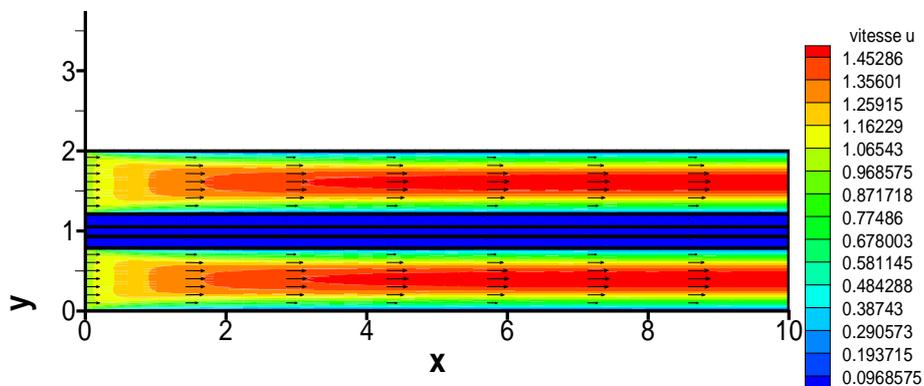


Figure 4 : Répartition du champ de vitesse pour une hauteur du canal $h_c=0.75$

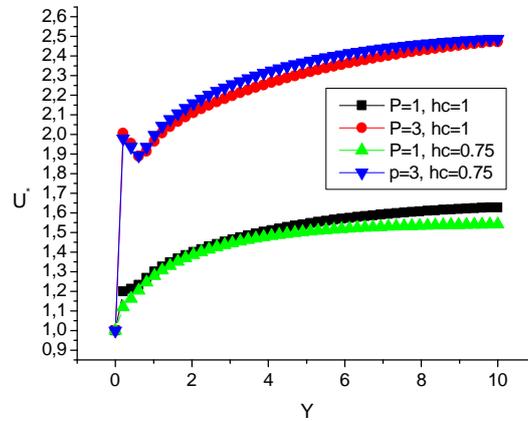
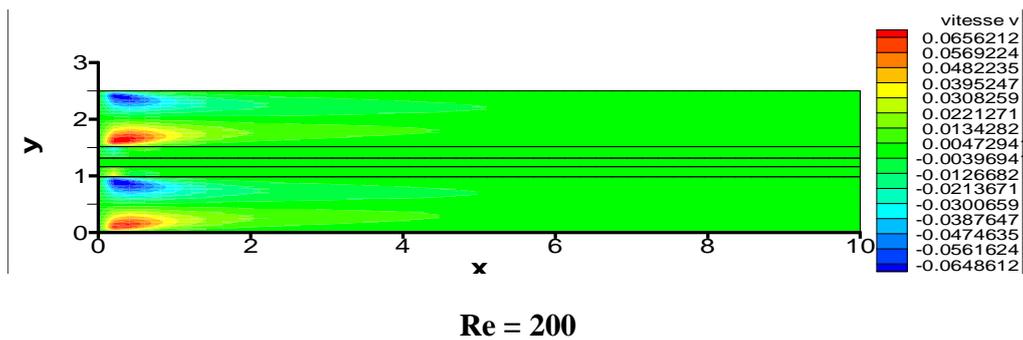


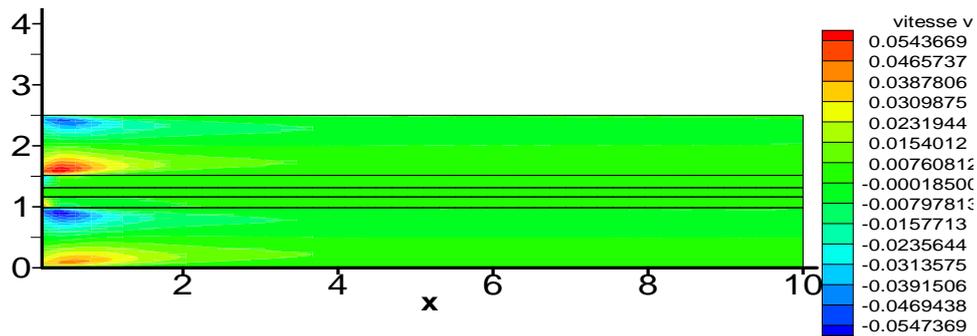
Figure 5 : profil de vitesses horizontales au milieu du canal suivant la longueur de la pile pour différentes valeurs de pression d'entrée et de hauteur de canal.

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 négatifs, donc, on peut dire qu'il a un décollement des gaz.



Résultats et discussions



Re = 600

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.

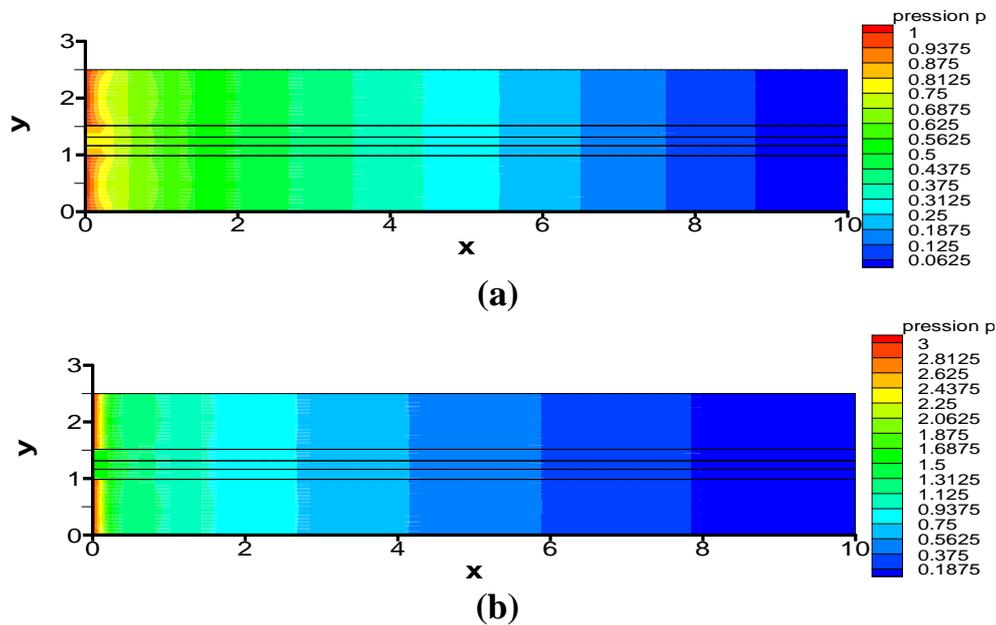


Figure 7 : Distribution des champs de pression, pour une pression d'entrée

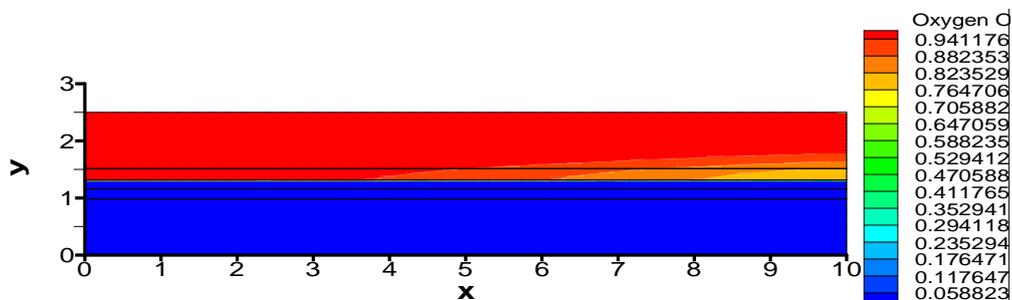
(a) P = 1, (b) P = 3.

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

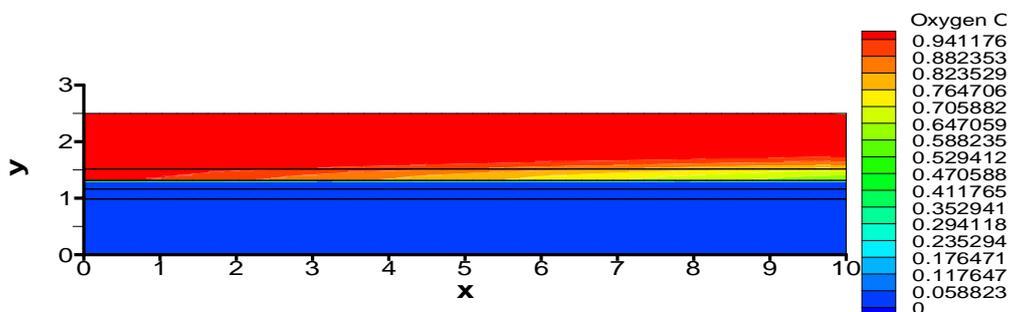
II.1. Profils des champs de distribution d'oxygène

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 à celui faible et cela pour les deux valeurs de pression.

❖ $P = 1$



Re = 200

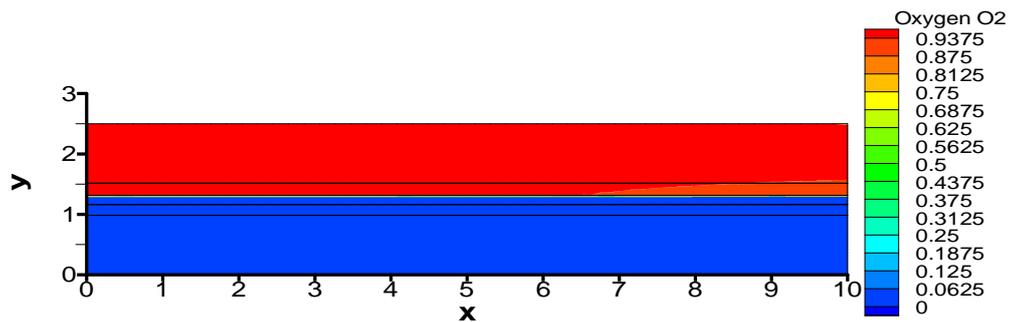


Résultats et discussions

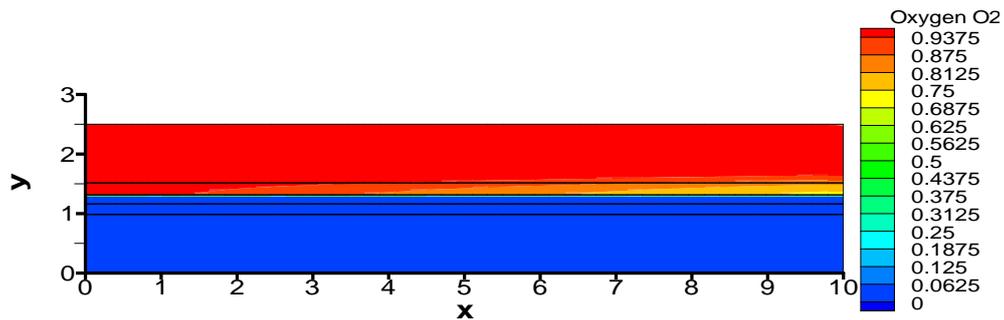
Re = 600

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

❖ P = 3



(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

Résultats et discussions

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.

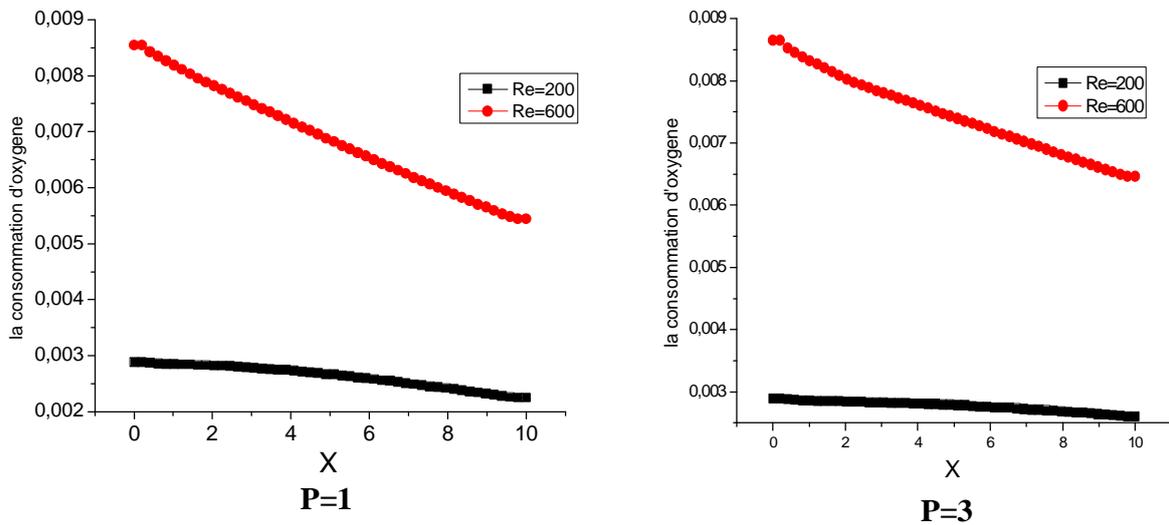


Figure 10 : profils de consommation d'oxygène pour différents valeurs de pression et de nombre de Reynold.

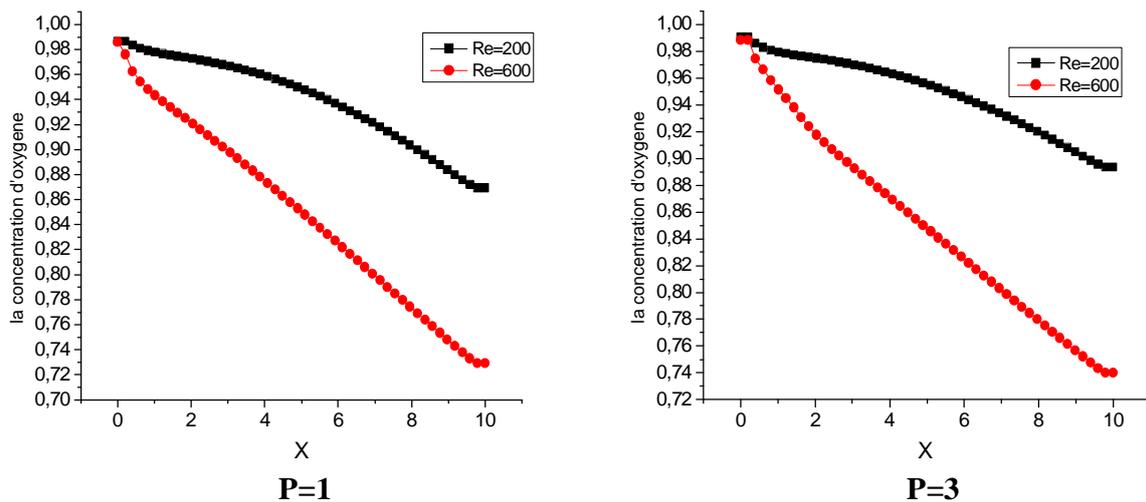


Figure 11: profils de concentration d'oxygène dans la couche catalyseur pour différents valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

Résultats et discussions

II.3. Profils des champs de distribution d'hydrogène

❖ P = 1

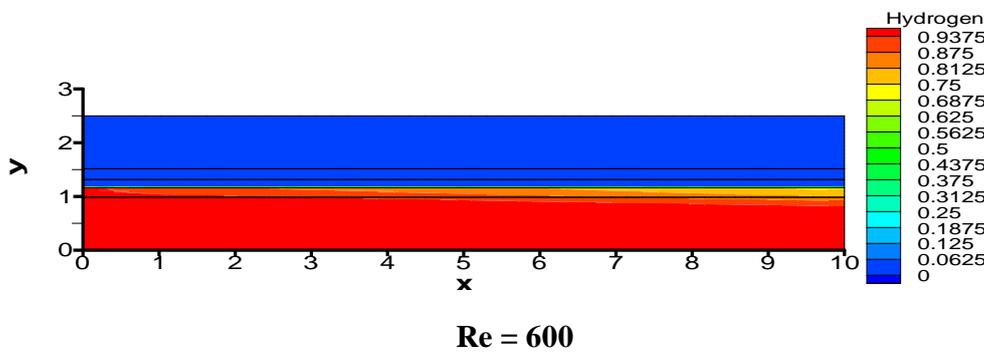
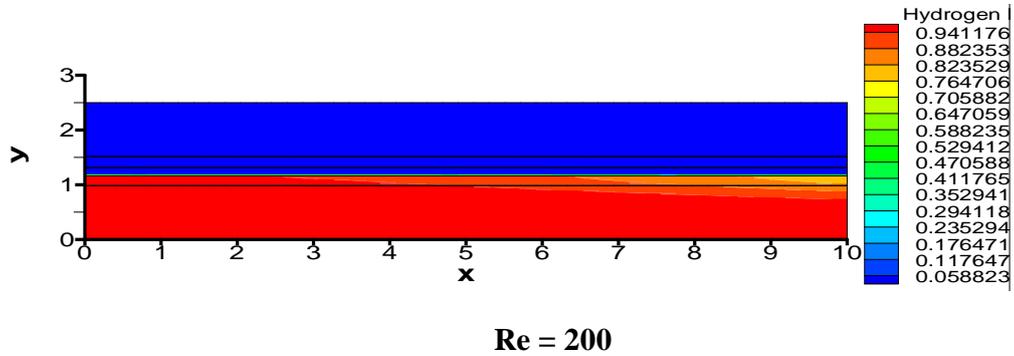
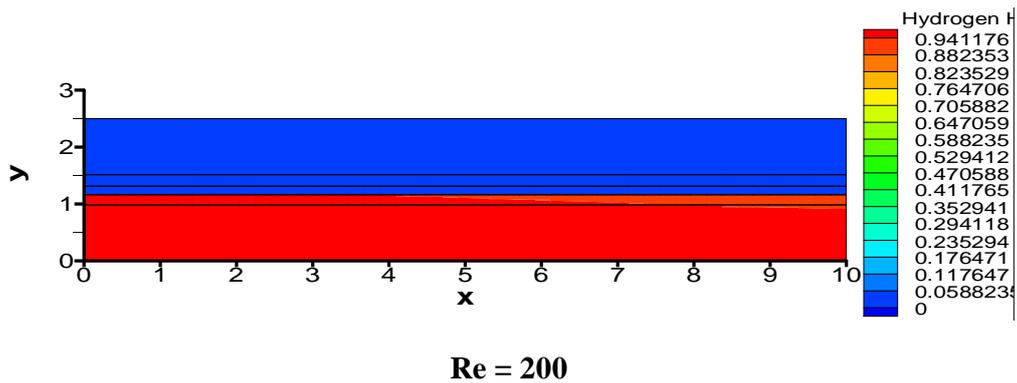


Figure 12 : champs de distribution d'hydrogène pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

❖ P = 3



Résultats et discussions

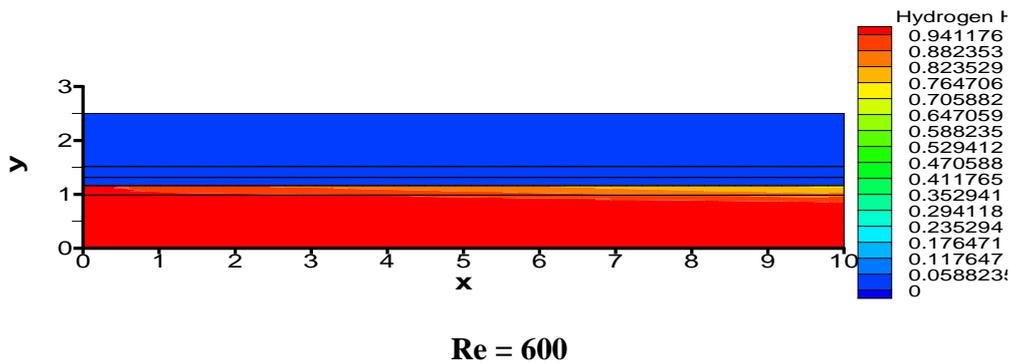


Figure 13 : champs de distribution d'hydrogène pour différents du nombre de Reynolds.

II.4. profils de consommation et de concentration d'hydrogène

Les champs de répartition et la consommation de l'hydrogène sont présentés sous forme de contours et de profils. Les figures (14, 15) montrent l'influence de l'écoulement dans le canal sur la répartition de l'hydrogène dans différentes parties anodique de la pile dans le plan (OXY). En général, la concentration d'hydrogène diminue de l'admission à la sortie pendant qu'elle est consommée, cette dernière est variée suivant le nombre de Reynolds et la pression d'entrée et on constate aussi que la répartition d'hydrogène, dans la couche catalyseur, est uniforme pour un nombre de Reynolds petit. La description des profils montre que la consommation d'hydrogène est le double de la consommation d'oxygène.

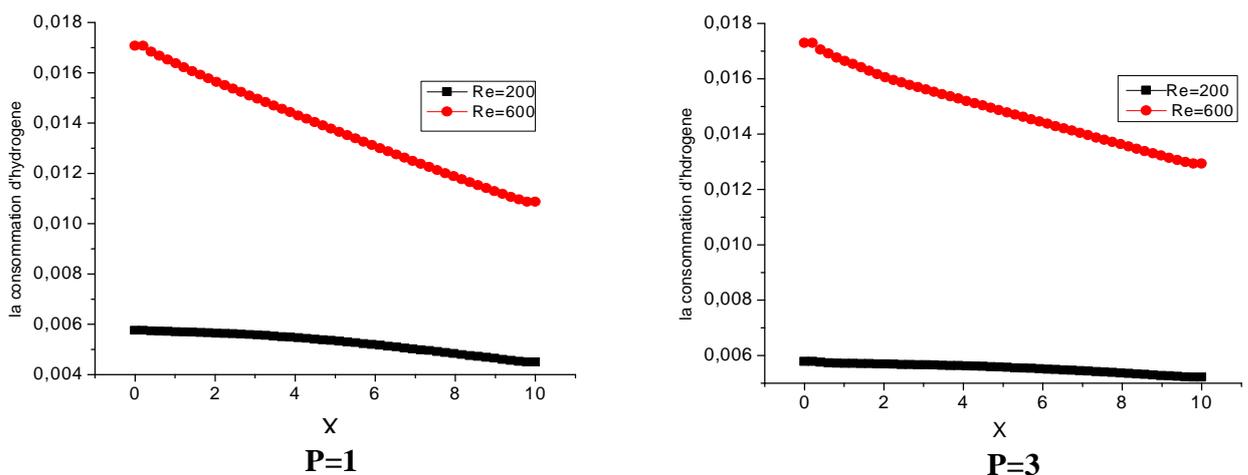


Figure 14 : profils de consommation d'hydrogène pour différents valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

Résultats et discussions

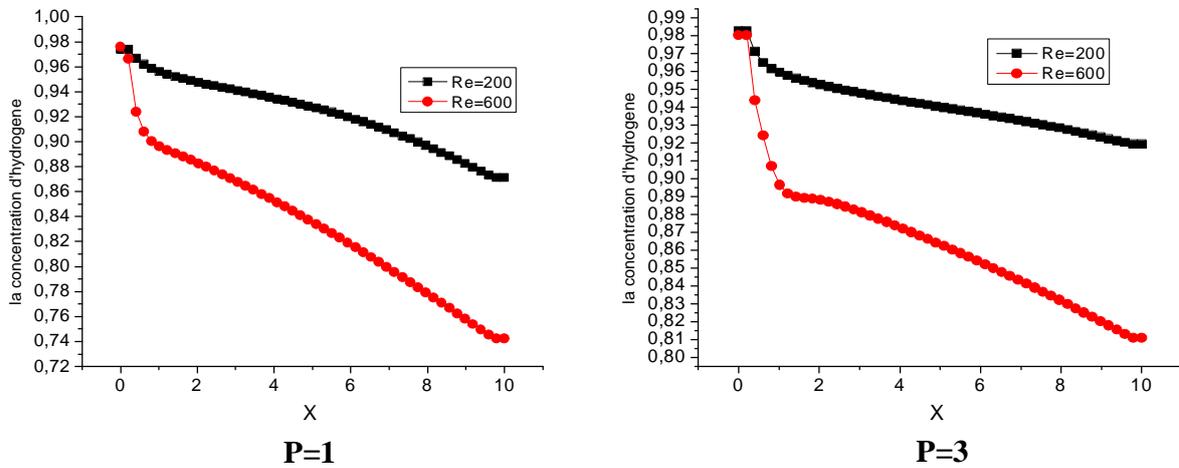


Figure 15: profils de concentration d'hydrogène dans la couche catalyseur pour différentes valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

II.5. Profils des champs de distribution de l'eau

La distribution des champs de l'eau est présentée dans les figures 16 et 17, les figures 18 et 19 présentent la production et la concentration dans la couche catalyseur respectivement. Des deux cotés les gaz sont humidifiés avant leur entrée dans la pile afin de réduire la résistance protonique de la membrane. Il s'agit de diffusion binaire à l'anode : H_2 , H_2O_{vap} et O_2 , H_2O_{vap} à la cathode dans l'épaisseur du matériau poreux.

La concentration de l'eau à l'intérieur de la cellule de carburant dépend fortement de la consommation des réactifs, raison laquelle les profils de production et de concentration ont la même allure que celles d'oxygène et d'hydrogène. Par conséquent la génération de l'eau est plus haute dans la couche catalyseur cathodique dans laquelle les réactions électrochimiques ont lieu. Les courbes de production et de concentration nous permettent de voir que la quantité d'eau produite pour Reynolds élevée est importante. L'eau produite au niveau du catalyseur se diffuse vers la membrane et la GDL.

Résultats et discussions

❖ **P = 1**

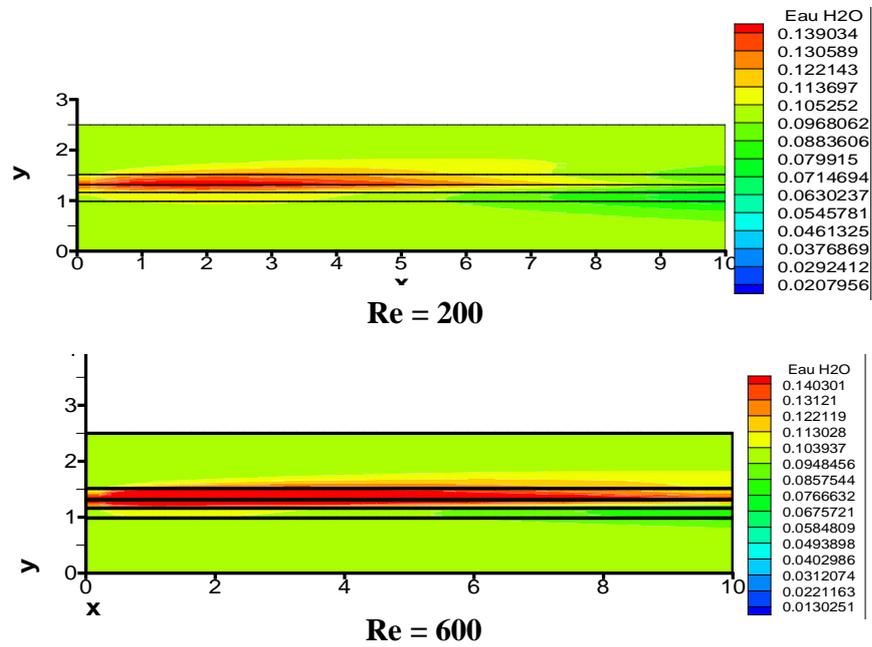


Figure 16 : champs de distribution d'eau pour différentes valeurs du nombre de Reynolds.

❖ **P = 3**

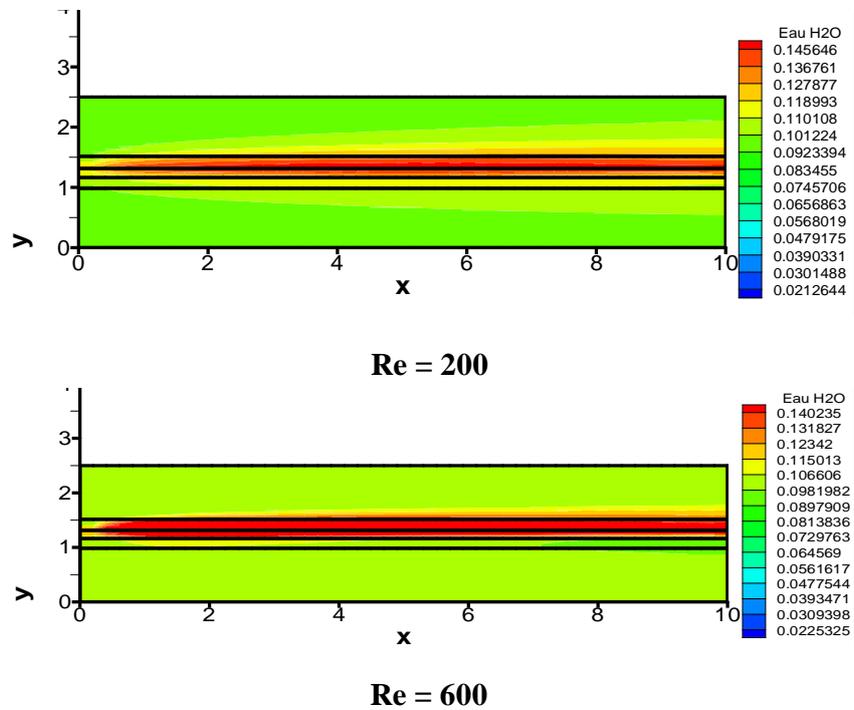


Figure 17: champs de distribution d'eau pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

II.6. profils de production et de concentration d'eau

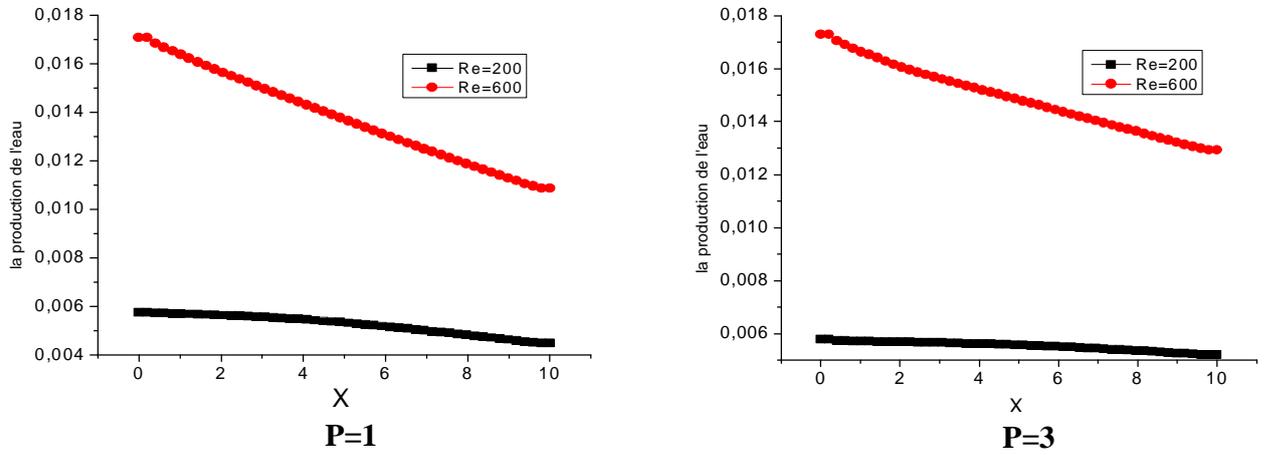


Figure 18 : profils de production d'eau, dans la couche catalyseur, pour différentes valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

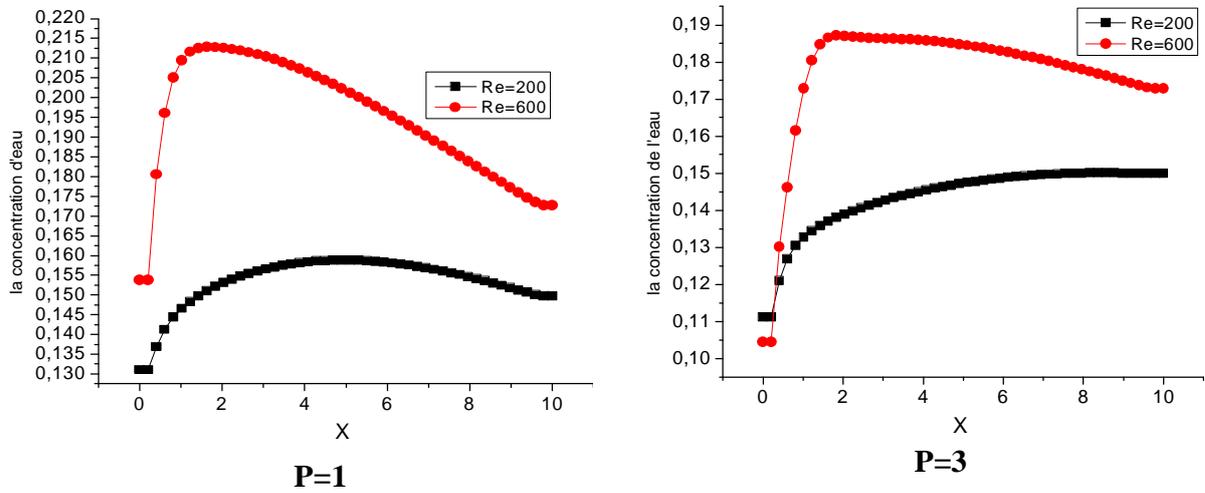


Figure 19 : profils de concentration d'eau, dans la couche catalyseur, pour différents valeurs de pression et de nombre de Reynolds.

III. Effet de la hauteur du canal sur la consommation des réactifs.

Dans cette partie on présente l'effet de la hauteur des deux canaux anodique et cathodique sur la consommation d'hydrogène et l'oxygène et par conséquent sur la formulation de l'eau. Dans la première partie, la simulation est faite pour $h_c=1$, tandis que dans cette partie on prend $h_c=0,75$ pour les mêmes valeurs de pression et de nombre de Reynolds. L'influence de ces paramètres sur la consommation des réactifs a été examinée.

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

L'effet de la hauteur du canal a été montré sur les figures ci-dessus pour différentes valeurs de pression d'entrée et de nombre de Reynolds. Les champs de concentration de l'oxygène, de l'hydrogène sont présentés sous forme de contours dans les figures (20, 21, 24 et 25), les figures (22, 26) présentent les consommations des réactifs, les figures (23, 27) présentent les concentrations d'hydrogène et d'oxygène au niveau du catalyseur.

L'effet de la hauteur du canal sur la consommation de l'oxygène et l'hydrogène a été montré, si la hauteur est plus petite on remarque qu'il y a une augmentation de la consommation des espèces. L'influence de la hauteur du canal devient importante pour un nombre de Reynolds élevé.

Résultats et discussions

❖ **P = 1**

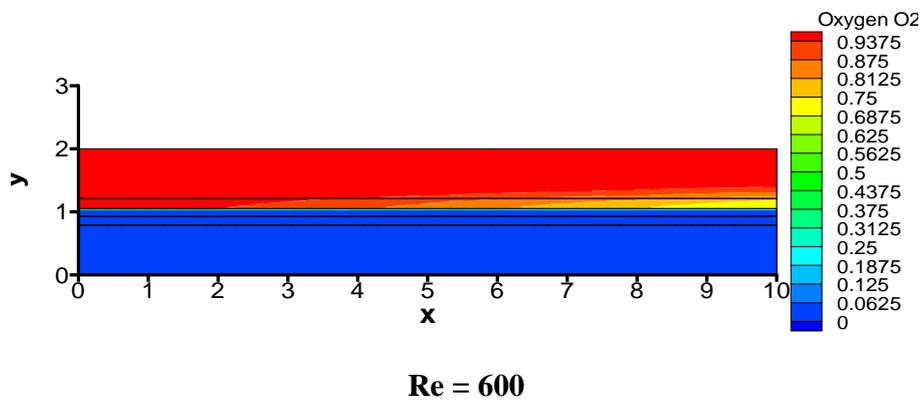
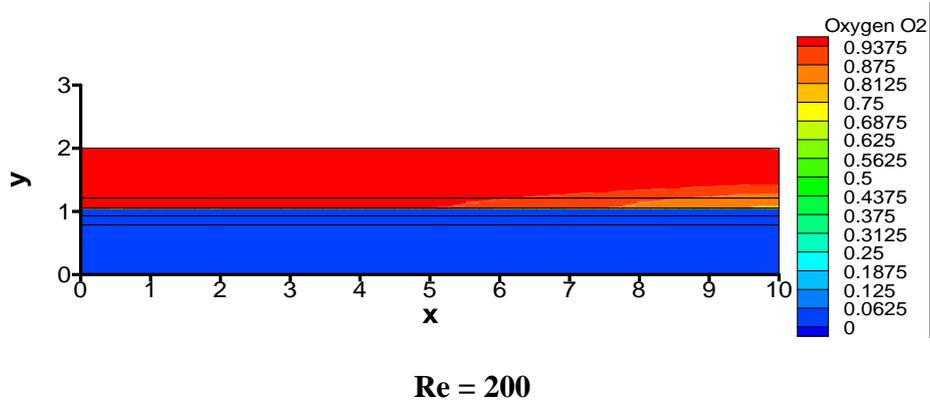
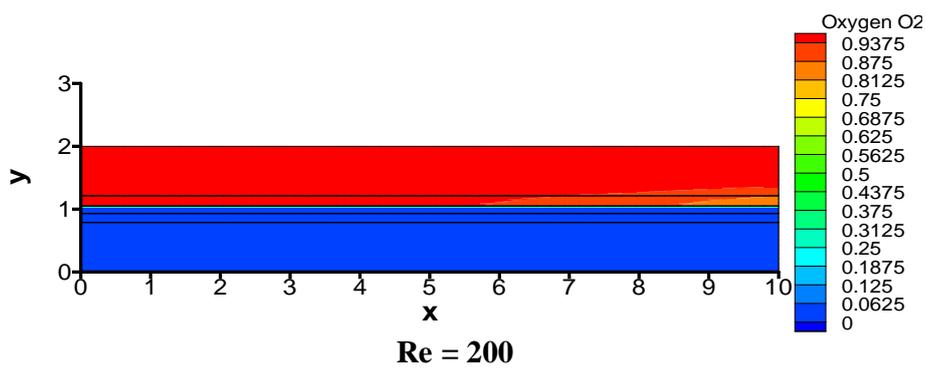


Figure 20 : champs de distribution d'oxygène pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

❖ **P = 3**



Résultats et discussions

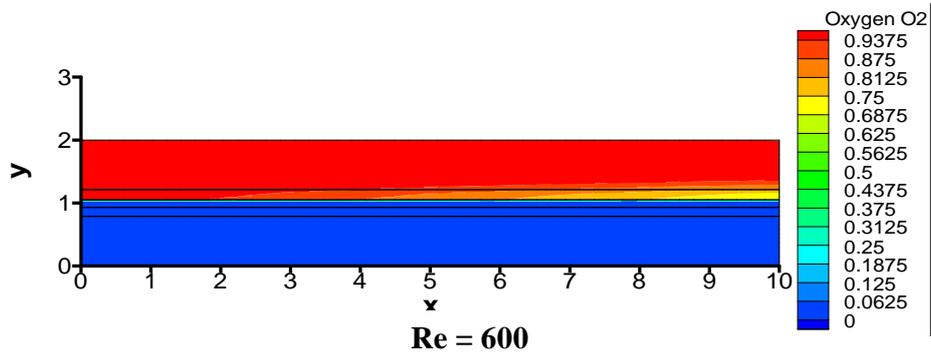


Figure 21 : champs de distribution d'oxygène pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

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

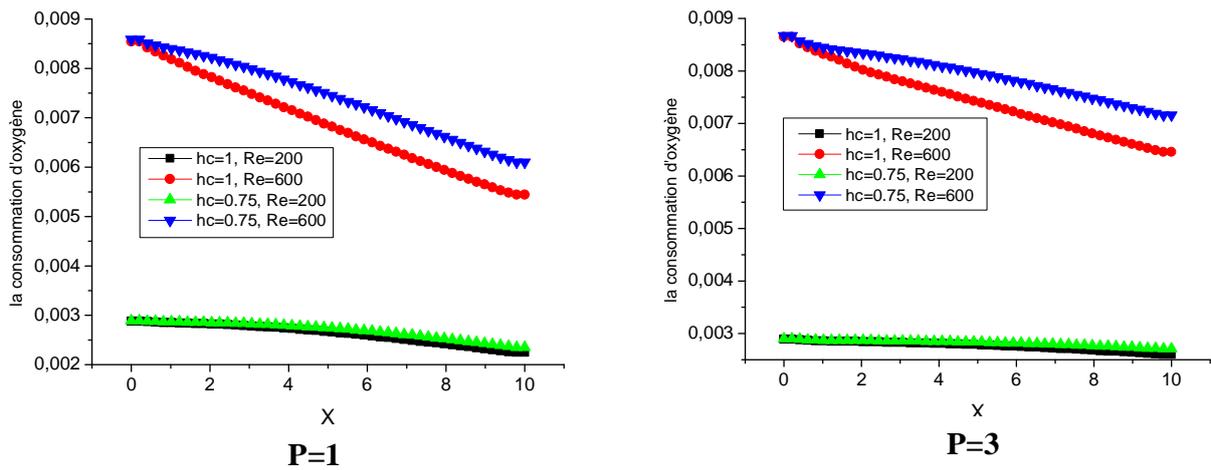


Figure 22 : profils de consommation d'oxygène pour différentes valeurs de pression, du nombre de Reynolds et de la hauteur du canal.

Résultats et discussions

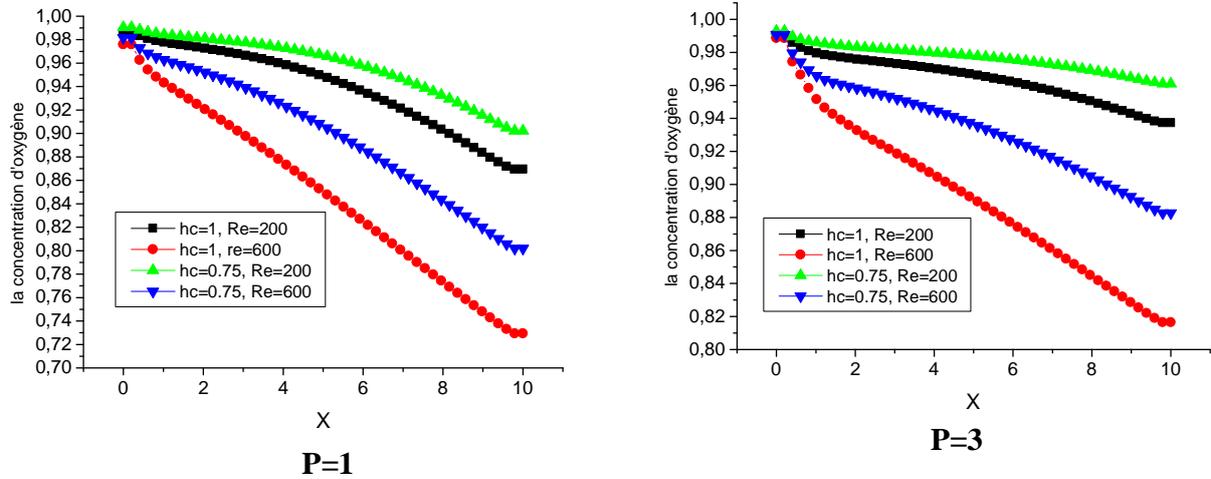


Figure 23 : profils de concentration d'oxygène dans la couche catalyseur pour différents valeurs de pression, de nombre de Reynolds et de hauteur du canal.

III.3. Profils des champs de distribution d'hydrogène

❖ $P = 1$

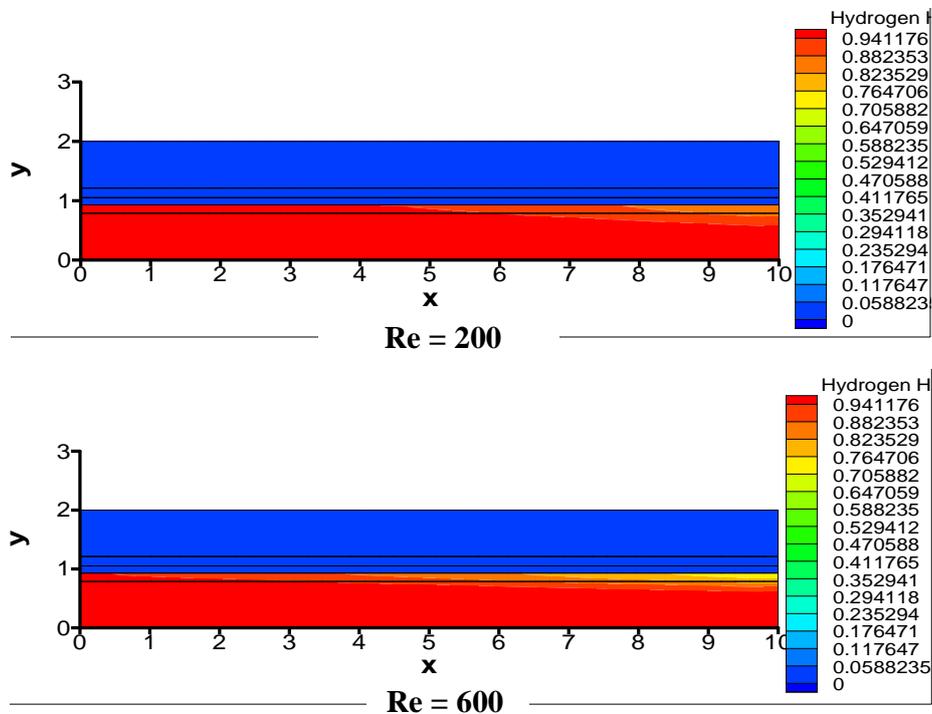


Figure 24 : champs de distribution d'hydrogène pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

Résultats et discussions

❖ $P = 3$

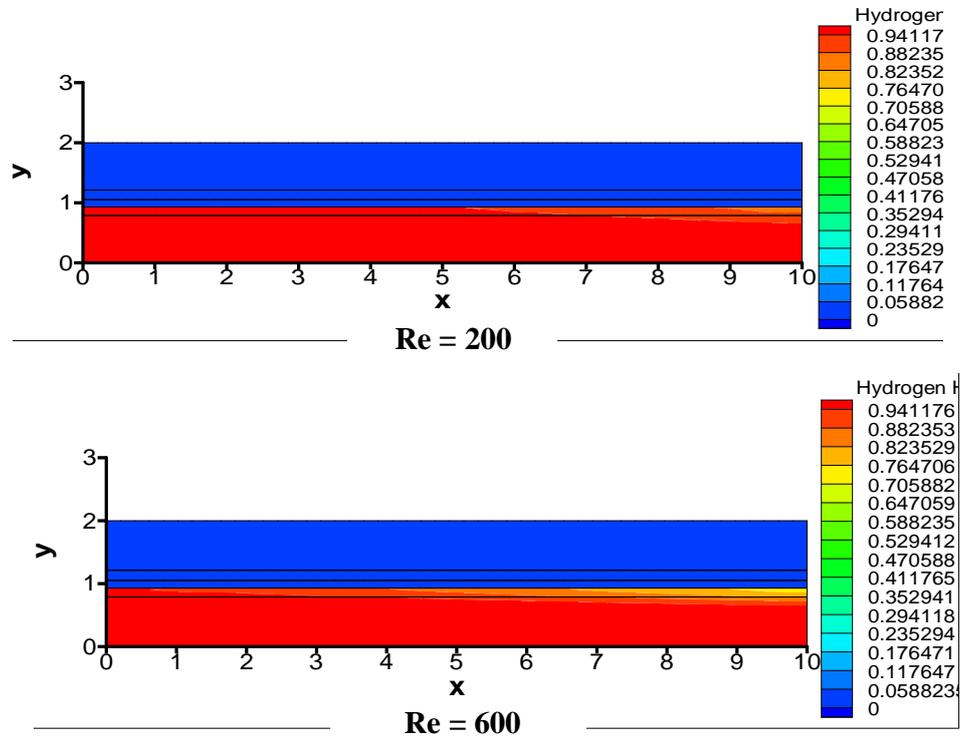


Figure 25 : champs de distribution d'hydrogène pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

III.4. profils de consommation et de concentration d'hydrogène

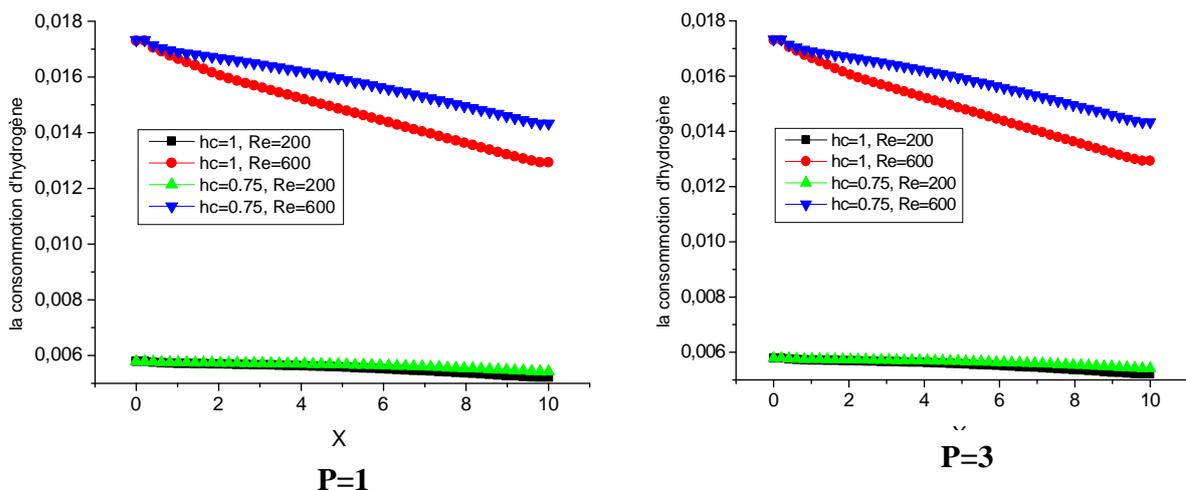


Figure 26: profils de consommation d'hydrogène pour différentes valeurs de pression, du nombre de Reynolds et de hauteur du canal.

Résultats et discussions

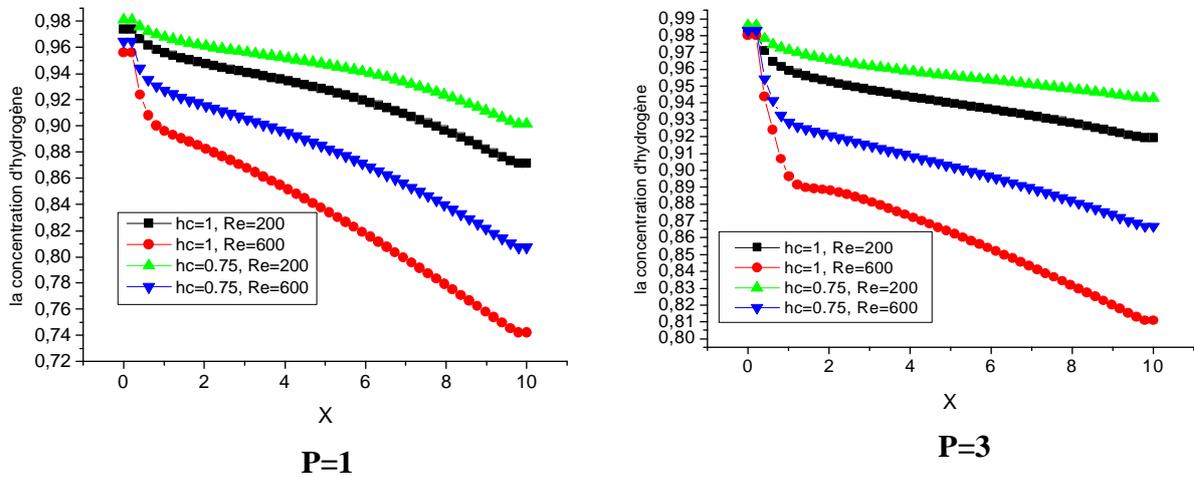


Figure 27 : profils de concentration d'hydrogène dans la couche catalyseur pour différentes valeurs de pression, du nombre de Reynolds et de la hauteur du canal.

III.5. Profils des champs de concentration de l'eau

Les figures 28, 29, 30 et 31 présentent la production de l'eau et leur diffusion vers les canaux. Pour les deux valeurs de pression d'admission ($P = 1$ et $P = 3$) et pour différents valeurs du nombre de Reynolds. Une fois la réaction électrochimique existe la production de l'eau se fait à l'interface cathode-membrane, dont l'augmentation du nombre de Reynolds conduit à l'augmentation de la production de l'eau, à cause de l'augmentation de la consommation des réactifs. D'après les résultats obtenus, on constate que la diffusion de l'eau vers les canaux pour un Reynolds faible est plus élevée à ce grand.

Résultats et discussions

❖ **P = 1**

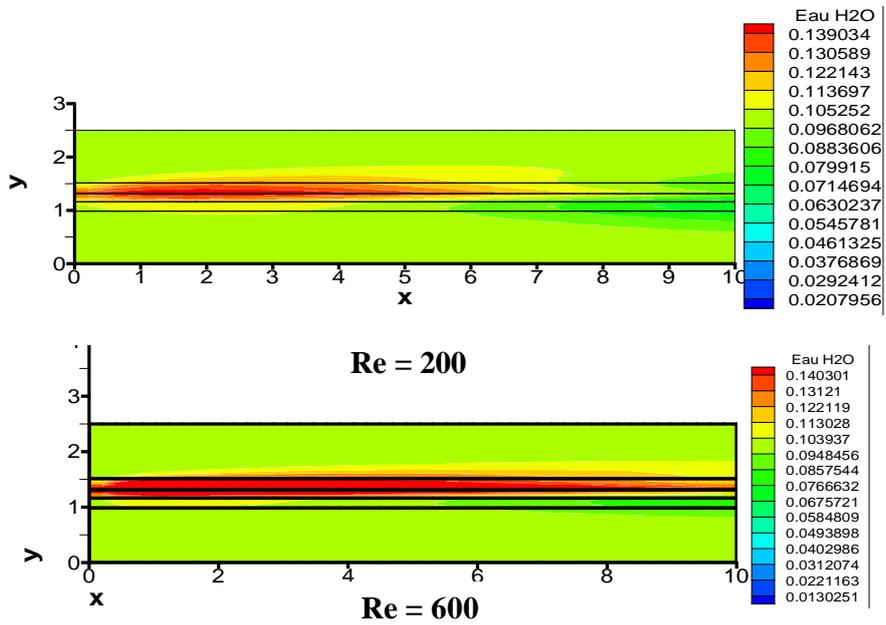


Figure 28 : champs de distribution de l'eau pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

❖ **P = 3**

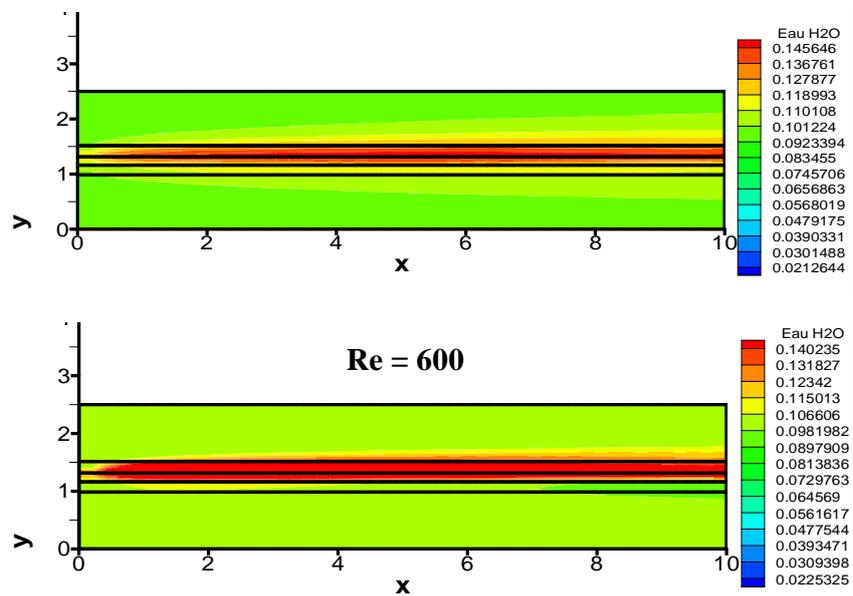


Figure 29 : champs de distribution de l'eau pour différents valeurs du nombre de Reynolds.

III.6. profils de production et de concentration de l'eau

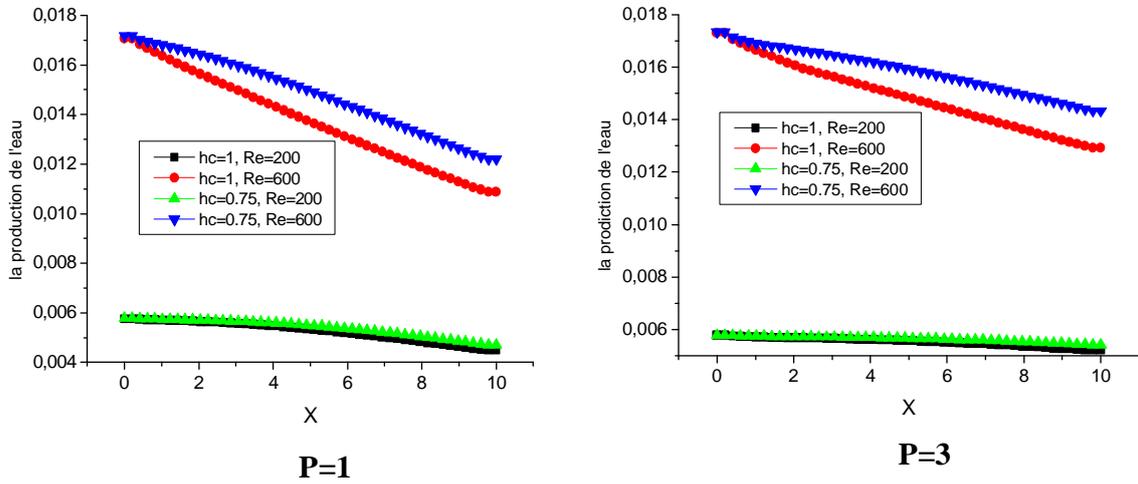


Figure 30 : profils de production de l'eau pour différentes valeurs de pression, du nombre de Reynolds et de la hauteur du canal.

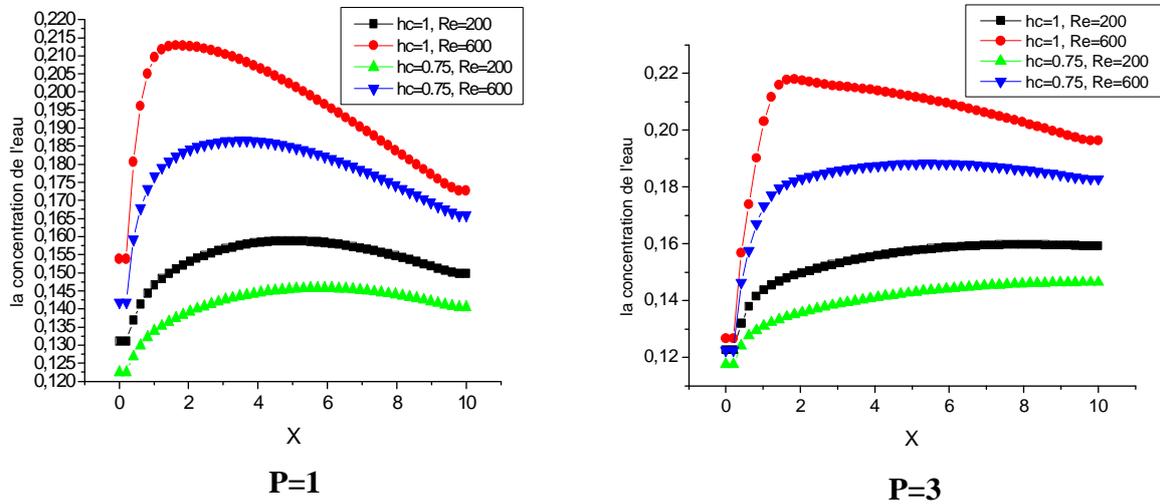


Figure 31 : profils de concentration de l'eau dans la couche catalyseur pour différentes valeurs de pression, du nombre de Reynolds et de la hauteur du canal.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans la présente étude, nous avons effectué des simulations dans une pile à combustible à membrane échangeuse de proton PEMFC avec une géométrie droite simple du canal. Les effets des paramètres de l'écoulement citer sur la consommation des réactifs, ont été examinés dans ce travail, en utilisant un programme de calcul réalisée par nous même. La concentration et la consommation des gaz de réaction, et la distribution de l'eau sont obtenues. Les équations mathématiques gouvernantes du phénomène d'écoulement et de transport des espèces ont été résolues, dans toutes les parties de la pile PEMFC, à l'aide de la méthode des volumes finis. Un ensemble d'hypothèses ont été considérés pour simplifier le problème et atteindre la solution désirée.

D'abord, dans le premier cas, deux valeurs de nombre de Reynolds ($Re=200$, $Re=600$) avec deux valeurs de pression d'entrée du canal ($P=1$, $P=3$) ont été choisies avec la même hauteur de canal ($h_c=1$) pour examiner leurs effets. Dans le deuxième cas, les mêmes valeurs de nombre de Reynolds et de pression sont examinées pour une nouvelle hauteur du canal ($h_c=0.75$) afin de voir l'effet de cette dernière. Les résultats des simulations en fonction de ces paramètres d'écoulement de canal nous permettent de conclure :

- Une consommation des réactifs importante, pour un nombre de Reynolds élevé, et une distribution homogène de celles-ci pour un nombre de Reynolds faible.
- l'effet de la pression d'entrée des canaux anodique et cathodique démontre qu'une faible variation est manifestée sur la concentration d'hydrogène et d'oxygène.
- Les canaux avec de plus petite hauteur ont montré une concentration d'oxygène et d'hydrogène plus élevée. L'effet de la hauteur est plus important pour une vitesse d'écoulement plus élevée (nombre de Reynolds).

Références:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Wael ALIMI, Ridha CHOUIKH, Amenallah GUIZANI, modélisation des transferts de masse et de charges au sein d'une cellule á combustible de type pemfc, *13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007*.
- [5] Sungho Lee, Heeseok Jeong, Byungki Ahn, Taewon Lim, Youngjin Sona, Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances, *international journal of hydrogen energy* 33 (2008) 5691 – 5696.
- [6] 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.
- [7] Shiang-Wuu Perng, Horng-Wen Wu, Heat transfer in a PEMFC flow channel, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 3579–3594.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] S. Shimpalee, J.W. Van Zee, Numerical studies on rib/channel dimension of flow-field on PEMFC performance, *international Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 842 – 856.
- [14] Puneet K. Sinha, Chao-Yang Wang, and Uwe Beuscher, Transport Phenomena in Elevated Temperature PEM Fuel Cells, *Journal of the Electrochemical Society*, 154-1-B106-B116-2007.
- [15] Wei-Mon Yan, Hung-Yi Li, Po-Chiao Chiu, Xiao-Dong Wang, Effects of serpentine flow field with outlet channel contraction on cell performance of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 178 (2008) 174–180.
- [16] 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)*.
- [17] Mohammad Hadi Akbari, Behzad Rismanchi, Numerical investigation of flow field configuration and contact resistance for PEM fuel cell performance, *Renewable Energy* 33 (2008) 1775–1783.
- [18] Rajesh Boddu, Uday Kumar Marupakula, Benjamin Summers, Pradip Majumdar, Development of Bi-polar Plates with Different Flow Channel Configurations for Fuel cells, *Journal of Power Sources*, (2008) 12-156.
- [19] Tang Yuan Chen, Chang Hsin Chen and Chiun Hsun Chen, the experimental study of the effect of flow pattern geometry on performance of micro proton exchange membrane fuel cell, *World Academy of Science, Engineering and Technology* (2009) 55.
- [20] Jérôme lachaize, Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, Thèse préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH Unité Mixte de Recherche du CNRS n°5828,2004.page 15.
- [21] Marie-Cécile PERA, Systèmes Pile à Combustible Enjeux – Technologies Applications – Perspectives, 2004/2005.
- [22] Nicolas ROMANI, Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué, THÈSE DE DOCTORAT, université de paris-sud 11, septembre 2007.
- [23] Benchrif Rachid, Zejli Driss, Bennouna Abdelaziz et Zazi Khalida. Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité, Centre National de Recherche Scientifique et Technique Unité de Technologies et Economies des Energies Renouvelables.
- [24] Julien Ramousse, transferts couples masse-charge-chaleur dans une cellule de pile a combustible a membrane polymère, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), novembre 2005.
- [25] Colleen Spiegel, PEM fuel cell molding and simulation using MATLAB, Elsevier, 2008.

- [26] James Larminie, Andrew Dicks, fuel cell Systems explained, second Edition, John wiley and sons Ltd, the Atrium, southernGate, Chichester, West sussex p0198SQ, England 2003.
- [27] Mihai RADULESCU, Systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vaporeformage externe, thèse de doctorat, université de HENRI POINCARÉ, septembre 2006.
- [28] 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).
- [29] Maher A.R,sudig.AL-Baghdadi, Modelling of proton exchange membrane fuel cell.performance based on semi-empirical equations, renewable energy , 30 (2005) 1587-1599.

Abstract

The objective of this study is modeling numerical, two-dimensional and transient of phenomena of the laminar flow of gases in the channels, and to see its influences on the consumption of the reactive in the exchange membrane fuel cell. A program based on the finite volume method was realized to simulate the equation system governing the phenomena. This modeling visualize the effect of the Reynolds number, the pressure of admission of gases and the heights of the channels on the distribution of the different parameters of model in the plan (OXY).

Résumé

L'objectif de cette étude est la modélisation numérique, bidimensionnelle et transitoire du phénomène d'écoulement laminaire des gaz dans les canaux et voir ses influences sur la consommation des réactifs dans une pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Un programme basé sur la méthode des volumes finis a été réalisé pour simuler le système d'équation gouvernant le phénomène. Cette modélisation a visualisé l'effet du nombre de Reynolds, la pression d'admission des gaz et les hauteurs des canaux sur la distribution des différents paramètres du modèle de la pile dans le plan (OXY).

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة نموذج عددي، ثنائي البعد و بدلالة الزمن لظاهرة التدفق الصفحي للغازات ونرى تأثيرها على استهلاك المتفاعلات داخل خلية وقودية ذات غشاء نفوذ للبروتونات. و قد قمنا بانجاز برنامج عددي يعتمد على طريقة الحجوم المتناهية لحل جملة المعادلات التي تحكم الظاهرة. هذا النموذج يبرز تأثير عدد رينولدز ، ضغط الغازات و ارتفاع القنوات على توزيع مختلف متغيرات النموذج المدروس للخلية في المستوي (XY).