

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana



Faculté des Science et de la Technologie
Département de Technologie

Mémoire de fin d'études

En Vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière : Génie mécanique /Spécialité : Energétique

Thème :

**Etude des phénomènes des transferts thermiques
dans la pile à combustible PEM**

Présenté par :

 KHEMACHE Abdelhak

 EMBAREK Aissam

Encadré par :

 Dr. Bilal ABDEREZZAK

 M. Djelloul BELKACEMI (co-encadreur)

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Al Hamdo li Allah le tout puissant, nous avons achevé ce travail que je dédie aux deux personnes qui représentent mon monde, Pour ma chère maman celle qui m'a encouragé tout au long de ma vie par son amour inconditionnel et son soutien constant, ainsi que mon père, mon exemple et ma source de motivation. Sans eux, je ne serais jamais arrivé là.

Je tiens à remercier tous les gens qui m'ont donné un coup de main, qui m'ont souhaité le bien et qui ont cru en moi, votre amour et encouragement sera à jamais reconnaissable.

A mes chers amis, ma famille et mes collègues, merci.

Khemache Abdelhak

Dédicaces

*Pour mes chers et bien aimée parents qui m'ont encouragé tout au
long de ma vie avec leur soutien constant,*

Ma très chère et bien aimée maman

Et mon très cher et bien aimé papa

A ma famille,

A mes amis,

A mes collègues,

Et à tous ceux qui m'ont soutenu.

Embarek Aissam

Remerciements

Nous tenons de prime abord à remercier l'ensemble de nos enseignants qui ont contribués à notre formation dans la faculté des Sciences et technologies tout au long de notre cursus au sein de l'université de Khemis-Miliana.

*Une sincère et totale gratitude et une profonde reconnaissance est dédiée à notre encadreur de PFE de Master monsieur **ABDEREZZAK Bilal**, Maître de Conférences à l'Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, encore pour sa bonne humeur, son dynamisme quotidien et aussi pour sa convivialité a son bureau malgré ses tâches administratives très lourdes à assurer en parallèle. Sans son aide et sa disponibilité, la réussite de ce modeste travail Master n'aurais pas eu lieu.*

*Un grand merci à monsieur **BELKACEMI Djelloul** de l'UNDES pour son aide inconditionnelle et pour sa disponibilité et ses conseils précieux.*

*Une sincère et profonde reconnaissance et remerciement aux membres de jury le Professeur **KERFAH Rabah** et **ALLICHE Redha**, pour le temps et l'attention qui ont attribués à la lecture et à l'examination de notre travail.*

Tables des matières

<i>Liste des figures</i>	6
<i>Liste des tableaux</i>	7
<i>Nomenclature</i>	8
<i>Introduction générale</i>	11
<i>Chapitre 1 : La technologie de la pile à combustible PEM</i>	14
1 Introduction	14
2 Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM	14
3 Avantages et limitations	15
4 Les différents types des piles et les domaines d'application	18
5 Conclusion	20
<i>Chapitre 2 : Les phénomènes des transferts thermiques Au cœur de la pile PEM</i>	22
1.1 Les phénomènes de transfert de charge	22
1.2 Les phénomènes de transfert de masse	28
1.3 Les phénomènes de transfert de chaleur	32
<i>Chapitre 3 : Modélisation et simulation numérique</i>	38
1 Introduction	38
2 Modélisation du transfert de chaleur dans la pile PEM	38
2.1 Le modèle mathématique 1D	40
2.2 La représentation 2D du phénomène thermique	46
2.3 Interprétation des résultats	58
<i>Conclusion Générale</i>	59
<i>Références Bibliographiques</i>	60

Liste des Figures

Chapitre 01

Figure (I.1). Schéma de fonctionnement de la pile PEM

Chapitre 02

Figure (II.1). Structure chimique de Nafion

Figure (II.2). Les différents flux de matières dans une cellule de pile PEM

Figure (II.3). Les expressions des sources de chaleur dans une cellule de pile PEM

Chapitre 03

Figure (III.1). La cellule élémentaire à étudier

Figure (III.2). Distribution de la température dans la cellule

Figure (III.3). Un maillage 2D quadratique de plus de 200K de cells et resserré dans les zones d'interface (Gambit).

Figure (III.4). Conditions aux limites (*Ansys Fluent*).

Figure (III.5). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=9$ m/s

Figure (III.6). La tension de la cellule par effet de température

Figure (III.7). Représentation surfacique

Figure (III.8). Conductivité protonique par (T)

Figure (III.9). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=1.5$ m/s.

Figure (III.10). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=3$ m/s.

Figure (III.11). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=6$ m/s.

Figure (III.12). La conductivité protonique σ_{H^+} en fonction de (T) et lambda λ

Figure (III.13). La conductivité protonique σ_{H^+} en fonction de lambda λ

Figure (III.14). La relation entre la température T et la teneur en eau λ

Figure (III.15). La relation entre lambda (λ) et la teneur en eau (a)

Figure (III.16). La relation entre la température (T) et la teneur en eau (a)

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau (1.1). Comparaison des piles à combustible

Chapitre 03

Tableau (3.1). Valeurs numériques de la simulation

Tableau (3.2). Les conditions aux limites du modèle étudié

Tableau (3.3). Les résistances thermiques des éléments

Tableau (3.4). Récapitulatif des températures interfaciales

Tableau (3.5). Les équations donnant les températures de chaque élément

Nomenclature

Notations associées à l'alphabet romain

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
a	Activité de l'eau	-
aq	Aqueux (solution)	
S	Surface	[m ²]
A _{ac}	Coefficient empirique	[V]
b	Coefficient empirique	[A.m ⁻²]
c	Concentration molaire	[mol. m ⁻³]
C _p	Capacité calorifique	[J. kg ⁻¹ .K ⁻¹]
D	Coefficient de diffusion	[m ² .s ⁻¹]
E	Tension réversible	[V]
EW	Poids équivalent	[g.mol ⁻¹]
F	Constante de Faraday	[C. mol ⁻¹]
h	Coefficient de convection	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
I	Courant	[A]
j	Densité de courant	[A.m ⁻²]
j _o	Densité de courant d'échange	[A.m ⁻²]
k	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
L	Longueur	[μm]
liq	Liquide	
m	Coefficient empirique	[V]
n	Coefficient empirique	[m ² .A ⁻¹]
n _e	Nombre d'électrons transféré	-
P	Pression	[atm]
Q	Quantité de chaleur	[J]
q	Charge électrique	[Coulombs . mol ⁻¹]
q̇	Densité de flux de chaleur	[W /m ²]
R	Constante des gaz parfait	[J K ⁻¹ mol ⁻¹]

r	Résistance spécifique	[$\Omega \cdot m^2$]
T	Température	[K]
V	Tension	[V]
V _{cell}	Tension de la cellule	[V]
We	Travail électrique	[J]
σ_{H^+}	Conductivité ionique protonique	[J]
x	Fraction massique	-

Notations associées à l'alphabet grec

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
α	Coefficient de transfert de charge	
η	Pertes de tension	[V]
λ	Teneur en eau	-
σ	Conductivité de la membrane	[S.m ⁻¹]
ρ	Masse volumique	[Kg.m ⁻³]

Indices et exposants

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
a	Anode
ac	Anode Cathode
ACL	Couche catalytique coté anode
act	Activation
c	Cathode
conc	Concentration
H ⁺	Proton
m	Membrane
max	Maximum (courant)
ohm	Ohmique
Sorp	Sorption
sys	Système
th	Théorique
tot	Totale

Introduction Générale

Introduction générale

La pollution et le réchauffement climatique causés par l'utilisation des sources d'énergies fossiles épuisables, sont des problèmes qui ont poussé les chercheurs et les scientifiques à trouver des sources d'énergies vertes et renouvelables. Il est ainsi devenu nécessaire et même urgent de trouver des autres ressources d'énergies qui possèdent les mêmes propriétés que les ressources actuelles, en tenant compte de l'aspect stockage et transportation, et avec moins de points négatifs.

Dans cette situation, l'hydrogène apparaît comme un choix intéressant qui peut remplacer le pétrole ou les autres combustibles utilisées quotidiennement pour produire de l'énergie non polluante et propre. L'hydrogène, (inexistant à l'état naturel), est considéré comme un vecteur énergétique qui a un caractère stockable. Pour cela, la pile à combustible s'impose comme la pièce manquante qui peut transformer l'énergie chimique qui se réside dans l'hydrogène en énergie électrique, sans avoir recours à la combustion classique, et avec même des rendements très élevés.

La problématique scientifique de notre sujet réside dans la contribution d'une étude du dégagement de chaleur dans une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (*PEMFC*). La bonne compréhension du phénomène thermique de la pile est primordiale pour passer à sa bonne gestion thermique. Les éventuelles questions scientifiques relatives à ce sujet sont clairement liées à la localisation des différents niveaux de températures, ainsi que la quantification des différentes sources chaudes à l'intérieur de la pile. A l'issue, et en fonction de cette étude, on se contentera d'évaluer les risques relatifs à un dysfonctionnement du système de refroidissement. Entre localisation des points chauds et évaluations des risques, on pourra aisément se prononcer sur l'éventuel système de refroidissement adéquat à cette pile.

Dans notre projet de fin d'étude, on s'intéresse à l'étude du transfert thermique dans la pile à combustibles de type PEM (Proton Exchange Membrane), on peut aussi la trouver sous le nom de PEMFC on y ajoutant (Fuel Cell). Il est à noter que cette technologie est bien présente dans diverses applications. La pile à combustible est une nouvelle technologie découverte par sir William Grove en 1839 après qu'il a fait sa célèbre expérience de la pile

à combustible avec une cellule hydrogène - oxygène, et des électrodes en platine poreuses et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Cette technologie peut être employée dans multiples applications (applications spatiale, applications automobiles, la cogénération, la production d'électricité).

La pile à combustible PEM constitue une actualité scientifique maintenant plus que jamais, plusieurs entreprises et laboratoires de recherche visant l'amélioration et le développement de la pile à combustible et leurs composants l'une de ses priorités pour publier les premiers prototypes orientés au marché. Elle est devenue la technologie la plus proche dans le plan commercial.

Notre curiosité scientifique et le fait de traiter un sujet nouveau nous a poussé davantage pour opter à choisir cette thématique prometteuse. De plus, le titre de sujet reflète une nouveauté qui peut être publiable dans un journal scientifique.

Dans ce manuscrit, on y trouve trois grands chapitres en plus d'une conclusion générale.

Le premier chapitre initie bien le lecteur dans le domaine de l'hydrogène de la pile à combustible en passant par le principe de fonctionnement et les avantages et limitations de cette technologie. Il illustre bien le contexte général de ce travail en présentant une riche recherche bibliographique sur le thème abordé. La dernière partie de ce chapitre présente l'utilité de notre recherche ainsi que les objectifs scientifiques à atteindre.

Le deuxième chapitre tiendra compte des phénomènes de transferts ainsi que les équations gouvernantes relatives à cela. Plusieurs illustrations et schéma sont présentés avec les commentaires nécessaires à la bonne compréhension du phénomène globale. Une attention spéciale est dédiée aux équations liées au transfert thermique et à l'état d'hydratation de la membrane.

Le troisième chapitre est clairement destiné à la modélisation et à la simulation numérique de cette problématique scientifique. Une première partie traite la distribution de la température le long d'une cellule qui pourra nous aider à localiser et quantifier les points chauds dans la zone élémentaire étudiée. Une seconde partie s'engage dans la recherche de l'impact l'augmentation de la température sur le bon fonctionnement de la pile. Pour cela,

plusieurs conditions peuvent causer la hausse de la température d'une pile PEM. Dans notre cas, nous avons supposé un éventuel dysfonctionnement du système de refroidissement. Un modèle mathématique est présenté et une visualisation des résultats de la simulation à donner lieu à des constats pertinents.

La conclusion générale résume le travail fait et regroupe les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1

La technologie de la pile à combustible PEM

1. Introduction

La pile à combustible est une nouvelle technologie qui peut être employée dans plusieurs applications énergétiques. Cette technologie innovante et amie à l'environnement abrite plusieurs domaines d'études, dont certains font parties de notre spécialité tel que la mécanique des fluides et la thermique. Notre curiosité scientifique et le fait de traiter un sujet nouveau nous a poussé davantage pour opter à choisir cette thématique prometteuse. De plus, le titre du sujet reflète une nouveauté qui peut être publiable dans un journal scientifique dont nous sommes très enthousiastes de le faire.

2. Principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM :

La pile à combustible PEM est constituée de deux électrodes et un électrolyte. Une électrode s'appelle l'anode est chargée négativement. L'autre électrode est appelée la cathode et elle est chargée positivement. L'électrolyte est la membrane et elle est considérée comme le cœur de la cellule élémentaire. L'hydrogène est introduit du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Les protons d'hydrogène traversent la membrane qui sépare les deux électrodes et s'installent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Les électrons circulent dans un circuit externe représenté par la charge (figure 1.1)

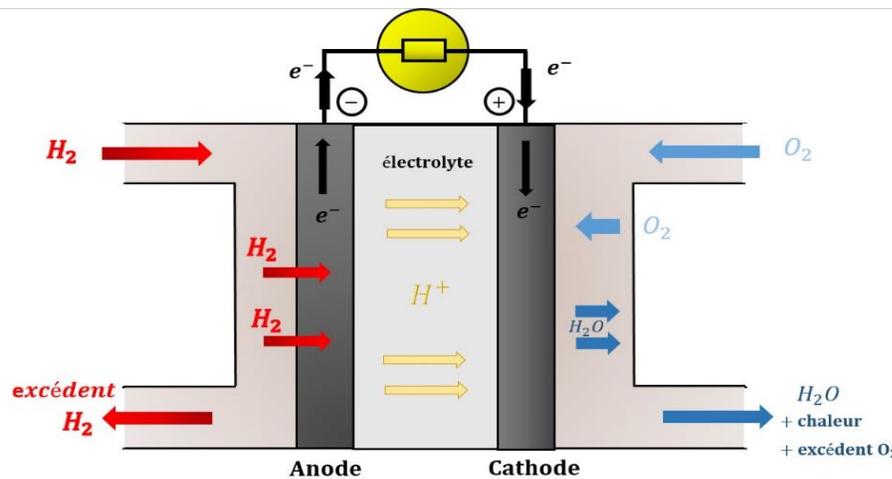


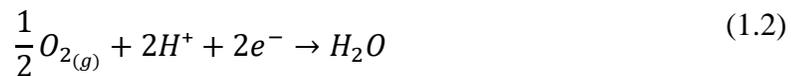
Figure (I.1). Schéma de fonctionnement de la pile PEM

La pile à combustible PEM convertit l'hydrogène et l'oxygène en énergie électrique selon les réactions suivantes, [1]:

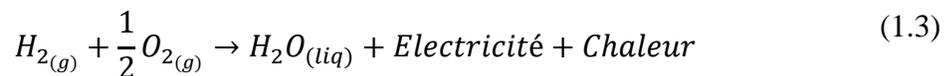
Anode:



Cathode:



La réaction globale :



Ce type des piles à une température de fonctionnement inférieure à 100 C° (entre 60 et 80 C°) et un rendement électrique de 40 à 50%. Le temps de démarrage de cette pile est très rapide grâce à sa faible température de fonctionnement. La puissance de la pile s'ajuste de quelques dizaines de watts à une dizaine de watts, [2].

Ces piles sont fabriquées pour alimenter des véhicules et des installations de petite ou moyenne taille. Il est essentiel de noter que pour le fonctionnement d'une pile, elle doit être associée à des équipements auxiliaires pour assurer le stockage des réactifs (l'hydrogène et l'air) et leur conditionnement (débit, pression et hygrométrie) et le contrôle des produits de la réaction (eau, chaleur et électricité). Ces accessoires représentent 60% de la masse du système d'installation et 20% de dépense énergétique.

3. Avantages et limitations

Comme chaque technologie, la pile à combustible PEM contient des avantages et des inconvénients spécifiques.

- **Avantages :**

Les piles à combustibles sont l'actualité de recherche dans le domaine de production d'énergie et elles sont classées comme des solutions de futur dans ce domaine.

Nous allons citer les points forts de cette technologie qui justifient son importance et son intérêt de recherche et de développement :

- Temps de démarrage très rapide
- Temps de réponse très rapide
- Electrolyte solide

Bien qu'elle soit considérée comme le cœur de la cellule et le facteur essentiel dans les réactions chimiques, la membrane utilisée dans la pile PEM est dans son état solide, ce qui signifie que y'a pas de risque de fuite de l'électrolyte.

- Rendement énergétique très élevé

Le rendement électrique d'une pile à combustible PEM varie entre 40 et 50 %. La quantité d'énergie non convertie en énergie électrique sera transformée sous forme de chaleur et elle sera dégagée sous forme de vapeur ou d'eau chaude.

Dans le cas d'utilisation dans le domaine domestique, la pile à combustible est capable de fournir de l'électricité d'un côté, et de l'eau chaude de l'autre, ce dernier peut être utilisé pour le chauffage domestique.

- Elles sont très peu polluantes

Les piles PEM sont considérées comme une source d'énergie amie à l'environnement car son seul déchet quand on utilise l'hydrogène comme combustible c'est bien l'eau, et si on la compare avec un véhicule à essence, on trouve qu'elle est 99% en moins de monoxyde de carbone, [3].

- La température de fonctionnement :

Les piles à combustible à membrane polymère électrolytique fonctionnent à basse température (moins 100°C), elles ont un rendement électrique meilleur. Ce type de piles est bien adapté aux applications portables, [2].

- Modulabilité

Les piles à combustible ont un avantage important c'est qu'elles sont modulables, c'est-à-dire elles peuvent être fabriquées dans des différentes tailles. La taille d'une pile peut être

augmentée ou réduite sans effet sur son rendement électrique, car ce dernier est indépendant de la taille de la pile, [4].

- Silence

Les piles à combustible ne font pas trop de bruit, elles sont très calmes, [5]

- Insensibilité au CO₂

Limitations :

Malgré tous ses avantages, la pile à combustible lui reste plusieurs points importants à améliorer pour qu'elle puisse parvenir à maturité

- Coût de fabrication :

Selon A.HADDAD et EL-HASSANE AGLZIM et al [6] et [7] celui-là est considéré comme le plus gros obstacle concernant la pile à combustible.

Pour la pile à membrane échangeuse de protons, l'utilisation des métaux nobles dans la fabrication des électrodes, la membrane, le catalyseur et les plaques bipolaires est bien la cause de son coût très élevé.

Les membranes polymères coûtent environ 100.000 dinars par m², ainsi que le prix de platine varie à 17euros par gramme. Aussi, la fabrication des plaques bipolaires en graphite est cher et coûteuse. Sans oublier l'assemblage des éléments et les pièces auxiliaires.

Pour le catalyseur, il y'a des progrès réalisés sur la teneur de platine (utilisation des alliages).

- La durée de vie :

Les piles à combustible fabriquées sont pratiquement des prototypes seulement, ça veut dire que la vision n'est pas vraiment claire sur la durée de vie des piles. Cette dernière varie de chaque de pile a une autre.

- Vieillessement :

Les composantes de la pile à combustible PEM sont soumises à un vieillissement chimique ou mécanique causé principalement par :

- L'humidité non contrôlée de la membrane.
- L'effet de la température qui cause la dégradation de la membrane.
- La perte d'activité catalytique.
- Dissemblance des matériaux utilisés.

4. Les différents types des piles et les domaines d'application

Il y'a plusieurs types de piles à combustibles au cours de développement actuel.

Les piles à combustibles sont classifiées selon la nature de l'électrolyte, ce dernier est le facteur principal pour la détermination de la température de fonctionnement d'un côté, et le type d'ion qui assure la conduction ionique de l'autre, [8]. On compte :

- La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC).
- La pile a méthanol (DMFC).
- La pile à combustible alcaline (AFC).
- La pile a acide phosphorique (PAFC).
- La pile a carbonates fondus (MCFC).
- La pile a électrolyte solide (SOFC).

Les domaines d'applications :

Les piles à combustibles sont utilisées dans plusieurs domaines expliqués ci-dessous :

- **Les applications transports :**

La pile à membrane échangeuse de protons PEMFC est bien le type utilisé pour la propulsion du véhicule car elle fonctionne à 80 °C avec un électrolyte en polymère. Les piles alcalines AFC sont aussi utilisées pour alimenter en électricité les appareils du véhicule comme le climatiseur et les autres appareils électroniques, [9].

- **Les applications portables :**

Les piles à combustibles utilisées pour les applications portables sont en compétition avec les batteries. Les piles doivent être fortes et peu sensibles aux conditions extérieures pour assurer un bon fonctionnement. Parmi les différents types des piles à combustibles existant,

seulement les piles à membranes échangeuse de protons PEMFC et les piles à méthanol DMFC peuvent s'adapter aux conditions de ce domaine grâce à leur faible température de fonctionnement qui diminue les problèmes de gestion thermique, [10].

- **Les applications stationnaires :**

Les piles à combustibles produisent l'électricité et la chaleur, et pour cela, les piles à carbonates fondus MCFC et les piles à électrolyte solide SOFC sont les types utilisés à la cogénération et la production centralisée d'électricité, [11].

- **Les applications spatiales et militaires :**

La NASA a utilisé des piles à méthanol AFC pour alimenter leurs navettes spatiales GEMINI qui est cours de programme et des missions APOLLO, [12].

On peut notamment noter que l'armée allemande a développé un sous-marin qui fonctionne grâce à la pile à combustible, [13].

- **Les capteurs :**

Les piles à combustible sont aussi utilisées comme une source d'énergie par plusieurs capteurs. Parmi ses capteurs, on peut nommer :

-les capteurs de terrain :

Il existe plusieurs types de capteurs développés par le pôle national de recherche et d'implantation régionale (PNIR).

-les capteurs optiques :

Les capteurs optiques reposent sur plusieurs principes :

Spectroscopie infrarouge atténuée à réflexion totale.

Analyse de la diffusion multiple de la lumière par les agrégats qui permet de déterminer leur dimension fractale.

-les capteurs électrochimiques :

Leur principe se repose sur la mesure ampérométrique du flux de matière d'une espèce électro-active, l'oxygène dissous ou un indicateur électrochimique spécifique, au niveau de la surface de l'électrode. Le bio film en se développant sur la surface de l'électrode provoque la diminution du flux de la matière.

-les capteurs biologiques :

Il s'agit d'utiliser les possibilités de la biologie moléculaire en immobilisant des anticorps/ou des sondes nucléiques, [14].

Tableau (1.1). Comparaison des piles à combustible

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de proton	Membrane polymère conductrice de proton	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ ; KCO ₃ fondu dans LiAlO ₂	ZrO ₂ Et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Température de fonctionnement	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydants	O ₂	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'applications	spatial	Automobiles, portable	portable	cogénération	Cogénération, production centralisé d'électricité	Cogénération, production centralisé d'électricité, automobile, maritime

Conclusion :

Dans ce premier chapitre, on a défini la pile à combustible, le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients ainsi que les différents types des piles à combustibles qui existent et leurs domaines d'utilisation.

Chapitre 2

Les phénomènes des transferts couplés
Au cœur de la pile PEM

1. Les phénomènes des transferts dans une pile à combustible

D'après la littérature, on peut observer qu'il existe trois phénomènes de transfert : charge, masse et chaleur, [1], [2], [12], [15]–[19].

1.1. Les phénomènes de transfert de charge

L'un des concepts les plus importants à comprendre lorsque l'on tente de modéliser une pile à combustible est la réaction électrochimique qui se produit dans sa couche catalytique. Aussi bien que la perte d'activation, il y a également une perte dans le processus de transfert de charge à travers la pile à combustible. Le transport de charge électronique décrit le mouvement de la charge de l'électrode. Les deux principaux types de particules chargées sont les *électrons* et les *ions*, et des pertes d'électrons et d'ions se produisent dans les piles à combustible. La perte électrique entre la plaque de refroidissement bipolaire et la plaque de contact est due au degré de contact entre les plaques dû à la compression de la pile à combustible. Le transport d'ions est plus difficile à prédire et à modéliser que le transport d'électrons dans les piles à combustible. Lorsque les ions H^+ traversent l'électrolyte, une perte de charge ionique se produit dans la membrane de la pile à combustible. Dans ce chapitre, nous traiterons le transfert de charge d'électrons et d'ions dans les piles à combustible, ainsi que les différentes pertes de tension. De sa part, la tension de la pile V_{cell} , est la différence entre la tension théorique (de Nernst), et l'ensemble des pertes pendant le processus de transfert (masse, charge et enfin chaleur), cette tension est exprimée comme suit, :

$$V_{cell} = E_{Nernst} + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (2.1)$$

Avec :

$$E_{Nernst} = E_T^0 + \frac{RT}{2F} \cdot \ln\left(1 - HR_a \cdot \frac{P_{sat}(T)}{P_a}\right) + \frac{RT}{4F} \cdot \ln\left[0,21 \cdot \left(1 - HR_c \cdot \frac{P_{sat}(T)}{P_c}\right)\right] + 3 \frac{RT}{4F} \cdot \ln(p_{syst}) \quad (2.2)$$

Avec :

HR_a : Humidité relative de l'anode ; HR_c : Humidité relative de la cathode ; P_{sat} : Pression de saturation ; P_a : Pression dans l'anode ; P_c : Pression dans la cathode

- **La perte de tension due au transport de charge**

Elle est aussi connue par l'appellation « Polarisation ohmique », chaque matériau a une résistance au flux de charge. Elle peut provoquer une polarisation ohmique, ce qui entraîne une perte de tension de la cellule (chute de tension). Cette résistance est relativement élevée par rapport à la résistance électrique des électrodes.

Tous les composants de la pile à combustible contribuent à sa résistance électrique totale, y compris l'électrolyte (membrane), la couche de catalyseur, la couche de diffusion des gaz, les plaques bipolaires, les contacts d'interface. Cette perte en tension est appelée perte ohmique, elle est plus visible dans la membrane, et elle est exprimée par la loi d'ohm, [20] :

$$\eta_{ohm} = R_m \cdot I \quad (2.3)$$

R_m est la résistance surfacique spécifique de la membrane, on peut la trouver aussi ASR (Area Specific Resistance) exprimé en ($\Omega \cdot m^2$) avec :

$$R_m = \frac{e_m}{\sigma_{H^+}} \quad (2.4)$$

Où σ_{H^+} : conductivité ionique (protonique) de la membrane en (s.m)

e_m : Épaisseur de la membrane en (m) avec :

$$\sigma_{H^+} = (0,5139 \cdot \lambda - 0,326) \cdot \exp \left[1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.5)$$

Selon Wöhr [21] et [22], on trouve une autre expression de calcul pour la conductivité ionique.

$$\sigma_{H^+} = (0.2658 \cdot \lambda + 0.0298 \cdot \lambda^2 + 0.0014 \cdot \lambda^3) \exp \left[(2640 \cdot \exp(-0,6 \cdot \lambda) + 1183) \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.6)$$

Où λ est la teneur en eau de la membrane exprimée par le biais du coefficient d'activité de l'eau s'écrit :

Avec :

$$\lambda = \begin{cases} 0,043 + 17,81a - 39,85a^2 + 36a^3 & (0 < a \leq 1) \\ 14 + 1,4(a - 1) & (1 < a \leq 3) \\ 16,8 & (a > 3) \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec :

$$a = \frac{P_{H_2O}}{P_{sat}} = \frac{P \cdot x_{H_2O}}{P_{sat}} \quad (2.8)$$

Et :

$$P_{sat}(T) = e^{aT^{-1} + b + cT + dT^2 + eT^3 + f \cdot \ln(T)} \quad (2.9)$$

Avec :

a = -5800,2206 ; b = 1,3914993 ; c = - 0,048640239 ; d = 0,41764768.10⁻⁴ ;
e = - 0,14452093.10⁻⁷ ; f = 6,5459673.

Cette teneur en eau de la membrane λ peut être aussi exprimée par ces relations :

$$\lambda = \frac{n_{H_2O}}{n_{SO_3}} \quad (2.10)$$

Dont n_{H_2O} : le nombre de molécule d'eau ; n_{SO_3} : le nombre de molécule de site actif (SO₃)

$$\lambda = \frac{EW}{\rho_{dry}} \cdot c_{H_2O} \quad (2.11)$$

Avec EW : la masse équivalente en (g.mol SO₃) ; ρ_{dry} : la masse volumique de la membrane sèche exprimé en (g.m⁻³) ; c_{H_2O} : la concentration de l'eau dans la membrane, [2].

$$EW = 100n + 446 \quad (2.12)$$

Le coefficient de diffusion d'eau à l'électrolyte varie en fonction du type de membrane, s'écrit sous la formule suivante :

$$D_{H_2O}^m = 3,5 \cdot 10^{-7} \cdot \exp\left(-\frac{2436}{T}\right) \cdot \lambda \quad (2.13)$$

Par ailleurs, la conductivité électronique du métal utilisé dans une pile à combustible est importante car elle affecte le transfert de charge des électrons. Les composants de la pile à combustible généralement en métal comprennent les plaques de champ d'écoulement, les

collecteurs de courant et les interconnexions. Une expression courante de la mobilité des électrons libres dans un conducteur métallique peut être écrite sous la forme :

$$U = \frac{Q\tau}{m_e} \quad (2.14)$$

Avec : τ : le temps entre les événements de diffusion ; m_e : la masse de l'électron ($m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{kg}$) ; Q : la charge de proton ($Q = 1,68 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Cependant, le transport ionique dans les électrolytes polymères (membranes), suit la relation exponentielle :

$$\sigma_T = \sigma_0 e^{-E_a/Kt} \quad (2.15)$$

Où σ_0 représente la conductivité à un état de référence, et E_a est l'énergie d'activation (eV/mol).

Un bon polymère conducteur doit avoir un nombre fixe de sites de charges et espaces ouverts. Les sites chargés ont une charge négative et fournissent un lieu de repos temporaire pour l'ion positif. Le fait d'augmenter le nombre de sites chargés augmente la conductivité ionique, mais un nombre excessif des chaînes latérales chargées peuvent réduire la stabilité du polymère. En plus, l'augmentation du volume libre dans le polymère laisse plus d'espace pour les ions pour bouger. Dans les membranes polymères à base de polytétrafluoréthylène (PTFE) comme le Nafion qui est l'appellation de marque d'un fluoropolymère copolymère basé à tétrafluoroéthylène sulfonaté, les ions sont transportés à travers la membrane polymère par attelage sur les molécules d'eau qui se déplacent à travers la membrane. Ce type de membrane a une conductivité élevée. Elle est cependant considérée comme la membrane la plus populaire utilisée pour les piles à combustible PEM. Le Nafion a une structure similaire au Teflon, mais comprend les groupes acides sulfoniques ($\text{SO}_3^- \text{H}^+$) qui fournissent des sites pour le transport des protons.

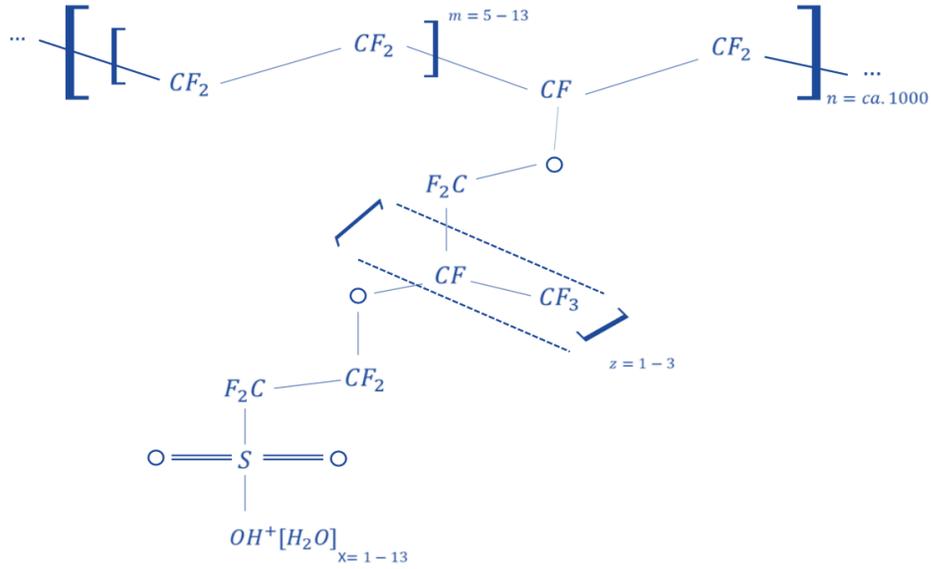


Figure (II.1). Structure chimique de Nafion

La conductivité de Nafion dépend de la quantité d'hydratation et peut varier avec la teneur en eau. L'hydratation peut être obtenue en humidifiant les gaz ou en s'appuyant sur l'eau générée à la cathode. En présence d'eau, les protons forment des complexes d'hydronium (H_3O^+), qui transportent les protons dans la phase aqueuse. Lorsque le Nafion est complètement hydraté, sa conductivité est similaire à celle des électrolytes liquides. Le volume de Nafion peut augmenter jusqu'à 22% lorsqu'il est complètement hydraté. La conductivité et l'hydratation de la membrane étant corrélées, la teneur en eau peut être déterminée par la conductivité de la membrane. L'humidité peut être quantifiée grâce à l'activité de la vapeur d'eau A_{eau_evap} :

$$A_{eau_evap} = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (2.16)$$

Où P_w représente la pression partielle de vapeur d'eau dans le système, et P_{sat} représente la pression de vapeur d'eau saturante pour le système à la température de fonctionnement.

Puisque les protons ont généralement une ou plusieurs molécules d'eau qui leur sont associées, la conductivité et l'hydratation changent simultanément. Ce phénomène du

nombre de molécules d'eau qui accompagne chaque proton est appelé la traînée électro-osmotique (ndrag), on peut calculer son coefficient comme suit, [20] :

$$\xi = \begin{cases} 0,2. \lambda & \text{pour } \lambda < 5 \\ 1 & \text{pour } 5 \leq \lambda \leq 14 \\ 0; 1875. \lambda - 1,625 & \text{pour } \lambda > 14 \end{cases} \quad (2-17)$$

- **La perte de tension par activation**

C'est la perte en tension dû à l'activation des sites des réactions au niveau des électrodes. En effet, le temps nécessaire au début de la réaction au niveau l'anode par exemple, conduit à une perte de la tension délivrée par la pile. En raison de la cinétique de réduction de l'oxygène, la polarisation d'activation a la cathode est plus importante et plus lente que la réduction de l'hydrogène a l'anode. On peut évaluer cette polarisation en utilisant l'équation de Tafel comme suit, [1] :

$$\eta_{act} = -\frac{RT}{\alpha nF} \ln i_0 + \frac{RT}{\alpha nF} i \quad (2.18)$$

- **La perte de tension par concentration**

Les pertes par concentration sont causées par la diminution de concentration des réactifs sur la surface des électrodes.

Dans le cas de l'air, la teneur en oxygène à la surface des électrodes va chuter, plus ou moins selon l'intensité du courant, entraînant une diminution de pression partielle d'oxygène, ce qui entraîne une chute de tension.

Le même phénomène se fait pour l'anode. On peut exprimer les pertes par concentration dans l'équation suivantes, [15] :

$$\eta_{conc} = m. \exp^{(n.i)} \quad (2.19)$$

1.2. les phénomènes de transfert de masse

Pour assurer la production de l'électricité, une pile à combustible doit être alimentée continuellement en carburant (hydrogène) et en oxydant (oxygène). En outre, l'eau produite doit être éliminée en permanence pour assurer un carburant et un oxydant appropriés au niveau des couches de catalyseur afin de maintenir une efficacité élevée de la pile à combustible.

L'étude de transfert de masse dans les différentes espèces est très importante. En effet, la mauvaise manipulation des flux massiques peut causer des problèmes sur les performances de la pile.

Les forces convectives de transfert de masse dans les canaux de flux sont principalement exercées par le flux de carburant, et les conditions de fonctionnement de flux comburant sont contrôlées par l'utilisateur. Le débit élevé du réactif peut assurer une bonne répartition vers les sites catalytiques de l'électrode, cela peut également poser des problèmes dans l'ensemble de la pile et causer un endommagement de la membrane polymère. La figure II.2 exprime le bilan général des flux de matière

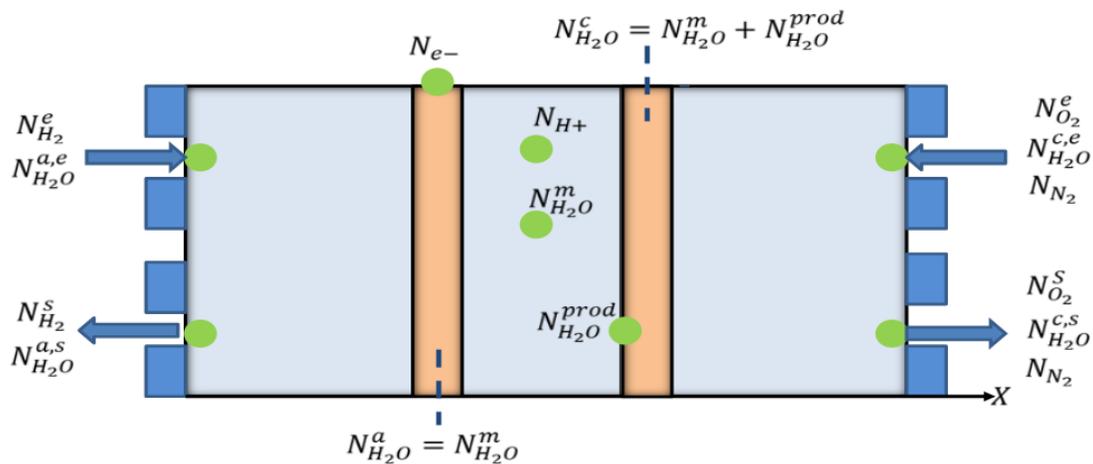


Figure II.2. Les différents flux de matières dans une cellule de pile PEM

De manière générale, Il existe deux phénomènes de transfert de masse dans les couches externes de la PEMFC ; (i) la convection dans les structures d'écoulement des flux (canaux de flux), et (ii) la diffusion multi-espèces dans le milieu poreux qui s'appelle GDL (Gas Diffusion Layer). Cependant, trois phénomènes de transfert de masse apparaissent dans la membrane : (i) l'Electro-diffusion, la migration et l'électro-osmose.

Dans ce qui suit, nous allons présenter le rôle de chaque couche vis-à-vis du transfert de masse.

- **Pour la couche de diffusion (GDL)**

Elle contribue à la pénétration facile du gaz dans les couches catalytiques et à l'augmentation de la conductivité thermique. Cependant, la limitation actuelle c'est que l'eau liquide (non évacué) bloque les pores du catalyseur.

- **Les canaux de flux**

Le canal de flux permet la distribution uniforme des réactifs sur la surface des électrodes, en minimisant la perte de charge et en rendant la capacité d'élimination de l'eau à sa valeur maximum. La limitation actuelle c'est que les réactifs sont épuisés et le site du catalyseur est contaminé par des impuretés comme l'azote (N₂).

- **Les électrodes**

La réaction électrochimique se produit à l'interface du catalyseur, qui consomme les réactifs (H₂/O₂) et produit de l'eau. La limitation actuelle c'est que la charge du catalyseur dans les électrodes est faible, et donc la réaction est lente.

- **La membrane**

Elle présente une bonne gérance de l'eau pour obtenir une bonne transmission des ions (proton H⁺). La limitation actuelle c'est que la membrane est très sensible à son degré d'humidité. Une fois sèche ou trop humide, elle entraîne la perte de sa conductivité protonique.

A titre d'exemple, le transfert de masse par convection repose sur la relation suivante, [2] :

$$\dot{m} = A_{elec} h_m (C_0 - C_S) \quad (2.20)$$

Avec :

A_{elec} : surface des électrodes

h_m : coefficient de transfert de masse

Le gaz de réaction dans le canal d'écoulement a une concentration (C_0), il sera transporté vers la couche de diffusion par convection et répartis uniformément sur la surface de l'électrode, puis la concentration devient (C_s).

$$h_m = Sh \frac{D_{i,j}}{D_h} \quad (2.21)$$

Avec :

D_h : diamètre hydraulique

$D_{i,j}$: coefficient de diffusion binaire des espèces (i) et (j)

Sh : nombre de Sherwood.

Le bilan massique de la pile à combustible exige que la somme de toutes les entrées de masse soit égale aux sorties de masse $\sum(m_i) e = \sum(m_i) s$

Dont :

i : est la masse entrant et sortant de la cellule et compris l'oxygène, l'hydrogène et l'eau.

Les débits à l'entrée sont proportionnels au courant, et au nombre de cellules. la puissance de sortie de la cellule est :

$$W_{el} = n_{cell} V_{cell} I \quad (2.22)$$

Dont :

n_{cell} : nombre des cellules

V_{cell} : tension de cellule

Tous les débits sont proportionnels à la puissance de sortie et inversement proportionnels à la tension de la cellule, [23] :

$$I \cdot n_{cell} = \frac{W_{cell}}{V_{cell}} \quad (2.23)$$

Les débits d'entrée d'une pile à combustible PEM sont les suivants, [23] :

Le débit massique d'hydrogène est :

$$m_{H_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I \cdot n_{cell} \quad (2.24)$$

Le débit massique d'oxygène est :

$$m_{O_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{O_2}}{4F} I \cdot n_{cell} \quad (2.25)$$

Le débit massique d'air est :

$$m_{air,in} = \frac{S_{O_2} M_{air}}{r_{O_2} 4F} I \cdot n_{cell} \quad (2.26)$$

Le débit massique de l'azote :

$$m_{N_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1 - r_{O_2,in}}{r_{O_2,in}} I \cdot n_{cell} \quad (2.27)$$

La vapeur d'eau à l'entrée de l'hydrogène est :

$$m_{H_2O,inH_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} \frac{\varphi_{an} P_{vs}(T_{an,in})}{P_{an} - \varphi_{an} P_{vs}(T_{an,in})} I \cdot n_{cell} \quad (2.28)$$

La vapeur d'eau a l'entrée de l'oxygène est :

$$m_{H_2O,inO_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2O}}{4F} \frac{\varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})}{P_{ca} - \varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})} I \cdot n_{cell} \quad (2.29)$$

La vapeur d'eau a l'entrée d'air est :

$$m_{H_2O,inair,in} = \frac{S_{O_2} M_{H_2O}}{r_{O_2} 4F} \frac{\varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})}{P_{ca} - \varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})} I \cdot n_{cell} \quad (2.30)$$

Les débits de sortie d'une pile à combustible PEM sont les suivants :

Le débit d'hydrogène non utilisé est :

$$m_{H_2,out} = (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2}}{2F} I \cdot n_{cell} \quad (2.31)$$

Le débit d'oxygène à la sortie est égal à l'oxygène fourni à l'entrée moins l'oxygène consommé dans la réaction électrochimique du combustible

$$m_{O_2,out} = (S_{O_2} - 1) \frac{M_{O_2}}{4F} I \cdot n_{cell} \quad (2.32)$$

Le débit d'azote à la sortie est le même qu'à l'entrée car l'azote ne participe pas à la réaction de la pile à combustible

$$m_{N2in} = S_{O2} \frac{M_{N2}}{4F} \frac{1-r_{O2in}}{r_{O2in}} I_{n,cell} \quad (2.33)$$

Le débit d'air appauvri est alors simplement une somme des débits d'oxygène et d'azote :

$$m_{air,out} = [(S_{O2}-1)M_{O2} + S_{O2} \frac{1-r_{O2in}}{r_{O2in}} M_{N2}] \frac{I_{n,cell}}{4F} \quad (2.34)$$

1.3. Les phénomènes de transfert de chaleur

La température dans une pile à combustible n'est pas toujours uniforme, même lorsqu'il y a un débit massique constant dans les canaux.

Comprendre le phénomène de transfert de chaleur dans le procédé pile à combustible est essentiel pour optimiser ses performances et améliorer sa durabilité. Le dégagement de chaleur dans PEMFC est lié à l'énergie électrique fournie par la pile elle-même.

Cette énergie (chaleur) est générée à partir de la chaleur dégagée lors de la réaction électrochimique irréversible (55%), de la chaleur entropique (35%) et de la chaleur dégagée par effet Joule due à la résistance ohmique de la membrane (10%)

On observe plusieurs modes de transfert thermique dans les différentes couches de la PEMFC. Le transfert thermique à travers la membrane est assuré par la conduction thermique, tandis que la conduction et la convection existent à la fois dans les couches catalytiques (l'anode et la cathode), et les couches de diffusion (GDL) ainsi que la plaque bipolaire (les canaux de flux). La gestion thermique de la PEMFC est conçue pour garder sa température uniforme ou quasi-uniforme, afin d'éviter la production de points chauds dans ses différentes couches.

Une disparité dans le gradient de température, ou un excès de cette dernière pourra avoir des effets fatals à la membrane polymère, du fait que cette dernière doit avoir un optimum de son degré d'hydratation. Néanmoins, en réalité, il est difficile de conserver la température de la pile vue qu'il existe un gradient de température entre l'entrée et la sortie

du circuit de refroidissement. Ce gradient peut être utilisé pour favoriser le transfert d'eau, améliorant ainsi les performances électriques de la pile. En effet, d'après Bradean et al. [24] des flux d'eau importants pourraient être entraînés par des gradients de températures plus importants.

- **Les sources de chaleur dans la pile PEM**

La figure (II.3), tirée de [2] montre l'emplacement des sources de chaleur dans une cellule de la pile. Dans les GDL.

On suppose que les flux d'eau sont destinés de l'électrode à les GDL

Dans la GDL, l'eau change son état dans l'épaisseur et la chaleur nécessaire du flux d'eau liquide a la vaporisation est prise en compte.

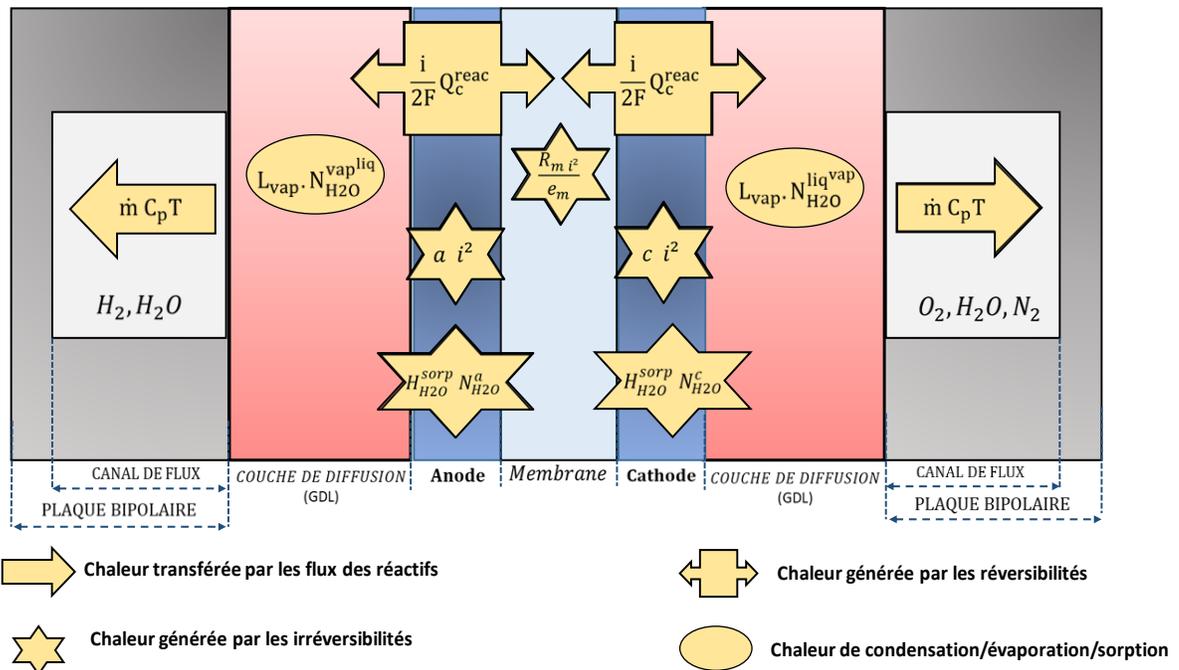


Figure (II.3). Les expressions des sources de chaleur dans une cellule de pile PEM [2]

- **Dans la membrane polymère**

Dans la membrane, la résistance au transfert protonique provoque l'effet joule. La résistance calculée est celle de la membrane, les variations de conductivité protonique sont

négligées dans l'épaisseur de la membrane. La source de chaleur liées a l'effet joule est répartie uniformément dans l'épaisseur. On peut écrire cette densité volumique de flux de chaleur de ce cas comme suit, [20]:

$$\dot{q}_i = \frac{R_m \cdot i^2}{e_m} \quad (2.35)$$

Dont :

R_m : la résistance électrique de la membrane, en [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]

e_m : l'épaisseur de la membrane, en [cm].

Cette densité volumique exprimé en [$\text{w} \cdot \text{cm}^{-3}$].

- **Dans les électrodes**

L'oxydation de l'hydrogène et la réduction de l'oxygène à la cathode sont exothermiques, et la génération de chaleur est considérée homogène. De l'eau est produite au niveau des agglomérats réactionnels, elle apparaît généralement sous forme liquide. Cependant, on observe trois sources de chaleur dans les électrodes :

- Un flux de chaleur dégagé par la réaction électrochimique (réversible).
- Un flux de chaleur d'activation électrochimique des réactions (irréversible).
- Un flux de chaleur de changement de phase (de sorption).

Pour la cathode on a :

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_c^{reac} + \dot{Q}_c^{act} + \dot{Q}_c^{sorp} \quad (2.36)$$

Pour l'anode :

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_a^{reac} + \dot{Q}_a^{act} + \dot{Q}_a^{sorp} \quad (2.37)$$

- **Flux de chaleur de la réaction :**

La chaleur dégagée totale par la réaction dans les deux électrodes Q^{reac} s'écrit, [2]:

$$Q^{reac} = -T \cdot \Delta S^{rev} \quad (2.38)$$

Cette chaleur exprimée en [J.mol⁻¹]

Pour le flux a la cathode :

$$\dot{Q}_c^{reac} = \frac{i}{2F} \cdot Q_c^{reac} \quad (2.39)$$

Pour l'anode :

$$\dot{Q}_a^{reac} = \frac{i}{2F} \cdot Q_a^{reac} \quad (2.40)$$

- **Dans la GDL**

À-propos la chaleur de changement de phase, on trouve l'eau sous deux formes, sous forme de vapeur dans les GDL et liquide dans l'électrolyte (membrane). En effet, l'eau contenue dans la membrane et l'eau produite sont toutes de forme liquide, l'eau entrant dans la membrane se condense et provoquant aussi un dégagement de chaleur lorsqu'il sort, produisant un puit de chaleur. La connaissance de flux d'eau qui traverse la membrane tel que son enthalpie de sorption de l'eau est suffisante pour déterminer l'intensité des puits de chaleurs qui correspondent. Par conséquent, il est nécessaire de considérer la quantité de chaleur produite ou consommée quand la sorption de l'eau a la membrane tel que la désorption de l'eau qui se produit dans l'électrode. Les phénomènes de sorption expliquent l'équilibre entre la phase liquide (adsorbée) et la phase gazeuse (désorbée) dans l'interface. Les transferts sont donc reliés à un changement de phase a l'interface. D'après Ramousse et al. [20], les flux d'eau calculés nous permettre d'utiliser de la même façon la sorption et la désorption de l'eau. Ces densités de flux s'expriment en [W.m⁻²], [2] :

$$\dot{Q}_a^{sorp} = \Delta H_{H_2O}^{sorp} \cdot N_{H_2O}^a \quad (2.41)$$

Et

$$\dot{Q}_c^{sorp} = \Delta H_{H_2O}^{sorp} \cdot N_{H_2O}^c \quad (2.42)$$

Avec :

$$N_{H_2O}^c = N_{H_2O}^a + \frac{i}{2F} \quad (2.43)$$

Chapitre 3

Modélisation et simulation Numérique

Introduction

Ce chapitre présente la partie relative à la modélisation ainsi que celle de la simulation numérique. Nous rappelons que l'objectif de ce travail est bien de faire une simulation numérique pour avoir la distribution de température au niveau des différentes couches de la pile ainsi que de bien assimiler les risques et les problèmes dans le cas d'absence ou de mal fonctionnement d'un système de refroidissement.

Pour ce fait, la première partie de ce chapitre traite la modélisation du transfert thermique dans la pile PEM. Plusieurs bilans énergétiques seront présentés relatifs à l'ensemble de la pile.

La deuxième partie de ce chapitre propose d'étudier l'effet néfaste de l'augmentation de la température de la pile sur ses performances.

1. Modélisation du transfert de chaleur dans la pile PEM

Afin de mieux assimiler le phénomène de transfert thermique dans la pile PEM, nous avons proposé un modèle 1D regroupant l'ensemble de la pile. Ce modèle permet de visualiser le gradient de température le long de la pile PEM (*à travers toutes les couches*). Plusieurs *modèles* mathématiques décrivent l'aspect thermique de la pile PEM, ils sont généralement basés sur des *bilans d'énergies* relatifs aux différents flux de pile PEM.

Tout d'abord, *Ces bilans* peuvent être établis en faisant la somme des quantités d'énergies entrantes qui doit être égale à la somme des quantités d'énergies sortantes, on écrit, [1] :

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = W_{el} + Q_{dis} + Q_c \quad (3.1)$$

Avec :

Q_{in} : l'enthalpie des gaz réactif entrant

Q_{out} : l'enthalpie des gaz non consommés et de la chaleur produite par les réactifs

W_{el} : l'électricité générée

Q_{dis} : la chaleur dissipée dans l'entourage

Q_c : la chaleur évacuée par le système de refroidissement

Par conséquent, vu que la réaction électrochimique se produit à l'intérieur de la pile, ainsi la quantité de chaleur produite doit être évacuée par le système de refroidissement.

La chaleur générée par la pile est aussi liée à la perte de tension. Afin de mieux estimer le bilan énergétique, il est nécessaire de considérer l'énergie contenue dans les réactifs et l'énergie électrique produite tel que, [16] :

$$\frac{I}{nF} \cdot H_{PCS} \cdot n_{cell} = Q_{gen} + I \cdot V_{cell} \cdot n_{cell} \quad (3.2)$$

Avec :

Q_{gen} : la chaleur générée par le stack, en [w]

n_{cell} : le nombre de cellule

V_{cell} : la tension de la cellule, en [v]

H_{PCS} : enthalpie (pouvoir calorifique supérieur [J.mol⁻¹])

Dans le cas où l'eau produite est sous forme liquide, la chaleur dégagée par le stack s'écrit, [17]:

$$Q_{gen} = (1,482 - V_{cell}) \cdot I \cdot n_{cell} \quad (3.3)$$

Dans le cas où l'eau produite est sous forme vapeur, la chaleur dégagée par le stack s'écrit :

$$Q_{gen} = (1,254 - V_{cell}) \cdot I \cdot n_{cell} \quad (3.4)$$

On peut également écrire un équilibre basé sur l'enthalpie. L'entrée sera l'enthalpie de l'hydrogène, de l'oxygène et de la vapeur d'eau dans ces gaz de réaction.

Cependant, l'enthalpie du flux sortant est l'enthalpie de l'électricité produite, les flux réactifs non consommé et la chaleur perdue par les systèmes de rayonnement, Cette nouvelle évaluation s'écrit ainsi :

$$\sum (hi)_{in} = W_{el} + \sum (hi)_{out} + Q \quad (3.5)$$

L'enthalpie d'un mélange de gaz sec, ou bien d'un gaz sec s'écrit :

$$h = \dot{m} \cdot c_p \cdot T \quad (3.6)$$

Avec :

\dot{m} : le débit massique du gaz ou du mélange gazeux, en [g.s⁻¹]

c_p : la chaleur spécifique, en [j.g⁻¹.k⁻¹].

Avec le pouvoir calorifique supérieur (PCS) on écrit :

$$h = \dot{m} \cdot (c_p \cdot T + h_{pcs}^0) \quad (3.7)$$

h_{pcs}^0 : est l'enthalpie du gaz qui s'appliquer a son PCS a 0 °c, exprimé en [j. g⁻¹]

1.1.Le modèle mathématique 1D

On se propose de voir le gradient de la température le long d'une cellule de la pile PEM, pour ce fait on utilise un modèle 1D qui regroupe les différents modes de transferts thermiques dans la pile PEM [2].

Dans notre cas, seule la chaleur dégagée par la réaction électrochimique dans la cathode est prise en compte, vu qu'elle présente 90% de la chaleur globale dégagée par la pile PEM.

La figure suivante présente un schéma descriptif de la partie élémentaire considérée.

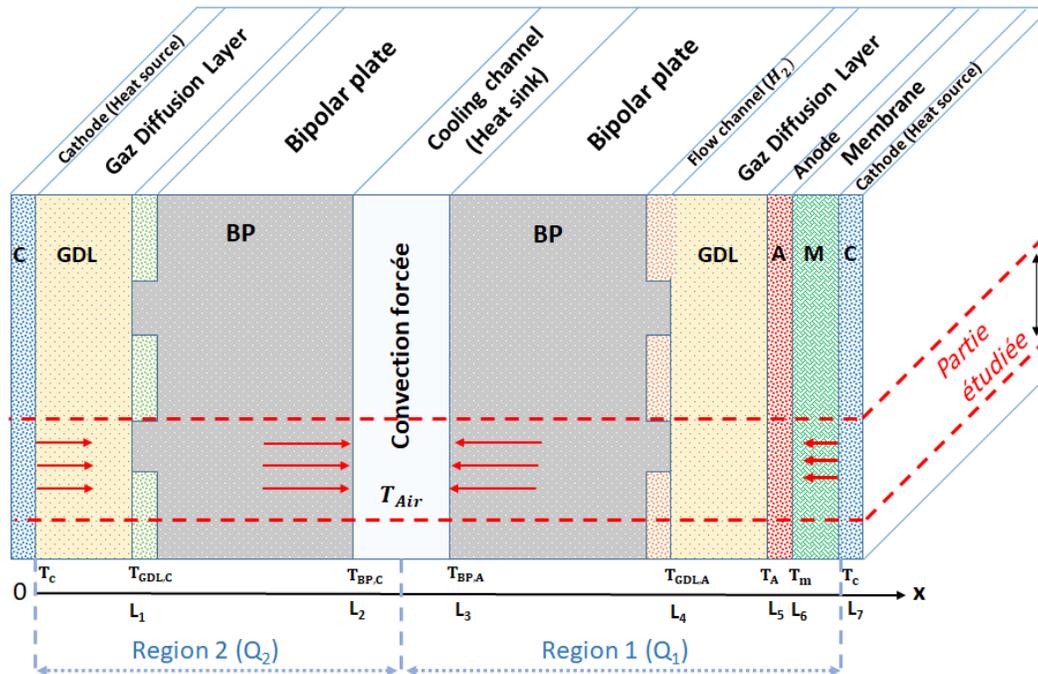


Figure (III.1). La cellule élémentaire à étudier

La partie élémentaire décrite sur le schéma précédent illustre les différentes couches d'une cellule qui est comprise entre deux cathodes et un puits de chaleur (le canal de refroidissement).

En effet, trois modes de transferts sont observés :

- La conduction thermique : entre la cathode et le canal de refroidissement, en passant par les différentes couches et interfaces
- La convection thermique forcée : entre les plaques bipolaires et le canal de refroidissement
- La convection naturelle : entre le Stack et le milieu environnant

Nous allons admettre que la quantité de chaleur à extraire par le canal de flux est égale à la somme des deux quantités de chaleur en provenance des deux cathodes, tel que :

$$q_{ext} = q_1 + q_2 \quad (3.8)$$

Avec :

q_{ext} : la quantité de chaleur dégagée exprimée en [W.m⁻²]. Le bilan thermique de la région 1 s'écrit :

$$q_1 = \frac{T_C - T_{BP,A}}{\frac{e_m}{\lambda_m} + \frac{e_A}{\lambda_A} + \frac{e_{GDL}}{\lambda_{GDL}} + \frac{e_{BP}}{\lambda_{BP}}} = h_{air} \cdot (T_{BP,A} - T_{air}) \quad (3.9)$$

Avec :

T_i : Température de l'interface (i), en [K]

e_i : Epaisseur de l'interface (i), en [m]

h : Coefficient de convection thermique, en [W.m⁻².K⁻¹]

λ : Conductivité thermique, en [W.m⁻¹.K⁻¹]

La même chose pour la deuxième région (\dot{Q}_2) :

$$q_2 = \frac{T_C - T_{BP,C}}{\frac{e_{GDL}}{\lambda_{GDL}} + \frac{e_{BP}}{\lambda_{BP}}} = h_{air} \cdot (T_{BP,C} - T_{air}) \quad (3.10)$$

On détermine le coefficient de convection thermique (h) en fonction de la géométrie du puit (canal de refroidissement) et du type d'écoulement. Pour cette simulation, on a utilisé des valeurs numériques présentées en bas dans le tableau suivant :

Tableau (3.1). Valeurs numériques de la simulation

Paramètres	Valeurs numériques
e_m/λ_m	183 $\mu\text{m}/0.36$
e_A/λ_A	20 $\mu\text{m}/0.8$
e_{GDL}/λ_{GDL}	250 $\mu\text{m} / 15$
e_{BP}/λ_{BP}	6 mm/ 15
T_{air}	30 °C
T_C	80 °C
$T_{moy} = T_{BP} + T_{air}/2$	54 °C
a/b (canal de refroidissement)	6/2
Nombre de Reynolds Re (a 3m.s ⁻¹)	494
Nombre de Prandtl Pr	0.7
Nombre de Nusselt Nu (écoulement laminaire interne)	3.96
h_{air}	35

La loi de fourrier s'écrit :

$$\rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (3.11)$$

Dans le cas d'un transfert de chaleur monodimensionnel et sans terme source et en régime permanent, on a :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (3.12)$$

La solution de notre équation s'écrit en forme :

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad (3.13)$$

Afin de définir les constantes C_1 et C_2 , les conditions aux limites affichées dans le tableau suivant sont envisagées

Tableau (3.2). Les conditions aux limites du modèle étudié

: interfaces	Conditions aux limites
$x = 0$	$T(0) = T_C$
$x = L_1$	$T(L_1) = T_{GDL,C}$
$x = L_2$	$T(L_2) = T_{BP,C}$
$x = L_3$	$T(L_3) = T_{BP,A}$
$x = L_4$	$T(L_4) = T_{GDL,A}$
$x = L_5$	$T(L_5) = T_A$
$x = L_6$	$T(L_6) = T_m$
$x = L_7$	$T(L_7) = T_C$

Les résistances thermiques sont présentées dans le tableau (3.3)

Tableau (3.3). Les résistances thermiques des éléments

Elements	Expressions
Membrane (m)	$R_m = e_m / \lambda_m$
Anode	$R_A = e_A / \lambda_A$
Couche de diffusion GDL	$R_{GDL} = e_{GDL} / \lambda_{GDL}$
Plaque bipolaire BP	$R_{BP} = e_{BP} / \lambda_{BP}$
Region (1)	$R_1 = R_m + R_A + R_{GDL} + R_{BP}$
Region (2)	$R_2 = R_{GDL} + R_{BP}$

Les équations qui donnent les températures interfaciales sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau (3.4). Récapitulatif des températures interfaciales

Interfaces	Température
$x = 0$	T_C
$x = L_1$	$T_{GDL,C} = (T_C + ((R_{GDL}/R_{BP}) \cdot T_{BP,C})) / ((R_{GDL}/R_{BP}) + 1)$
$x = L_2$	$T_{BP,C} = (T_C + (h_{air} \cdot R_2 \cdot T_{air})) / (h_{air} \cdot R_2 + 1)$
$x = L_3$	$T_{BP,A} = (T_C + (h_{air} \cdot R_1 \cdot T_{air})) / (h_{air} \cdot R_1 + 1)$
$x = L_4$	$T_{GDL,A} = (h_{air} \cdot R_{BP} \cdot (T_{BP,A} - T_{air})) + T_{BP,A}$
$x = L_5$	$T_A = ((R_{GDL}/R_{BP}) \cdot (T_{GDL,A} - T_{BP,A})) + T_{GDL,A}$
$x = L_6$	$T_m = (T_C + ((R_m/R_A) \cdot T_A)) / ((R_m/R_A) + 1)$
$x = L_7$	T_C

Le tableau (3.5) représente les équations qui permettent l'observation des températures de chaque élément de la cellule :

Tableau (3.5). Les équations donnant les températures de chaque élément

Distances	Distribution de la température
$0 \rightarrow L_1$	$T(x)=[((T_{GDL,C}-T_C)/e_{GDL}).x]+T_C$
$L_1 \rightarrow L_2$	$T(x)=[((T_{BP,C}-T_{GDL,C})/e_{BP}).x]+T_{GDL,C}$
$L_7 \rightarrow L_6$	$T(x)=[((T_{BP,C}-T_{GDL,C})/e_m).x]+T_C$
$L_6 \rightarrow L_5$	$T(x)=[((T_A-T_M)/e_A).x]+T_m$
$L_5 \rightarrow L_4$	$T(x)=[((T_{GDL,A}-T_A)/e_{GDL}).x]+T_A$
$L_4 \rightarrow L_3$	$T(x)=[((T_{BP,A}-T_{GDL,A})/e).x]+T_{GDL,A}$

La figure (3.2) représente la distribution de la température dans la cellule de la pile PEM.

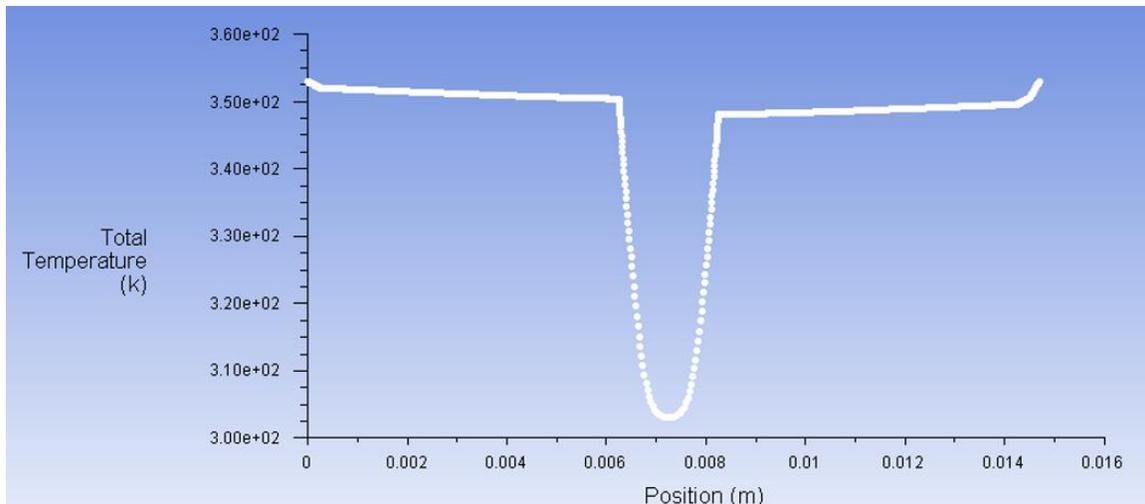


Figure (III.2). Distribution de la température dans la cellule

On remarque sur la figure que la différence de la température entre la cathode qui est la source de chaleur et le canal de refroidissement ne dépasse pas $1,5^{\circ}\text{C}$ pour les deux régions. D'après cette observation, on peut considérer la cellule comme isotherme.

1.2. La représentation 2D du phénomène thermique

En utilisant les méthodes des volumes finis, ainsi que les mêmes paramètres de modèle 1D en haut, on a réussi à avoir une représentation 2D à l'aide de logiciel informatique *Ansys-Fluent*.

- **Méthode des volumes finis**

La méthode des volumes finis est une méthode numérique utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles, cette méthode se base à diviser le domaine d'étude en volume élémentaire et chaque volume élémentaire accompagne un nœud principal limité par des interfaces, ces nœuds principaux sont bornés par des nœuds voisins. Les équations différentielles sont intégrées dans les volumes élémentaires pour déterminer l'intégrale dans ces volumes. Cette méthode est facile à utiliser même quand le maillage n'est pas structuré (figure III.3).

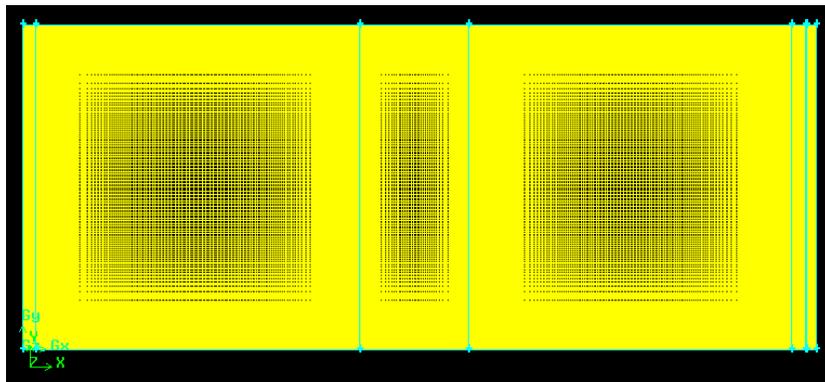


Figure (III.3). Un maillage 2D quadratique ($> 200\text{K}$) avec Gambit.

Dans notre cas, mis en œuvre de la méthode des volumes finis on a fait une discrétisation du domaine géométrique de cellule de la pile (on a divisé le volume de la pile à des volumes

élémentaires) après on a intégrés l'équation de vitesse d'air dans chaque volume élémentaire et en déduire les équations algébriques aux différents nœuds. Ensuite on a assemblé ces équations algébriques dans un système d'équation linéaire, à l'aide de logiciel d'informatique MATLAB on a pu écrire un programme pour solutionner le système d'équation linéaire et on a obtenu cette représentation 2D. (figure III.4)

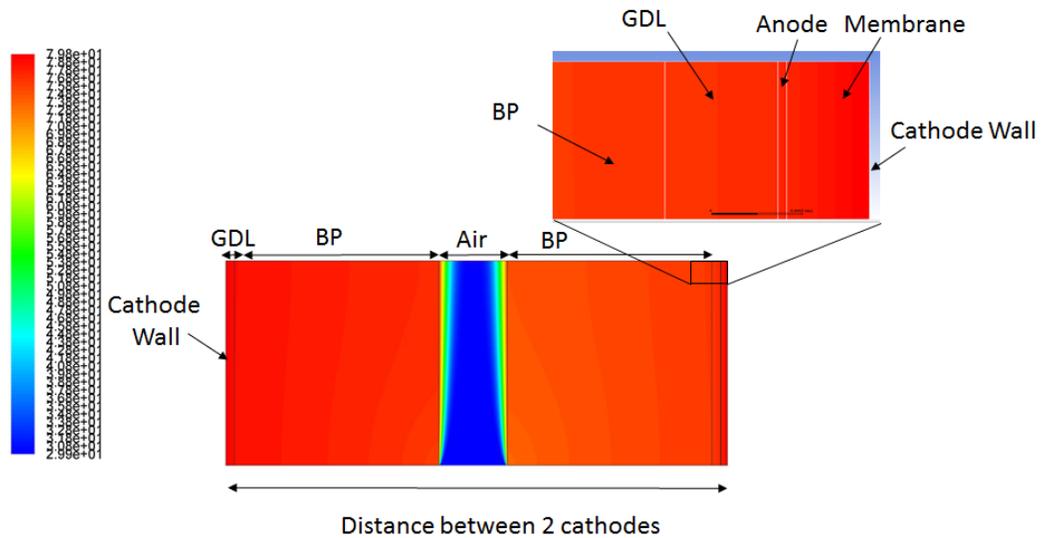


Figure (III.4). Conditions aux limites (*Ansys Fluent*).

Dans notre expérience, on a utilisé une vitesse d'air égale a 9m/s. La figure en bas est le résultat obtenu par le logiciel MATLAB.

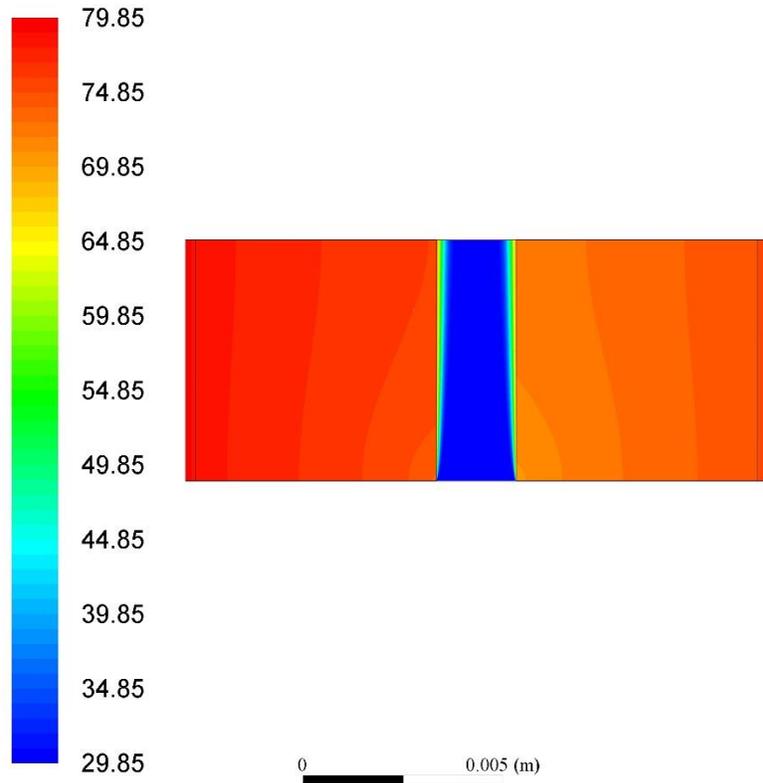


Figure (III.5). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=9$ m/s

Cette figure représente le bon fonctionnement d'une pile PEM qui veut dire que les paramètres utilisés dans cette expérience sont celle qui correspondent à ce type de pile.

D'après l'échelle colorée, on remarque une dégradation de couleur (de rouge jusqu'à l'orange clair) qui signifie une diminution de la température. Ce phénomène se passe entre les deux cathodes en traversant les multiples interfaces et les couches de la pile jusqu'à arriver au canal de refroidissement (celle en bleu).

- **L'effet des conditions opératoires sur les performances de la pile PEM**

Tout d'abord, il faut explorer l'influence de la température (T), la pression (P) et l'humidité relative (HR) sur les performances de la pile PEM. Il est juste à noter que les performances d'une pile PEM peuvent se récapituler dans la courbe de polarisation $V=f(I)$.

En théorie, l'augmentation de la température de la pile accroît ses performances. Les figures de (III.3) à (III.8) présentent l'influence de la variation de température sur la tension de pile.

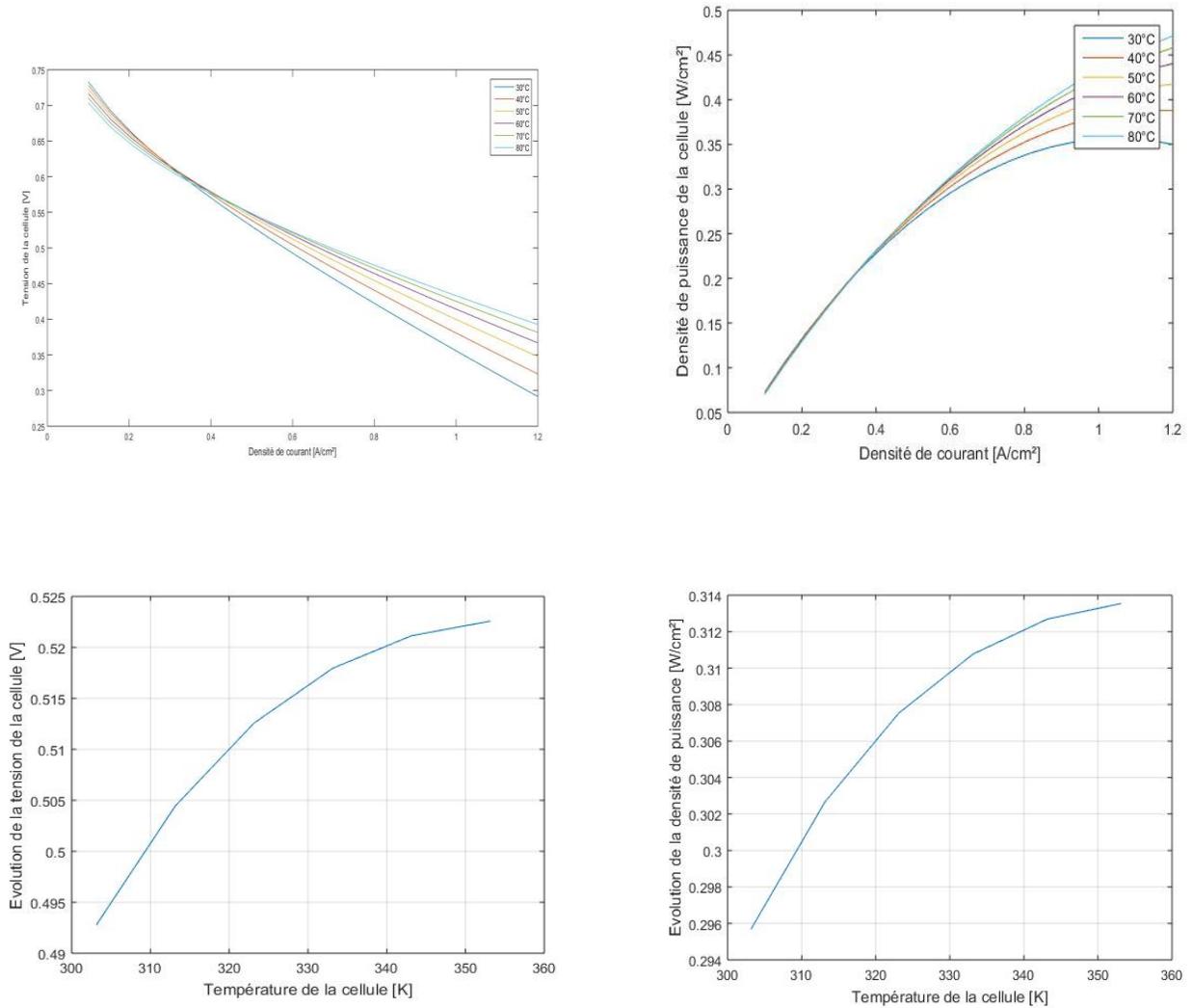


Figure (III.6). La tension de la cellule par effet de température

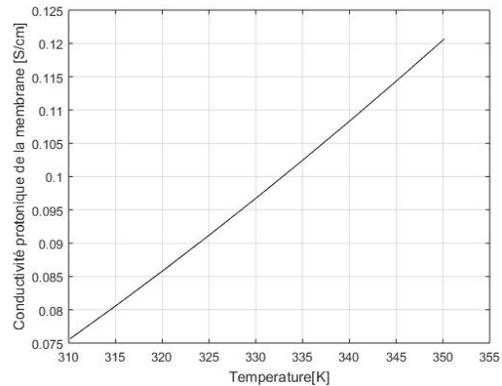
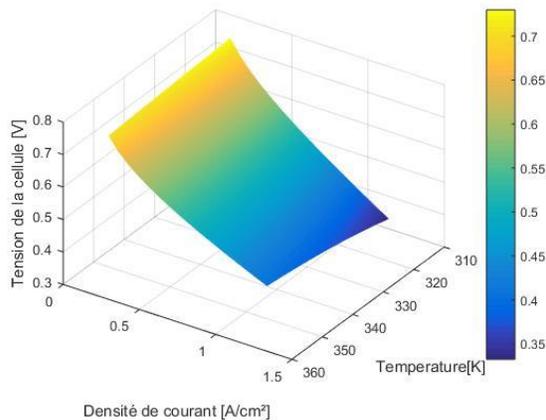


Figure (III.7). Représentation surfacique

Figure (III.8) Conductivité protonique par (T)

La figure (III.6) représente l'évolution de la tension [v] en fonction de la température [k], Depuis cette figure On remarque que la température augmente en parallèle avec l'augmentation de la tension (relation proportionnelle) par exemple entre [330k-340k] on peut avoir une augmentation de tension d'environ 0,004[v] donc on peut dire qu'il y a un pas moyen de 0,004[v] pour chaque 10 [k], la même chose pour la figure (III.4), la densité de puissance et la température sont d'une relation proportionnelle (la densité augmente parallèlement avec l'augmentation de température), entre [330k-340k], on observe une augmentation de 0.002 [w/cm²], donc l'augmentation se fait avec un pas moyen d'environ 0.002 [w/cm²] pour chaque 10 [k]. la figure (III.7) est une représentation surfacique résume la relation entre la tension de la cellule [v], la densité de courant [A/cm²] et la température [k], on remarque qu'à chaque fois que la température augmente on peut avoir une augmentation dans la cellule en fonction de la densité de courant. La figure (III.8) représente la conductivité protonique de la membrane en [s/cm] en fonction de température en Kelvin [k], on observe sur cette figure que la conductivité protonique augmente à chaque fois que la température augmente (relation proportionnelle), entre [315k-320k] on observe une augmentation de conduction protonique d'environ 0,005 [s/cm] par cellule. D'après ces figures, on peut conclure que la température a un impact très important sur les performances de la pile qui sont la tension et la puissance de la pile.

- **En pratique**

La tension délivrée par la pile PEM accroît en parallèle avec l'accroissement de la température jusqu'à un seuil technique relatif aux conditions de la membrane.

En effet, la conductivité protonique de la membrane est influencée par la teneur en eau λ , qui est par elle-même guidée par la valeur de la pression de saturation incluse dans l'activité de l'eau (a), voir équations (II.7), (II.8) et (II.9). Ces paramètres (σ^{H^+} , λ , a , P_{sat}), sont, analytiquement, liés à la température (T).

Afin d'explorer le risque de l'augmentation de la température sur le bon fonctionnement de la pile, on peut envisager un scénario de dysfonctionnement dans son système de refroidissement. Pour cela, on a pu simuler une défaillance dans le système de refroidissement (ventilateur), par une réduction de la vitesse de ventilation, et en enregistrant à chaque fois les différents paramètres de la pile (T , V_{cell}). Une représentation 2D basée sur le modèle thermique cité en première partie de ce chapitre, nous a permis d'avoir un aperçu sur la distribution de température tout au long de la partie élémentaire choisie.

Ces températures sont prélevées pour être utilisées dans les équations donnant vers l'enchaînement de paramètres utiles au calcul de V_{cell} .

- Les images 2D

- Dans le cas de $V_{\text{air}} = 1.5 \text{ m/s}$

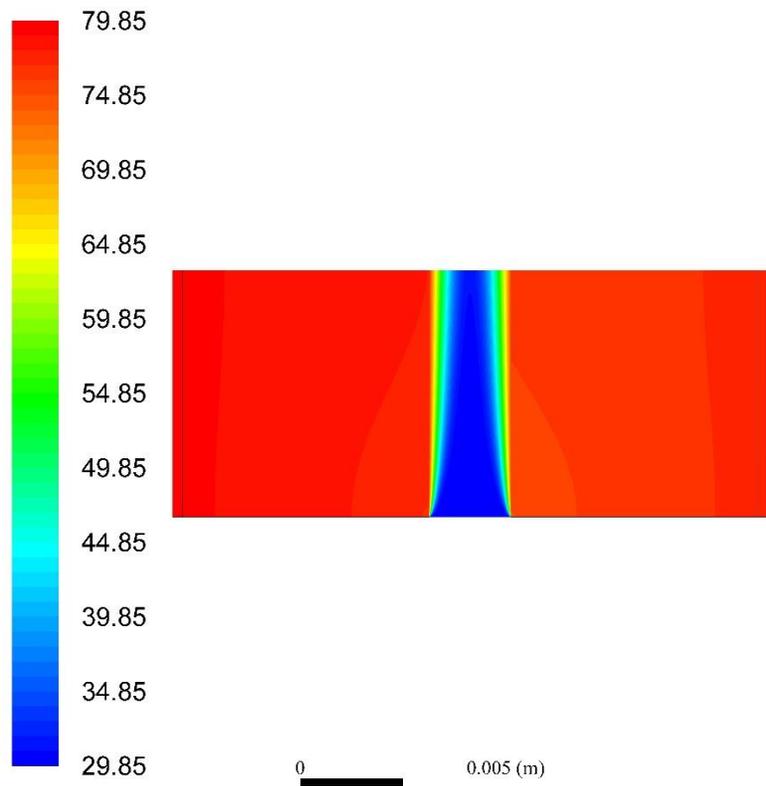


Figure (III.9). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}} = 1.5 \text{ m/s}$.

- Dans le cas de $V_{\text{air}}=3 \text{ m/s}$

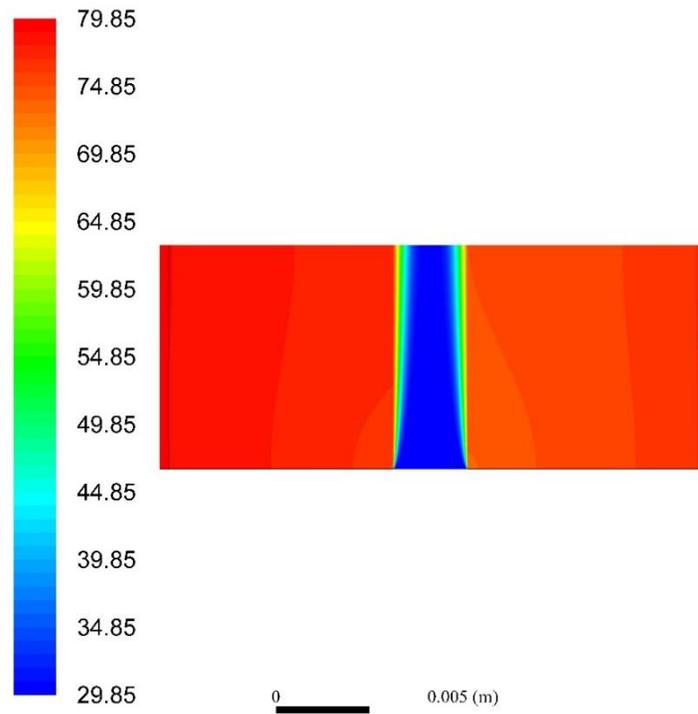


Fig (III.10). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=3 \text{ m/s}$.

- Dans le cas de $V_{\text{air}}=6 \text{ m/s}$

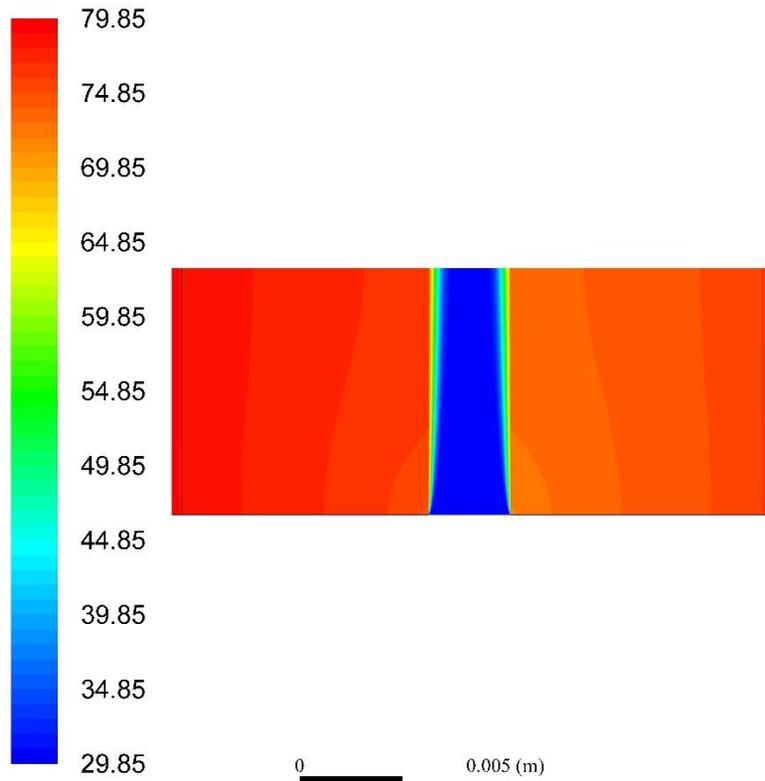


Fig (III.11). Contours de température [°C] à $V_{\text{air}}=6 \text{ m/s}$.

Les 3 figures représentent la même pile mais avec des différentes V_{air} .

On remarque que le changement de la valeur V_{air} a fait un impact sur la dégradation des couleurs.

Ce qu'on peut conclure sur ses essais, c'est que le changement d'un paramètre a un énorme impact sur le fonctionnement de la pile PEM.

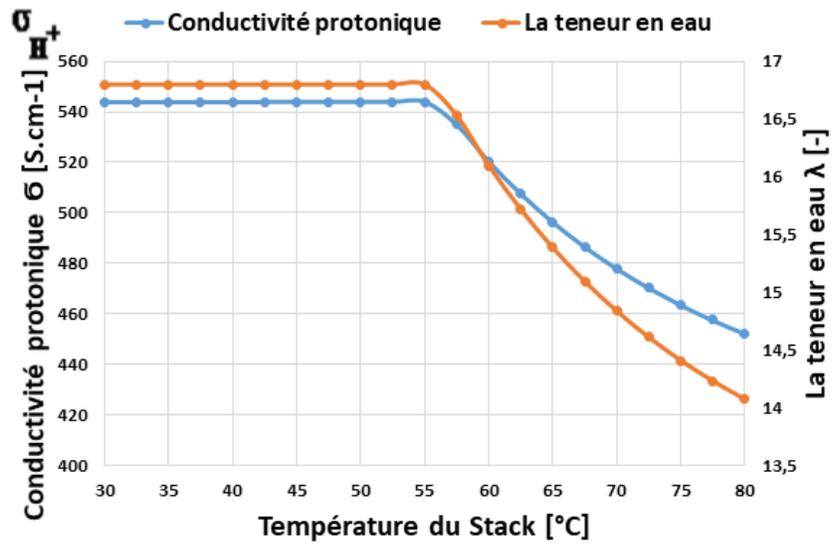


Figure (III.12). La conductivité protonique σ_{H^+} et lambda λ en fonction de (T)

La figure (III.2) représente la conductivité protonique et la teneur en eau en fonction de la température.

Entre [30-55°C], il y'a une stabilité de la conductivité protonique [545 S.cm⁻¹] et la teneur en eau [16,8]. Puis, à T=55°C, on remarque une diminution rapide de la teneur en eau jusqu'à arriver à [14,6] a T=80°C. Pour la conductivité, a T=80°C aussi, elle atteint [450 S.cm⁻¹] donc une perte d'environ 100 S.cm⁻¹.

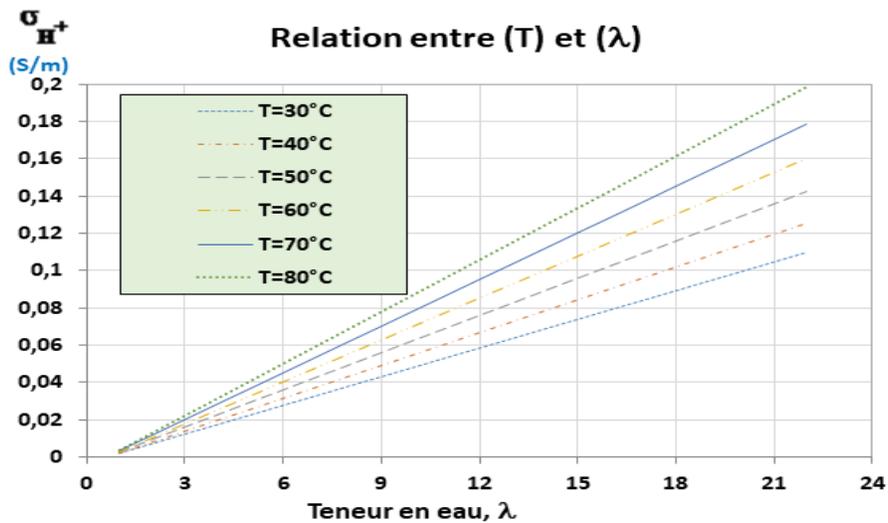


Figure (III.13). La conductivité protonique σ_{H^+} en fonction de lambda λ

La figure (III.13) représente la conductivité protonique en fonction de la teneur en eau a différentes températures.

On remarque qu'à chaque fois qu'on augmente la température, la conductivité protonique et la teneur en eau augmentent en parallèle et arrivent à des meilleurs états.

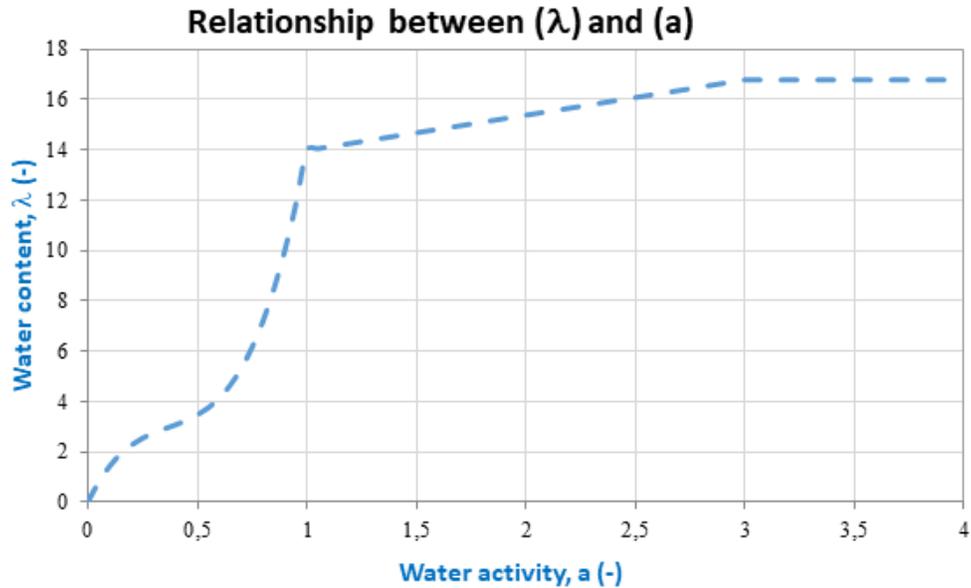


Figure (III.14). La relation entre la température T et la teneur en eau λ

La figure (III.14) représente la teneur en eau en fonction de a.

On remarque une grande augmentation dans la valeur de la teneur en eau entre 0 et 1.

Puis, cette augmentation se ralentit un petit peu entre 1 et 3 jusqu'à arriver à la stabilité de 3 à 4 et la teneur en eau atteint sa meilleure valeur (presque 18) pour un bon fonctionnement.

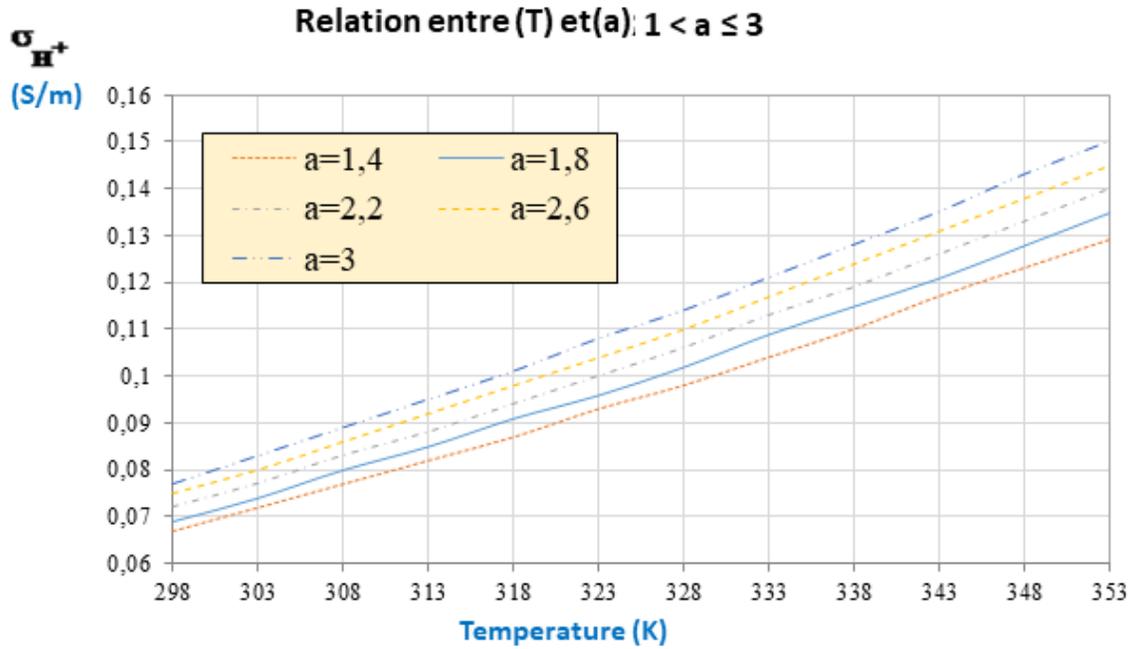


Figure (III.15). La relation entre lambda (λ) et la teneur en eau (a)

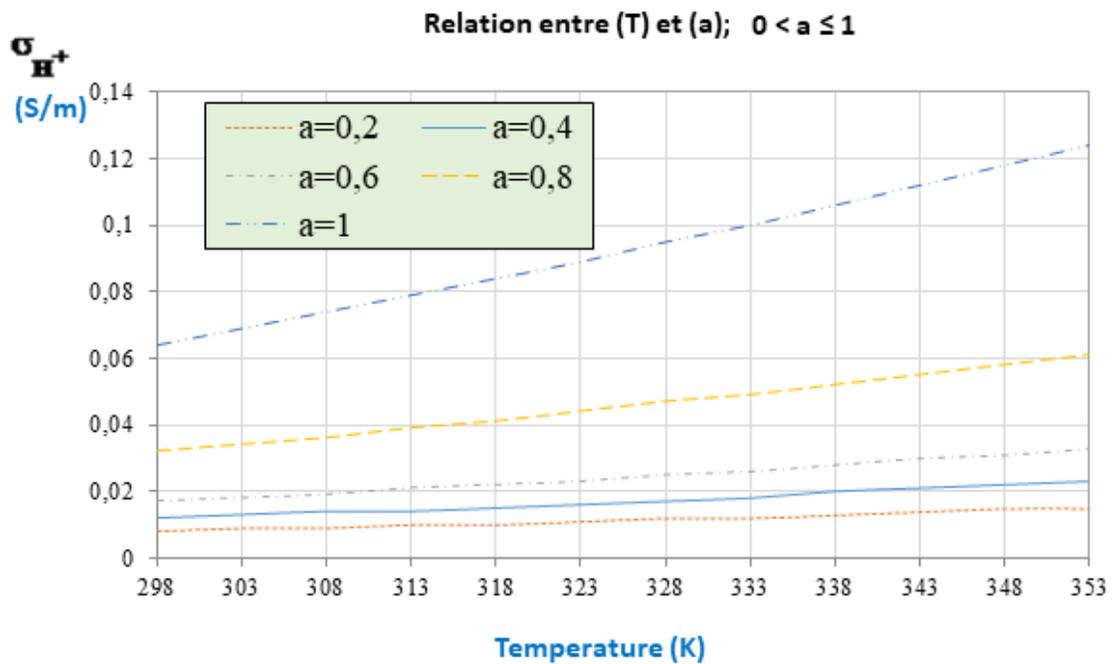


Figure (III.16). La relation entre la température (T) et la teneur en eau (a)

Les figures (III.15) et (III.16) représentent la conductivité protonique en fonction de température avec des différentes valeurs de a .

Ce qu'on peut remarquer sur les deux figures précédentes, c'est que la conductivité protonique atteint des meilleurs chiffres et résultat à chaque augmentation de température et de a . ce qui veut dire que ses deux facteurs ont un rôle essentiel dans l'augmentation de la valeur de la conductivité protonique.

2.3. Interprétation des résultats

La tension V_{cell} délivrée par une pile PEM (voir équation (2.1)), dépend pratiquement de l'état de la membrane, qui est aussi influencé par les conditions opératoires (P , T et HR). En conséquence, une conductivité protonique élevée est le résultat d'une membrane parfaitement hydratée. Elle va clairement réduire le terme de la polarisation ohmique dans l'équation de V_{cell} , ce qui va augmenter la tension délivrée.

En revanche, une conductivité protonique réduite, est le résultat d'une membrane qui n'est pas bien hydratée. Ceci va clairement augmenter la polarisation ohmique dans l'équation de V_{cell} , ce qui va réduire la tension délivrée.

Cependant, trois paramètres peuvent intervenir pour la définition de la teneur en eau de la membrane ; à savoir (i) l'humidité relative des réactifs (principalement l'air), (ii) la vitesse d'écoulement de l'air dans les canaux de flux (non pas de refroidissement) et (iii) la température du Stack qui se propage par conduction thermique de la cathode vers le reste des couches y compris la membrane. Cette propagation thermique peut nuire à la teneur en eau de la membrane en asséchant la quantité d'eau comprise dans cette dernière.

Conclusion générale

La pile à combustible est une nouvelle technologie qui peut être employée dans plusieurs applications énergétiques. L'étude du phénomène de transfert thermique dans la pile est essentielle pour quantifier la chaleur dégagée, de localiser les points chauds ainsi que de bien assimiler les risques dans le cas d'absence ou de défaillance d'un système de refroidissement.

Le phénomène thermique est présent dans les différentes couches et matériaux de la pile par les différents modes de transferts thermiques (conduction, convection et rayonnement). Cependant, une gestion optimale de la quantité de chaleur dégagée par les différentes couches de la pile PEM reposerait sur la bonne connaissance des différents gradients de température. Cette gestion optimale ne pourra pas être au détriment de la durabilité de la pile.

L'évolution de la température est décroissante depuis la source vers le couloir (canal) de refroidissement. Ce gradient de température sera plus important dans le cas d'un refroidissement insuffisant ou dans le cas de l'arrêt du ventilateur. En conséquence, des effets très néfastes peuvent avoir lieu dans ce cas et peuvent aussi provoquer l'endommagement de la pile PEM.

Sur le plan structurel (géométrie), la simulation 2D nous a permis de bien détecter les points chauds dans un autre aperçu (quadrangulaire) et pour chaque couche. Ce constat pourra contribuer à bien éviter la surchauffe dans les zones sensibles de la cellule de la pile tel que la membrane en provoquant son assèchement.

Références bibliographiques

- [1] Colleen Spiegel, *Designing and Building Fuel Cells*. McGraw-Hill Education, 2007.
- [2] B. Abderezzak, *Introduction to transfer phenomena in PEM fuel cells*, 1st ed. ISTE Press - Elsevier, 2018.
- [3] DANA-MARIA PACLISAN, “optimisation par la modélisation de l’expérimentation vibratoire des systèmes pile a combustible pour le transport terrestre,” Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [4] H.MAHCENE, “Etude des causes d’augmentation de la température dans une pile à oxyde solide (SOFC): Etude bidimensionnelle du champ de température,” Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [5] S. BELKACEM BOUZIDA, “Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC,” Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2011.
- [6] A.HADDAD, “Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l’humidité dans la membrane électrolytique,” Université De Technologie De Belfort-Montbéliard, 2009.
- [7] EL-HASSANE AGLZIM, “Caractérisation Par Spectroscopie d’impédance De l’impédance Complexe d’une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l’influence De l’humidité,” Université Henri Poincaré – Nancy1, 2009.
- [8] W.MABROUK, “Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes protoniques. Applications en pile à combustible à membrane échangeuse de protons,” Faculté des Sciences de Tunis, 2012.
- [9] E.FRAPPÉ, “Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW,” Université Paris-Sud, 2012.
- [10] N.MEDDOUR, “simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide,” Université Kasdi Merbah Ouargla., 2010.
- [11] Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR, “Contribution à l’étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d’une pile à combustible de type PEMFC,” Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2014.
- [12] Benjamin Blunier; Abdellatif Miraoui, *Piles à combustible Genie énergétique : Principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés*. ELLIPSES, 2007.
- [13] F.BREQUE, “modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l’humidification interne de la pile,” l’Université du Québec A

Trois-Rivières, 2008.

- [14] M. R. et S. R. A. BRANGER, *Livre de Microbiochimie et alimentation*, Éducagri é. 2007.
- [15] Frano Barbir, *Pem Fuel Cells: Theory and Practice*, Second Edi. academic Press Inc, 2011.
- [16] Ryan O'hayre, *Fuel Cell Fundamentals*, Third edit. John Wiley & Sons, 2016.
- [17] Fei Gao; Benjamin Blunier; Abdellatif Miraoui, *Modélisation de piles à combustible à membrane échangeuse de protons : Physique, méthodes et exemples*. Hermes Science Publications, 2011.
- [18] B. Abderezzak, B. Khelidj, and M. Tahar Abbes, “Modeling charge transfer in a PEM fuel cell using solar hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 3, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.159.
- [19] B. Abderezzak *et al.*, “Technical feasibility assessment of a PEM fuel cell refrigerator system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 19, pp. 11211–11219, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.060.
- [20] D. M. J Ramousse, O Lottin, S Didierjean, “Heat sources in proton exchange membrane (PEM) fuel cells,” *J. Power Sources*, vol. 192, pp. 435–441, 2009.
- [21] M. Wöhr, K. Bolwin, W. Schnurnberger, M. Fischer, W. Neubrand, and G. Eigenberger, “Dynamic modelling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 3, pp. 213–218, 1998, doi: 10.1016/s0360-3199(97)00043-8.
- [22] W Neubrand, “Modelbildung und Simulation von Elektromembranverfahren,” Technische Universität Stuttgart, 1999.
- [23] B. Abderezzak, K. Busawon, and R. Binns, “Flows consumption assessment study for fuel cell vehicles: Towards a popularization of FCVs technology,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.152.
- [24] T. V. R. Bradean, H. Haas, K. Eggen, C. Richards, “Stack models and designs for improving fuel cell startup from freezing temperatures,” *ECS Trans.*, vol. 3, no. 1, pp. 1159–1168, 2006.

ملخص

تعتبر بطارية الوقود بمثابة حدث علمية نظرا لتطورها من جهة، وقابلية الاستعمال في مجالات مختلفة. دراسة ظواهر الانتقال (شحنة، كتلة وحرارة) في البطارية جد مهمة. من جهة، هذا الامر يُمكننا من فهم هذه التكنولوجيا، وكذا معرفة مدة استعمالها من جهة أخرى. دراسة ظواهر الانتقال الحراري مهمة جدا حيث تعتبر المفتاح الأساسي لحساب الحرارة المنبعثة وتحديد النقاط الساخنة مع إبراز عواقب غياب او تعطل جهاز التبريد الخاص بها. هذه الدراسة مبنية على تتبع مسار الحرارة عبر مختلف مكونات البطارية نظريا، ثم تحديد النقاط الساخنة عن طريق نموذج ثنائي الابعاد باستعمال برنامج خاص. النتائج المتحصل عليها عبارة عن منحنيات تعبر عن تطور درجة الحرارة عبر مختلف شرائح البطارية، ورسومات ثنائية الابعاد تسمح لنا بتحديد المواقع الساخنة. واعتمادا على هذه النتائج، يمكننا ملاحظة الخلل في البطارية سواء كان ارتفاعا مبالغا للحرارة او تعطلا في جهاز التبريد.

Résumé

La pile à combustible PEM constitue une actualité scientifique, tant par sa technologie très innovante que par ses multiples applications. L'étude des phénomènes des transferts (Charge, Masse et chaleur) dans une pile à combustible PEM est très importante. D'une part, elle contribue à la bonne compréhension de cette technologie. D'autre part, elle nous permet un bon diagnostic de la pile PEM pour préserver sa durabilité. Cependant, l'étude du phénomène de transfert thermique dans la pile PEM est essentielle, elle permet de quantifier la chaleur dégagée, de localiser les points chauds ainsi que de bien assimiler les risques dans le cas d'absence ou de défaillance d'un système de refroidissement. Ce travail scientifique fait l'objet d'une étude théorique qui touche à la distribution de température dans les différentes couches d'un stack de la pile. La localisation et la quantification de ses éventuels points chauds passera par une simulation numérique en 2D à l'aide d'un logiciel de simulation. Plusieurs résultats importants sont attendus sous deux formes : (i) des courbes qui représentent l'évolution de la température dans les différentes couches de la pile à combustible, ainsi que la quantité de chaleur estimée ; (ii) une distribution 2D réalisée par un logiciel de simulation ou même un langage de programmation. Cette distribution 2D nous permettra de localiser le regroupement de points chaud. Il nous sera très facile par la suite de voir l'effet néfaste d'une surchauffe de la pile lors d'un système de refroidissement insuffisant ou carrément défectueux

ABSTRACT

Nowadays, much attention is put on green energy solutions as well Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs), which converts electrochemically hydrogen and air into power, water and heat. This technology regroups many fields of study *e.g.*, electrochemistry, transfer phenomena (charge, mass and heat), materials and electrical engineering. PEMFCs can be employed in several applications (stationary, portable and transportation). However, some technical issues are encountered in PEMFCs as well water and thermal management. This research work investigates numerically the heat transfer issue alternative, clean and sustainable energy sources like hydrogen. It can be used in one of the highest energy demand sectors, indeed the automotive one. Hydrogen can be employed as a fuel for combustion purpose in the existing internal combustion engines, as it can be also used in fuel cells for power generation in electrical vehicles. In fact, PEM fuel cell This work is an investigation on an eventual faulty running scenario in the thermal management system of a PEM fuel cell used in a vehicle. A various driving profile with different road shape is considered. Results show that serious damages can occur to the polymeric membrane which will cause the immediate stop of the stack.