

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



UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie Mécanique
Option : Énergétique/Installations Energétiques et Turbomachines

Thème

*Analyse des performances électriques et du
Comportement thermique d'un système PEMFC*

Réalisé par :
KONATE Sanaba
CAMARA Elie Abdoulaye

Proposé et encadré par :

Dr ABDI Hamid

Année universitaire :2024/2025

Résumé :

Dans un contexte de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) représentent une solution prometteuse pour la production d'électricité propre. Le travail présenté dans cette étude a pour objectif d'analyser les performances électriques et le comportement thermique d'un système PEMFC en tenant compte des principaux paramètres de fonctionnement tels que la température, la pression et le coefficient stœchiométrique de l'air. À partir d'une modélisation mathématique rigoureuse utilisant les aspects électrochimiques, thermiques et énergétiques, suivie de simulations numériques sous MATLAB, nous avons étudié l'évolution de la tension, de la puissance, des rendements ainsi que des flux thermiques. L'étude paramétrique a ainsi permis de mettre en évidence l'influence significative des conditions opératoires sur les performances globales du système.

Mots clés : PEMFC, température, pression, débit d'air, performance

Abstract :

In the context of energy transition and greenhouse gas emission reduction, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) represent a promising solution for clean electricity production. The work presented in this study aims to analyze the electrical performance and thermal behavior of a PEMFC system, taking into account key operating parameters such as temperature, pressure, and air stoichiometric coefficient. Using rigorous mathematical modeling, electrochemical, thermal, and energy aspects, followed by numerical simulations in MATLAB, we studied the evolution of voltage, power, efficiency, and heat flux. The parametric study has highlighted the significant influence of operating conditions on the overall system performance.

Keywords : PEMFC, temperature, pressure, air flow, performance

Remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à ALLAH, le tout miséricordieux, le très miséricordieux, qui nous a accordé la santé, la patience, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.

Nous remercions du fond du cœur notre promoteur **Dr ABDI Hamid** pour son suivi et son apport scientifique, sa disponibilité et ses conseils qui nous ont été extrêmement utiles lors de l'élaboration de ce mémoire.

Nos remerciements vont à l'endroit de toute l'équipe pédagogique de l'Université SAAD Dahlab de Blida et particulièrement du département de génie Mécanique pour la richesse de leur enseignement, la rigueur intellectuelle qu'ils nous ont transmise.

Un grand merci aux membres du jury qui ont pris le temps de juger notre modeste travail, nous leur exprimons l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions très naturellement nos parents qui durant toutes ces années n'ont pas arrêtés de nous soutenir que ce soit moralement ou financièrement, merci à eux pour leurs amours inconditionnels et leurs sacrifices.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et plus particulièrement nos frères et sœurs des cités universitaires 5 et

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma famille, en particulier à mes parents (Daouda KONATE et Massitan KONE), pour leur amour infini, leurs prières, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants ; À mes frères et sœurs (Mariam, Balla, Bakary et Kadi), pour leur affection, leur présence réconfortante et leurs encouragements qui m'ont donné du courage dans les moments où j'en avais le plus besoin.

Je dédie également ce mémoire à tous mes amis et compatriotes en ALGERIE et au MALI qui m'ont accompagné avec bienveillance et patience tout au long de ce parcours ; Le soutien mutuel, nos discussions enrichissantes, les longues heures de travail partagées, et les liens d'amitié tissés au fil des années ont été pour moi un grand réconfort.

Je le dédie aussi à mes professeurs d'université pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité, leur exigence et leurs conseils avisés, qui ont contribué à ma formation intellectuelle et personnelle.

Et enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

Sanaba

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Ce mémoire est le témoignage d'un parcours enrichi par les liens qui m'unissent.....

En premier lieu, je le dédie à ma famille, surtout à mes parents, socle de mon existence, dont l'amour inconditionnel, les prières ferventes, le soutien constant et les sacrifices innombrables ont été le moteur essentiel de ma réussite.

A mes frères et sœurs, compagnons de toujours, dont l'affection sincère et la présence réconfortante ont été un soutien indéfectible qui ont ravivés ma flamme dans les moments de doutes, vos encouragements m'ont toujours données la force de persévérer.

A mes amis et compatriotes d'ALGERIE, complice de cette aventure, vous avez partagé mes joies et mes doutes avec une bienveillance infinie, nos échanges stimulants, nos efforts partagés et notre amitié sont une source de joie immense qui m'ont fait me sentir chez moi. Votre amitié est la plus belle des compositions !

A mes professeurs, artisans de mon savoir, dont la passion pour leur discipline et la qualité de leur enseignement ont éveillé ma curiosité, enrichi mes connaissances et façonné ma pensée. Leur disponibilité, leurs exigences et leurs conseils avisés ont été des jalons essentiels de ma formation.

A toutes celles et ceux qui d'une manière ou d'une autre a apporté leur pierre à cet édifice, votre contribution est une part essentielle de cette victoire.

Et enfin, que ces pages portent l'écho de ma reconnaissance la plus sincère !

Elie

Table des matières

Résumé	
Remerciements	
Dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclatures	
Introduction générale	Error! Bookmark not defined.
Chapitre 1 : Etat de l'art	3
1.1 Introduction	3
1.2 Etat des recherches	3
1.3 But du travail	Error! Bookmark not defined.
Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des PEMFC	8
2.1. Introduction	8
2.2 Historiques	8
2.3 Types de piles à combustible et leurs applications	9
2.3.1. Pile à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC)	9
2.3.2. Pile à Oxyde Solide (SOFC)	9
2.3.3. Pile à Acide Phosphorique (PAFC)	10
2.3.4. Pile à Carbonates Fondus (MCFC)	10
2.3.5. Pile Alcaline (AFC)	10
2.3.6. Pile à Méthanol Direct (DMFC)	10
2.4. Le type PEMFC	11
2.4.1 Les composantes d'une PEMFC	11
Chapitre 3 : Modélisation du système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons	15

3.1. Introduction	15
3.2. Description du système	15
3.3. Modélisation mathématique du système PEMFC	16
3.3.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEM	16
3.3.1.1. Calcul de la tension de la pile	16
3.3.1.2. Calcul du débit d'eau produite et celui passant par l'échangeur de chaleur :	19
3.3.2. Modèle thermique de la pile à combustible PEM	20
3.3.2.1 Calcul du Débit d'eau de refroidissement	20
3.3.2.2. Calcul de la puissance net du système	23
3.3.3. Calcul du rendement électrique et thermique de la pile	24
3.4. Organigramme de calcul	25
3.5. Conclusion	26
Chapitre 4 : Résultats et interprétations	27
4.1. Introduction	27
4.2. Conditions de simulation	27
4.3. Comportement électrique et thermique de la pile	28
4.4. Analyse des performances globales du système	32
4.5. Etude paramétrique du système	35
4.5.1. Effet de la température de fonctionnement	36
4.5.2. Effet de la Pression de fonctionnement	40
4.5.3. Effet du coefficient stœchiométrique de l'air (S _{air})	44
4.6. Conclusion	45
Conclusion générale	47
Références	48

Liste des figures

Figure 2.1	Schéma illustrant les composantes et le principe de fonctionnement d'une PEMFC.	13
Figure 2.2	Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.	13
Figure 2.3	Schéma de principe d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.	14
Figure 3.1	Système de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).	16
Figure 3.2	Schéma montrant les dimensions géométriques d'un PEMFC.	21
Figure 4.1	Variation de la tension de la cellule en fonction de la densité de courant.	26
Figure 4.2	Variation de la tension de la pile en fonction de la densité de courant.	27
Figure 4.3	Variation de la tension et de la puissance d'une cellule en fonction de la densité de courant.	28
Figure 4.4	Variation de la tension et de la puissance de la pile en fonction de la densité de courant.	28
Figure 4.5	Variation des chaleurs en fonction de la densité du courant.	29
Figure 4.6	Variation du débit d'eau de refroidissement en fonction de la densité.	30
Figure 4.7	Variation des puissances nettes, brute et parasite de la pile en fonction de la densité de courant.	31
Figure 4.8	Variation de la puissance parasite et du compresseur de la pile en fonction de la densité de courant.	31
Figure 4.9	Variation des puissances des pompes de refroidissement et d'humidification.	32
Figure 4.10	Variation des rendements en fonction de la densité du courant.	33
Figure 4.11	Variation de la tension de la pile à différentes températures de fonctionnement.	35

Figure 4.12	Variation de la puissance parasite du système à différentes températures de fonctionnement.	35
Figure4.13	Variation de la puissance brute de la pile à différentes températures de fonctionnement.	36
Figure 4.14	Variation de la puissance nette du système à différentes températures de fonctionnement.	36
Figure 4.15	Variation du débit d'eau de refroidissement à différentes températures de fonctionnement.	37
Figure 4.16	Variation de la chaleur totale perdue à différentes températures de fonctionnement.	37
Figure 4.17	Variation de la chaleur totale générée à différentes températures de fonctionnement.	38
Figure 4.18	Variation de la puissance nette du système à différentes températures de fonctionnement.	38
Figure 4.19	Variation Puissance parasite du système à différentes pressions de fonctionnement.	39
Figure 4.20	Variation Puissance Brute du système à différentes pressions de fonctionnement.	40
Figure 4.21	Variation Puissance nette du système à différentes pressions de fonctionnement.	40
Figure 4.22	Variation du débit d'eau de refroidissement à différentes pressions de fonctionnement.	41
Figure 4.23	Variation Chaleur totale générée dans la pile à différentes pressions de fonctionnement.	41
Figure4.24 :	Variation de la puissance parasite du système à différents stœchiométries.	42
Figure 4.25 :	Variation de la puissance brute de la pile à différentes stœchiométries.	43
Figure 4.26	Variation de la puissance nette du système à différents stœchiométries	43

Liste des Tableaux

Tableau 2.1	Différents types de pile à combustible.	11
Tableau 4.1	Paramètres de base pour la simulation de la pile PEMFC.	25
Tableau 4.2	Les différents paramètres étudiés et leurs valeurs.	33

Nomenclatures

A_{active}	Surface active de la pile à combustible (cm^2)
A_{cell}	Surface de la pile à combustible (cm^2)
A_{ends}	Surface des extrémités de la pile à combustible (cm^2)
A_{sides}	Surface des côtés de la pile à combustible (cm^2)
A_t	Surface totale de la section transversale de la cheminée (cm^2)
$C_{p_{air}}$	Chaleur spécifique de l'air à pression constante (J/kg K)
$C_{p_{H_2O}}$	Chaleur spécifique de l'eau à pression constante (J/kg K)
E_{max}	Tension maximale de la cellule (V)
$CH_{2,conc}$	Concentration d'hydrogène (mol/cm^3)
$CO_{2,conc}$	Concentration d'oxygène (mol/cm^3)
E_{Nernst}	Tension de Nernst (V)
F	Constante de Faraday ($C\ cm^{-1}$)
h	Enthalpie spécifique (KJ/mol)
h_{conv}	Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W\ m^{-2}\ ^\circ C$)
$h_{conv,bottom}$	Coefficients de transfert de chaleur par convection de la pile à combustible du bas du canal ($W\ m^{-2}\ ^\circ C$)
$h_{conv,top}$	Coefficients de transfert de chaleur par convection de la pile à combustible du haut du canal ($W\ m^{-2}\ ^\circ C$)
i	Densité de courant de la pile à combustible (A/cm^2)
I	Courant de la pile à combustible (A)
I_L	Densité de courant maximal (A/cm^2)
l_{vap}	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
t	Température de fonctionnement de la pile à combustible (K)
P	Pression de fonctionnement de la pile à combustible (atm)
R	Constante du gaz universel ($J\ mol^{-1}K^{-1}$)
N_{cell}	Nombre de cellule
V_{ohm}	Surtension ohmique (V)
V_{conc}	Surtension de concentration (V)
V_{cell}	Tension de la cellule (V)
V_{act}	Surtension activation (V)
r_{mem}	Résistance de la membrane ($\Omega\ cm$)

R_{int}	Résistance interne (Ω)
T_{stack}	Température du module (K)
P_{O_2}	Pression partielle de l'oxygène (bar)
P_{H_2}	Pression partielle d'hydrogène (atm)
$W_{net,parasit}$	Puissance parasite (W)
$W_{cool,pump}$	Puissance de refroidissement de pompe (W)
$W_{humid,pump}$	Puissance d'humidification de pompe (W)
W_{comp}	Puissance du compresseur (W)
$P_{drop,coolant}$	Perte de pression de l'eau de refroidissement (Pa)
$P_{drophumid}$	Perte de pression dans l'humidificateur (Pa)
$W_{brute,stack}$	Puissance brute de l'empilement (W)
$W_{net,system}$	Puissance nette de sortie du système (W)
S_{factor}	Facteur de sécurité

Lettres grecques

ξ	Coefficient paramétrique
ζ	Teneur en eau de la membrane
η_{pump}	Rendement de la pompe (%)
η_{motor}	Rendement du moteur (%)
η_{elect}	Rendement électrique du système (%)
η_{therm}	Rendement thermique (%)
ρ_{H_2O}	Densité de l'eau (Kg/m^3)
β	Coefficient de dilatation volumique

Introduction générale

La progression des énergies renouvelables et la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre placent aujourd'hui les systèmes de conversion d'énergie propre aux cœurs des préoccupations scientifiques et industrielles. A travers cette perspective, les piles à combustible apparaissent comme une solution innovante et prometteuse et en particulier la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) qui se distingue des autres, par son rendement élevé, sa capacité à produire de l'électricité de manière continue et ses faibles émissions polluantes et fonctionnant principalement à partir d'hydrogène et d'oxygène. La PEMFC est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique en dégageant de la chaleur et de l'eau, ce qui en fait une solution particulièrement attractive pour les applications stationnaires, la mobilité et la production d'électricité de manière autonome.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, la PEMFC présente encore des défis majeurs liés à l'optimisation de ses performances électriques et à la gestion thermique de ses composants. Il est essentiel de maîtriser ces éléments non seulement pour assurer l'efficacité énergétique du système, mais aussi sa durabilité et sa fiabilité dans diverses conditions fonctionnelles. De nombreux travaux de recherche ont ainsi été consacrés à la modélisation et à l'analyse des PEMFC, mettant en évidence l'influence déterminante des paramètres opératoires tels que la température, la pression l'humidité des gaz réactifs et la gestion de l'eau produite sur le comportement globale de la pile.

Notre travail consiste à analyser les performances électriques ainsi que le comportement thermique d'un système PEMFC. En utilisant une méthodologie qui associe la modélisation mathématique, simulations numériques et analyse paramétrique. Notre travail vise à approfondir la compréhension des phénomènes physiques qui déterminent le fonctionnement de la PEMFC afin d'améliorer son efficacité globale.

Ce document est structuré de quatre principaux chapitres :

- Un premier chapitre, présentant les recherches effectuées les piles à combustible, en particulier la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).
- Un deuxième chapitre dont l'objectif est de présenter des généralités sur les piles à combustible, et développer en détail, le cas particulier des piles à combustible à membrane échangeuse de protons.

- Dans le troisième chapitre, nous exposerons le modèle mathématique qui décrit les phénomènes électrochimiques, thermiques et énergétique d'un système de pile à combustible de type PEMFC.
- Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir des simulations, leurs interprétations, l'analyse des performances du système, et les perspectives d'optimisation dégagées à travers l'étude paramétrique.

Enfin le mémoire se clôture par une conclusion générale qui résume les apports de notre travail et propose des pistes pour des recherches futures.

Chapitre 1 :

Etat de l'art

1.1. Introduction

Les piles à combustible sont des convertisseurs d'énergie, et non des sources d'énergie. Une pile à combustible convertit directement l'énergie chimique de la réaction d'un carburant (hydrogène, méthanol etc...) et d'un oxydant (habituellement oxygène ou air) en énergie électrique par une réaction d'oxydoréduction. Cette réaction consiste en l'oxydation d'un combustible d'une part (à l'anode) et en la réduction d'un comburant d'autre part (à la cathode) [1]. Ces deux réactions sont favorisées par un catalyseur, en général du platine. Les deux réactifs sont séparés par un électrolyte à travers lequel les ions produits par la réaction circulent. Lorsque l'hydrogène est utilisé comme carburant, elle génère uniquement de l'énergie électrique et de l'eau pure (un moteur à émission nulle). Les piles à combustible diffèrent aux batteries dans le sens où elles ne contiennent pas tous les réactifs nécessaires initialement stockés. Lorsque l'électricité est nécessaire, le carburant et l'oxydant sont alimentés en continu dans la cellule et les produits de réaction sont également enlevés en continu simultanément [2].

Nous nous intéresserons dans ce travail aux piles de type PEMFC. Ce type de pile est actuellement très étudiée car les applications sont multiples autant dans le domaine stationnaire que dans le domaine automobile et la production d'électricité.

Nous allons passer en revue un état de l'art sur les piles à combustibles, leur classification, mode de fonctionnement, ainsi que les avantages et les inconvénients de ces dernières.

1.2. Etat des recherches

A travers des années, de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'analyse de la pile à combustible PEMFC en recourant à diverses méthodes et modèles, afin de mieux comprendre les performances électriques, le comportement thermique et l'optimisation d'un système PEMFC. Dans ce qui suit, nous mentionnons quelques études menées sur les piles à combustible PEMFC :

L'étude élaboré par **Xue et Dong** en **2001** portait sur un modèle du système de pile à combustible basé sur le modèle semi-empirique de la pile à combustible Ballard Mark IV qui

est une représentation mathématique utilisée pour simuler le comportement électrique de la (PEMFC) prenant en compte certains phénomènes physiques et pertes énergétiques. Ce modèle et l'optimisation numérique ont permis de déterminer la zone de la pile active optimale et le rapport stœchiométrique de l'air dans le but d'augmenter la production nette d'énergie et de réduire les coûts de production [3].

Mawardi, Yang et Pitchumani 2005 Cette recherche visait à optimiser les performances des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'objectif était spécifiquement de maximiser la densité de puissance fournie par la pile par contrôle des paramètres de fonctionnement. Les chercheurs ont développé un modèle multidimensionnel intégrant les phénomènes de transfert de masse, de chaleur et de charge électrique, afin de simuler avec précision le comportement d'une PEMFC sous diverses conditions. Ils ont mis en œuvre des techniques d'optimisation numérique, y compris des algorithmes de recherche exhaustive dans l'espace des paramètres, afin de trouver les combinaisons parfaites qui conduisent à des performances optimales, principalement en termes de densité de puissance. Ce modèle a permis de mieux comprendre les interactions complexes entre les différents paramètres de fonctionnement, tels que la température, la pression, l'humidité relative des gaz réactifs et les débits d'alimentation en hydrogène et en air [4].

L'étude proposée par **Forde et al en 2009** a visé à examiner de l'intégration thermique entre une unité de stockage d'hydrure métallique et une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Cette recherche a permis spécifiquement à perfectionner la gestion thermique du système par l'exploitation de la chaleur produite par la pile pour déclencher le stockage et de libérer l'hydrogène au sein de l'unité d'hydrure métallique. Cette méthode a contribué à accroître l'efficacité énergétique globale du système hybride [5]

En 2009 **Sylvain Chupin** a développé un outil permettant de diagnostiquer l'état interne de la pile (hydrique, thermique et électrique) à partir des conditions opératoires, afin d'ajuster ces dernières pour obtenir des performances optimales. Ce travail a montré comment les distributions locales (eau, courant, température) influencent directement le courant global délivré par la pile [6].

Hwang et al. (2010), ont proposé l'intégration d'une unité de récupération de chaleur dans un système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'objectif était de valoriser la chaleur résiduelle générée par la pile afin d'améliorer l'efficacité énergétique globale du système. L'unité de récupération de chaleur est conçue

pour récupérer la chaleur résiduelle, puis l'utiliser afin de chauffer de l'eau. Les résultats montrent une amélioration significative du rendement global, démontrant le potentiel de ce type de récupération thermique dans des applications résidentielles ou stationnaires. Ils ont conclu aussi que l'ajout d'une unité de récupération de chaleur est une stratégie efficace pour optimiser les performances des systèmes PEMFC [7].

L'étude proposée par, **Guo, Y. et al 2020** porte sur l'analyse énergétique, exergetique et écologique d'une pile à membrane échangeuse de protons opérant à haute température utilisant une membrane en polybenzimidazole dopée à l'acide phosphore. Les chercheurs ont étudié l'impact de divers facteurs opérationnels tels que la température, la pression et la concentration des réactifs sur le rendement de la pile. Ils ont évalué les performances du système sur la base de l'efficacité énergétique, exergetique qui repose sur la qualité de l'énergie transformée et d'un indice écologique qui combine rendement et impact environnemental [8].

Zhang, X., et al. 2011 ont parallèlement mis en avant un système hybride d'alimentation, composé d'une pile à hydrogène PEM et d'un cycle de réfrigération, qui permet d'exploiter la chaleur résiduelle d'une PEMFC pour le refroidissement. Les résultats des simulations ont montré que l'énergie maximale produite par le système hybride des densités de courant est élevée [9].

En 2019, Guo C, Lu J, Tian Z, et al ont suggéré une méthode innovante pour optimiser les paramètres majeurs d'une pile à combustible à membrane échangeuses de protons, dans le but d'améliorer ses performances et son rendement énergétique. Ils ont utilisé la méthode de réseau de neurones qui sert à modéliser le comportement dynamique d'une pile à combustible, et présidant la tension de sortie en fonction de différentes conditions d'entrée (la température, la pression). Les résultats obtenus ont indiqué que cette méthode d'optimisation offre une meilleure précision, mécanisme de convergence plus rapide et de meilleures performances globales par rapport à d'autres algorithmes [10].

Le travail présenté par **BENRAYA Yamina** en 2020 est basé sur l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie renouvelable à travers la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'objectif principal était de comprendre le fonctionnement de ce type de pile, d'analyser ses caractéristiques électriques, et d'étudier son comportement à l'aide de la modélisation et de la simulation sous Matlab. Cette étude a mis en lumière l'importance de la PEMFC dans des applications comme le transport, et comment elle permet de transformer l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec pour seuls sous-produits

de l'eau et de la chaleur ce qui en fait une technologie propre et prometteuse [11].

L'étude élaborée par **Z. Zhou, D. Qiu, S. Zhai, et al en 2020** avait pour but d'améliorer les performances et la fiabilité d'une PEMFC par l'analyse des contraintes mécaniques et thermiques qui apparaissent lors de l'assemblage; pour cela ils ont proposé un modèle en 2D pour évaluer l'impact de l'assemblage sur les performances globales de la pile. Ce modèle a permis de réduire considérablement le temps de calcul, donne une bonne précision et à aider à identifier les zones de déformation excessive ; optimiser la force de serrage et la conception des composants et prévenir les défaillances. Les chercheurs ont montré que leur modèle utilisé constitue un outil pratique et fiable pour l'ingénierie des piles à combustible, capable d'accélérer le développement de nouveaux designs et d'améliorer les performances globales des systèmes PEMFC [12].

Zhang et al. (2021) ont étudié l'effet des conditions environnementales sur le comportement des PEMFC, mettant ainsi en évidence la sensibilité de la tension de sortie à la pression atmosphérique et aussi à la température ambiante. Ceci souligne l'importance de prendre en compte les facteurs environnementaux dans la conception et l'exploitation des PEMFC [13].

Zou et al. (2022) ont développé un modèle dynamique prenant en compte la dégradation des composants, et montrant l'importance de la gestion thermique et de l'humidité dans la durabilité du système. Ces dernières sont des facteurs clés pour maintenir les performances optimales de la pile et prolonger sa durée de vie. [14]

Kim et al. (2022) ont proposé des stratégies de gestion thermique passive basées sur l'intégration de matériaux à changement de phase, permettant une réduction importante des pertes thermiques. Ceci entraîne une amélioration de l'efficacité et la fiabilité des PEMFC [15].

L'intégration de la PEMFC dans des systèmes hybrides a également progressé, comme l'indique l'étude de **Alavi et al. (2023)**. Les auteurs ont mis en œuvre un contrôle prédictif pour améliorer la répartition de l'énergie entre une pile à combustible et une batterie lithium-ion dans les véhicules électriques [16].

Gharibi et al. (2023), ont appliqué des techniques d'intelligence artificielle pour optimiser les paramètres de fonctionnement de la pile comme la température, la pression et le débit moyennant des algorithmes multi-objectifs. Le but est d'améliorer les performances globales et le rendement exergétique. Cette approche a montré également le potentiel de l'intelligence artificielle pour optimiser les systèmes énergétiques complexes [17].

1.3. But du travail :

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser les performances électriques et thermiques d'un à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), en tenant compte de l'effet des conditions de fonctionnement telle que la température, la pression et le coefficient stœchiométrique de l'air qui peuvent influencer de manière significative la production d'énergie et la gestion thermique de ces systèmes. A travers ce travail, nous chercherons à étudier les variations, de la tension, de la puissance électrique et thermique produites, ainsi que les différents rendements associés. Cette étude vise à mieux comprendre les défis liés à la stabilité et à l'efficacité des PEMFC dans des contextes d'utilisation variés, afin de contribuer à l'optimisation de leur fonctionnement, tant pour des applications fixes.

Chapitre 2 :

Généralités et principes de fonctionnement des PEMFC

2.1. Introduction

Les piles à combustible ont été développées depuis de nombreuses années. Pendant les années soixante, elles ont été développées pour différentes applications mais seulement fabriquées pour les applications spatiales, pour des raisons de coût. Les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC) ont été alors développées et proposées à la vente pour des applications stationnaires alors que les piles à combustible à membrane d'électrolyte solide polymère (PEMFC) deviennent maintenant une solution intéressante pour les applications mobiles, du fait des plus fortes densités de puissance qu'il est possible d'atteindre [18].

2.2 Historiques :

1838 : C.F. Schönbein découvre le principe de la pile à combustible, il réalise l'électrolyse de l'eau (grâce à un courant électrique il obtient de l'hydrogène et de l'oxygène) mais s'aperçoit qu'en coupant le courant, ces gaz donnaient lieu à un courant électrique inverse.

1839 : W.R. Grove réalise la première pile à hydrogène en laboratoire.

1939-1953 : les travaux de Francis T. Bacon permettent la mise en place d'un premier prototype industriel de puissance (de l'ordre du kW).

1960 : la NASA sort la pile à hydrogène de l'oubli en l'utilisant pour alimenter ses véhicules spatiaux.

1973 : Suite au premier choc pétrolier il apparaît indispensable d'être énergétiquement indépendant. Les recherches sur les piles à combustible reprennent de manière plus importante aux Etats-Unis, au Japon et en Europe grâce à cette prise de conscience [19].

Années 1980 : En raison des coûts rédhibitoires des catalyseurs et des membranes, l'élan des recherches sur les PAC est freiné.

Années 1990 : L'aggravation des problèmes environnementaux (notamment le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique) ainsi que les avancées technologiques entraînent un regain d'intérêt pour ces systèmes.

Années 2000 : Les piles à combustible commencent à être utilisées dans des applications commerciales, notamment dans les véhicules et les systèmes de cogénération domestique, grâce à la réduction des coûts et à l'amélioration de l'efficacité des technologies associées.

Années 2010 : Les avancées dans les matériaux et la fabrication, ainsi que les préoccupations croissantes concernant les émissions de carbone, stimulent la recherche et le développement des piles à combustible, avec des initiatives de soutien de la part des gouvernements et des entreprises privées.

Années 2020 : Les piles à combustible se positionnent comme une solution clé pour la transition énergétique, avec des applications croissantes dans le transport, l'industrie et les infrastructures énergétiques, et une attention accrue à l'hydrogène vert produit à partir de sources renouvelables [20].

2.3 Types de piles à combustible et leurs applications

Chaque type de pile à combustible présente des caractéristiques spécifiques qui les rendent plus adaptées à certaines applications qu'à d'autres, en fonction des besoins en puissance et des conditions de fonctionnement notamment la température. Nous distinguons plusieurs types de piles à combustible qui sont classées selon deux (2) catégories, à savoir les piles à combustible à basse température ($T < 150^{\circ}\text{C}$) et les piles à combustible à haute température ($T > 150^{\circ}\text{C}$). Nous citons ci-dessous, quelques types de piles avec leurs domaines d'application.

2.3.1. Pile à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC)

La technologie PEMFC se différencie des autres technologies de piles à combustible en ce sens qu'une membrane polymère en phase solide est utilisée comme séparateur/électrolyte cellulaire. Parce que le séparateur cellulaire est un film polymère et que la cellule fonctionne à des températures relativement basses. Grâce à leur démarrage rapide et leur compacité, les PEMFC sont recommandées pour les véhicules électriques (voitures, bus) et les applications portables [19].

2.3.2. Pile à Oxyde Solide (SOFC)

Adaptées à la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur), les SOFC sont utilisées pour des installations stationnaires, comme l'alimentation de bâtiments ou de réseaux électriques locaux. Il peut fonctionner à des températures plus élevées d'environ 1000°C avec du carburant à l'hydrogène ainsi qu'avec d'autres types de carburant tels que le gaz naturel, le biogaz et le gaz de charbon. Les composants de base et la réaction globale sont les mêmes dans une SOFC à l'exception des réactions électrochimiques aux électrodes anodiques et

cathodiques [20].

2.3.3. Pile à Acide Phosphorique (PAFC)

Les PAFC sont désignés sous le nom de piles à combustible à température intermédiaire avec une température de fonctionnement d'environ 200°C ; il utilise de l'acide phosphorique (H₃PO₄) comme solution liquide d'électrolyte et un ion hydrogène (H⁺) ou un proton comme ion migrant à travers celui-ci. Ils sont principalement employés dans des installations stationnaires de grande puissance, telles que des centrales électriques décentralisées ou des systèmes de cogénération pour des bâtiments commerciaux [1].

2.3.4. Pile à Carbonates Fondus (MCFC)

Les MCFC peuvent fonctionner non seulement avec de l'hydrogène, mais aussi avec d'autres types de carburant, y compris le gaz naturel, le biogaz et le gaz de charbon propre en produisant de l'hydrogène par un processus de reformage et il fonctionne entre 600°C et 660°C. L'hydrogène subit une réduction de l'oxydation en combinant avec des ions carbonate entrants (CO₃), en libérant des électrons vers le circuit externe et en produisant de l'eau et du dioxyde de carbone. À la cathode, l'oxygène subit une réaction de réduction en combinant avec du dioxyde de carbone et des électrons entrants du circuit externe et en libérant des ions carbonate. Ils sont utilisés pour la production d'électricité à grande échelle, notamment dans des centrales électriques stationnaires, en raison de leur haut rendement énergétique. [22]

2.3.5. Pile Alcaline (AFC) :

Ce type de pile utilise soit une solution d'hydroxyde de potassium (KOH), soit de l'hydroxyde de sodium (NaOH) comme électrolyte et fonctionnent à basse température d'environ 100°C ; l'AFC est très efficace mais ces piles à combustible sont actuellement limitées à l'utilisation d'hydrogène et d'oxygène purs uniquement en raison de l'incompatibilité de l'électrolyte alcalin avec d'autres carburants et de l'air contenant du dioxyde de carbone. Ce type est historiquement utilisées dans les programmes spatiaux, notamment par la NASA lors des missions Apollo, en raison de leur efficacité et de leur fiabilité. [20]

2.3.6. Pile à Méthanol Direct (DMFC) :

Il tire son nom de l'utilisation du méthanol comme carburant au lieu d'hydrogène. Il est similaire à la conception et aux structures du PEMFC, qui comprend une membrane d'électrolyte polymère solide conductrice de protons avec deux électrodes revêtues de catalyseur. Principalement destinées aux appareils portables et aux petites applications

stationnaires, ces piles utilisent le méthanol comme combustible, simplifiant ainsi le stockage et le ravitaillement [1].

Le tableau suivant (2.1) regroupe quelques informations essentielles concernant ces différents types de pile de pile à combustible [21].

Tableau 2.1 : Différents types de pile à combustible.

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom en anglais	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane FC	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	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 et 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
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-marins)	Electronique portable, transport, cogénération	Electronique portable	Transport, cogénération	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, transport (APU)
Rendement électrique	55-60 %	32-40 %	15-25 %	40-45%	50% 55% avec réutilisation de la chaleur	40-45% 55% avec réutilisation de la chaleur

2.4. Le type PEMFC

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) sont considérées comme des technologies énergétiques durables prometteuses en raison de leurs avantages comme la haute efficacité, un démarrage rapide, une température de fonctionnement

relativement basse, une construction simple et de bonnes performances dynamiques. Pour ces raisons, le principal potentiel d'application s'est concentré sur le secteur des transports. A l'heure actuelle, le principal obstacle de la commercialisation des PEMFC réside dans sa durabilité [22].

2.4.1. Les composantes d'une PEMFC :

Comme le montre les figures (2.1) et (2.2), une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est composée de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène en énergie électrique. Les principaux composants sont :

1. **Membrane échangeuse de protons (électrolyte) :** Cette membrane polymère permet le passage des protons de l'anode vers la cathode tout en empêchant le passage des électrons et des gaz, assurant ainsi la conduction protonique nécessaire au fonctionnement de la pile.
2. **Électrodes (anode et cathode) :** Ces couches contiennent un catalyseur, généralement du platine, qui facilite les réactions électrochimiques. L'anode est le site de l'oxydation de l'hydrogène, tandis que la cathode est le site de la réduction de l'oxygène.
3. **Couches de diffusion de gaz (GDL) :** Situées entre les plaques bipolaires et les électrodes, ces couches poreuses assurent une distribution uniforme des gaz réactifs (hydrogène et oxygène) sur les électrodes et facilitent l'évacuation de l'eau produite lors des réactions.
4. **Plaques bipolaires :** Elles séparent et distribuent les gaz aux différentes cellules de la pile, collectent le courant électrique produit et aident à la gestion thermique en évacuant la chaleur générée [23].

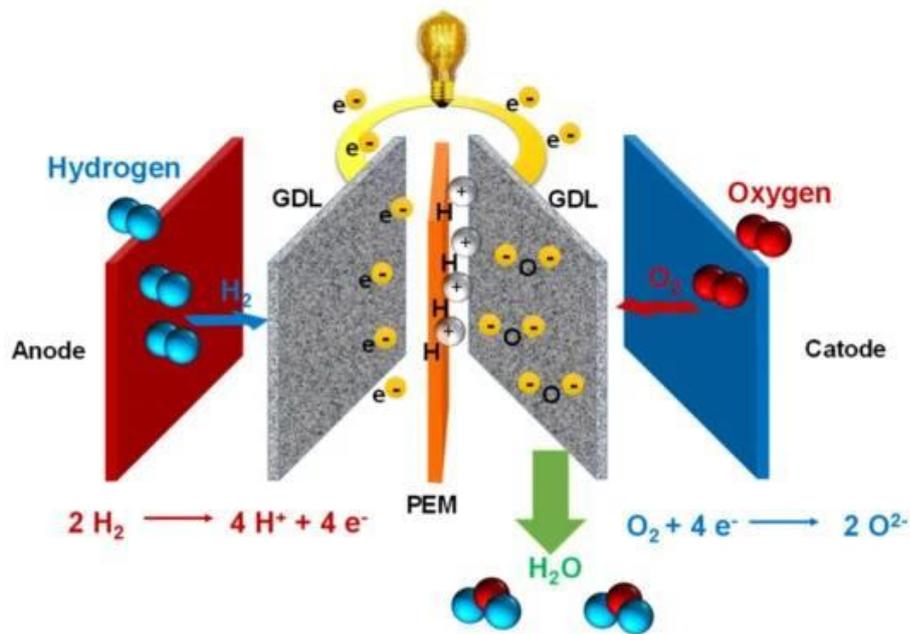


Figure 2.1 : Schéma montrant le principe de fonctionnement d'une PEMFC [24].

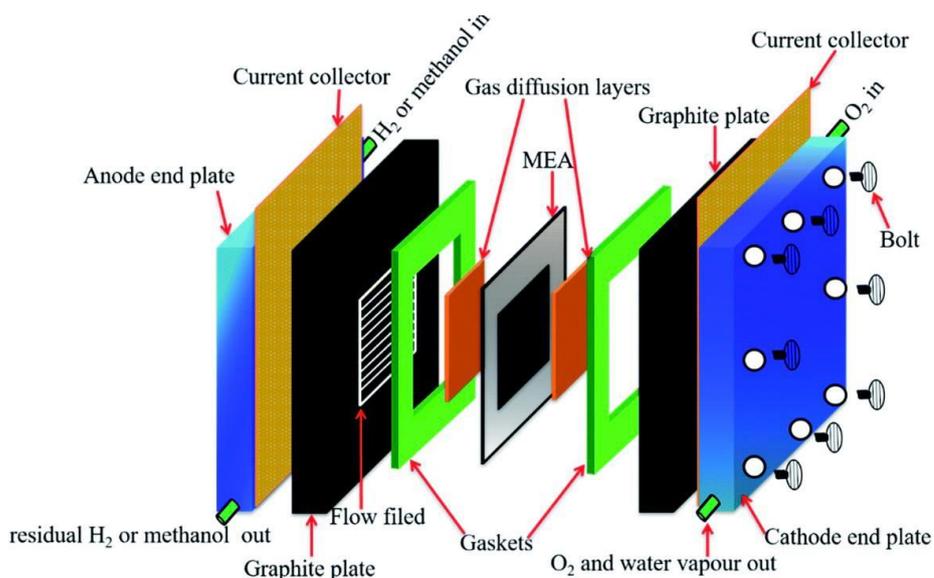


Figure 2.2 : Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons. [25].

Le schéma précédent montre les composants d'une seule PEMFC avec les plaques bipolaires, joints, couches de diffusion de gaz et MEA ; cette disposition est répétée dans une pile à combustible.

La figure (2.3) illustre le principe de fonctionnement d'une PEMFC. La réaction d'oxydation de l'hydrogène ayant lieu au niveau de l'anode est donnée par l'équation (2.1).



Les électrons sont forcés de circuler dans un circuit électrique externe et les protons traversent la membrane polymère.

A la cathode la réaction de réduction aura lieu, les électrons du circuit externe arrivent et les protons H^+ traversent la membrane, selon la réaction suivante :



Et il en résulte une production d'eau comme sous-produit.

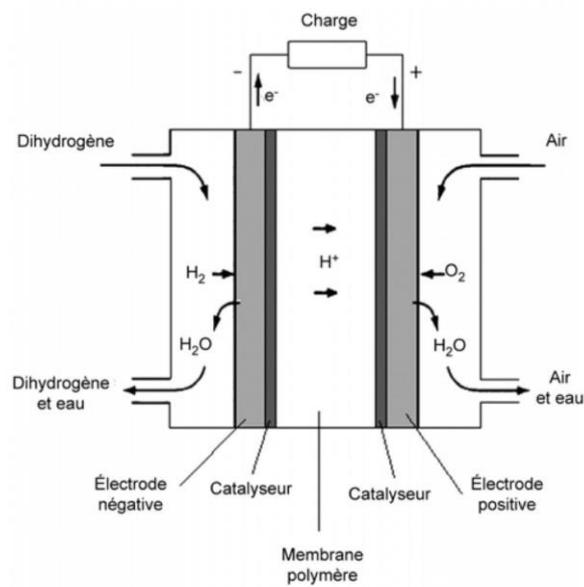


Figure 2.3 : Schéma descriptif du principe d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons [26].

Chapitre 3 :

Modélisation du système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons

3.1. Introduction :

La modélisation d'une pile à combustible (PEMFC) est une étape clé pour analyser ses performances, et prévoir son comportement dans différentes conditions d'exploitation. Elle permet de mieux comprendre les phénomènes électrochimiques et thermiques, facilitant ainsi le développement de stratégies d'amélioration et de contrôle.

Dans cette section, nous présentons le modèle utilisé pour décrire le fonctionnement de la PEMFC, en tenant compte des aspects électrochimiques, thermodynamiques et de transfert de masse et de chaleur. Nous détaillerons les hypothèses retenues, les équations fondamentales qui régissent le comportement du système et la méthodologie employée pour résoudre ces équations. L'objectif est de fournir un cadre théorique rigoureux permettant d'analyser les performances de la pile et d'identifier les principaux paramètres influençant son efficacité.

3.2. Description du système :

Le système étudié est présenté par la figure (3.1). Ce dernier comprend essentiellement la PEMFC ainsi que les sous-composants auxiliaires. L'hydrogène, stocké dans un réservoir, passe par un régulateur de pression avant d'être humidifié et introduit dans l'empilement de piles à combustible. L'air ambiant est comprimé par un compresseur, filtré et également humidifié après un échange thermique avant d'atteindre la pile. A l'intérieur de la pile, l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Le système est équipé d'un circuit de refroidissement comprenant une pompe, un réservoir et un radiateur, afin de maintenir une température de fonctionnement adéquate. Un système d'humidification, équipé d'une pompe, permet de réguler efficacement l'humidité indispensable aux bonnes hydratations de la membrane.

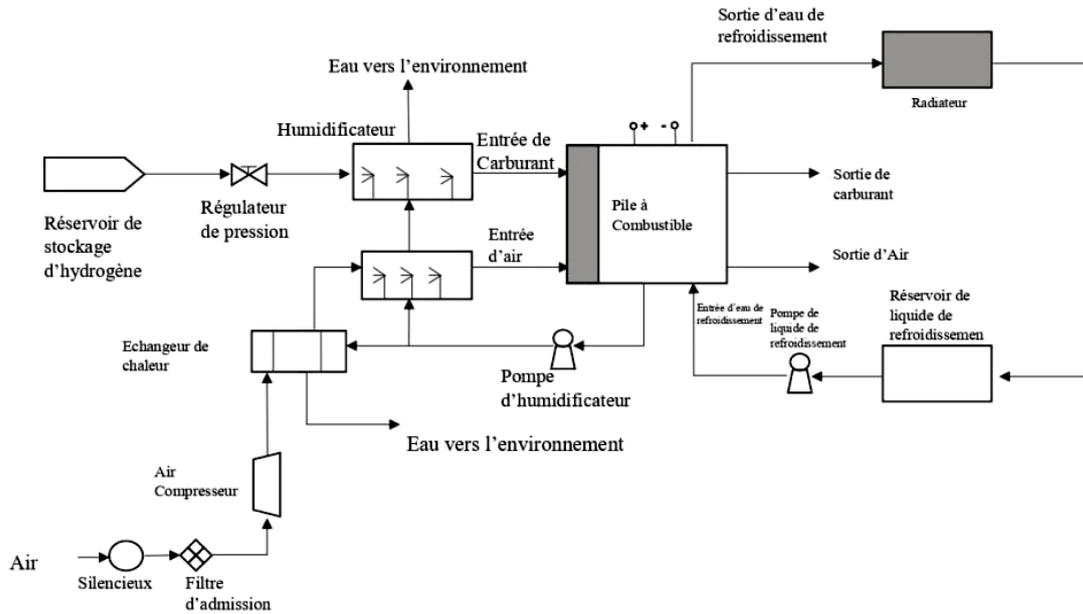


Figure 3.1 : Système de pile à combustible [31].

Afin d'analyser le comportement électrique et thermique du système étudié, il est essentiel de développer une représentation mathématique rigoureuse du système. La modélisation permet non seulement de comprendre les phénomènes physiques et électrochimiques en jeu, mais aussi de prédire les performances sous diverses conditions de fonctionnement. Dans la section suivante, nous présentons les étapes fondamentales de cette modélisation.

3.3. Modélisation mathématique du système PEMFC :

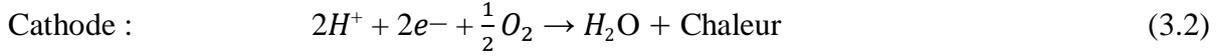
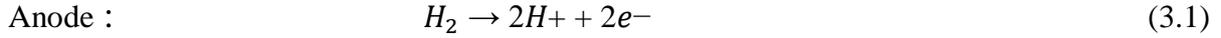
La modélisation mathématique du système PEMFC repose d'abord sur la compréhension des phénomènes électrochimiques qui ont lieu dans la pile. Ces phénomènes régissent la conversion de l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène en énergie électrique.

3.3.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEM

3.3.1.1. Calcul de la tension de la pile :

L'un des paramètres clés pour évaluer les performances d'une pile à combustible est sa tension de sortie. Celle-ci dépend directement des réactions électrochimiques qui ont lieu à l'anode et à la cathode, ainsi que des diverses surtensions. Dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), l'hydrogène à l'anode et l'oxygène à la cathode

sont les principaux réactifs de la réaction électrochimique. Les processus réactionnels se déroulant au sein de ces électrodes peuvent être décrits de la manière suivante [27] :



Cette réaction produit une tension d'équilibre, appelée tension de Nernst, qui peut être exprimée par l'équation suivante [28] :

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T_{fc} \times (\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})) \quad (3.4)$$

Avec :

T_{fc} : la température de la cellule (K)

P_{H_2} : la pression partielle de l'hydrogène (atm)

$P_{H_2O}^{sat}$: Représente la pression de saturation de la vapeur d'eau, elle s'exprime par l'équation (3.5) :

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \times 10^{-7}t^3 \quad (3.5)$$

t : est la température de fonctionnement de la pile à combustible en °C et peut être calculée

Comme suit :

$$t = T_{fc} - 273.15 \quad (3.6)$$

P_{O_2} : la pression partielle de l'oxygène

Les pressions partielles effectives d'hydrogène P_{H_2} au niveau de l'anode et d'oxygène P_{O_2} au niveau de la cathode sont données respectivement par les équations (3.7) et (3.8) :

$$P_{H_2} = 0.5 \times P_{H_2O}^{sat} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{fc} \cdot 1.334}\right) \cdot X_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (3.7)$$

$$P_{O_2} = P \left[1 - X_{H_2O}^{sat} X_{N_2}^{channel} - \exp\left(\frac{0.291i}{T_{fc}}\right) \right] \quad (3.8)$$

P : est la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM.

Le terme « i » représente la densité du courant.

$X_{N_2}^{channel}$ Est la fraction molaire de l'azote et $X_{H_2O}^{sat}$ est la fraction molaire de la vapeur d'eau dans le mélange, elle est donnée par :

$$X_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P} \quad (3.9)$$

La fraction molaire de l'azote dans le flux d'air est déterminée par la moyenne logarithmique entre sa fraction molaire dans un flux d'air humidifié à l'entrée et celle à la sortie.

$$X_{N_2}^{channel} = \frac{X_{N_2}^{in} - X_{N_2}^{out}}{\ln(X_{N_2}^{in}/X_{N_2}^{out})} \quad (3.10)$$

Où

$$X_{N_2}^{in} = 0.79(1 - X_{H_2O}^{sat}) \quad (3.11)$$

$$X_{N_2}^{out} = \frac{1 - X_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air} - 1}{\lambda_{air}}\right) \cdot \left(\frac{0.21}{0.79}\right)} \quad (3.12)$$

La tension réelle de la pile à combustible est généralement inférieure à la tension réversible de Nernst en raison des pertes irréversibles, notamment la surtension d'activation, la surtension ohmique et la surtension de concentration. De ce fait, la tension de sortie de la pile à combustible PEM s'exprime par l'équation suivante :

$$V_{fc} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3.13)$$

Où

V_{act} , V_{ohm} , V_{conc} sont respectivement la surtension d'activation, la surtension ohmique et la surtension de concentration.

La surtension d'activation est due la cinétique de la réaction de transfert de charge à travers l'interface électrode-électrolyte [29]. Autrement dit, c'est l'énergie requise pour activer les réactions chimiques. Elle peut être exprimé par : [30]

$$V_{act} = -[-0.948 + \xi T_{fc} + 0.000076 T_{fc} (\ln(CO_2, conc)) - 0.000193 T_{fc} (\ln(I))] \quad (3.14)$$

I : est le courant de fonctionnement de la pile en (A)

ξ peut être représenté par :

$$\xi = 0.00286 + 0.0002 \ln(A_{cell}) + 0.000043 \ln(C_{H_2, conc}) \quad (3.15)$$

$C_{O_2, conc}$ et $C_{H_2, conc}$ sont les concentrations d'oxygène et d'hydrogène dans l'interface de la surface des électrodes (mol/cm³). Elles sont données en fonction de la pression par la loi d'Henry [29] :

$$C_{O_2, conc} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp(498/T_{fc}) \quad (3.16)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} \text{ PH}_2 \exp(-77/T_{fc}) \quad (3.17)$$

La surtension ohmique dans une pile à combustible provient des pertes dues aux résistances que rencontrent les électrons et les ions dans les différents composants de la cellule, notamment la membrane, les électrodes, la plaque bipolaire et les connexions. Selon la loi d'Ohm elle est définie par :

$$V_{ohm} = I \cdot R_{int} \quad (3.18)$$

R_{int} : Désigne la résistance interne totale et elle est calculée par l'équation (19) :

$$R_{int} = \frac{r_{mem} \cdot L}{A_{cell}} \quad (3.19)$$

Où L représente l'épaisseur de la membrane en (cm) et r_{mem} représente la résistance spécifique de la membrane en ($\Omega \cdot \text{cm}$). Cette dernière est obtenue par la relation :

$$r_{mem} = \frac{181.6 [1 + 0.03i + 0.062 (\frac{T_{fc}}{303})^2 i^{2.5}]}{[\zeta - 0.634 - 3i] \exp[4.18((T_{fc} - 303)/T_{fc})]} \quad (3.20)$$

ζ : est la teneur en eau de la membrane

La surtension de concentration est causée par une différence de concentration des réactifs ou des produits à la surface de l'électrode, due à la limitation de la diffusion des protons et à l'augmentation de la concentration des protons au niveau de la cathode. Elle est donnée par :

$$V_{conc} = \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (3.21)$$

i_L : Représente la densité du courant maximale.

3.3.1.2. Calcul du débit d'eau produite et celui passant par l'échangeur de chaleur :

Le rendement du système de pile à combustible est étroitement lié à la quantité de réactifs alimentant le système. Les proportions relatives de ces réactifs impliquées dans la réaction électrochimique décrite par l'équation (3.3) sont régies par l'équilibre molaire de cette dernière. Le débit molaire du H_2 est donné par [31] :

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{I \lambda_{H_2} N_{cell}}{2 \cdot F} \quad (3.22)$$

Le débit molaire de l'oxygène est :

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{I \lambda_{O_2} N_{cell}}{4 \cdot F} \quad (3.23)$$

La génération de l'eau suite à la réaction électrochimique dans la pile à combustible est à la fois bénéfique et problématique : elle doit suffire à hydrater la membrane sans saturer l'AME (Assemblage Membranaire-Électrode). Un déséquilibre entraîne une baisse de performance,

voire des dommages irréversibles en cas de d'achement. Il est supposé dans ce travail que la membrane est parfaitement hydratée [32]. L'eau produite à la cathode sert à humidifier les réactifs, comme illustré à la figure 3.1.

Le débit d'eau générée est donné par [33] :

$$\dot{m}_{H_2O, produit} = \frac{In_{cell}.MH_2O}{2.F} \quad (3.24)$$

Où MH_2O est la masse molaire de l'eau (dont la valeur est $18.018 \times 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$).

La quantité d'eau nécessaire pour humidifier complètement l'hydrogène est :

$$\dot{m}_{H_2O, in H_2} = \frac{8.937P_{H_2O}^{sat}}{P_{cell} - P_{H_2O}^{sat}} \dot{m}_{H_2} \quad (3.25)$$

Où \dot{m}_{H_2} est le débit massique d'hydrogène donné par :

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{N}_{H_2}. M_{H_2} \quad (3.26)$$

M_{H_2} la masse molaire de l'air a la valeur de $2,01610^{-3} \text{ kg/mol}$

De même la quantité d'eau injectée dans le flux d'air est :

$$\dot{m}_{H_2O, in air} = \frac{8.937P_{H_2O}^{sat}}{P_{cell} - P_{H_2O}^{sat}} \dot{m}_{air} \quad (3.27)$$

Où \dot{m}_{air} est le débit massique d'air donné par :

$$\dot{m}_{air} = \dot{N}_{air}. M_{air} \quad (3.28)$$

M_{air} Est la masse molaire de l'air a la valeur de $28.9710^{-3} \text{ kg/mol}$

3.3.2. Modèle thermique de la pile à combustible PEM :

Le fonctionnement de la pile à combustible génère de la chaleur, car l'enthalpie non convertie en énergie électrique est transformée en énergie thermique. Cela entraîne une augmentation de la température de la pile au-delà de sa plage de fonctionnement, nécessitant l'utilisation d'un système de refroidissement.

3.3.2.1 Calcul du Débit d'eau de refroidissement :

Dans ce travail, le modèle suppose que le passage de l'air réactif à travers la pile contribue au transfert de chaleur, tandis que le système de refroidissement évacue l'excédent thermique afin de maintenir une température adéquate. Lors de son fonctionnement, un empilement de piles à combustible produira la quantité de chaleur suivante [31] :

$$\dot{Q}_{total} = (E_{max} - V_{cell})In_{cell} \quad (3.29)$$

E_{max} : est la tension maximale obtenue si l'hydrogène, c'est-à-dire la valeur calorifique ou l'enthalpie de formation ont été transformées en énergie électrique, et est donnée par :

$$E_{max} = \frac{\Delta H}{n.F} = 1.48 \text{ V} \quad (3.30)$$

Où ΔH est la variation d'enthalpie.

Le transfert de chaleur entre la pile et le milieu ambiant se manifeste par les trois processus : rayonnement, convection et évaporation. Ainsi, la quantité de chaleur échangée peut-être calculer à l'aide de l'expression suivante :

$$\dot{Q}_{air,total} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv,total} + \dot{Q}_{evap} \quad (3.31)$$

La quantité de chaleur émise par rayonnement par la pile à combustible vers son environnement est donné par :

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \epsilon A_{cell} (T_{stack}^4 - T_0^4) \quad (3.32)$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ϵ est l'émissivité de la paroi ;

T_{stack} Est la température moyenne de la pile (supposée être la même que T_{cell}) et T_0 est la température ambiante de l'air, et A_{cell} est la surface du corps de l'empilement radiatif, elle est donnée par [25] :

$$A_{cell} = 0.85 \times 2A_{Ends} + 0.70 \times 1.3 A_{Sides} \quad (3.33)$$

Dans ce modèle, les termes 0.85 et 0.70 font référence au fait que 85% des deux (2) plaques d'extrémité constituent la surface efficace de rayonnement thermique et 70% de la surface environnante.

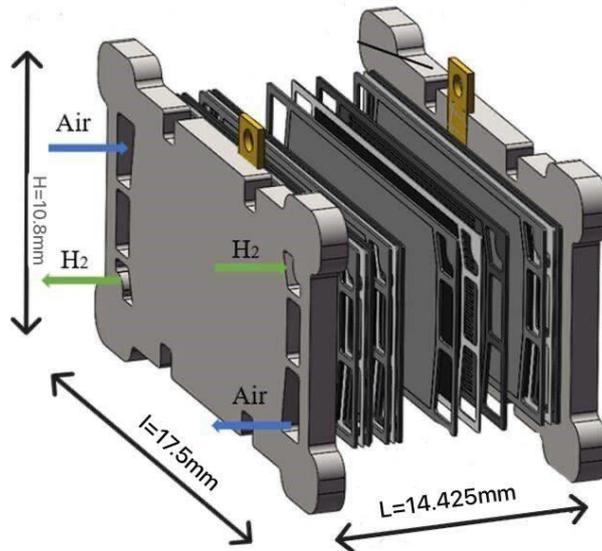


Figure 3.2 : Schéma montrant les dimensions géométriques de notre pile PEMFC

A_{Ends} Est la surface des extrémités donnée par :

$$A_{Ends} = \text{Hauteur} \times \text{Largeur} \quad (3.34)$$

A_{Sides} Est la surface des cotés donnée par :

$$A_{Sides} = 2 \times \text{Longueur} \times (\text{Hauteur} + \text{Largeur}) \quad (3.35)$$

La chaleur perdue par convection à travers les parois verticales de la cellule sont données par :

$$\dot{Q}_{conv,paroi} = 1.15 A_{Sides} h_{conv} (T_{stack} - T_0) \quad (3.36)$$

Où h_{conv} est le coefficient de transfert par convection ($W m^{-2} \text{ } ^\circ C$). Il est calculé à l'aide de l'équation (3.37) [34]. Le coefficient 1.15 comprend également la zone latérale effective de la pile basée sur la géométrie de la pile non lisse. Le coefficient de transfert de chaleur est donné par :

$$h_{conv} = \frac{K_{air} Nu}{L} \quad (3.37)$$

Où K_{air} est la conductivité thermique de l'air ($W/m \text{ } ^\circ C$) et Nu est le nombre de Nusselt sans dimension et (l) est la longueur de la pile en (cm). Le transfert de chaleur dû à la convection en haut et en bas du canal est donné par [35] :

$$\dot{Q}_{conv,haut+bas} = (h_{conv,haut} + h_{conv,bas})(T_{stack} - T_0)A_{Ends} \quad (3.38)$$

Où $h_{conv,haut}$ et $h_{conv,bas}$ sont les coefficients de transfert de chaleur de la convection du haut et du bas de la pile.

Les coefficients de transfert de chaleur par convection, $h_{conv,haut}$ et $h_{conv,bas}$ sont calculées en utilisant les corrélations correspondantes du nombre de Nusselt (Nu) selon la géométrie du système. Le nombre de Nusselt dépend également du nombre de Rayleigh (Ra) [36] :

$$Ra = \frac{g\beta(T_{stack} - T_0)Lc^3}{\mu \alpha} \quad (3.39)$$

Ra est le nombre de Rayleigh utilisé en convection naturelle pour évaluer la nature de l'écoulement.

g Est l'accélération due à la gravité (m/s^2)

μ Est la viscosité dynamique ($Pa \cdot s$ ou $kg/(m \cdot s)$)

β Est le coefficient de dilatation thermique exprimé en ($\beta = 1/T$ pour les gaz parfait) ;

α est la diffusivité thermique de l'air (m^2/s) définit par :

$$\alpha = \frac{K_{air}}{\rho_{air} Cp} \quad (3.40)$$

Les paramètres comme la conductivité thermique K_{air} le nombre de Prandtl Pr, la viscosité

cinématique μ et C_p sont obtenue à partir de la table des propriétés de l'air en considérant une température moyenne :

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_{\text{stack}} + T_{\text{O}}}{2} \quad (3.41)$$

L_c : est la longueur caractéristique de la géométrie en m qui est définie :

Pour les côtés : $L_c = \text{Hauteur}$

Pour les extrémités : $L_c = \text{Longueur}$

Le nombre de Nusselt pour les côtés est donné par :

$$\text{Nu} = \frac{0.67 \text{Ra}^{1/4}}{(1 + (0.492 / \text{Pr}^{9/16})^{4/9})} \quad (3.42)$$

$\text{Pr} = 0.7282$ est le nombre de Prandtl qui caractérise l'influence de la nature du fluide

Le nombre de Nusselt pour les extrémités est donné par :

$$\text{Nu} = 0.27 (\text{Ra})^{1/4} \quad (3.43)$$

La chaleur totale perdue par convection est alors donnée par la somme des équations (3.36) et (3.38) :

$$\dot{Q}_{\text{conv,total}} = \dot{Q}_{\text{conv,paroi}} + \dot{Q}_{\text{conv,haut+bas}} \quad (3.44)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour convertir une masse d'eau liquide en vapeur d'eau est égale au produit de la chaleur latente de vaporisation et le débit d'eau. La chaleur perdue par vaporisation est donnée par :

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = l_{\text{vap}} 0.90 \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,produit}} \quad (3.45)$$

Le « 0.90 » fait référence à la quantité d'eau produite qui est évaporée selon l'hypothèse de calcul.

Le débit d'eau en (kg s^{-1}) requise pour effectuer le transfert de chaleur vers le liquide de refroidissement est [34] :

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,refr}} = \frac{\dot{Q}_{\text{total}} - \dot{Q}_{\text{air,total}}}{C_{p\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{stack}} - T_{\text{cool,H}_2\text{O,in}})} \quad (3.46)$$

Où $C_{p\text{H}_2\text{O}}$ est la capacité thermique spécifique de l'eau à pression constante et $T_{\text{cool,H}_2\text{O,in}}$ est la température de l'eau de refroidissement à l'entrée de la pile.

3.3.2.2. Calcul de la puissance net du système :

La puissance parasite totale qui représente la puissance consommée par les systèmes auxiliaires comprenant le compresseur d'air, l'humidificateur et la pompe à eau. Elle est

donnée par [37] :

$$W_{net,parasit} = W_{cool,pump} + W_{humid,pump} + W_{comp} \quad (3.47)$$

- $W_{cool,pump}$: Est la puissance consommée par la pompe à eau [37] :

$$W_{pump,refr} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} P_{chut,liquide} \frac{S_{factor}}{\eta_{pump} \cdot \eta_{motor}} \quad (3.48)$$

- $W_{humid,pump}$ Est la puissance consommée par la pompe d'humidification, elle est donnée par :

$$W_{humid,pump} = \frac{\dot{m}_{H_2O,produit}}{\rho_{H_2O}} P_{chute,humid} \frac{S_{factor}}{\eta_{pump} \cdot \eta_{motor}} \quad (3.49)$$

- W_{comp} Est la puissance consommée par le compresseur, elle est donnée par :

$$W_{comp} = C_{p,air} \cdot \dot{m}_{air} \cdot \frac{T_{air,in}}{\eta_{comp}} \left(\left(\frac{P_{cell}}{P_{air,atm}} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right) \quad (3.50)$$

$\dot{m}_{H_2O,refr}$: Représente le débit d'eau de refroidissement calculé précédemment dans l'équation (3.46).

$\dot{m}_{H_2O,produit}$: est la masse d'eau produite calculée dans l'équation (3.24)

La puissance brute de l'empilement est donnée par :

$$W_{brute,stack} = I \cdot V_{cell} \cdot n_{cell} \quad (3.51)$$

La puissance nette de sortie du système est la différence entre la puissance brute de l'empilement et de la puissance parasite totale :

$$W_{net,system} = W_{brute,pile} - W_{net,parasite} \quad (3.52)$$

3.3.3. Calcul du rendement électrique et thermique de la pile :

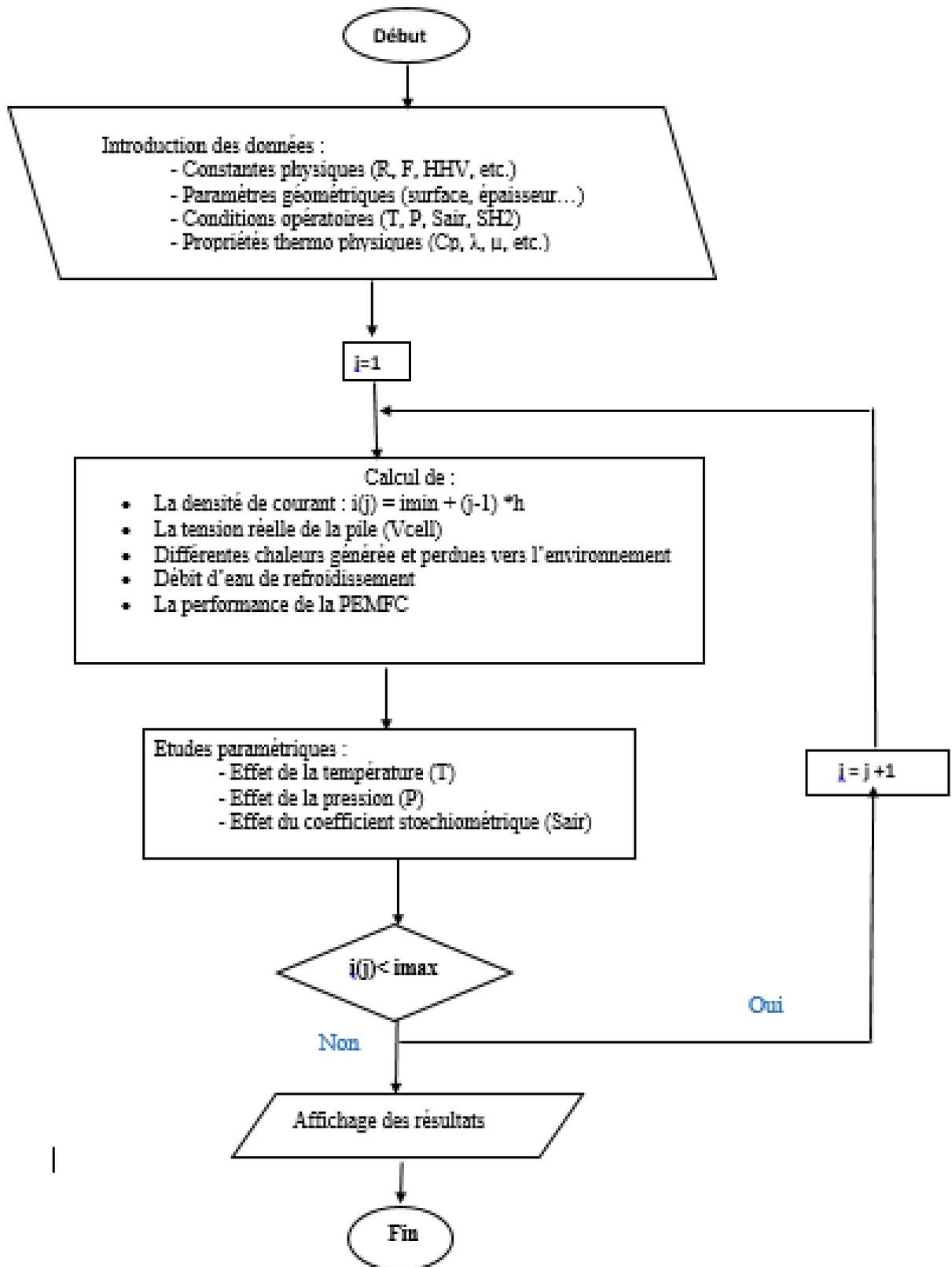
Le rendement électrique représente la proportion d'énergie chimique contenue dans l'hydrogène qui est convertie en énergie électrique par la pile et il est donné par :

$$\eta_{elect} = \frac{1}{\lambda_{H_2}} \left(\frac{V_{cell}}{E_{max}} \right) \quad (3.53)$$

Le rendement thermique représente la part de l'énergie chimique non convertie en électricité, mais générée sous forme de chaleur ; elle est donnée par :

$$\eta_{therm} = \frac{1}{\lambda_{H_2}} \left(1 - \frac{V_{cell}}{E_{max}} \right) \quad (3.54)$$

3.4. Organigramme de calcul



3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique représentant les phénomènes électrochimiques, thermiques et énergétiques d'un système PEMFC. Cette modélisation constitue une base solide pour simuler le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Chapitre 4 :

Résultats et interprétations

4.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'analyse des performances du système à partir de la simulation du modèle mathématique introduit dans le précédent chapitre. Par la suite, on s'intéresse à l'étude de la variation de la température, la pression et le coefficient stœchiométrique de l'air afin d'étudier leurs influences sur les performances du système PEMFC.

4.2. Conditions de simulation :

Le tableau ci-dessous contient les paramètres de base utilisés pour la simulation de notre système PEMFC

Tableau 4-1 : Paramètres de base pour la simulation de la pile PEMFC

Symbole	Paramètre	Valeur
Ne	Nombre d'électrons	2
F	Constante de Faraday	96,485 C mol ⁻¹
R	Constante universel des gaz parfait	8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹
T _{amb}	Température ambiante	298.15 K
P _{amb}	Pression ambiante	1 bar
N _{cell}	Nombre de cellules dans la pile	25
A _{cell}	Surface active	96 cm ²
i _L	Densité du courant maximale	1 A cm ⁻²
L _e	Épaisseur de la membrane	0.00254 cm
P	Pression de fonctionnement de la pile PEMFC	3 bars
T _{stk}	Température de fonctionnement de la pile PEMFC	318.15 K
S _{air}	Coefficient stœchiométrique à la cathode	1.8
S _{H2}	Coefficient stœchiométrique à l'anode	1.1
l _{vap}	Chaleur latente de vaporisation	2257 j.kg ⁻¹
η _{pump}	Efficacité ou le rendement de la pompe	0.6
η _{motor}	L'efficacité ou le rendement du moteur	0.8
P _{drop,coolant}	Perte de pression de l'eau de refroidissement à travers la boucle	10 ⁴ Pa
P _{drop,humid}	Perte de pression dans l'humidificateur	10 ⁵ Pa
ρ _{H2O}	La densité de l'eau	998 Kg /m
HHV	Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène	285812 J mol ⁻¹
S _{factor}	Facteur de sécurité	1.15

4.3. Comportement électrique et thermique de la pile :

Les figures (4.1) et (4.2) montrent respectivement la variation de la tension d'une cellule unique et de l'ensemble des cellules en fonction de la densité de courant. On peut diviser les courbes en trois zones : Une zone où les résistances d'activation prédominent, avec des courants faibles allant de 0 à 0.2 A/cm². Un intervalle pour des courants intermédiaires de 0,2 à 0.8 A/cm² où la résistance ohmique prédomine. Cette situation est attribuée à l'opposition rencontrée par le flux d'ions dans l'électrolyte et à la résistance rencontrée par les électrons dans les électrodes. Pour des densités de courant élevées (de 0.8 à 1 A/cm²), la résistance au déplacement des réactifs prédomine.

La figure 4.1 permet d'identifier la zone de fonctionnement idéale pour la cellule, souvent située dans la zone où la tension diminue lentement, avant les pertes importantes.

La figure 4.2 permet de visualiser l'effet de la densité du courant sur le comportement global de la pile : à partir d'un certain seuil de densité, la pile devient moins efficace. Ces courbes de la tension soulignent l'importance de trouver un équilibre entre la puissance fournie et l'efficacité du système.

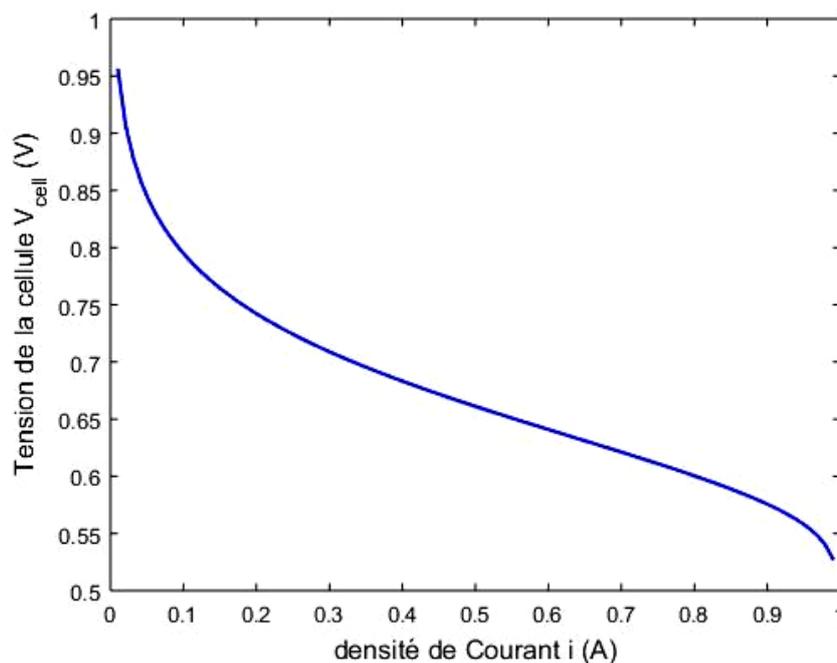


Figure 4.1 : Variation de la tension de la cellule en fonction de la densité de courant.

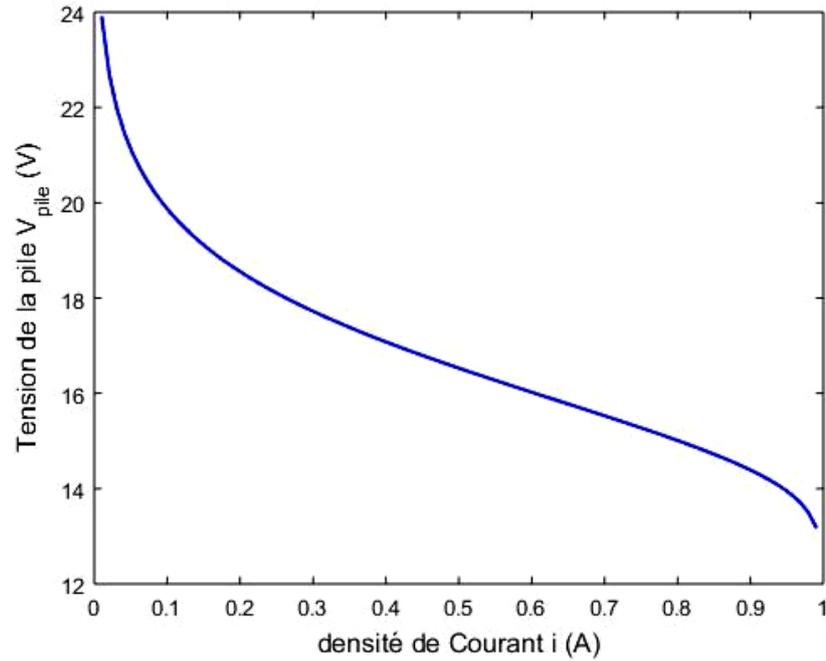


Figure 4.2 : Variation de la tension de la pile en fonction de la densité de courant.

Les deux figures (figure 4.3 et figure 4.4) illustrent l'évolution de la tension d'une cellule ainsi que la puissance de sortie d'une cellule et d'une pile en fonction de la densité de courant. On constate que, la tension décroît avec l'augmentation de la densité de courant à cause des des surtensions ; quant à la puissance, elle augmente d'abord, atteignant un maximum entre 0.8-1 (A/cm^2) puis elle diminue. Cette diminution est due à la forte baisse de tension qui ne compense plus l'augmentation du courant. La puissance maximale est de 30W pour le cas d'une seule cellule, alors qu'elle est de 866W pour le cas de l'empilement.

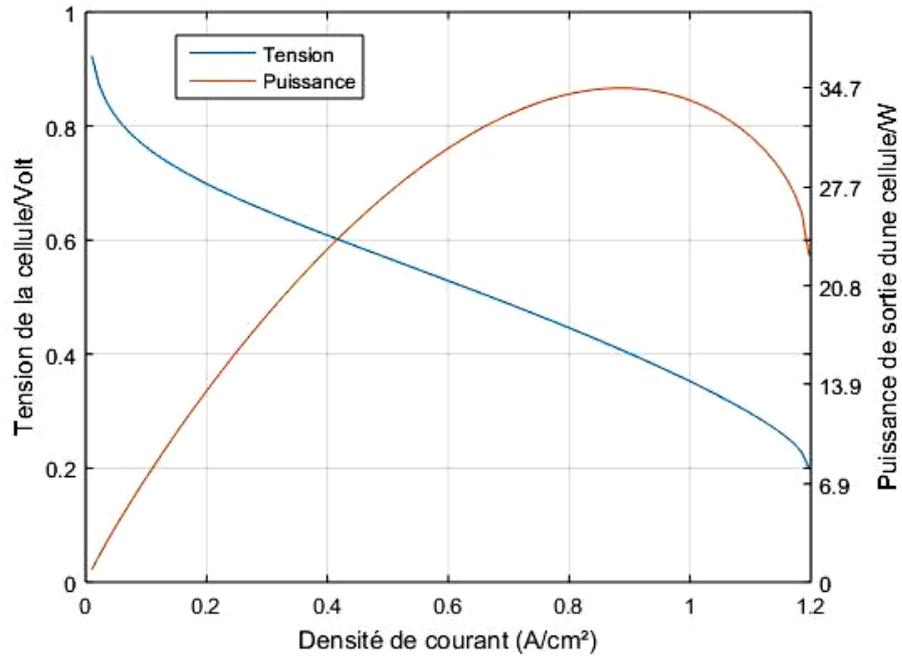


Figure 4.3 Variation de la tension et de la puissance d'une cellule en fonction de la densité de courant

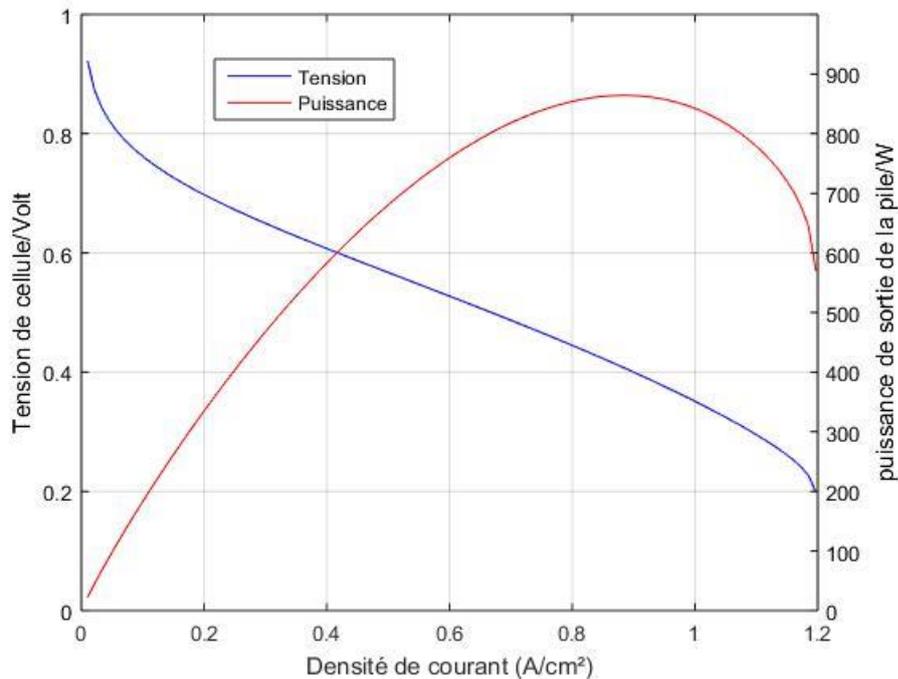


Figure 4.4 Variation de la tension et de la puissance de la pile en fonction de la densité de courant

La figure (4.5) montre la variation de la chaleur générée la PEMFC et celle évacuée vers le milieu ambiant en fonction de la densité de courant, ainsi que la puissance électrique brute de la PEMFC. Il est à remarquer que la puissance brute produite augmente avec la densité de

courant jusqu'à atteindre un maximum au niveau de 0.8 A/cm². Au-delà de cette valeur, la puissance diminue. La chaleur totale générée par la pile augmente progressivement au début, puis de manière de plus en plus rapide, elle devient très importante à des densités de courant élevées. Cette évolution montre que la pile génère des pertes thermiques importantes durant son fonctionnement. La chaleur évacuée dans l'air, quant à elle, augmente mais reste toujours inférieure à la chaleur totale produite : cela indique que seule une partie de l'énergie thermique est dissipée, ce qui nécessite un mécanisme de refroidissement afin de maintenir une température de fonctionnement adéquate.

La figure (4.6) montre que le débit d'eau de refroidissement augmente de façon non linéaire avec l'augmentation de la densité de courant. A faible densité de courant (< 0.5 A/cm²), l'augmentation est relativement faible tandis que, pour de hautes densités de courant (> 1 A/cm²), l'augmentation devient encore plus significative et le débit d'eau atteint 0.041 kg/s pour une densité de courant de 1.5 A/cm². Ceci s'explique par l'augmentation de la chaleur générée dans la pile. Plus la pile produit d'électricité (courant élevé), plus elle génère de la chaleur qui doit être évacuée par le circuit de refroidissement.

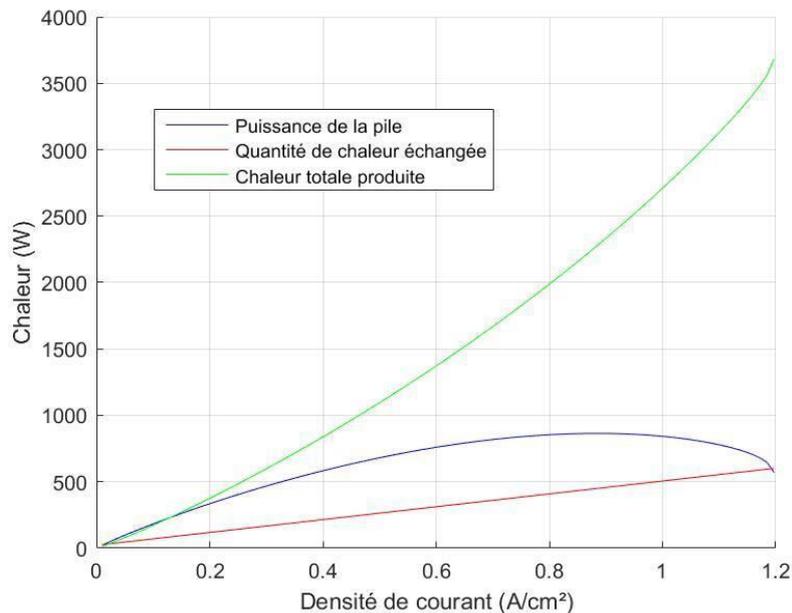


Figure 4.5 : Variation des puissances électrique et thermique en fonction de la densité du courant

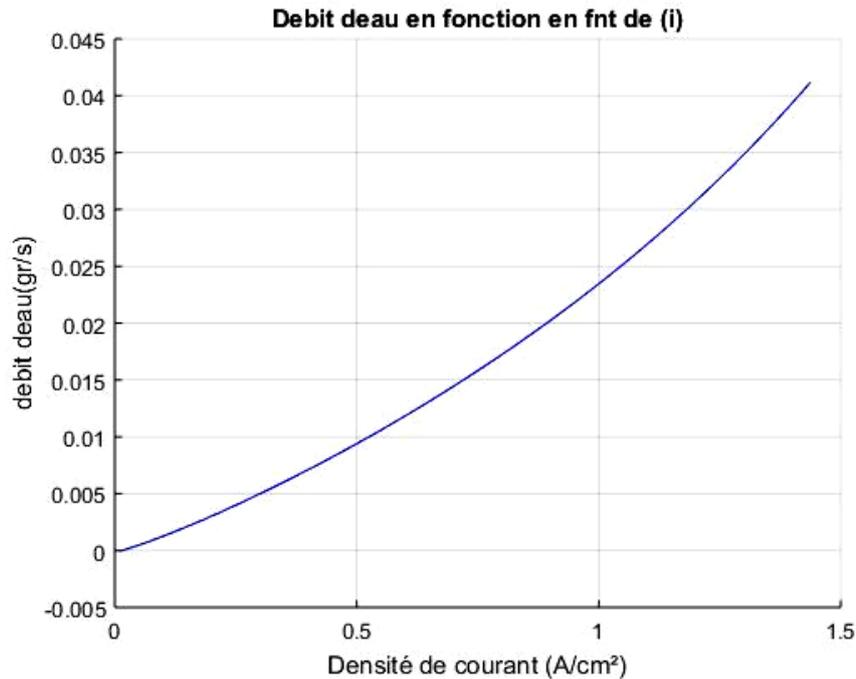


Figure 4.6 : Variation du débit d'eau de refroidissement en fonction de la densité

4.4. Analyse des performances globales du système :

La figure (4.7) montre les évolutions de la puissance brute, la puissance consommée par les auxiliaires ainsi que la puissance générée par le système PEMFC en fonction de la densité du courant. On constate que, la puissance brute du système augmente aussi jusqu'à un maximum de 870W pour une densité située entre 0.8 et 0.9 A/cm², puis elle diminue à densités de courant élevée ; ceci est dû à l'augmentation des surtensions ohmiques et de concentration. Il est à noter aussi que, la puissance consommée par les accessoires du système PEMFC augmente de manière linéaire avec la densité de courant, elle atteint la valeur de 380W à une densité de courant de 1.2 A/cm². Tandis que, la puissance nette augmente avec la densité de courant, atteignant un maximum de 600W à une densité de courant de 0.8 A/cm². Au-delà de cette valeur la puissance diminue, ceci est dû l'augmentation de la consommation des auxiliaires. Il est également à remarquer que la puissance parasite représente une part importante de la puissance totale, surtout à haute densité de courant, soulignant l'importance d'optimiser les auxiliaires dans la conception des systèmes de PEMFC.

A partir des figures (4.8) et (4.9) indiquant l'évolution des puissances consommées par les axillaires, il est clair que le compresseur d'air représente le principal consommateur d'énergie parmi les systèmes auxiliaires, ce qui en fait la cible prioritaire pour les efforts d'optimisation énergétique des systèmes PEMFC.

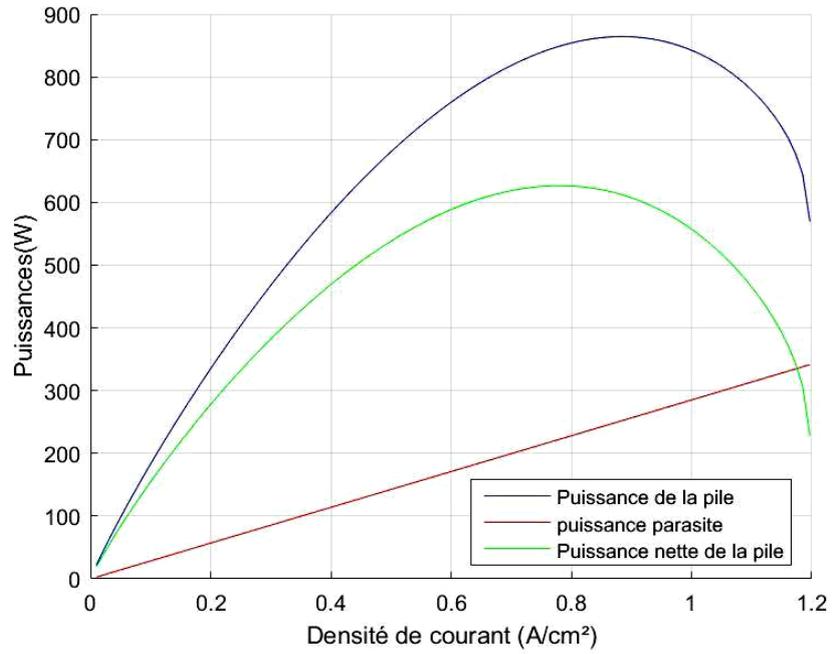


Figure 4.7 : Variation des puissances nettes, brute et parasite

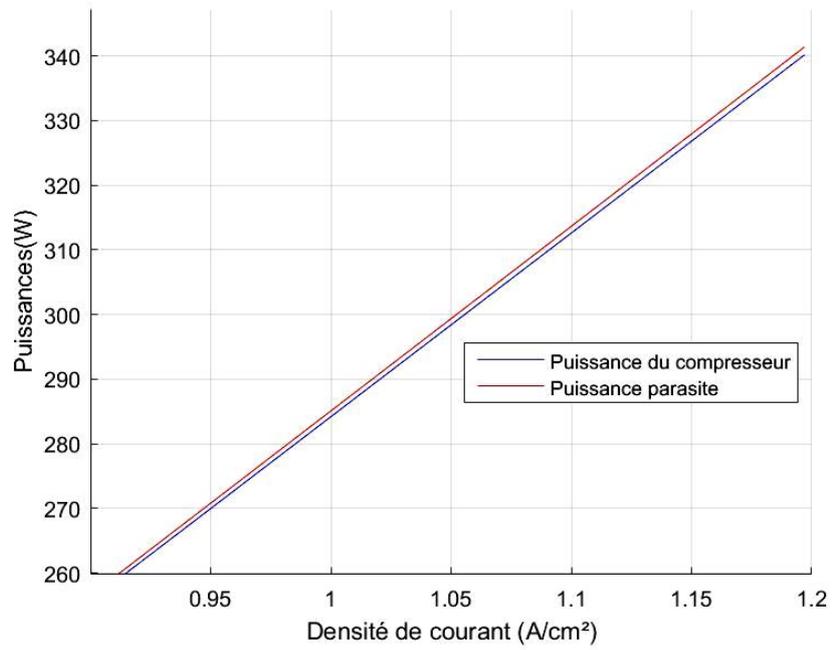


Figure 4.8 : Variation des puissances parasites et celle du compresseur en fonction de la densité de courant.

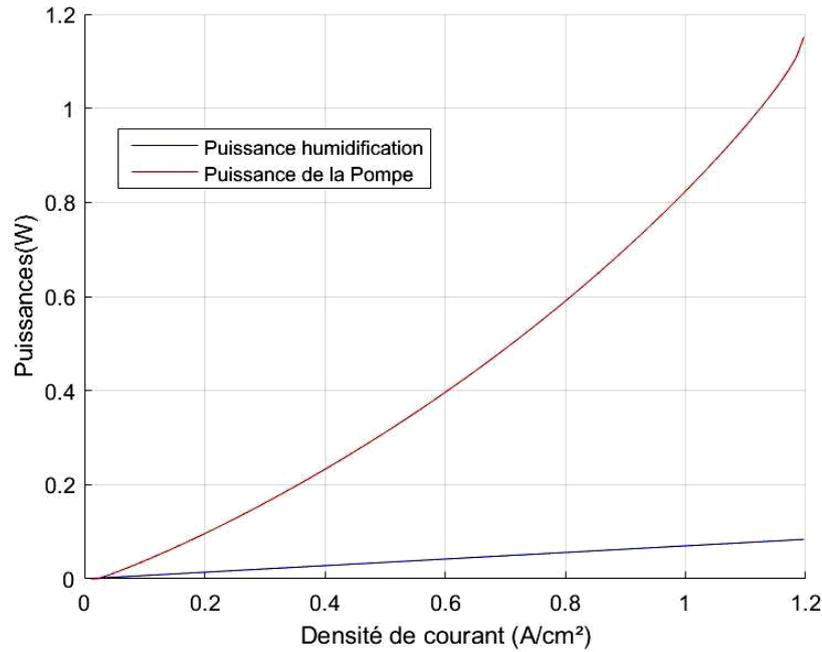


Figure 4.9 : Variation des puissances consommées par : la pompe à eau et celle d'humidification

La figure (4.10) illustre les différents rendements de la pile notamment le rendement électrique qui diminue progressivement avec l'augmentation de la densité de courant, passant d'une valeur de 55% à faible courant à seulement 15% pour une densité de courant de 1.2 A/cm². Ceci peut être expliqué par l'augmentation des pertes électrochimiques (activation, ohmiques et concentration). Quant au rendement thermique, il augmente avec la densité de courant et passe de 35% à faible densité de courant à 80% pour une densité de courant de 1.2 A/cm². Ceci montre que l'évolution du rendement thermique est complémentaire à celle du rendement électrique, puisque l'énergie non convertie en électricité est principalement dissipée sous forme de chaleur.

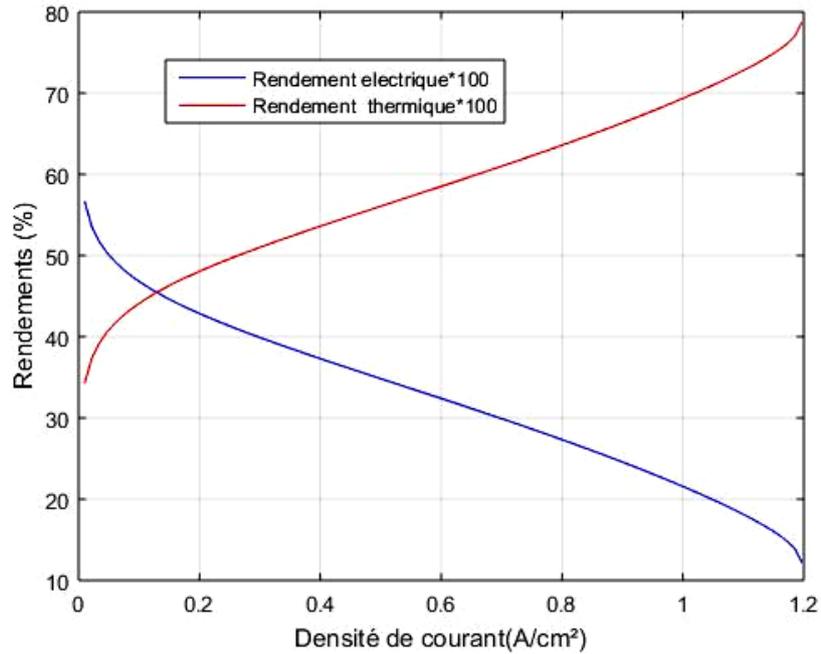


Figure 4.10 : Variation des rendements électrique et thermique de la pile en fonction de la densité du courant.

4.5. Etude paramétrique du système :

Dans cette partie, nous nous intéresserons à l'analyse de l'influence des principaux paramètres de fonctionnement en les faisant varier simultanément tout en maintenant les autres conditions de fonctionnement identiques à celles du cas de base présenté précédemment dans le tableau (4.1). Il s'agit de la température et la pression de fonctionnement de la pile, ainsi que le coefficient stœchiométrique de l'air.

Les différentes valeurs prises par ces paramètres sont présentées dans le tableau ci-dessous

Tableau4.2 : Les différents paramètres étudiés et leurs valeurs

Symboles	Paramètres	Valeur
T_{fc}	Température de fonctionnement	45°C
		60°C
		80°C
P	Pression de fonctionnement	3 atm
		1 atm
		2 atm
S_{air}	Coefficient stœchiométrique de l'air	1.8
		2.2
		2.5

4.5.1. Effet de la température de fonctionnement

Les figures (4.11 à 4.14) montrent respectivement la variation de la tension de la pile, la puissance consommée par les accessoires, la puissance brute et la puissance nette du système. La figure (4.11) montre qu'une augmentation de température entraîne une augmentation significative de la tension de la pile indiquant ainsi, une meilleure efficacité électrochimique à des températures élevées. La puissance des parasites dépend légèrement de la température de fonctionnement du système comme le montre la figure (4.12). La figure (4.13) montre une augmentation de la puissance brute lorsque la température de fonctionnement augmente car les pertes électrochimiques (Ohmique, activation) sont réduites à haute température. Similairement à la puissance brute, la puissance nette représentée sur la figure (4.14) augmente au fur et à mesure que la température augmente à cause de l'invariance de la puissance parasite lorsque la température augmente.

La figure (4.15) montre que le débit d'eau de refroidissement diminue considérablement lorsque la température de fonctionnement de la pile augmente. Pour une basse température de fonctionnement, le système nécessite un débit d'eau important pour maintenir cette température, car la chaleur générée est plus importante. La figure (4.16) indique que la chaleur perdue est plus importante lorsque la température augmente. Ceci est dû au fait que l'écart de température entre les parois de la pile et l'air ambiant devient plus important. De la figure (4.17) il apparaît qu'à température élevée, la pile génère très légèrement moins de chaleur s'expliquant par le fait que lorsque la pile fonctionne à forte densité de courant et à basse température, une plus grande proportion de l'énergie est convertie en chaleur plutôt qu'en électricité.

D'après ces différents résultats, il est à noter que le fonctionnement sous une température de 80°C présente plusieurs avantages, notamment une meilleure performance électrique (tension plus élevée), une puissance brute et nette plus importantes et un besoin réduit en refroidissement. La tendance des courbes de puissance montre qu'il existe une densité de courant optimale (entre 0.8 et 1.0 A/cm²) qui maximise la puissance nette du système, particulièrement à haute température. Par contre, si la pile fonctionne à haute température, elle génère moins de chaleur pour de haute densité de courant mais en perd davantage plus de chaleur vers le milieu ambiant, ce qui pourrait affecter l'efficacité globale du système.

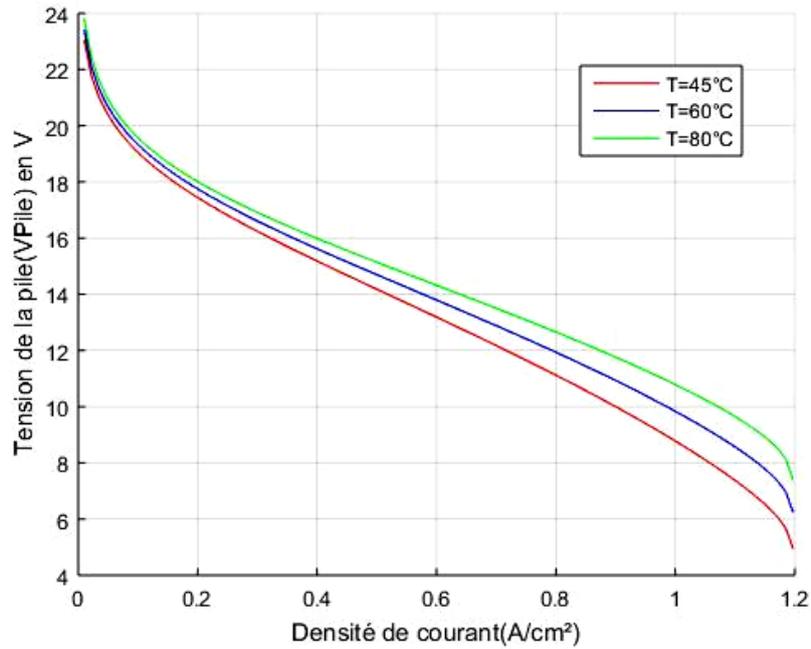


Figure 4.11 : Variation de la tension de la pile à différentes températures de fonctionnement.

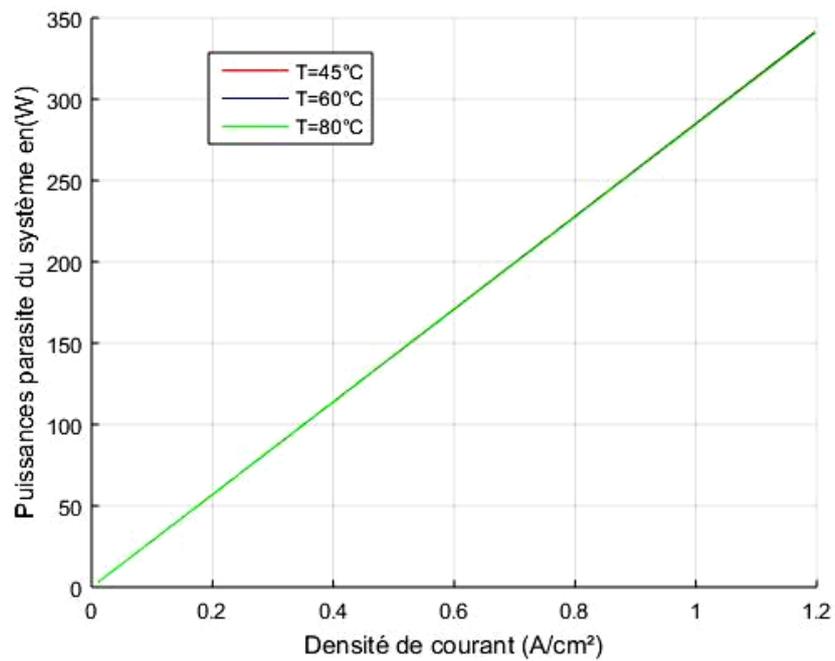


Figure 4.12 : Variation de la puissance parasite du système à différentes températures de fonctionnement.

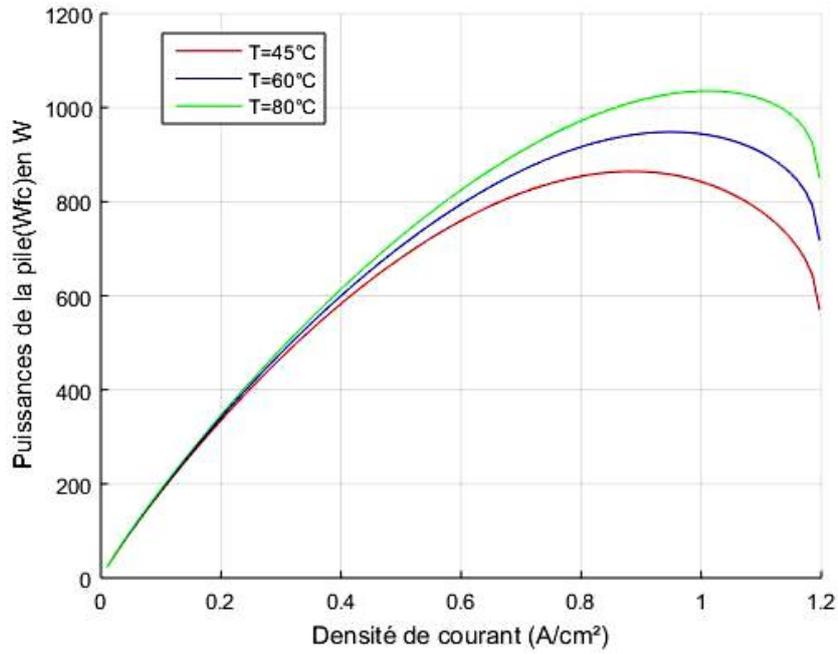


Figure 4.13 : Variation de la puissance brute de la pile à différentes températures de fonctionnement.

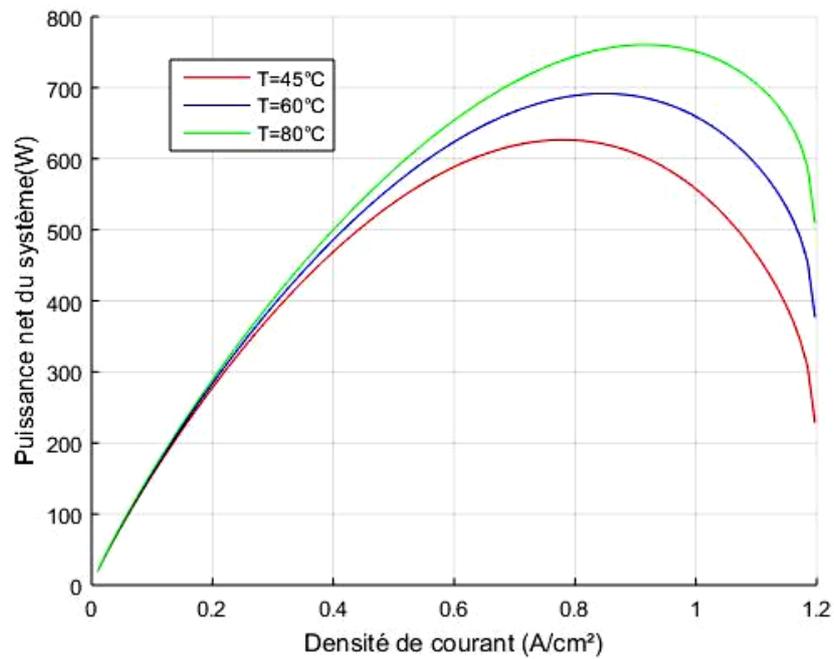


Figure 4.14 : Variation de la puissance nette du système à différentes températures de fonctionnement.

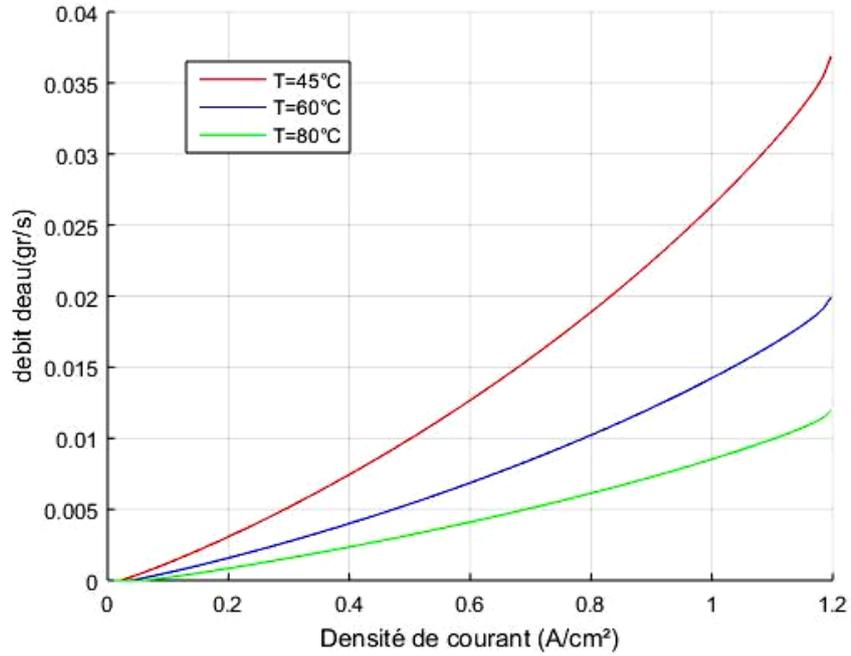


Figure 4.15 : Variation du débit d'eau de refroidissement à différentes températures de fonctionnement.

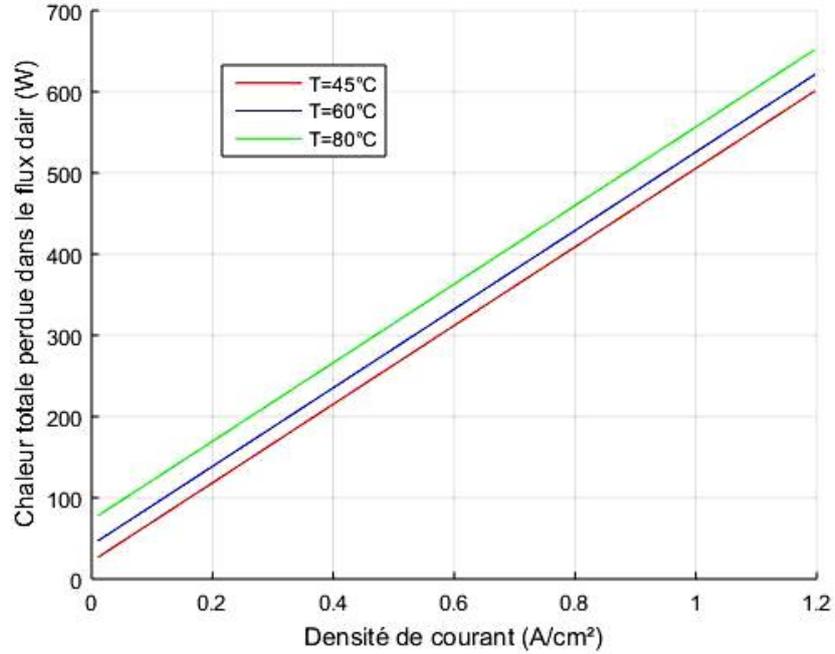


Figure 4.16 : Variation de la chaleur totale perdue à différentes températures de fonctionnement.

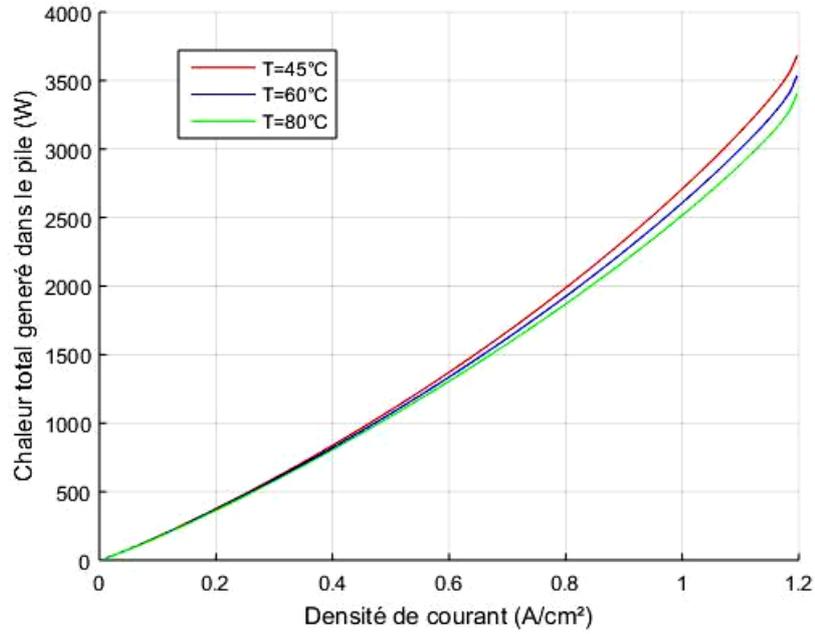


Figure 4.17 : Variation de la chaleur totale générée à différentes températures de fonctionnement.

4.5.2. Effet de la Pression de fonctionnement :

Sur la figure (4.18) il ressort que plus la pression diminue plus la tension tend vers des valeurs plus faibles. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de la pression entraîne une augmentation de la concentration des réactifs.

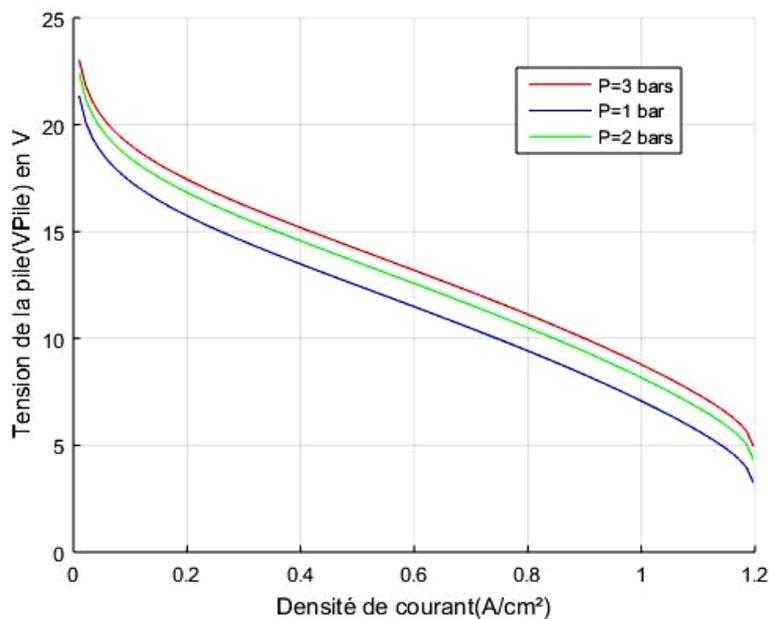


Figure 4.18 : Variation de la tension de la pile à différentes pressions de fonctionnement.

Les figures (4.19 à 4.21) montrent respectivement la variation des puissances parasites, brute et nette du système. Il est à remarquer de la figure (4.19), que la diminution de la pression de fonctionnement entraîne une diminution de la consommation auxiliaires ; ce qui est principalement dû à la diminution de la consommation du compresseur d'air qui représente la consommation majoritaire.

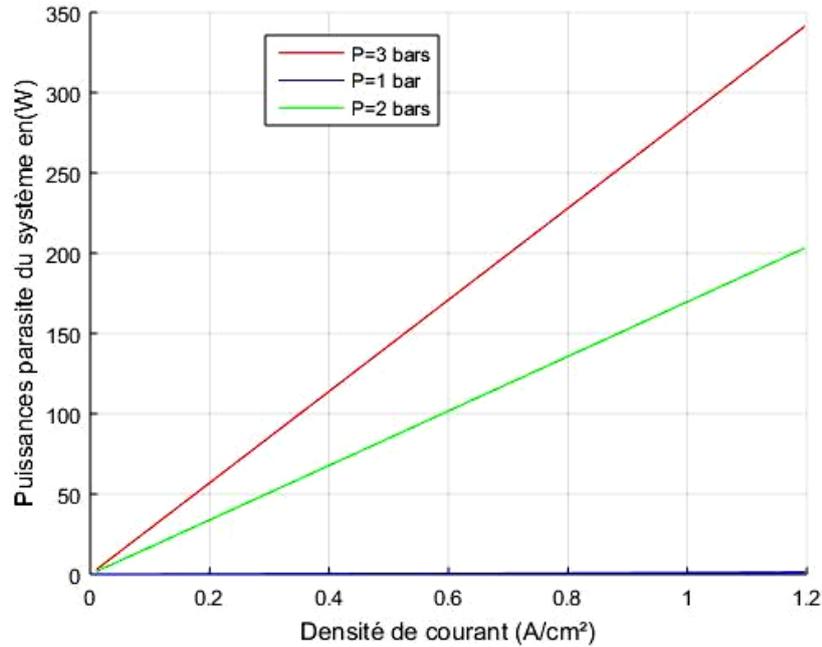


Figure 4.19 : Variation de la puissance parasite du système à différentes pressions de fonctionnement.

Il ressort clairement de la figure (4.20) que la puissance brute de la pile diminue au fur et à mesure que la pression de fonctionnement diminue. D'autre part, il est constaté que la puissance nette du système subit une diminution à mesure que la pression de fonctionnement augmente. Cette diminution est due au fait que la consommation des auxiliaires demeure de plus en plus importante à des pressions élevées.

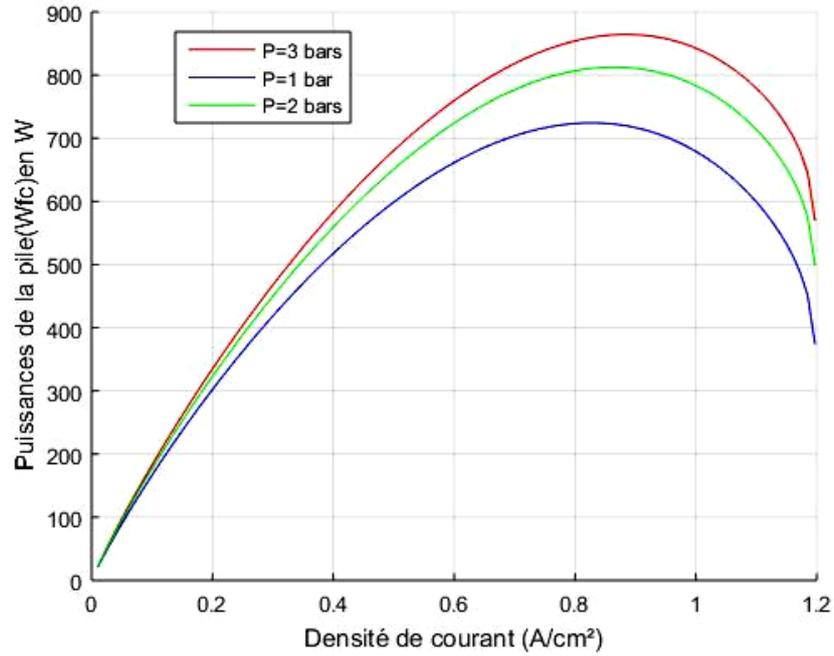


Figure 4.20 : Variation de la puissance brute du système à différentes pressions de fonctionnement.

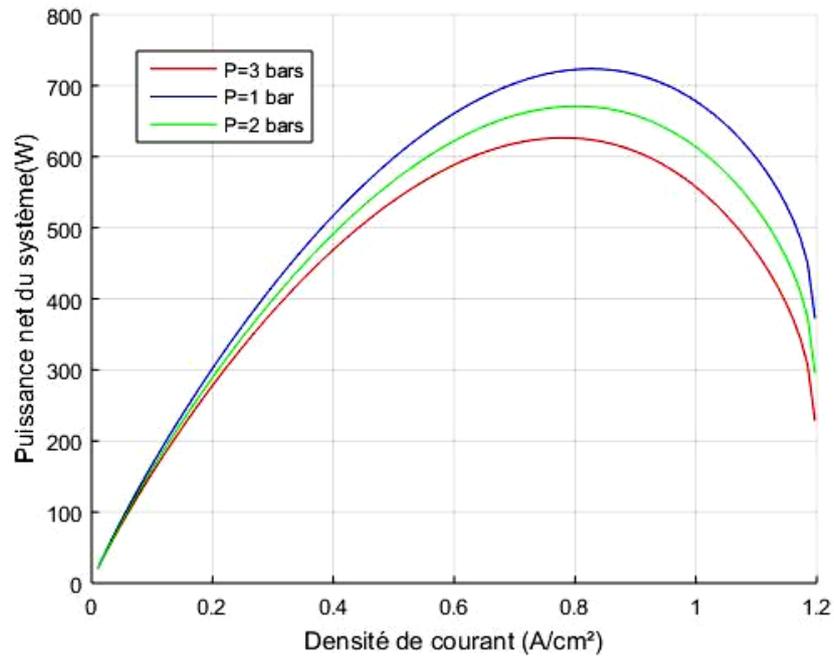


Figure 4.21 : Variation de la puissance nette du système à différentes pressions de fonctionnement.

La figure (4.22) montre que le débit d'eau de refroidissement augmente légèrement lorsque la pression diminue, de ce fait, il est clair que la pression de

fonctionnement à une faible influence sur le débit d'eau de refroidissement.

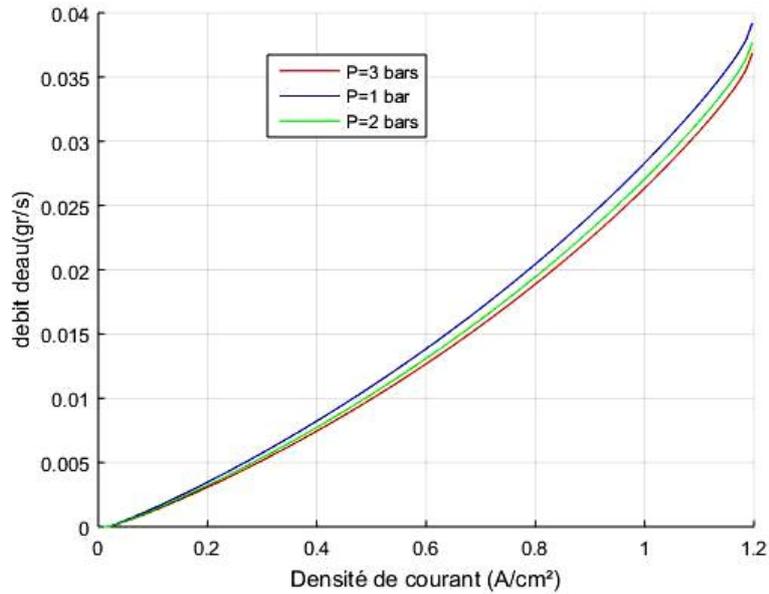


Figure 4.22 : Variation du débit d'eau de refroidissement à différentes pressions de fonctionnement.

Sur la figure (4.23) montrant l'évolution de la chaleur totale générée par la pile, il ressort clairement que la chaleur produite augmente lorsque la pression diminue. Cela signifie qu'une pression élevée permet d'améliorer l'efficacité de la pile et diminuer les pertes énergétiques transformées en chaleur.

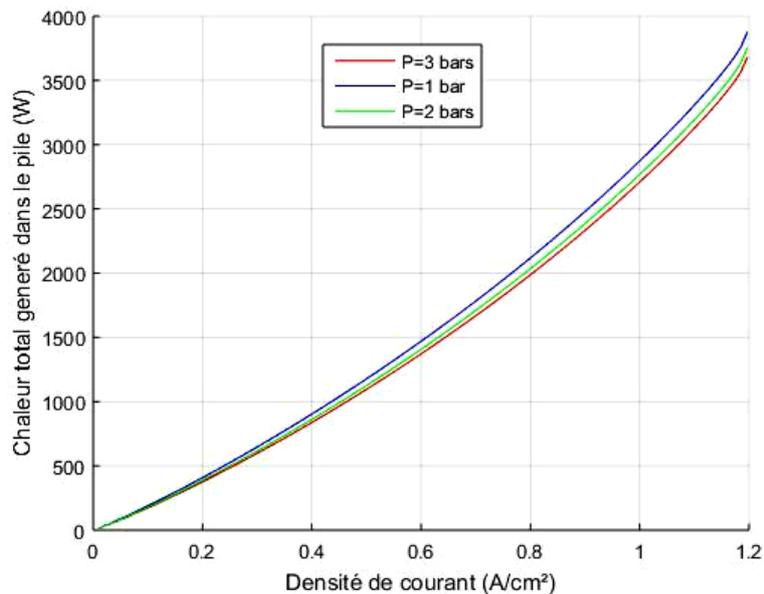


Figure 4.23 : Variation de la chaleur totale générée dans la pile à différentes pressions de fonctionnement.

4.5.3. Effet du coefficient stœchiométrique de l'air (S_{air}) :

Les figures (4.24 à 4.26), montrent respectivement la variation de la puissance consommée par les auxiliaires, la puissance brute et nette du système. La tendance des courbes de la figure (4.24) montre que la puissance des parasites est plus importante pour des débits importants (coefficient stœchiométrique de l'air) car lorsqu'on introduit plus d'air dans le système, il nécessite une consommation d'énergie plus importante par le compresseur et les systèmes auxiliaires.

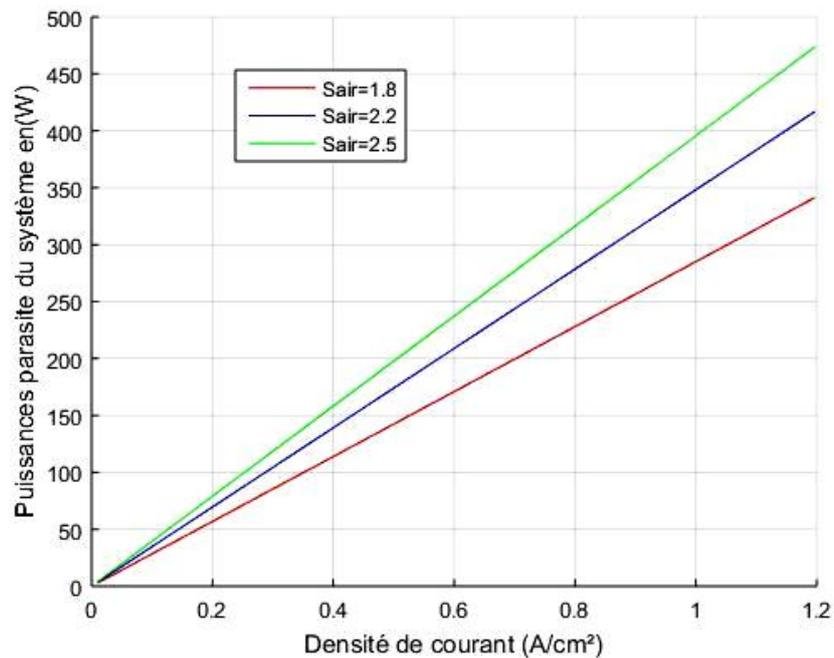


Figure 4.24 : Variation de la puissance parasite du système à différents stœchiométries.

De la figure (4.25), il est à noter que la puissance brute du système ne varie pratiquement pas avec l'augmentation du débit. Ceci permet de conclure le débit d'air à une influence minimale sur la production d'électricité par la pile. Par ailleurs, il est à noter que la puissance nette du système diminue lorsque le débit d'air augmente (voir figure 4.26).

En conclusion un coefficient stœchiométrique d'air plus faible permet d'obtenir une meilleure performance nette du système, car il minimise les consommations parasites en maintenant une production d'électricité assez similaire.

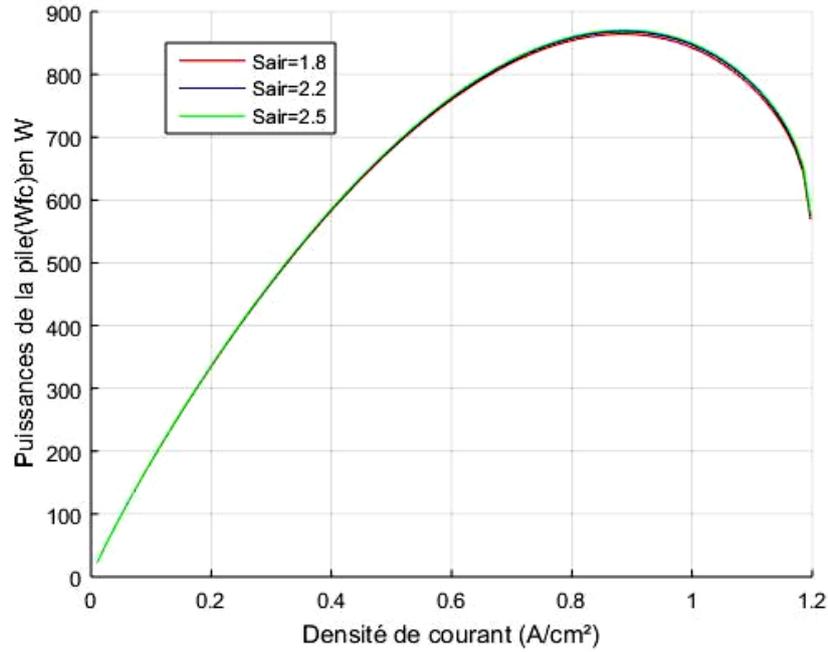


Figure 4.25 : Variation de la puissance brute de la pile à différents stœchiométries

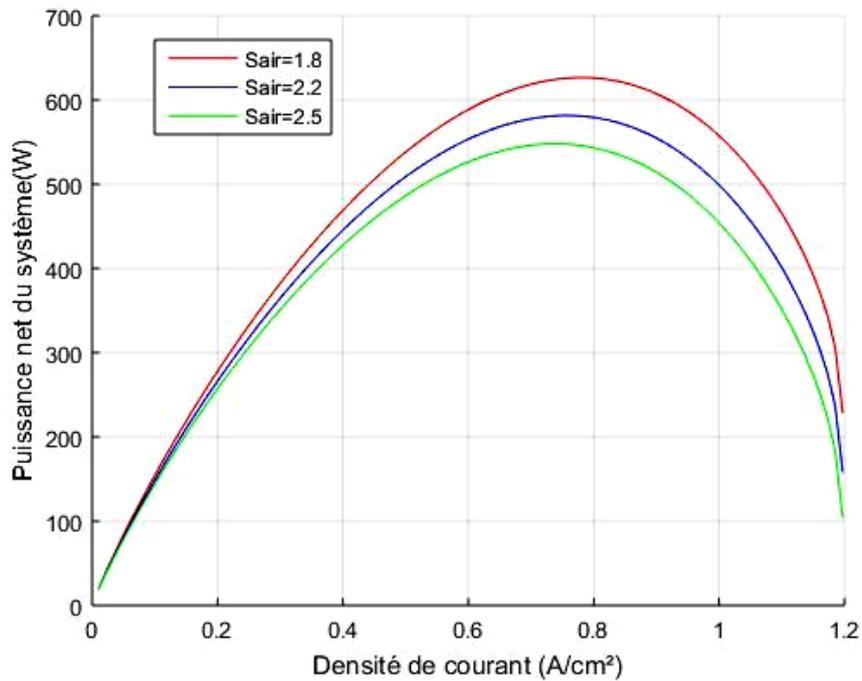


Figure 4.26 : Variation de la puissance nette du système à différentes stœchiométries

4.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les performances électriques et thermiques d'une pile à combustible PEMFC à travers une analyse détaillée basée sur la simulation de son modèle mathématique. Les résultats ont montré l'influence de la densité de courant sur la tension, la

puissance et la chaleur produite par la pile. Il a également été démontré que la température, la pression et le débit d'air introduit (coefficient stœchiométrique), ont un impact important sur l'efficacité du système. La température influence la production d'électricité tandis que la pression influence davantage la consommation des auxiliaires plus que la puissance brute de la pile. Enfin, un coefficient stœchiométrique adéquat permet de minimiser la consommation des auxiliaires sans affecter significativement la puissance brute.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons mené une étude du comportement électrique et thermique d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Grâce à la modélisation mathématique, aux simulations numériques sous Matlab nous avons pu analyser l'impact des divers paramètres de fonctionnement sur les performances du système.

Ainsi, les résultats obtenus montrent clairement que la température, la pression de fonctionnement et le coefficient stœchiométrique de l'air influencent significativement sur la puissance produite, les différents rendements, et la gestion thermique du système. Nous avons notamment constaté qu'une température plus élevée permettait d'améliorer les performances électriques tout en réduisant les besoins en refroidissement. Tandis qu'une pression de fonctionnement modérée et un ajustement du débit d'air permettent d'optimiser la puissance nette du système en limitant les pertes dues aux auxiliaires.

Ces résultats montrent également que la puissance nette maximale est atteinte à des densités de courant spécifiques (0.8-0.9 A/cm²). Cela souligne l'importance d'une gestion efficace de l'énergie dans le système.

Ce mémoire a ainsi permis de mettre en évidence les points essentiels et les limites du système PEMFC. Il en ressort que, bien que cette technologie soit très prometteuse pour des applications variées (transport, production d'électricité, etc.), son efficacité dépend fortement de la maîtrise de son fonctionnement interne ainsi que des conditions extérieures.

Pour aller plus loin, des pistes d'amélioration peuvent être explorées, notamment en ce qui concerne la gestion thermique, la réduction de la consommation des auxiliaires (notamment le compresseur), la récupération et l'utilisation de la chaleur dissipée ou encore l'intégration de nouvelles technologies hybrides. Ces efforts contribueront à rendre les piles à combustible plus performantes, plus fiables et mieux adaptées aux besoins énergétiques futurs.

Références:

1. MOHAMLMEDEI Abdallah « Influence de la Configuration des Mini-Canaux sur la Consommation des Combustibles dans une PEMFCs » thèse de doctorat, université de Batna2 2020.
2. Frano barber “PEM Fuel Cells: Theory and Practice” Elsevier 2005 ISBN: 978-012 387710-9
3. G. Wang, Z. Dong, P. Aitchison, Adaptive response surface method a global optimization method scheme for approximation-based design problems, *J. Eng. Optimizat.* 33 (6) (2001) 707–734.
4. A. Mawardi, F. Yang, R. Pitchumani, “Optimization of the operating parameters of a proton exchange membrane fuel cell for maximum power density”, *J. Fuel Cell Sci. Technol.* 2 (2) (2005) 121 135.
5. Forde T, Eriksen J, Pettersen AG, Vie PJS, Ulleberg O. “Thermal integration of a metal hydride storage unit and a PEM fuel cell stack”. *Int J Hydrogen Energy* 2009;34:6730e9.
6. Sylvain Chupin. « Comportement local et performances électriques d’une pile à combustible à membrane : vers un outil de diagnostic ». Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. Français. NNT: 2009INPL098N. tel-01748745
7. Hwang JJ, Zou ML, Chang WR, Su A, Weng FB, Wu W. “Implementation of a heat recovery unit in a proton exchange membrane fuel cell system”. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35: 8644e53.
8. Guo, Y., Guo, X., Zhang, H., and Hou, S. (2020). “Energetic, exergetic and ecological analyses of a high-temperature proton exchange membrane fuel cell based on a phosphoric-acid-doped polybenzimidazole membrane.” *Sustain. Energy Technol. Assessments* 38, 100671. doi: 10.1016/j.seta.2020.100671
9. Chen JC, Zhang XQ, Chen XH, Lin BH. “Maximum equivalent efficiency and power output of a PEM fuel cell refrigeration cycle hybrid system”. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:2190e6.
10. Guo C, Lu J, Tian Z, et al. “Optimization of critical parameters of PEM fuel cell using TLBO-DE based on Elman neural network”. *Energ Conver Manage* 2019;183: 149–58.
11. BENRAYA Yamina/ « Etude et modélisation d’une pile à combustible/Énergie et environnement. » Ecole supérieur en sciences appliquées, Tlemcen.
12. Z Zhou, D Qiu, S Zhai, et al. “Investigation of the assembly for high-power proton exchange membrane fuel cell stacks through an efficient equivalent model. *Applied*

- Energy”, 2020, 277: 115532. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115532>
13. Q. Zhang, X. Liu, et al., “Effect of ambient conditions on PEMFC performance: A numerical investigation”, *Renewable Energy*, vol. 174, pp. 1078–1087, 2021 : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.044>
 14. Y. Zou, Y. Wang, X. Liu, et al., “Thermal–electrical coupled modeling and dynamic performance of a PEM fuel cell system considering degradation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 13, pp. 7770–7783, 2022: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.076>
 15. Kim, D. H. Lee, et al., “Passive thermal management strategies for portable PEMFC systems”, *Journal of Power Sources*, vol. 543, 2022. [En ligne] :<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231764>
 16. M. R. Alavi, A. A. Akhlaghi, et al., “Energy management of a PEMFC–Li-ion hybrid system in electric vehicles using model predictive control”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 1, pp. 167–178, 2023. [En ligne] : <https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3212879>
 17. H. Gharibi, M. R. Alavi, et al., “AI-based optimization of PEMFC operating parameters using multi-objective algorithms”, *Applied Energy*, vol. 330, 2023 : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120258>
 18. Jean-François Fauvarque « Les piles à combustible et leurs applications », *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, Elsevier, July–August 2001.
 19. Xiao-Zi Yuan (2008). “PEM Fuel Cell Fundamentals. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications.” Springer ISBN: 978-1-84800-935-6
 20. Mohammadi, A., Sahli, Y., & Ben Moussa, H. (2019). 3D investigation of the channel Cross-section configuration effect on the power delivered by PEMFCs with straight channels. *Fuel*, 116713.
 21. Radulescu, M. N. (2006). « Systèmes à cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vaporeformage externe », Université Henri Poincaré-Nancy 1.
 22. L. Zhiqiang, X. Guo, W. Song, F. Xie, L. Shaoa “Effect of electrode Pt-loading and cathode flow-field plate type on the degradation of PEMFC” Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
 23. Gauthier Jullian. « Diagnostic robuste de pile à combustible PEM par modélisation physique et mesures d'impédance : prise en compte de conditions dynamiques et du

- vieillessement. Automatique ». Université Grenoble Alpes, 2019. Français.
24. M.M. Tellez-Cruz, J. Escorihuela, O.Solorza-Feria, V.Compan, « Proton Exchange Membrane fuel cells (PEMFC) : Advances and Challenges » *Polymers* 2021,13(18), 3064
 25. M.Vinothkannan, Ae Rhan Kim, Dong jin Yoo, « Potential carbon nanomaterials as additives for state-of-the-art Nafion electrolyte in proton-exchange membrane fuel cells », *RSC advances*,2021, 11, 18351-18370.
 26. Pierre Maye, « Générateurs électrochimiques, Piles, Accumulateurs et piles à combustible » Dunod, Paris,2010 ISBN978-2-10-055564-2, page (132)
 27. Zhao, P., et al. (2012). "Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell." *international journal of hydrogen energy* 37(4): 3382-3391.
 28. Xu, S., et al. (2019). "Parameter estimation of proton exchange membrane fuel cells using eagle strategy based on JAYA algorithm and Nelder-Mead simplex method." *Energy* 173: 457-467.
 29. Fowler, M. W., et al. (2002). "Incorporation of voltage degradation into a generalised steady state electrochemical model for a PEM fuel cell." *Journal of power sources* 106(1-2): 274-283
 30. Chen PC. « The dynamics analysis and controller design for the PEM fuel cell under gas flowrate constraints ». *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:3110e22.
 31. J. Wishart, Z.Dong, M. Secanell « Optimization of a PEM fuel cell system based on empirical data and a generalized electrochemical semi-empirical model » *Journal of Power*. October 2006
 32. Z. Dong , « Fuel cell system modeling notes » ,IESVic, Document, 2004.
 33. T. Springer, S. Zawodzinski, S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel-cell model", *J.Electrochem. Soc.* 138 (8) (1991) 2334–2342.
 34. F.N. Buchi, G.G. Scherer, In-situ resistance measurements of Nafion(R) 117 membranes in polymer electrolyte fuel cells, *J. Electroanal. Chem.*404 (1) (1996) 37–43
 35. Z. Dong, M. Guenther, G. Iuzzolino, "Mathematical modeling of PEM fuel cells and its implementation in MATLAB", *Research Report*, University of Victoria, 2003.
 36. Yunus A.ÇENGEL, Afshin J.GHAJAR "heat and mass transfer Fundamentals & applications", 5th édition ,pages(539-542) ; Table of air's properties(page 953).
 37. F.N. Buchi, G.G. Scherer, In-situ resistance measurements of Nafion(R) 117 membranes in polymer electrolyte fuel cells, *J. Electroanal. Chem.* 404 (1) (1996) 37–43.