



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université SAAD DAHLAB de Blida 1 Faculté de Technologie
Département de Mécanique

Projet de fin d'études
En vue de l'obtention de diplôme de Master en génie mécanique
Option : Installation énergétique et turbomachine

Thème

**Etude du comportement d'une pile à
combustible PEMFC sous des conditions de
fonctionnement variables**

Présenté par :

- **BENKESSIRAT Mohamed Nabil**
- **LACHEHEB Mohamed El Hadi**

Proposé et encadré par :

- **Promoteur : Dr. ABDI Hamid**
- **Co-promoteur : Dr. KETFI Omar**

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Allah le tout puissant, pour nous avoir donné le courage et la patience.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre promoteur de mémoire, Dr. Hamid ABDI et notre co-promoteur Dr. Omar KETFI. Nous les remercions de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Nos sœurs et nos frères, pour leurs encouragements.

Enfin, nos chers amis, Abdallah, Khobeib, Sofiane qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Dédicaces

Après cinq années de travail acharné dans cette université et durant toute ma scolarité où j'ai vécu des moments forts, le jour J est enfin arrivé, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir guidé et de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce projet de fin d'étude.

À cette occasion j'ai le grand plaisir de dédié ce travail à :

Mes grands supporteurs, mes parents d'inspiration, de joie et de bonheur, ma famille qui m'a toujours soutenu, je tiens à vous remercier d'être toujours à mes côtés.

Mes chers amis, et à toutes les personnes que j'ai rencontrées durant ces cinq années.

À toute la famille du Département de Mécanique.

Mon binôme : MOHAMED EL HADI Lacheheb

À tous ce que j'aime et ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Mohamed Nabil Benkessirat

ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه الدراسة إلى نمذجة خلية وقود غشائية لتبادل البروتونات من أجل محاكاة سلوكها الحراري. بعد تحليل نتائج حالة التخزين ، تم إجراء دراسة بارامترية لتجميع المعلمات الرئيسية. من ناحية أخرى ، كان اختيار نقطة التشغيل يعتمد على حل وسط بين الطاقة المقدمة وكفاءة البطارية. أدت النتائج التي تم الحصول عليها إلى استنتاج مفاده أن درجة الحرارة وضغط التشغيل لهما تأثير كبير على أداء الخلية ، علاوة على ذلك ، فإن الاختيار المناسب للترطيب أمر لا مفر منه لتجنب تدهور الغشاء. و تجدر الإشارة أيضًا إلى أنه يجب تعديل معدل تدفق الهيدروجين عند مدخل الخلية لضمان كمية كافية لتشغيل PEMFC.

الكلمات الدالة : PEMFC ، درجة الحرارة ، الضغط ، نقطة التشغيل.

Résumé

Le travail présenté dans cette étude a pour but de modéliser une pile à combustible à membrane échangeuse de protons afin de simuler son comportement thermique. Après avoir analysé les résultats d'un cas de base, une étude paramétrique regroupant les paramètres clés a été effectuée. D'autre part le choix du point de fonctionnement a été basé sur un compromis entre la puissance délivrée et le rendement de la pile. Les résultats obtenus ont permis de conclure que la température et la pression de fonctionnement influent considérablement sur les performances de la pile, de plus, un choix adéquat d'humidification est inévitable pour éviter la dégradation de la membrane. Il est à noter également que le débit de l'hydrogène doit être réglé à l'entrée de la pile pour assurer une quantité suffisante au fonctionnement de la PEMFC.

Mots clés : PEMFC, température, pression, point de fonctionnement.

Abstract

The work presented in this study aims to model a proton exchange membrane fuel cell in order to simulate its thermal behavior. After analyzing the results of a stocking case, a parametric study grouping the key parameters was carried out. On the other hand, the choice of the operating point was based on a compromise between the power delivered and the efficiency of the battery. The results obtained have led to the conclusion that the temperature and the operating pressure have a considerable influence on the performance of the cell, moreover, an adequate choice of humidification is inevitable to avoid the degradation of the membrane. It should also be noted that the flow rate of hydrogen must be adjusted at the inlet of the cell to ensure a sufficient quantity for the operation of the PEMFC.

Keywords: PEMFC, temperature, pressure, operating point.

Table des matières

Introduction générale.....	11
----------------------------	----

Chapitre 1: Etat de l'art

1.2. Etats des recherches :	3
1.3. But du travail :.....	5

Chapitre 2: Généralité et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

2.1. Introduction :	6
2.2. Les types de piles à combustible et leurs applications	8
2.3. la PEMFC.....	11
2.3.1.Constitution d'une PEMFC	11
2.3.2. Principe de fonctionnement.....	12
2.4. Les différents composants d'une cellule élémentaire	14
2.4.1 L'apport des gaz par les plaques mono polaires.....	14
2.4.2 Au cœur de la pile : l'assemblage membrane-électrodes	15
2.4.2.1.Les électrodes	15
2.4.2.2. La membrane	16
2.5. Domaines d'applications des piles à combustible.....	17
2.5.1 Les applications transports.....	17
2.5.2 Les applications stationnaires.....	19
2.5.3 Les applications portables.....	20
2.6. Conclusion.....	22

Chapitre 3: Modelisation de la pile à combustible.

3.1. Introduction :	20
3.2. MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC.....	20

3.3. Conclusion.....	22
----------------------	----

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4.1. Introduction :	233
---------------------------	-----

4.2. Performances du système PEMFC:.....	233
--	-----

4.3. Effet des paramètres de fonctionnement sur le comportement de la PEMFC:	29
--	----

4.4. Choix du point nominal de fonctionnement.....	400
--	-----

4.5. Conclusion.....	46
----------------------	----

Conclusion générale	47
---------------------------	----

Références	48
------------------	----

LISTE DES FIGURES :

Figure 2.1 : Gamme d'applications des différents types de pile à combustible.....	07
Figure 2.2 : Composition d'une PEMFC.....	10
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement d'une PEMFC.....	11
Figure 2.4 : Configurations utilisées pour l'apport des gaz	12
Figure 2.5 : Couche catalytique et couche de diffusion constituant la cathode et permettant le transport des gaz, protons et électrons ainsi que la diffusion de l'eau.....	13
Figure 2.6 : Bus Citaro (Mercedes-Benz).....	16
Figure 2.7 : Honda FCX Clarity.....	16
Figure 2.8 : Photo de la Direct fuel Cell DFC® 3000.....	17
Figure 2.9 : SFC EFOY 2200 Fuel cell family.....	18
Figure 2.10 : SFC EFOY Pro Series.....	18
Figure 4.1 : Variation du potentiel de Nernst et des surtensions en fonction de la densité du courant	25
Figure 4.2 : Variation de la tension de la cellule en fonction de la densité du courant.....	26
Figure 4.3 : Variation de la tension de la pile en fonction du courant électrique.....	26
Figure 4.4 : Evolution de la tension de la pile pour différentes température.....	27
Figure 4.5 : Effet de la variation de la température sur le rendement électrique de la pile.....	27
Figure 4.6 : Effet de la température sur le rendement thermique de la pile	28
Figure 4.7 : Effet de la température sur la puissance électrique de la pile	30
Figure 4.8 : Effet de la température sur la puissance thermique de la pile.....	30
Figure 4.9 : Effet des pressions sur la tension de la pile.....	31
Figure 4.10 : Effet des pressions sur la puissance électrique de la pile	31
Figure 4.11 : Effet des pressions sur la puissance thermique de la pile.....	32
Figure 4.12 : Effet des pressions sur le rendement électrique de la pile.....	33
Figure 4.13 : Effet des pressions sur le rendement thermique de la pile	33

Figure 4.14 : Effet du de l'humidité relative sur la tension de la pile	34
Figure 4.15 : Effet du de l'humidité relative sur l puissance électrique de la pile	35
Figure 4.16 : Effet du de l'humidité relative sur la puissance thermique de la pile.....	35
Figure 4.17 : Effet de l'humidité relative sur le rendement électrique de la pile.....	36
Figure 4.18 : Effet du de l'humidité relative sur le rendement thermique de la pile.....	36
Figure 4.19 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la tension de la pile.....	37
Figure 4.20 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la puissance électrique.	38
Figure 4.21 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la puissance thermique de la pile.....	38
Figure 4.22 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur le rendement électrique de la pile.....	39
Figure 4.23 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur le rendement thermique de la pile.....	39
Figure 4.24 : Deux positions du point nominal d'opération d'une cellule PEMFC avec leurs atouts et désavantages.....	41
Figure 4.25 : Evolution de la puissance en fonction de la température.....	42
Figure 4.26 : Evolution du rendement en fonction de la température.....	42
Figure 4.27 : Évolution la puissance en fonction de la pression.	43
Figure 4.28 : rendement en fonction de la pression.....	43
Figure 4.29 : la variation du rendement en fonction du R_{H_2}	44
Figure 4.30 : la variation de la puissance en fonction de la R_{H_2}	45
Figure 4.31 : puissance en fonction du S_{H_2}	45
Figure 4.32 : rendement en fonction du S_{H_2}	46

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 2.1: Les différents types de pile à combustible.....	.8
Tableau 4.1: Paramètres de fonctionnement de la pile PEMFC.....	.23
Tableau 4.2: Paramètres du modèle.23

Lettres latines

A	Surface active	Cm^2
b	Coefficient paramétrique	V
C_0	concentration d'oxygène à l'interface membrane/catalyseur	mol/cm^3
E_0	Potentiel standard	V
E_{nernst}	Potentiel de Nernst	V
I	Courant électrique	A
I_{max}	Courent électrique Maximale	A
J	Densité du courant	A/cm^2
J_{max}	Densité du courant maximale	A/cm^2
l	paisseur de la membrane	cm
LHV	tension de la cellule si l'eau produite est à l'état vapeur	V
N	Nombre de cellules	-
P_a	Pression à l'entrée de l'anode	bar
P_{ele}	Puissance électrique de la pile	kW
P_{the}	Puissance thermique de la pile	kW
R_M	Résistance de la membrane	Ω -
S_{H_2}	Stichométrie d'hydrogène	-
V_{act}	Surtension d'activation	V
V_{cell}	Tension de cellule	V
V_{con}	Surtension de concentration	V
V_{ohm}	Surtension ohmique	V
V_{st}	Tension de la pile	V

Lettres Grecques

ξ	Coefficient paramétrique	-
λ	Teneur en eau de la membrane	-
γ	Coefficient adiabatique de l'air	-
ρ_M	Résistivité de la membrane	$\Omega \text{ cm}$

ρ_w	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³
η_{ele}	Rendement électrique de la pile	%
η_{the}	Rendement thermique de la pile	%
ΔT	Ecart de température	K
Δh_{H_2O}	Différence d'enthalpie	kJ/mol

Abbreviation

PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell

Introduction générale

Les piles à combustible sont considérées depuis au moins deux décennies comme une solution prometteuse aux problèmes énergétiques, représentant depuis peu 3 d'avantages un maillon dans une chaîne de conversion ou de gestion de l'énergie qu'une solution universelle. De par son principe, une pile à combustible transforme l'énergie d'un combustible (hydrogène, alcool léger, hydrocarbures par exemple) en électricité, chaleur et eau – et dioxyde de carbone le cas échéant – en présence d'un comburant tel que l'oxygène de l'air. On envisage la pile à combustible pour des applications stationnaires (notamment pour le résidentiel ou pour alimenter de petits appareils électriques portables) ou bien embarquées pour le transport, c'est-à-dire permettant la traction électrique. Par ailleurs, selon le niveau de température de la conversion de l'énergie, plusieurs technologies de piles existent, notamment pour les plus connues, les piles à membranes échangeuses de protons (polymer electrolyte membrane fuel cells, PEMFC), à des niveaux de température en deçà de 100°C, et les piles à oxydes solides (solid oxide fuel cells, SOFC), généralement au-delà de 600°C. En comparaison avec les piles à oxydes solides, les piles PEMFC présentent certains avantages notamment un temps de réponse plus court à une sollicitation, des émissions en gaz toxiques plus faibles, des contraintes thermomécaniques ou de corrosion nettement plus faibles. Le revers de la médaille est un rendement électrique inférieur à ceux offerts par les piles à haute température et une plus grande sensibilité à d'éventuels gaz polluants contenus dans le combustible ou le comburant. Le combustible est oxydé à l'anode en différentes espèces selon sa nature, mais dans tous les cas l'oxydation produit des protons qui sont transférés à la cathode à travers la membrane insérée entre les deux électrodes.

Les membranes ne sont pas le siège de génération de charges électriques – comme le sont les électrodes – mais un milieu physiquement assimilable à un gel poly électrolytique permettant le transfert de protons de l'anode vers la cathode, le courant généré par la pile étant directement proportionnel à ce flux de protons selon la loi de Faraday.

Dans la littérature plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à l'étude du comportement de la PEMFC fonctionnant sous des conditions variables afin de pouvoir évaluer ces performances. L'analyse des paramètres clés tel que la température de fonctionnement le niveau d'humidification, les débits d'alimentation ainsi que les pressions conduit à des conclusions importantes. Dans ce contexte le travail proposé dans ce mémoire a

pour but d'étudier une pile PEMFC destinée à un véhicule de taille moyenne.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Nous présentons dans le premier chapitre une synthèse sur les travaux de recherches ayant étudiés les PEMFC pour des applications résidentielles.
- Dans le deuxième chapitre, une étude générale sur la pile PEMFC.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation d'une pile à combustible PEMFC.
- Les résultats de simulation issus du modèle mathématique adopté ainsi que du programme de calcul élaboré sont présentés au quatrième chapitre.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les travaux effectués sur les piles à combustibles PEMFC. L'étude des piles à combustibles se fait depuis de nombreuses années, avec différents objectifs. En effet, cette technologie est encore aujourd'hui insuffisamment connue.

1.2. Etats des recherches :

Durant ces dernières années, un certain nombre d'efforts de recherche ont été menés pour améliorer les performances des piles à combustible PEMFC, on peut citer :

Hwang, J. J., & Hwang, H. S. (2002): Une étude paramétrique d'un empilement de cellules d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) utilisant des plaques de champ d'écoulement Grafoil est réalisée. Un assemblage membrane-électrode (MEA) auto-fabriquée est utilisé pour intégrer la PEMFC. L'étude s'intéresse à l'effet des paramètres de fonctionnement tels que la température de la cellule, la pression et l'humidité du côté de la réaction et la géométrie du champ d'écoulement sur les performances de la pile [1]. Dans le même contexte, Yin, KM (2005) : il a fait une étude paramétrique de la cathode de pile à combustible à membrane échangeuse de protons à l'aide d'un modèle d'agglomérat [2].

Le travail présenté par **Alaefour, I., Karimi, G., Jiao, K. et Li, X. (2012)** est basé sur la compréhension des distributions de courant dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) car il est crucial pour la conception de composants de cellule tels que les plaques de champ d'écoulement et l'assemblage d'électrodes à membrane (MEA). Dans cette étude, les distributions spatiales de densité de courant dans une PEMFC ont été présentées. Les effets des conditions de fonctionnement clés telles que les rapports de stoechiométrie, les niveaux d'humidité d'entrée, la pression et la température des cellules sur les distributions locales de densité de courant pour un écoulement co-courant, contre-courant et écoulement croisé sont examinés. [3]

Reddy, EH, Monder, DS et Jayanti, S. en (2013) : Ont étudié l'efficacité d'un système

de refroidissement qui tient compte du transfert de chaleur par convection et conduction ayants lieu à travers les diverses couches des éléments d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons de haute température HT-PEMFC fonctionnant à 473 K (200 ° C). Le modèle tient compte du couplage de la température locale de la cellule, la densité de courant locale et la surtension locale par une analyse empirique [4].

Ferng, YM, Su, A. et Hou, J. (2014). : ont étudié expérimentalement et analytiquement les différents paramètres de conception et de fonctionnement pour améliorer les performances d'un PEMFC. Ces paramètres étudiés comprennent la température de fonctionnement, le débit de gaz, l'épaisseur et la porosité des électrodes et le niveau de dopage acide. Des expériences sont réalisées pour étudier les effets de la température de fonctionnement et du débit de gaz sur les performances de la pile. [5]

Babu, ARV, Kumar, PM, & Rao, GS (2018) : Cette étude se concentre sur l'analyse paramétrique des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) pour améliorer ses performances pour pouvoir l'utilisée dans un véhicule . L'étude implique la fabrication d'un assemblage d'électrodes à membrane à une charge de 40 % Pt/C et l'expérimentation de différents paramètres, à savoir, les températures des cellules, les débits d'oxygène et d'hydrogène et les températures d'humidification de la cathode et de l'anode [6].

Le but du travail proposé par **Lee, JY, Lee, JH et Kim, TS (2019)** avait pour objectif d'étudier un système de production d'énergie combiné pour récupérer la chaleur perdue à la fois de la pile PEMFC en appliquant un cycle de Rankine organique (ORC). Le meilleur fluide de travail avec la puissance de sortie ORC la plus élevée (c'est-à-dire l'efficacité combinée du système la plus élevée) a été identifié grâce à une étude paramétrique de différents fluides de travail. Une analyse économique a également été effectuée pour différents fluides de travail. Les résultats montrent que le coût d'installation de l'ORC peut être récupéré pendant la durée de vie de la pile à combustible dans les différents cas de conception [7].

Chugh, S., Chaudhari, C., Sonkar, K., Sharma, A., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2020) : Le travail présenté porte sur l'étude expérimentale d'un pile à combustible PEM à basse température de 30 cellules utilisant des membranes Nafion®-212. Les performances de la PEMFC sont fortement influencées par les différentes paramètres de fonctionnement tel que la température, la pression, la stœchiométrie des réactifs et l'humidité relative [8].

Li, Y., Ma, Z., Zheng, M., Li, D., Lu, Z. et Xu, B. (2021): on fait une étude d'un modèle de pile à combustible à membrane échangeuse de protons à haute température (HT-PEMFC) utilisant la membrane de poly-benzimidazole dopée avec des molécules d'acide phosphorique. En tenant compte de diverses pertes de polarisation, les expressions mathématiques de la densité de puissance de sortie et de l'efficacité de la HT-PEMFC sont déduites. La fiabilité du modèle est vérifiée par les données expérimentales. Les effets des paramètres de fonctionnement et des paramètres de conception sur les performances de la HT-PEMFC sont analysés en détail. L'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules (PSO) est utilisé pour l'optimisation de la densité de puissance et de l'efficacité du HT-PEMFC. Les résultats montrent que les performances de la HT-PEMFC optimisé sont améliorées. Alors, selon les différentes performances de sortie de la pile[9].

Li, Y., Shao, W., Ma, Z., Zheng, M. et Song, H. (2022) : un système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons à haute température (HT-PEMFC) utilisant des membranes composites de polybenzimidazole contenant du fluor (6FPBI) dopées avec un liquide ionique polymère réticulé (cPIL) est développé et étudié. La fiabilité du modèle est vérifiée par une comparaison avec les données expérimentales. Les performances du système HT-PEMFC utilisant des membranes 6FPBI avec différents niveaux de cPIL sont analysées.[10]

1.3. But du travail :

L'objectif principal de notre travail est d'évaluer les effets des paramètres de fonctionnement (température, pression, humidité relative et coefficient stœchiométrique de l'hydrogène) sur le comportement de la PEMFC. Les évolutions des tensions, des puissances électriques et thermiques ainsi que des rendements seront analysées.

Chapitre 2

Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

2.1. Introduction :

La pile à combustible est un générateur électrochimique capable de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible gazeux (hydrogène, gaz naturel, gaz de charbon ou méthanol) en électricité, chaleur, eau (ou vapeur d'eau) et gaz carbonique, en utilisant un comburant approprié (l'oxygène de l'air, par exemple). Bien que le principe des piles à combustible soit connu depuis le début du XIXe siècle, les premières utilisations réelles datent des missions spatiales américaines (missions Apollo) puis plus récemment, comme générateurs de secours pour immeubles de bureaux. En France, les recherches sur les piles à combustible ont connu un grand développement entre 1960 et 1975. Au cours des années 80- 90, plusieurs programmes soutenus par la Communauté Européenne (JOULE, BRITE-EURAM) ont permis de coordonner savoir-faire et ressources des principaux centres de recherches et des industriels. Le club de réflexion « Pile à combustible » a permis de rassembler l'ensemble des partenaires intéressés. Dans les années 90, les recherches se sont coordonnées autour des programmes PREDIT. Depuis 1999, un réseau de recherche et d'innovation technologiques « Pile à combustible », mis en place par le ministère, a permis de financer plus de trente projets qui associent recherche publique et industriels. Les objectifs principaux concernent la levée des barrières technologiques actuelles et la création et/ou la croissance d'entreprises innovantes. Les objectifs actuels concernent la traction des véhicules (automobiles, autobus ou camions), la production décentralisée d'électricité, le chauffage des bâtiments, voire les applications portables (ordinateurs, téléphones, etc.). Dans le contexte actuel de diversification énergétique, les piles à combustible présentent, en effet, des performances intéressantes en termes de rendement, de souplesse d'utilisation (potentiellement équivalente à celle des moteurs thermiques), d'autonomie (plus de 500 km pour un véhicule électrique), de nuisance (bruit, polluants), de modularité,...etc. Sur la base des données actuelles, il apparaît que les coûts des systèmes complets doivent être réduits d'un facteur 10 à 20 pour la production d'électricité stationnaire et d'un facteur 50 pour les systèmes à intégrer dans les véhicules électriques. On distingue cinq types principaux de piles à combustible fonctionnant à partir d'hydrogène et d'oxygène de l'air :

- les piles basses températures : piles à électrolyte polymère (PEMFC) et piles à

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

combustible alcalines (AFC pour « alkaline fuel cells »),

- les piles à moyennes températures : piles à combustible à acide phosphorique (PAFC),
- les piles à hautes températures : piles à carbonate fondu (MCFC) et piles à électrolyte solide (SOFC).

En outre, on doit considérer la pile à combustible DMFC (« direct methanol fuel cell ») qui utilise directement le méthanol, sans conversion préalable. Les efforts ont été porté principalement sur les piles à électrolyte polymère et les piles à oxyde électrolyte solide qui sont actuellement les deux filières privilégiées sur le plan industriel.

2.2. Les types de piles à combustible et leurs applications

L'intérêt porté aux piles à combustible (PAC) est largement motivé par leur faible émission des gaz à effet de serre lors de la mise en marche, un fonctionnement silencieux, un rendement énergétique élevé, des densités de puissances acceptables et une vaste gamme d'utilisation. Les piles à combustible peuvent être employées dans 3 principaux types d'applications : la génération stationnaire d'énergie comme les centrales électriques, de cogénération chaleur-électricité et la propulsion de véhicules et l'alimentation d'appareils portables [15]. La figure (2.1) montre les différentes applications des piles à combustibles.

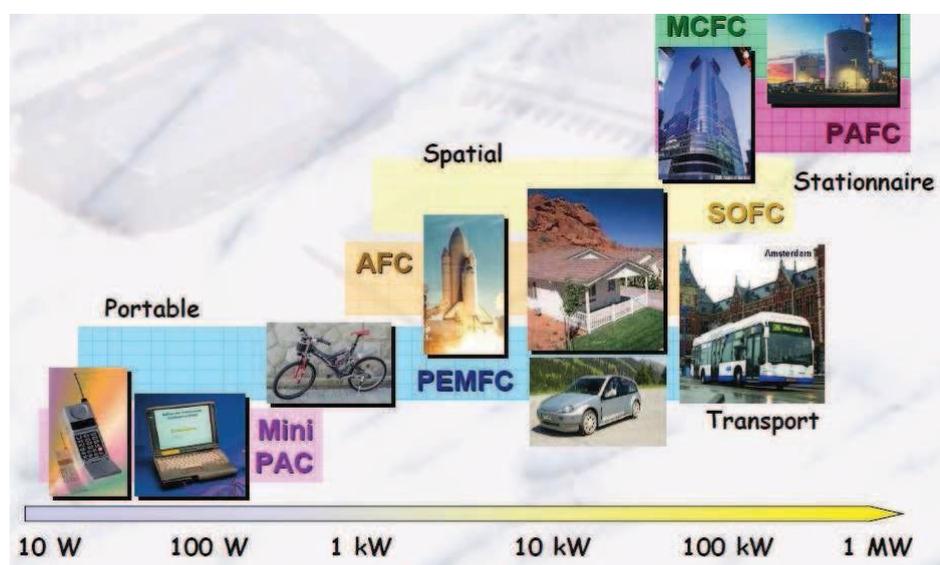


Figure 2.1 : Gamme d'applications des différents types de pile à combustible [16].

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

Elles se différencient par l'électrolyte, le combustible utilisé et la température de fonctionnement. Les principaux types de PAC sont :

Le tableau (2.1) montre les principales caractéristiques des différents types de piles utilisées. Les PAC sont classées en deux grandes catégories : il s'agit des piles à combustible dites à « basse température » (60–250°C) et celles à « haute température » (600–1000°C). Les PAC fonctionnant à basse température ont fait des progrès significatifs dans les applications automobiles et portables grâce à leurs performances. Les piles à combustible de basse température les plus communes sont les AFC, PEMFC, DMFC, PAFC. Les PAC à haute température sont plus particulièrement utilisées dans la cogénération centralisée d'électricité et d'énergie thermique, leur haute température de fonctionnement ainsi que leur temps de démarrage trop long les rendant peu utilisables dans le cadre d'applications automobiles. Les MCFC et SOFC classés parmi les piles à combustible à haute température.

Tableau 2.1: Les différents types de pile à combustible [17-19].

	Electrolyte	Température de Fonctionnement	Rendement Électrique	Temps de démarrage	Gamme d'application
AFC <i>Alkaline Fuel Cell</i>	Solution de KOH	<100°C	60–65%	secondes	Portable, mobile et stationnaire
PEMFC <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>	Polymère solide	60–120°C	35–50%	secondes	
DMFC <i>Direct Methanol Fuel Cell</i>	Polymère solide	60–120°C	20–30%	Seconds	
PAFC <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>	Acide phosphorique	160–220°C	35–40%	2–4 heures	Stationnaire, cogeneration

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

<i>Cell</i>	e				
MCFC <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>	Carbonate fondu	600–800°C	50–60%	>10 heures	Stationnaire, cogénération
SOFC <i>Solid Oxide Fuel Cell</i>	Electrolyte solide	800–1000°C	50–65%	>10 heures	

2.3. La PEMFC :

Les PEMFC sont compactes et relativement légères, ce qui en fait de bonnes candidates pour une vaste gamme d'applications (propulsion de véhicules, alimentation d'appareils portables...). Dans ce type de PAC, l'électrolyte étant un solide et non un liquide, la séparation des gaz entre l'anode et la cathode est souvent plus efficace. Un électrolyte solide offre aussi une durée de vie plus longue à la pile car il est moins corrosif que l'acide phosphorique. Toutefois, les PEMFC présentent des inconvénients dus au fait que les gaz doivent être humidifiés pour permettre un bon fonctionnement dans les applications automobiles [18] et une température d'utilisation encore trop basse. Les raisons suivantes expliquent pourquoi le fonctionnement à des températures plus élevées [19–21] :

- Les cinétiques électrochimiques aux électrodes seront améliorées
- L'évacuation de l'eau est plus aisée.
- La chaleur produite peut être récupérée et utilisée comme moyen de chauffage ou de mise sous pression d'un appareil supplémentaire (systèmes de cogénération).
- La tolérance du platine au monoxyde de carbone doit être améliorée pour permettre l'utilisation d'hydrogène reformé de moins bonne qualité.

2.3.1. Constitution d'une PEMFC :

Les PEMFC ont une structure de base commune à toutes les technologies de piles. Il s'agit d'un assemblage anode/électrolyte/cathode (AME) [16]. L'électrolyte est une membrane en polymère perfluoré sulphoné. Ce matériau, lorsqu'il est suffisamment hydraté permet la conduction de protons H^+ tout en empêchant la conduction d'électrons. Cet électrolyte reste néanmoins imperméable aux gaz même si il permet le transfert de vapeur d'eau par électro-osmose. Cet électrolyte se situe entre deux électrodes composées de carbone

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

sur lesquelles un dépôt catalytique à base de platine est effectué. Cet assemblage électrode / membrane / électrode (AME) est à son tour pris entre deux couches de diffusion (Gaz Diffusion Layer ou GDL). Elles sont composées d'un matériau poreux permettant l'arrivée des gaz jusqu'à l'AME ainsi que l'évacuation de l'eau produite par la réaction électrochimique. Enfin, deux plaques bipolaires en métal ou en graphite maintiennent mécaniquement cet empilement de couches successives. Elles sont appelées plaques bipolaires et assument plusieurs fonctions. D'une part, les canaux gravés sur ces plaques permettent de distribuer les gaz sur toute la surface de active. D'autre part, leur propriété thermique est utilisée pour évacuer la chaleur et donc assurer le contrôle de la température grâce à un système de refroidissement. Cet assemblage constitue une cellule élémentaire d'une PEMFC (Fig.2.2). Une PEMFC complète est un empilement (soit stack en anglais) de plusieurs cellules élémentaires.

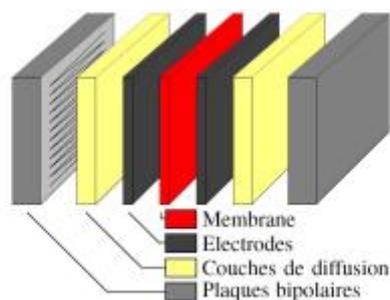


Figure 2.2: Composition d'une PEMFC

2.3.2. Principe de fonctionnement :

La pile est alimentée en hydrogène du côté anode et en oxygène du côté cathode. L'alimentation cathodique peut aussi se faire en air. La conversion d'énergie chimique / électrique est possible grâce aux réactions ayant lieu au niveau des électrodes [17]. A l'anode, le dihydrogène est oxydé selon la réaction électrochimique suivante :



Les protons H^+ obtenus traversent l'électrolyte tandis que les électrons passent par un circuit externe pour atteindre la cathode. Ici, le dioxygène se réduit selon la réaction suivante :



La réaction globale résultante correspond à :

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC



Une PEMFC produit donc de l'électricité, de l'eau, mais aussi de la chaleur (Fig.2.3) [18,19]. En effet, la réaction électrochimique ayant lieu au sein de la PEMFC est exothermique.

La pile PEMFC (figure 2.3) est un convertisseur d'énergie dont la causalité physique s'exprime par une sollicitation en courant et une réponse en tension. Cette dernière dépend des conditions opératoires et des phénomènes internes se produisant dans la cellule. La tension est notre descripteur pour le comportement du stack.

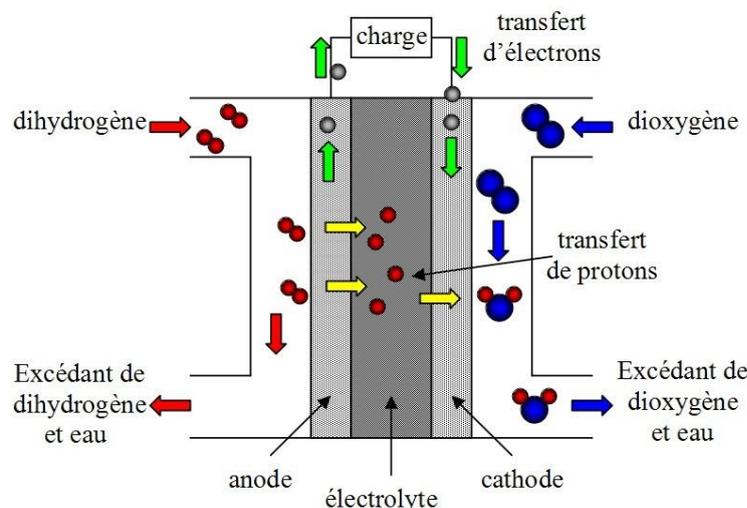


FIGURE 2.3: Principe de fonctionnement d'une PEMFC

2.4. Les différents composants d'une cellule élémentaire

La pile à combustible contient des éléments dans l'apport des gaz et d'autres au cœur de la cellule.

2.4.1. L'apport des gaz par les plaques mono polaires

Le rôle principal des plaques mono polaires est l'approvisionnement en gaz de part et d'autre du cœur de pile. Elles doivent aussi être un bon conducteur électronique et faciliter la gestion de l'eau et de la chaleur produites dans le cœur de pile. Les plaques mono polaires doivent résister aux contraintes mécaniques imposées par l'assemblage (force de serrage) mais aussi à un milieu chimique particulièrement agressif (oxydoréducteur O_2/H_2 , pH acide, température). Le matériau le plus adapté semble être le graphite haut densité en raison de sa bonne conductivité électrique et thermique, mais aussi du fait de sa bonne résistance chimique

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

et électrochimique et de son faible poids [20]. La fabrication des plaques en graphite reste cependant coûteuse et laborieuse du fait de la grande résistance mécanique du matériau qui rend son usinage difficile [21]. Ainsi on cherche à le remplacer par des matériaux composites ou métalliques [22].

De nombreuses études ont été faites sur la géométrie des canaux afin d'assurer une répartition la plus uniforme possible des gaz en surface des couches catalytiques. La configuration en « serpentín » est actuellement la plus utilisée (Fig.2.4). L'apport des gaz peut être effectué en co-flux (les gaz balayent l'électrode dans la même direction de part et d'autre de l'AME) ou en contre-flux (les gaz balayent l'électrode dans des directions opposées).

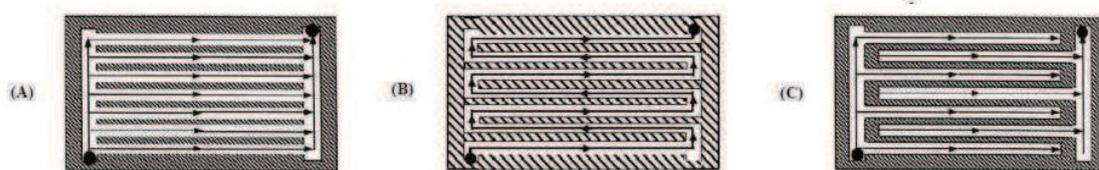


Figure 2.4 : Configurations utilisées pour l'apport des gaz
(A) canaux parallèles, (B) serpentín, (C) inter-pénétrée [23].

2.4.2. Au cœur de la pile : l'assemblage membrane-électrodes :

L'assemblage membrane-électrodes constitue le cœur de la PAC. Il est composé d'une membrane polymère prise en sandwich entre deux électrodes (anode et cathode).

2.4.2.1. Les électrodes

Les électrodes sont constituées d'une couche catalytique, qui correspond à la partie active à la surface de laquelle les réactions électrochimiques ont lieu, et d'une couche de diffusion dont le rôle est d'assurer une répartition uniforme des gaz au niveau des couches catalytiques.

La **couche catalytique** est composée d'un liant polymère et de carbone platiné. A l'anode comme à la cathode, son rôle est de catalyser les demies réactions d'oxydoréduction (le catalyseur est souvent du platine déposé sur des nanoparticules de carbone), mais aussi d'assurer la bonne conduction des protons entre la membrane et le site catalytique (par le biais d'un électrolyte) et des électrons vers le circuit externe (particules de carbone).

La **couche de diffusion** est une couche poreuse classiquement en carbone dans laquelle sont introduites des particules hydrophobes de poly tétra fluor éthylène (PTFE) [24]. Elle doit quant à elle assurer la répartition uniforme des gaz mais aussi permettre la conduction

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

électrique ainsi que l'évacuation de l'eau produite.

Les deux couches constituant la cathode sont représentées à la Fig.2.5 Le principe est le même à l'anode, à la différence près que la quantité de platine y est plus réduite (dans les applications industrielles), la cinétique d'oxydation y étant plus rapide.

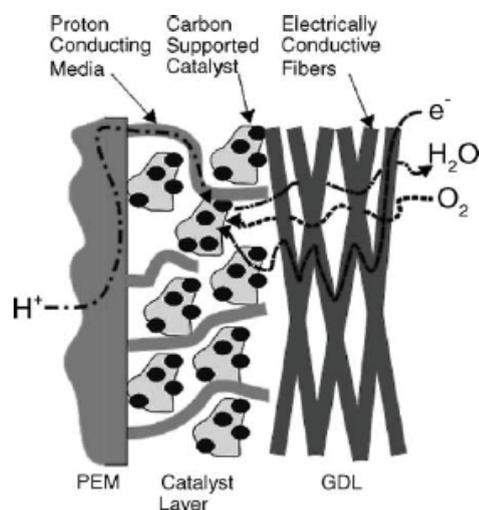


Figure 2.5 : Couche catalytique et couche de diffusion constituant la cathode et permettant le transport des gaz, protons et électrons ainsi que la diffusion de l'eau [25].

2.4.2.2. La membrane

Le rôle principal de la membrane est d'assurer le transport des protons de l'anode vers la cathode, tout en offrant une isolation électrique et une bonne séparation des gaz. Elle est généralement constituée d'un squelette polymère hydrophobe auquel sont rattachés (directement ou via des chaînes pendantes) des groupements acides sulfoniques qui sont hydrophiles. Ils permettent l'hydratation de la membrane (gonflement) et la conduction des protons. Ainsi la conductivité de la membrane dépend principalement de la concentration en groupes acides [26] mais aussi de sa teneur en eau [27].

Dans la suite, la concentration de groupes acides dans la membrane est déterminée soit par la Capacité d'Echange Ionique (ou CEI), représentant la quantité molaire de groupements sulfoniques par gramme de polymère sec ; soit par le degré de sulfonation (ou DS) représentant le nombre de groupement sulfonique par motif de répétition.

Au-delà d'une bonne conduction protonique, la membrane doit aussi présenter d'autres propriétés essentielles pour son application en pile :

- **Stabilité mécanique** : Les agressions mécaniques pouvant dégradé la membrane sont

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

nombreuses. La membrane est soumise à des contraintes mécaniques de compression et de cisaillement importantes, dues notamment aux dents et canaux des plaques mono polaires. Pour une application dans l'automobile, la pile à combustible doit aussi pouvoir faire face à un effet de cyclage dû aux arrêts et redémarrages fréquents du système. Ce cyclage implique des phases de gonflement/dégonflement de la membrane (contraintes mécaniques supplémentaires) ainsi que des variations de température [28]. Enfin la membrane doit pouvoir résister à une éventuelle différence de pression entre les gaz côté anode et cathode.

- **Stabilité thermique** : L'utilisation des PEMFC étant envisagée au-delà de 80°C [28] , la membrane doit garder de bonnes propriétés thermomécaniques et de conduction des protons même à haute température (>80°C).

- **Séparation des gaz** : Quand la membrane n'est pas totalement imperméable aux gaz, il peut y avoir migration de l'hydrogène vers la cathode, et de l'oxygène vers l'anode. Des deux côtés, le mélange H₂/O₂ peut réagir avec le platine présent dans les électrodes pour produire de l'eau et de la chaleur. Une chaleur excessive peut alors percer la membrane et conduire à un arrêt du système.

Une mauvaise séparation des gaz peut aussi favoriser la formation d'H₂O₂ qui, comme indiqué ci-dessous, est à l'origine de la dégradation chimique de la membrane en pile [28]

- **Stabilité chimique** : On suppose que des radicaux hydroxyles ou hydro per oxydes générés par la décomposition chimique d'H₂O₂ sont responsables de la dégradation chimique du polymère conducteur ionique [29].

2.5. Domaines d'applications des piles à combustible

Du fait de la grande flexibilité dans la géométrie et le volume des piles à combustible à membrane échangeuse de protons « PEMFC » les applications sont nombreuses. En effet, on peut couvrir une très large gamme de puissance. La PEMFC offre des perspectives d'utilisations larges au niveau des marchés suivants : stationnaire, portable et transport.

2.5.1. Les applications transports

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible PEM depuis le début des années 90. Elle est la plus prometteuse grâce à sa faible température de fonctionnement, sa simplicité de fabrication, sa meilleure réactivité, son bon

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

rendement aux puissances inférieures à la puissance maximale. Mais les conditions pour un succès sont sévères.

L'intégration d'une pile à combustible ne doit pas induire un surcoût par rapport aux automobiles conventionnelles. La fiabilité devra être la même que le moteur thermique si on ne veut pas risquer un rejet de commercialisation. La pile à combustible allie les avantages d'une grande propreté, d'un rendement élevé et d'un fonctionnement presque silencieux. Cependant, compte tenu de la contrainte du coût dans ce secteur et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteurs thermiques), mature et performante, il faut distinguer deux sous familles assez différentes dans leurs cahiers de charges, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelques 3000 heures de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige 100 fois plus d'heures de fonctionnement. Actuellement, cette technologie est bien maîtrisée. De nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993. Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou dans un hydrure métallique), le combustible qui sera très probablement utilisé dans une première phase est un combustible hydrogéné Chapitre 1 21 (méthanol, hydrocarbure) alimentant un reformeur embarqué, et ce pour des raisons de sécurité, de réglementation et de logistique de distribution. Au cours de la période 2009-2015, les constructeurs prévoient de vendre à prix bas pour ouvrir le marché et emmagasiner de l'expérience, comme l'a annoncé le directeur de la recherche de Daimler, « le prix d'un tel véhicule sera aux environs de celui d'un diesel hybride ». La commercialisation du bus Mercedes-Benz Citaro par le constructeur Mercedes-Benz propulsée à l'hydrogène est prévue en 2015 (Figure 2.6). Mais jusqu'à maintenant, c'est Honda qui a pu mettre en évidence l'utilisation à grande échelle de ce type de véhicule avec sa très innovante Berline FCX Clarity (figure 2.7), qui n'émet pas de CO₂ en roulant grâce à la pile à combustible (élue voiture verte de l'année 2009 au niveau mondial). Dans les trois ans à venir, Honda compte vendre environ 200 unités de ce modèle, au Japon et aux Etats-Unis. La technologie des PEMFC appliquée pour le transport ne deviendrait financièrement rentable qu'à partir de 2020. A l'horizon de 2035 ce sera le marché mondial qui sera visé, avec une production annuelle supérieure à 50 millions de véhicules, soit 10 % du marché global.



Figure 2.6: Bus Citaro (Mercedes-Benz). **Figure 2.7:** Honda FCX Clarity.

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir 1993. L'allemand Daimler Chrysler a présenté en 1997 un prototype de bus 'Nebus' de Mercedes-Benz. Fin 2003, il a lancé la livraison de 30 pré série Citaro dans 10 villes d'Européennes. En Juillet 2008, Beijing a lancé pour les jeux Olympiques trois autobus à pile à combustible et qui vont rester fonctionnels le long d'une ligne fixe comme démonstration publique des véhicules à énergie verte. A côté de ces applications routières, certains constructeurs (les français RVI et Iris-bus en particulier) pensent à un tramway propre, utilisant une pile à combustible.

Les applications stationnaires

Le marché mondial potentiel des piles à combustibles, pour la seule application stationnaire est estimé à 45 milliards d'euros à l'horizon de 2030. Quant au coût visé, il se situe autour de 1000 Euro/kW pour le système complet y compris l'installation. Au niveau actuel du développement de cette technologie, divers constructeurs essentiellement américains sont déjà engagés sur ce marché. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, Etats-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (200 kW à quelques MW) et la production domestique ou individuelle (2 à 7 kW). Plusieurs projets de démonstration existent déjà dans ce domaine. La plus grande centrale électrique de démonstration au niveau mondial a été construite par l'université de Technologie de Chine méridionale qui fonctionne sur le principe des piles à combustible type PEMFC. Au sein de la centrale, le gaz naturel est transformé d'abord en hydrogène, ensuite l'hydrogène entre dans les groupes générateurs des piles à combustible afin de produire le courant électrique et l'eau chaude. Cette centrale de démonstration fonctionne en continu. Le rendement énergétique atteint 90 %. Fuel Cell Energy DFC® 3000 est parmi les grandes centrales des piles à combustible (MCFC), capable de fournir l'énergie électrique 24h/7j avec un rendement énergétique de 47 %. Le système est particulièrement adapté pour des applications dans les hôpitaux, les universités, usines de

traitement des eaux usées (Figure 2.8).

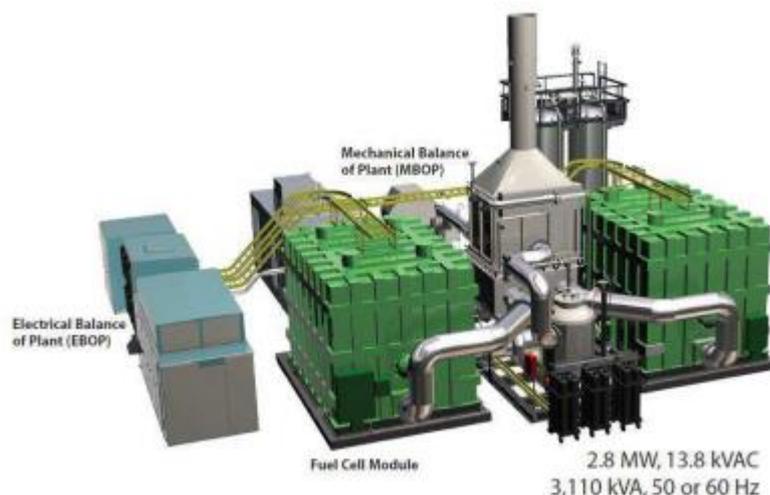


Figure 2.8 : Photo de la Direct fuel Cell DFC® 3000.

Le projet HYPER (Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications) en 2008 a été financé par la CE (European Commission) et 15 partenaires de la communauté Européenne ainsi que la Russie et les Etats-Unis [38]. Ce projet a comme objectif de générer de nouvelles connaissances dans le domaine de la sécurité de l'hydrogène, et l'application des PEMFC dans le stationnaire. Dans le domaine domestique ou individuel (habitat), plusieurs projets sont en cours de réalisation. Une dizaine de prototypes sont en situation de tests, afin de passer à la commercialisation. La société américaine Plug Power LLC lance un générateur de 7 kW (HomeGen 700). Ces appareils basés sur la technologie de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) fournissent de l'électricité et de la chaleur à 60 °C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarboné (généralement du gaz naturel) en hydrogène.

2.5.2. Les applications portables

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui nécessite une puissance de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable (en moyenne 10 W). En effet, ces domaines connaissent une forte croissance. Ce marché bien plus hétérogène est celui des applications portables ou de niche. Comme dans les applications spatiales ; ce n'est pas le coût qui est déterminant ici, mais la commodité d'usage. Panasonic vient de présenter deux modèles de DMFC, pour remplacer la batterie d'un portable par un réservoir de méthanol en

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

plastique comme on remplacerait la cartouche d'un stylo à plume. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou du méthanol (l'utilisateur rechargera son portable comme il recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes). Chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'un accumulateur actuel pour le même encombrement. Cette technologie pourrait se généraliser dans les années à venir. Motorola étudie avec un laboratoire américain une pile à combustible pour téléphone portable alimenté pour une semaine par une cartouche de méthanol de la taille d'une cartouche d'encre d'un stylo. Les piles à combustible EFOY de Smart Fuel Cell (SFC) ont été développées spécifiquement pour la mise à disposition fiable de courant destiné aux applications mobiles et portables dans la plage de puissance allant jusqu'à 250 W. La gamme s'est établie avec succès dans le monde entier, sur de nombreux marchés des domaines des loisirs, des applications industrielles sophistiquées hors réseau ainsi que des applications de défense, etc. Les piles à combustible de la série EFOY Pro sont vendues à des utilisateurs pour servir à des applications mobiles et stationnaires hors réseau. Dans ces domaines, elles livrent de l'énergie à 100 % fiable, toujours disponible, pour de nombreuses installations de l'ingénierie de circulation, de la technique de sécurité et de surveillance, pour des capteurs, des systèmes de mesure et radio hors réseau et pour des véhicules électriques (figures 2.9 et 2.10).



Figure 2.9 : SFC EFOY 2200 Fuel cell family.

Figure 2.10 : SFC EFOY Pro Series.

Si les piles à combustibles ne sont pas encore compétitives sur le plan économique, elles ont l'avantage sur les autres technologies d'avoir un meilleur rendement énergétique, de causer moins de pollution et de limiter considérablement les nuisances sonores. Toutefois, les prix baisseront naturellement avec l'augmentation du volume du marché lié au besoin progressif du grand public et l'avenir pourrait s'annoncer florissant avec cette technologie.

Chapitre 2 : Généralités et principes de fonctionnement des piles à combustible PEMFC

2.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'intérêt que suscite la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ainsi que son fonctionnement et ces applications. Une des limites à l'intégration de cette technologie au sein de l'industrie est sa trop courte durée de vie qui de plus n'est pas gérée. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation d'une pile à combustible PEMFC. Le modèle mathématique qui sera développé est basé sur l'électrochimie et des lois thermodynamiques.

Chapitre 3 Modélisation d'une pile à combustible PEMFC

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons un modèle mathématique permettant de simuler le comportement thermique et électrique d'une pile à combustible composé de 120 cellules. Il s'agit d'un modèle électrochimique le plus recommandé dans la littérature. Afin de simplifier le modèle, on considère les conditions de fonctionnement en régime permanent de plus la température de fonctionnement et la pression sont considérées invariables dans la pile, d'autre part les déperditions thermiques entre la pile et son environnement (milieu ambiant) sont considérées négligeables.

3.2. MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC :

Dans la pratique la tension réelle de la cellule diffère de la tension théorique (potentiel de Nernst) à cause de surtensions survenant au niveau des électrodes et la membrane. Ces dernières provoquent des surtensions d'activation, ohmique et de concentration.

L'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit [30,31] :

$$V_{cell} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3.4)$$

Pour calculer la tension de la pile (V_s) de (n) cellules unitaires reliées en série formant un assemblage [32,33]

$$V_s = n \times V_{cell} \quad (3.5)$$

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst [34,32] arrangée avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nerst} = 1.229 - 0.85T^{-3} \cdot (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (3.6)$$

La pression de saturation de la vapeur d'eau en fonction de la température de la cellule T [K] s'exprime par :

$$\log_{10}(P_{H_2O}^{sat}) = 2.95 \times 10^{-2}(T - 273.15) - 9.18 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7} \times (T - 273.15)^3 - 2.18 \quad (3.7)$$

Si les réactifs sont l'air et H_2 alors :

$$P_{N_2}^{channel} = \frac{0.79}{0.2} P_{O_2} \quad (3.8)$$

$$P_{O_2} = P_c - (RH_c \cdot P_{H_2O}^{sat}) - P_{N_2}^{channel} \cdot \exp\left(\frac{0.291(I/A)}{T^{0.832}}\right) \quad (3.9)$$

Si les réactifs sont O_2 et H_2 alors :

$$P_{O_2} = (RH_c \cdot P_{H_2O}^{sat}) \times \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{4.192(I/A)}{T^{1.334}}\right) \cdot \frac{(RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat})}{P_c}} - 1 \right] \quad (3.10)$$

Dans les deux cas la pression d'hydrogène est donnée par:

$$P_{H_2} = 0.5(RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat}) \times \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.635(I/A)}{T^{1.334}}\right) \cdot \frac{(RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat})}{P_a}} - 1 \right] \quad (3.11)$$

C_{O_2} représente la concentration de l'oxygène à l'interface électrode membrane (mol/cm^3). Elle est exprimée par la lois de Henry [35].

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \times e^{-498/T}} \quad (3.12)$$

La surtension d'activation est causée par la cinétique lente des réactions qui se produisant sur la surface active des électrodes, elle peut être calculée par

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \ln(I)] \quad (3.14)$$

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de pile à combustible PEMFC.

La chute de tension ohmique est causée par la résistance que rencontrent les protons à travers la membrane, la résistance que rencontrent les électrons traverse les électrodes et les plaques bipolaires. Elle peut être calculée en utilisant la loi d'ohm comme suit

$$V_{ohmic} = I(R_M + R_C) \quad (3.15)$$

La résistance équivalente de la membrane peut être obtenue par

$$R_M = \rho_M \cdot l/A \quad (3.16)$$

L'expression suivante est utilisée pour la résistivité protonique :

$$\rho_M = \frac{181.6[1+0.03(\frac{l}{A})+0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{l}{A})^{2.5}}{[\lambda-0.634-3(\frac{l}{A})]\exp[4.18(\frac{T-303}{T})]} \quad (3.17)$$

L'expression suivante est utilisée pour la tension de concentration.

$$V_{con} = -b \ln(1 - J/J_{max}) \quad (3.18)$$

Les performances de la pile à combustible PEM peuvent être évaluées en déterminant la puissance électrique, la puissance thermique ainsi que les rendements électrique et thermique

La puissance thermique de la pile est calculée par :

$$P_{therm} = N(LHV - V_{cell})I$$

L'expression de la puissance électrique de la pile :

$$P_{ele} = N \cdot V_{cell} \cdot I \quad (3.19)$$

L'expression du rendement thermique de la pile [52]:

$$\eta_{therm} = \frac{1}{SH_2} (1 - \frac{v_{cell}}{LHV}) \quad (3.20)$$

L'expression du rendement électrique [36] :

$$\eta_{ele} = \frac{1}{SH_2} \cdot \frac{v_{cell}}{LHV} \quad (3.21)$$

Avec LHV représente la tension délivrée par la cellule dans des conditions standards de pression et de température de 25°C et 1 atm .si l'eau est produite à l'état vapeur.

S_{H_2} .represente le coefficient stœchiométrique de l'hydrogène (1.2).

3.3. CONCLUSION :

Un ensemble de lois et une modélisation de la pile à combustible ont été présentés dans ce chapitre, qu'on va les utilisés dans notre programmation pour obtenir des graphes qui nous aident de bien comprendre le comportement de la PEMFC.

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulation issus du modèle mathématique adopté ainsi que du programme de calcul élaboré.

Nous présentons une analyse du comportement de la pile à combustible.

4.2. Performances du système PEMFC:

Les paramètres de fonctionnement de la pile ainsi que ceux nécessaires à la modélisation sont résumés respectivement dans les tableaux (4.1) et (4.2) [37]

Tableau 4.1 : Paramètres de fonctionnement de la pile PEMFC (cas de base)..

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>
Température ambiante	K	T_{amb}	298.15
Température de fonctionnement	K	T	338.15
Pression de l'anode	bar	P_a	1.2
Pression de la cathode	bar	P_c	1.2
L'humidité relative de la vapeur d'eau à l'anode	%	RHa	100
L'humidité relative de la vapeur d'eau à la cathode	%	RHc	100
Stichométrie d'hydrogène	-	S_{H_2}	1.15
Stichométrie d'air	-	S_C	2

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle [37]

<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>
Nombre de cellules	-	N	120
Courant électrique Maximale	A	I_{max}	311
Surface active	cm ²	A	311.88
Coefficient paramétrique	-	ξ_1	-0.8768
Coefficient paramétrique	-	ξ_2	2.6547×10^{-3}
Coefficient paramétrique	-	ξ_3	4.7783×10^{-5}
Coefficient paramétrique	-	ξ_4	-9.54×10^{-5}
Résistance de contact	Ω	R_C	2.4072×10^{-4}

Epaisseur de la membrane	cm	l	0.002
Teneur en eau de la membrane	-	λ	10
Coefficient paramétrique	Volt	B	0.0136
Densité du courant maximale	A/cm ²	J_{max}	1

Dans cette sous-section, nous nous intéressons à la façon de caractériser les performances de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Il en existe plusieurs, mais la plus utile du point de vue de l'utilisateur est la courbe de polarisation qui donne la tension de cellule en fonction de la densité de courant.

La figure (4.1) montre la variation des surtensions survenant dans une cellule unitaire ainsi que le potentiel de Nernst en fonction de la densité du courant électrique. On constate que le potentiel de Nernst a une valeur de 1.172V pour une température de fonctionnement de 338.15 K, tandis que les surtensions (d'activation, ohmique et par concentration) augmentent en fonction de la densité du courant électrique. Il est également à signaler que les pertes par activations sont plus significatives pour des faibles densités de courant, ceci est dû au taux de réaction électrochimique à la surface des électrodes qui est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour ces électrodes. Les pertes par concentration sont plus dominantes pour des hautes densités de courant, elles sont dues à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactifs. Les pertes ohmiques subissent une variation linéaire en fonction de la densité du courant électrique.

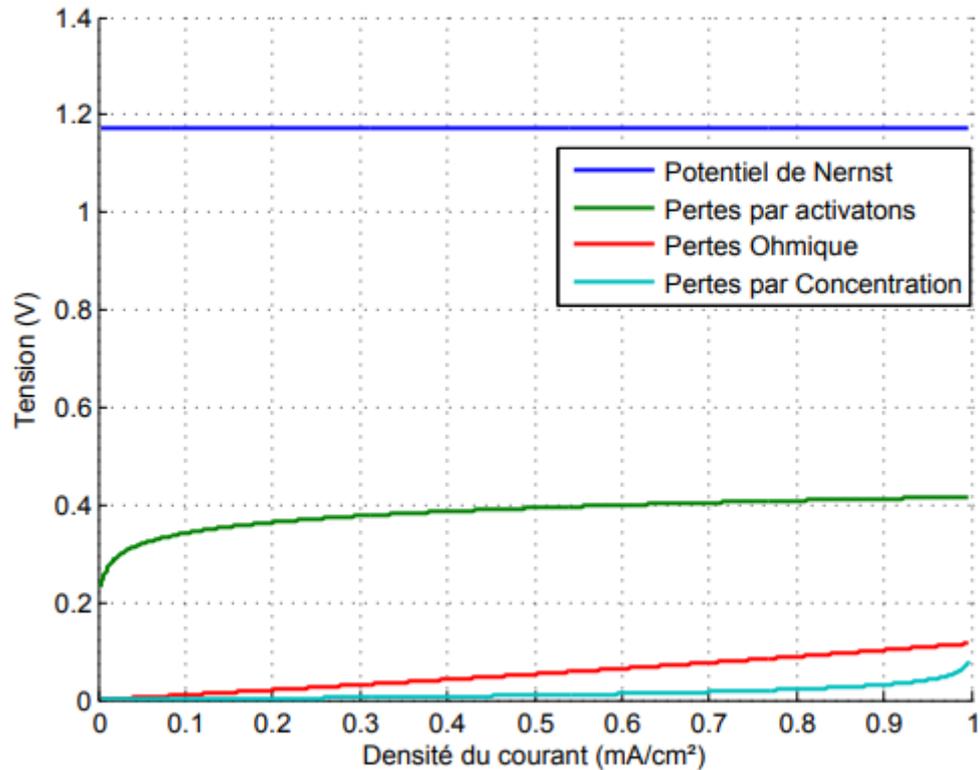


Figure 4.1 : Variation du potentiel de Nernst et des surtensions en fonction de la densité du courant.

Les figures (4.2) et (4.3) indiquent respectivement la variation de la tension d'une cellule unitaire et celle de l'ensemble des cellules (pile à combustible) en fonction du courant délivré. Les deux courbes peuvent être subdivisées en 3 domaines :

- Un domaine aux faibles courants (0 à 0.2 mA/cm²) pour lequel les résistances d'activation dominent
- Un domaine pour des courants intermédiaires (0.2 à 0.8 mA/cm²), pour lequel la résistance ohmique domine. Cette dernière est due à la résistance rencontrée par le flux d'ions dans l'électrolyte et à la résistance rencontrée par les électrons dans les électrodes.
- Un domaine pour des courants élevés (0.8 à 1 mA/cm²), dominé par la résistance au transport des réactifs.

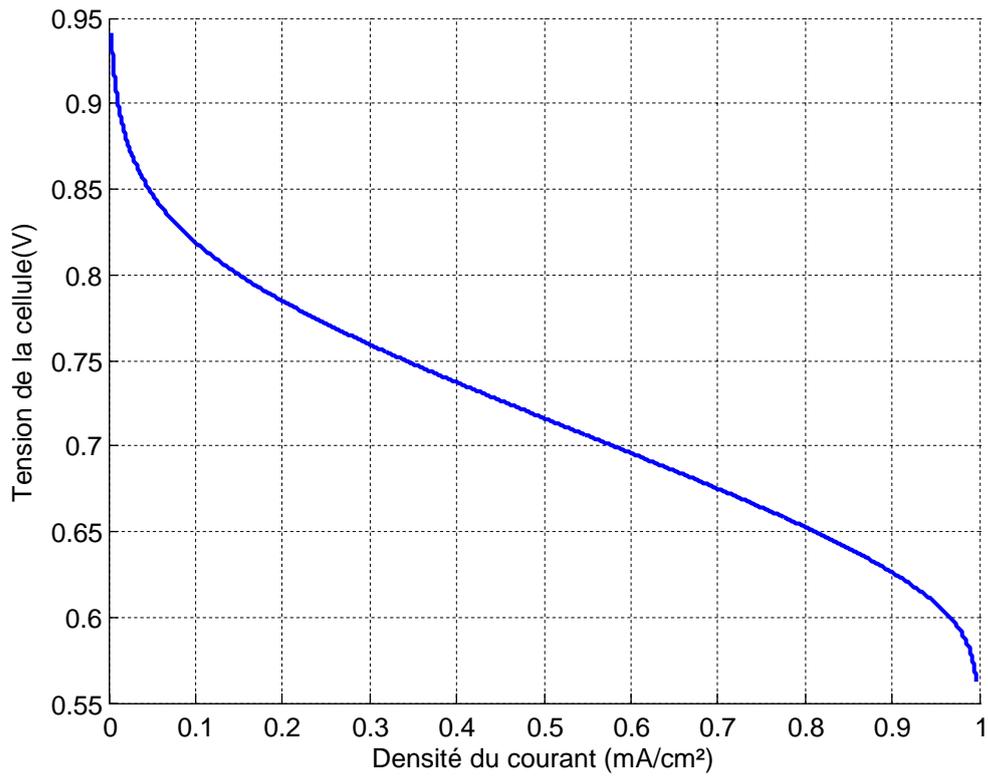


Figure 4.2 : Variation de la tension de la cellule en fonction de la densité du courant.

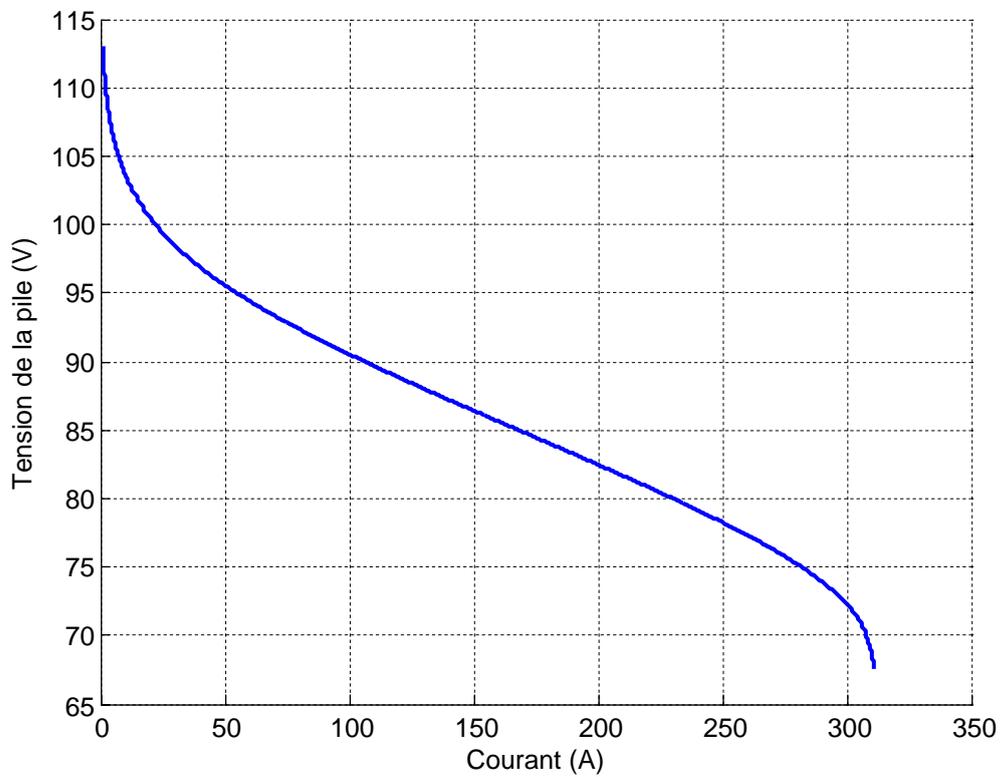


Figure 4.3 : Variation de la tension de la pile en fonction du courant électrique.

4.3. Effet des paramètres de fonctionnement sur le comportement de la PEMFC

Dans cette partie, les effets de la variation, de la température de fonctionnement, de la pression, de l'humidité relative ainsi que celui du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sont analysés.

- **Effet de la température de fonctionnement**

Afin d'illustrer l'effet de la température de fonctionnement, nous avons varié la température entre 303.15 k et 348.15 K avec un pas de 10, alors que, les autres paramètres de fonctionnement sont maintenus constant.

Les figures (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) et (4.8) montrent respectivement la variation de la tension de la pile, la puissance électrique, la puissance thermique le rendement électrique et le rendement thermique en fonction de la densité du courant, pour différentes température de fonctionnement.

On constate à partir de la figure (4.4) que l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la tension de la pile PEM. Ceci est dû principalement à la diminution des pertes de tension par activation car une température élevée permet de favoriser la réaction électrochimique.

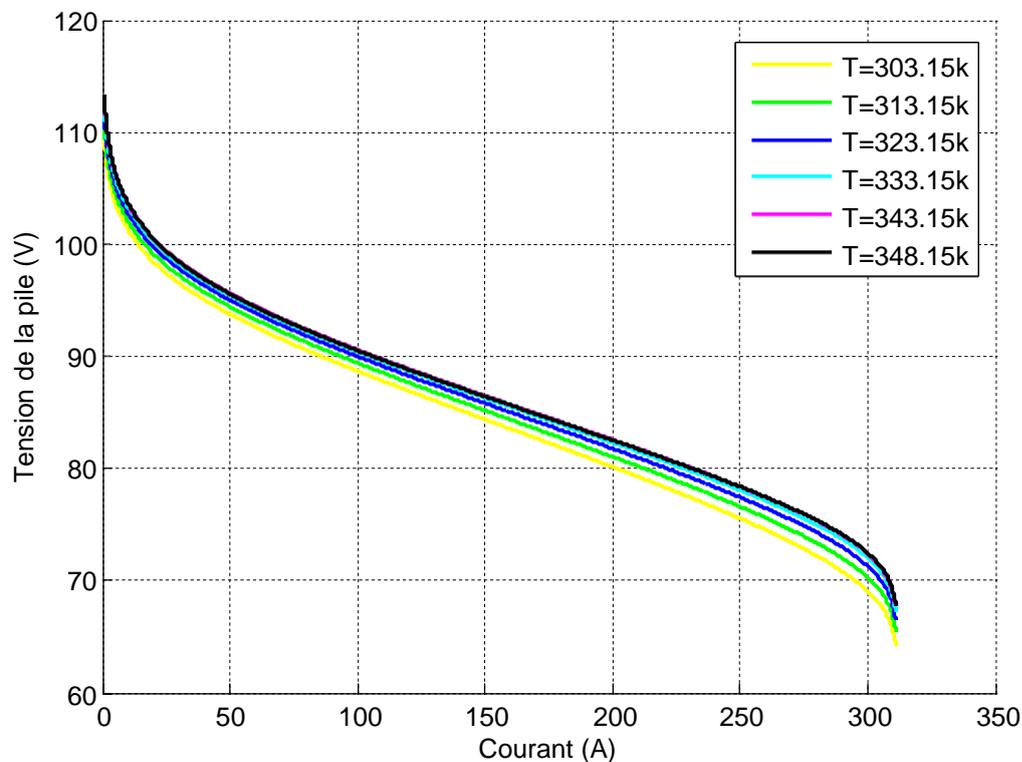


Figure 4.4 : Evolution de la tension de la pile pour différentes température.

On constate sur la figure (4.5) que l'augmentation de la température entraîne également une amélioration de la puissance électrique délivrée par la pile. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la tension électrique suite à la diminution des surtensions par activation. D'autre part, il est à noter que la puissance thermique subit une légère diminution (voir figure 4.6). Nous pouvons conclure que toute élévation de la puissance électrique est accompagnée par une baisse de puissance thermique.

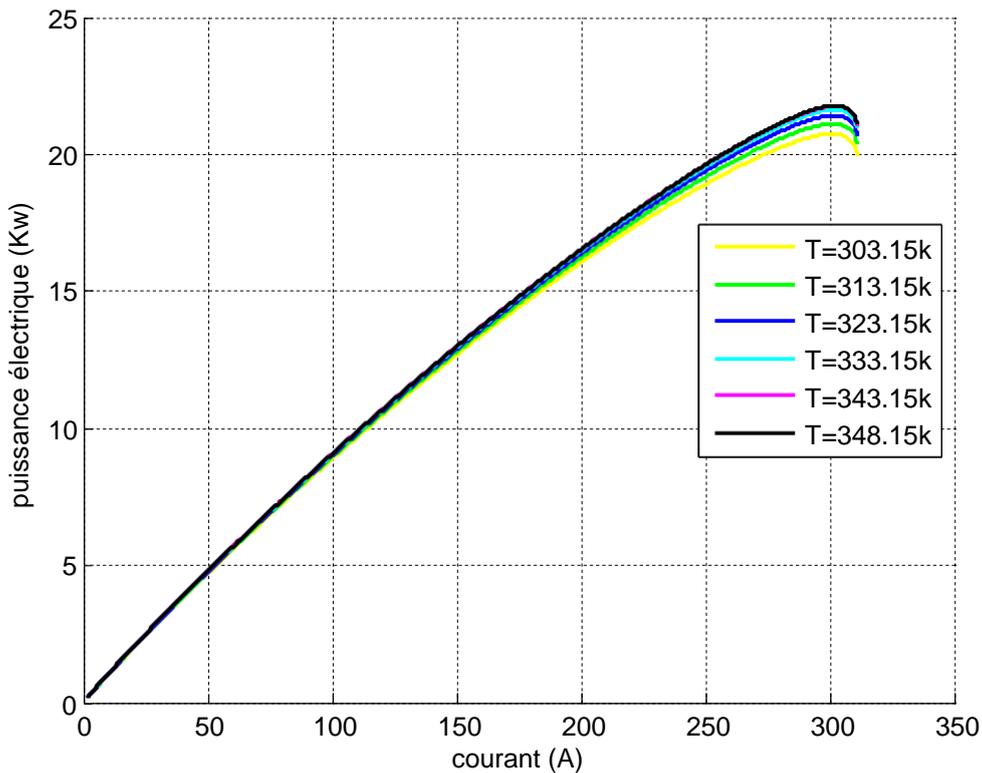


Figure 4.5 : Effet de la température sur la puissance électrique de la pile.

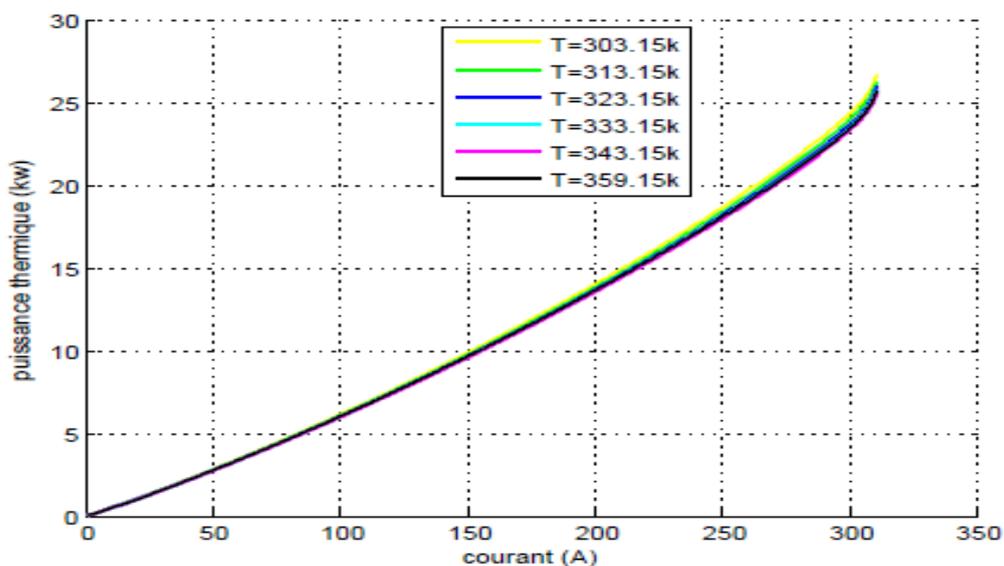


Figure 4.6 : Effet de la température sur la puissance thermique de la pile.

On constate sur la figure (4.7) que l'élévation de la température provoque une amélioration du rendement électrique de la pile. Ceci peut être expliqué aussi par l'augmentation de la puissance électrique délivrée suite à la diminution des surtensions par activation. D'autre part, il est à noter que le rendement thermique subit une légère diminution (voir figure 4.8). Nous pouvons conclure que toute élévation du rendement électrique est accompagnée par une baisse du rendement thermique.

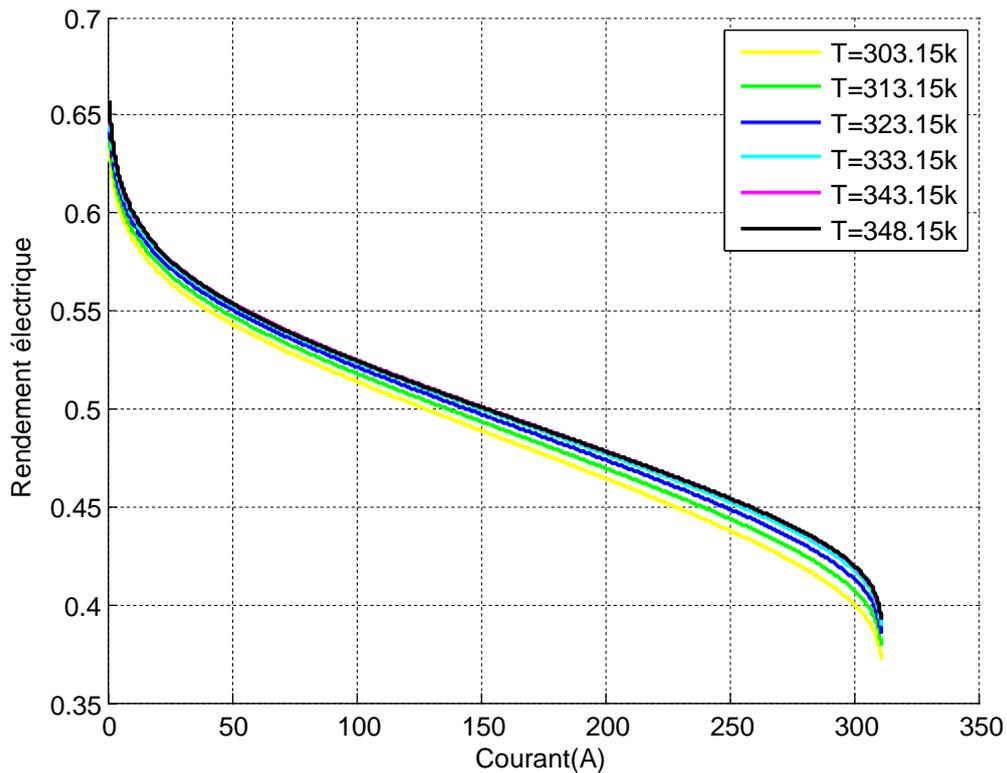


Figure 4.7 : Effet de la variation de la température sur le rendement électrique de la pile.

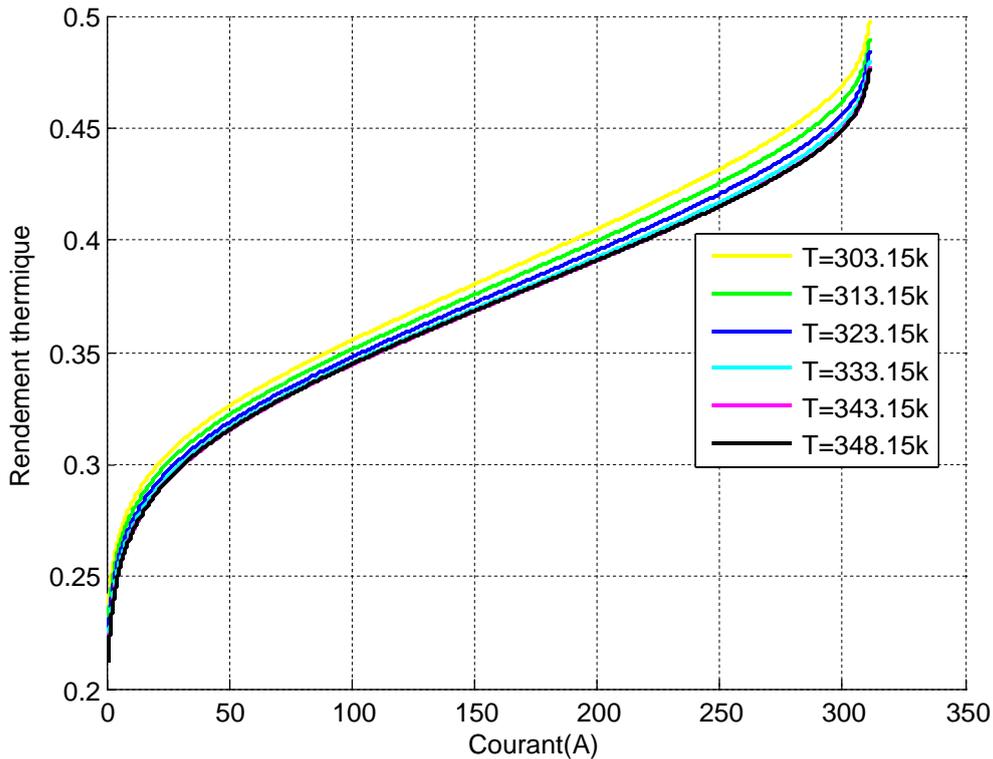


Figure 4.8: Effet de la température sur le rendement thermique de la pile.

- **Effet de la pression de fonctionnement**

Nous avons varié la pression entre 1.2 bar et 3.2 bar avec un pas de 0.4, alors que, les autres paramètres de fonctionnement sont maintenus constants et correspondent au cas de base.

Les figures (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) et (4.13) montrent respectivement la variation de la tension de la pile, la puissance électrique, la puissance thermique, le rendement électrique ainsi que le rendement thermique, en fonction de la densité du courant.

On conclut à partir de la figure (4.9) que l'augmentation de la pression à la cathode et celle de l'anode entraîne une augmentation de la tension de la pile PEM. Ceci est dû principalement au fait que l'élévation de la pression anodique permettras un débit important de l'hydrogène, d'où un meilleure transport de protons à travers la membrane, alors que, une pression élevée d'air humidifier à la cathode entraîne une meilleure humidification de la membrane.

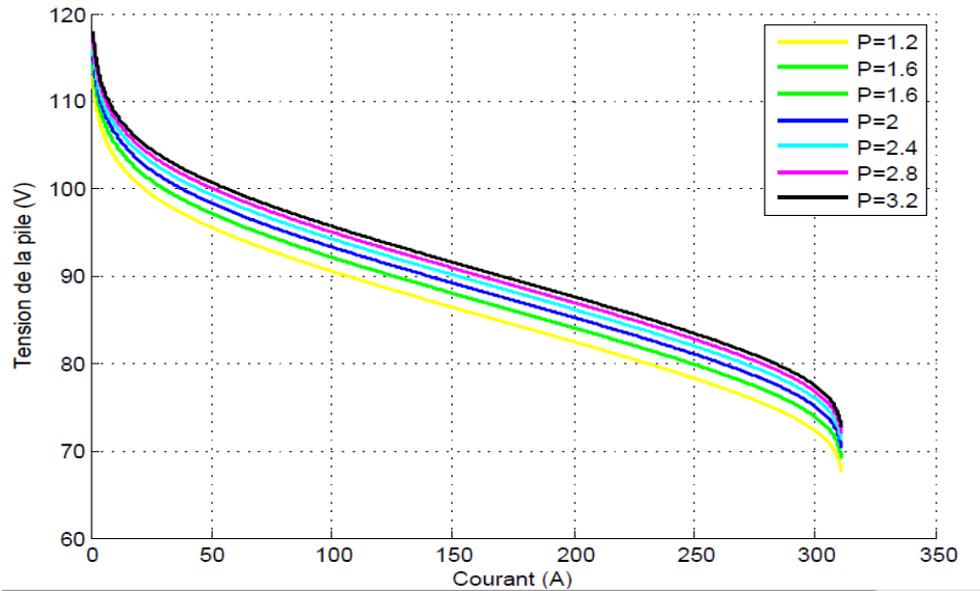


Figure 4.9 : Effet des pressions sur la tension de la pile.

On constate sur la figure (4.10) que l'augmentation de la pression conduit à une meilleure puissance électrique délivrée par la pile. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la tension électrique. La puissance thermique subit une légère diminution (voir figure 4.11). Nous pouvons exprimer ce fait par : toute élévation de la puissance électrique est accompagnée par une baisse de puissance thermique.

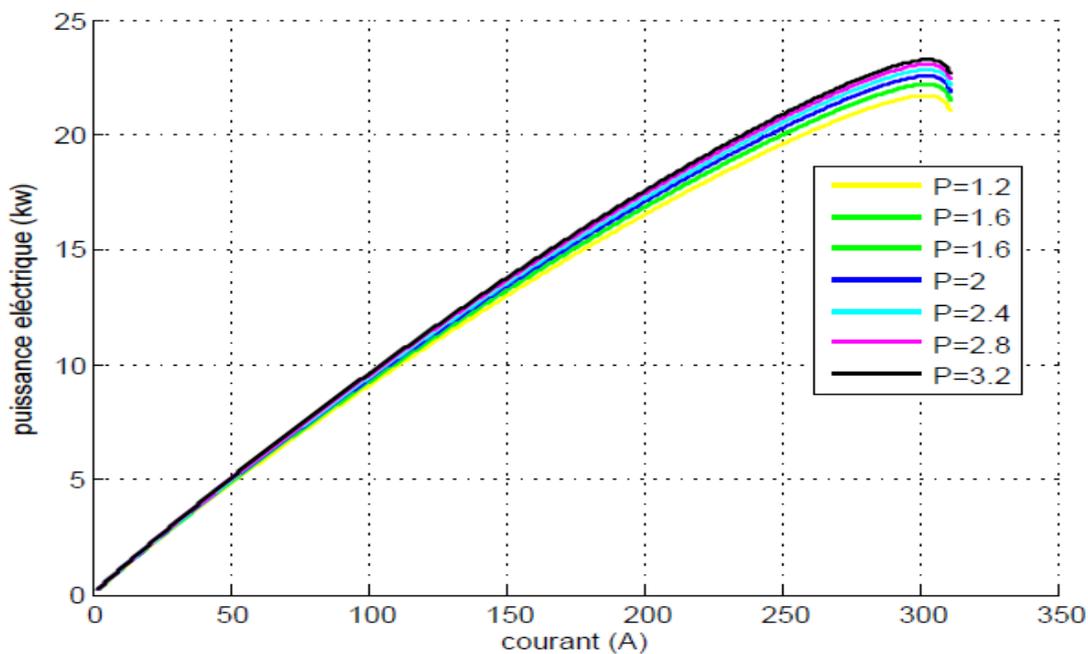


Figure 4.10 : Effet des pressions sur la puissance électrique de la pile.

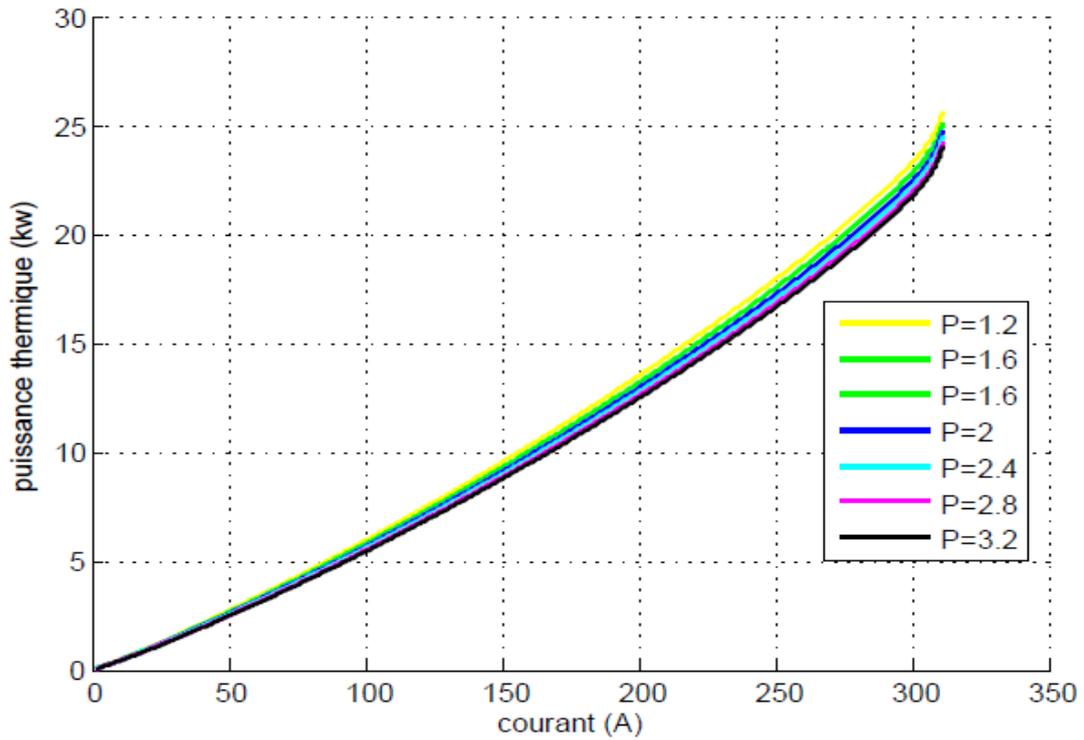


Figure 4.11 : Effet des pressions sur la puissance thermique de la pile.

D'après la figure (4.12) on conclut que l'élévation de la pression provoque une amélioration du rendement électrique de la pile. Ceci peut être expliqué aussi par l'augmentation de la de la puissance électrique délivrée. Le rendement thermique subit une légère diminution (voir figure 4.13). Nous pouvons noter que toute élévation du rendement électrique est suivie par une baisse de rendement thermique.

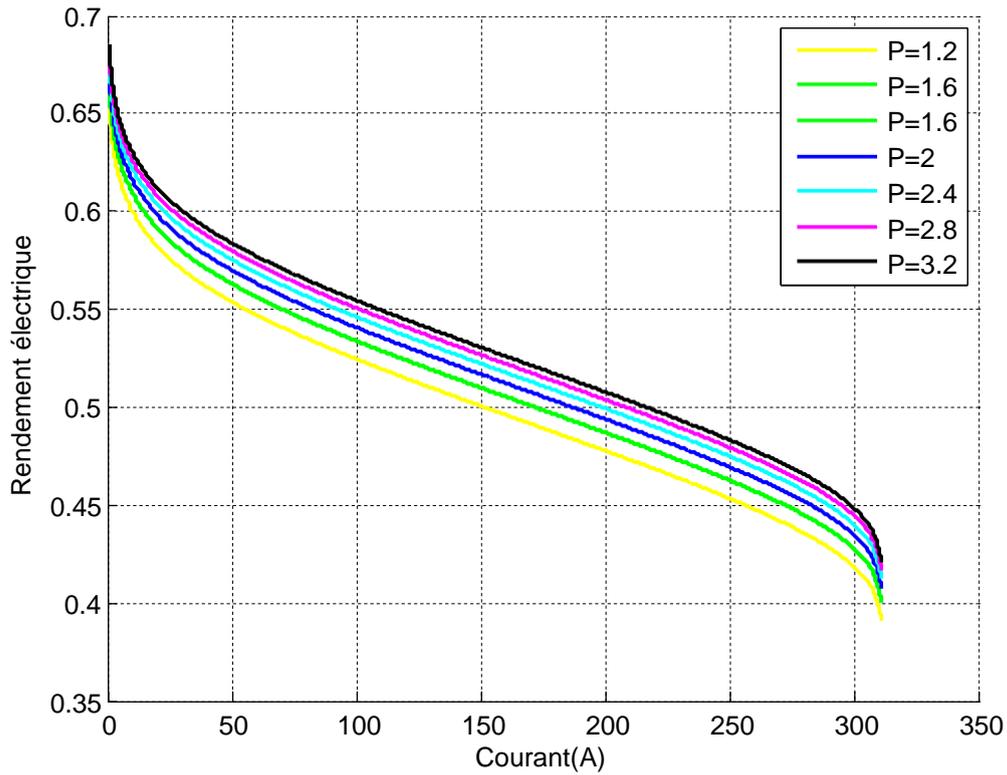


Figure 4.12 : Effet des pressions sur le rendement électrique de la pile.

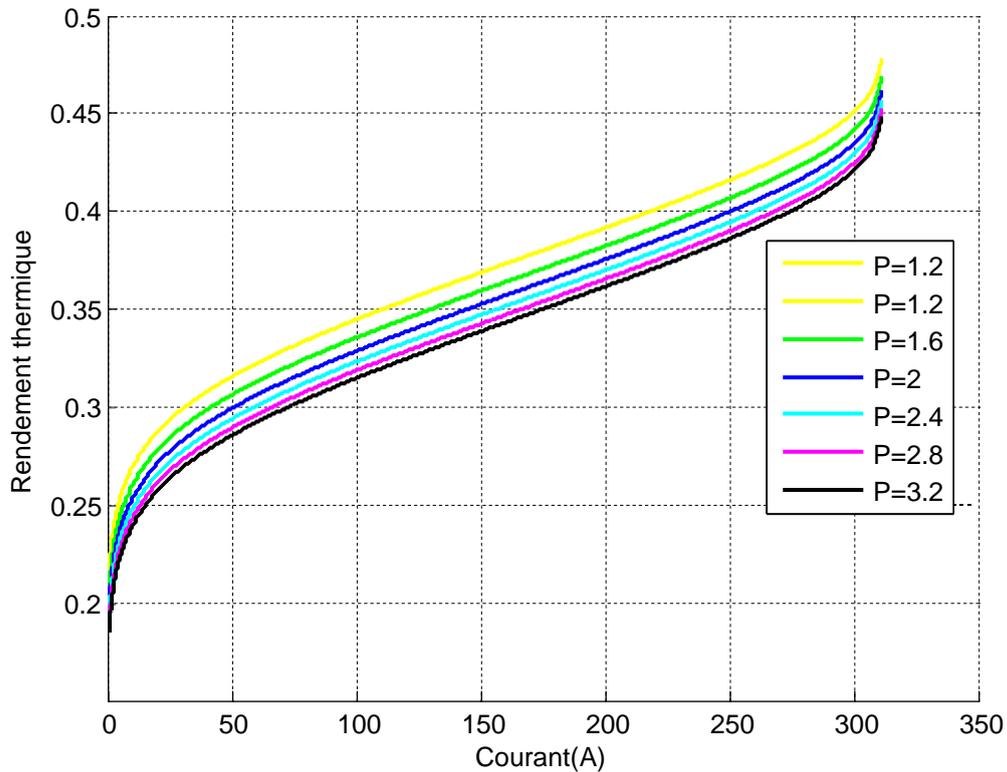


Figure 4.13 : Effet des pressions sur le rendement thermique de la pile.

- **Effet de la variation de l'humidité relative**

Nous avons varié humidité relative entre 0.5 et 1 avec un pas de 0.25, alors que, les autres paramètres de fonctionnement sont maintenus constants.

Les figures (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) et (4.18) montrent respectivement la variation de la tension de la pile, la puissance électrique, la puissance thermique, le rendement électrique et le rendement thermique, en fonction de la densité du courant.

L'examinassions des résultats obtenus montre que lorsque l'équilibre d'humidité entre l'anode et la cathode est maintenue, la tension, les puissances ainsi que le rendement électrique et thermique sont pratiquement les mêmes une avec très légère variation, toutefois, il est indispensable de faire humidifier la pile afin d'éviter la fissuration de la membrane et la surchauffe de la pile.

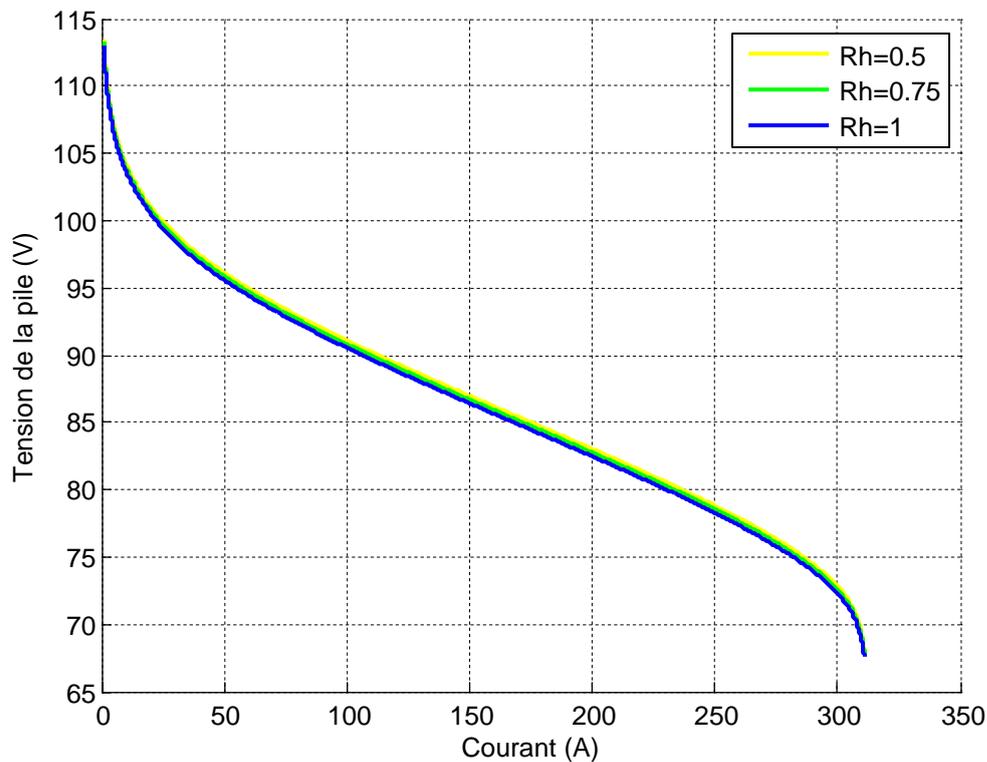


Figure 4.14 : Effet du de l'humidité relative sur la tension de la pile.

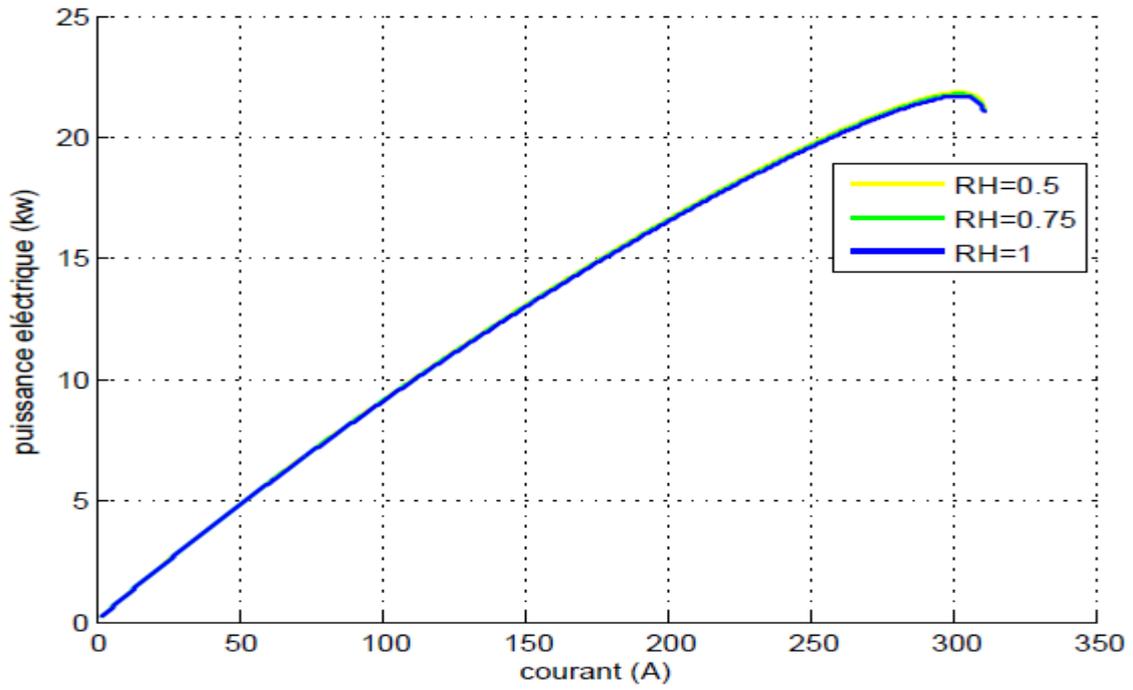


Figure 4.15 : Effet de l'humidité relative sur la puissance électrique de la pile.

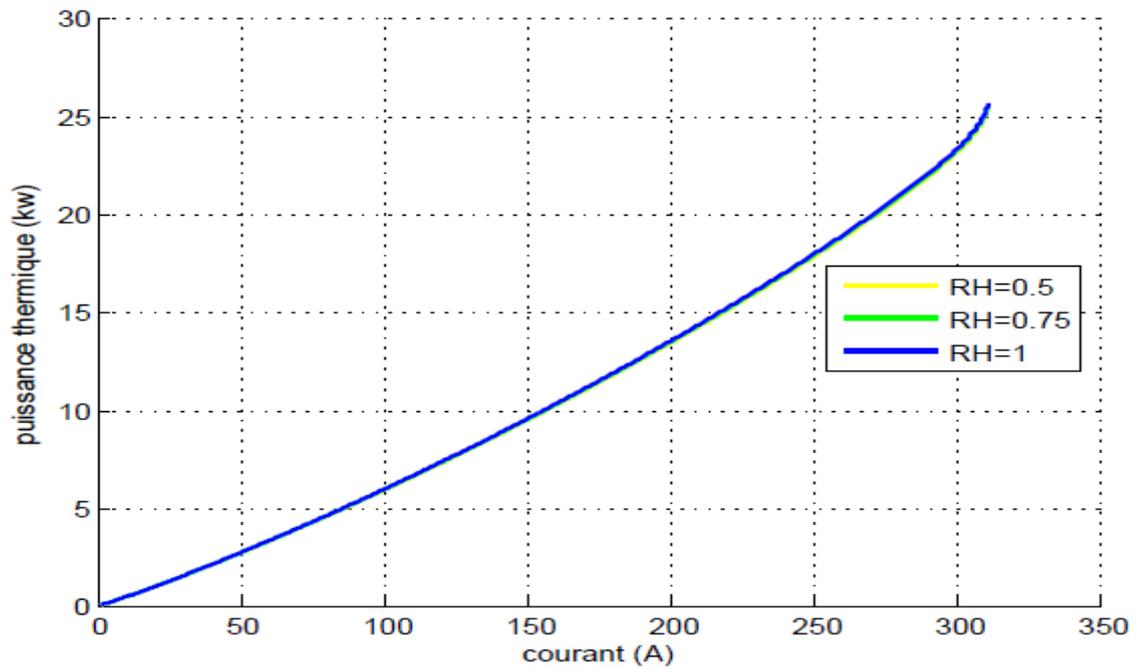


Figure 4.16 : Effet du de l'humidité relative sur la puissance thermique de la pile.

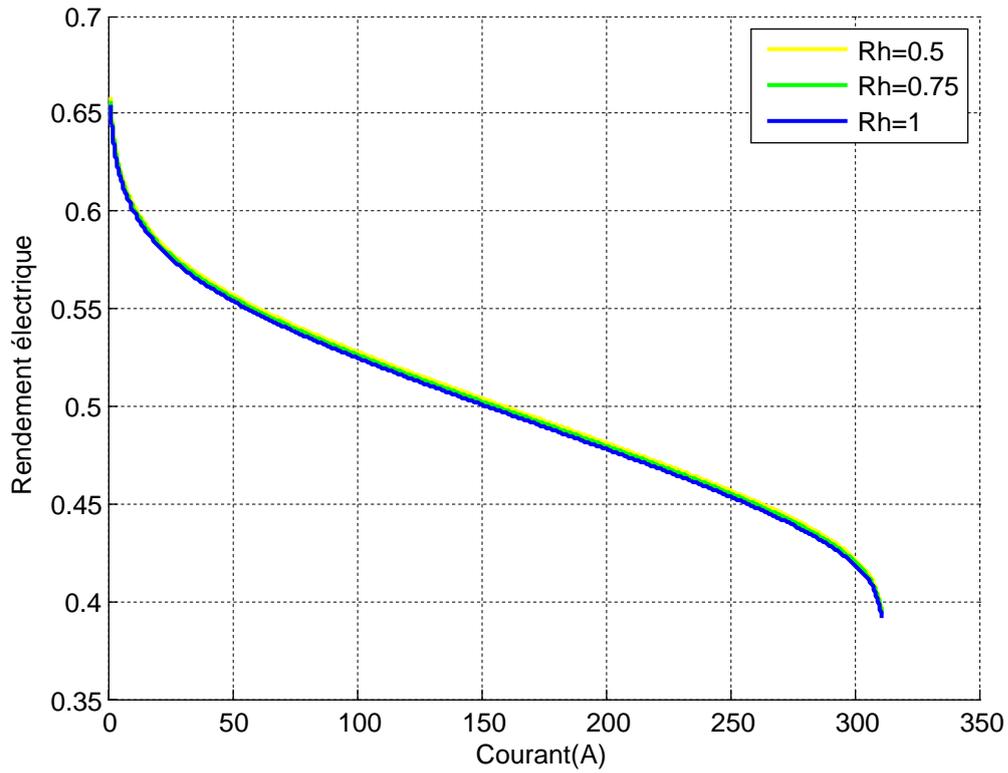


Figure 4.17 : Effet du de l'humidité relative sur le rendement électrique de la pile.

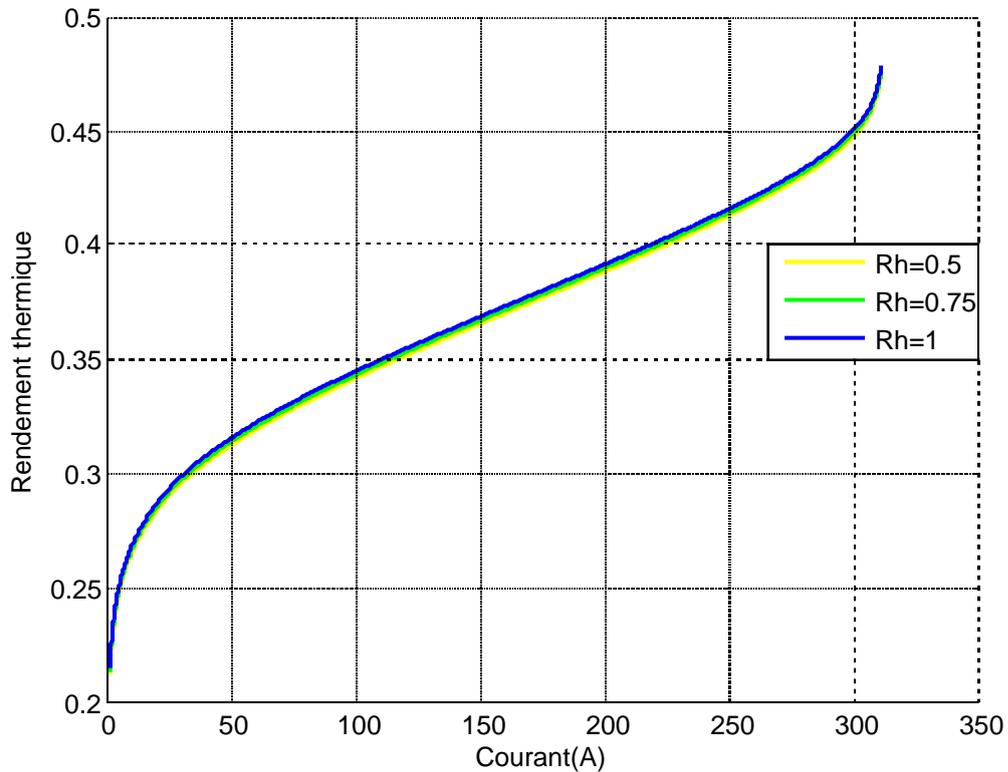


Figure 4.18 : Effet du de l'humidité relative sur le rendement thermique de la pile.

- **Effet de la variation du débit d'hydrogène**

Nous avons varié le coefficient stœchiométrique de l'hydrogène de 1.15 jusqu'à 1.8 avec un pas de 0.15, alors que, les autres paramètres de fonctionnement sont maintenus constants.

Les figures (4.19), (4.20), (4.21), (4.22) et (4.23) montrent respectivement la variation de la tension de la pile, puissance électrique, la puissance thermique, le rendement électrique et le rendement thermique en fonction de la densité du courant.

A partir des figures (4.19), (4.20) et (4.21) on remarque que la variation du débit d'hydrogène n'affecte pas la tension de la pile ainsi que les puissances électrique et thermique délivrées.

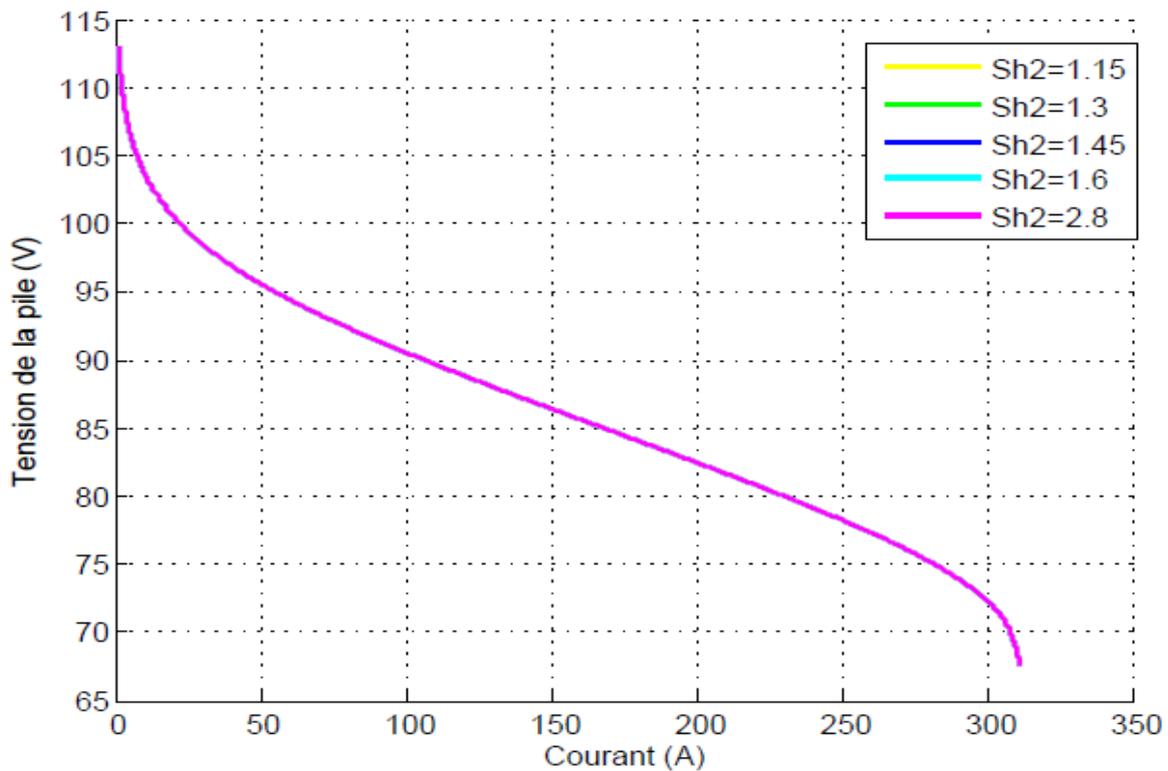


Figure 4.19 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la tension de la pile.

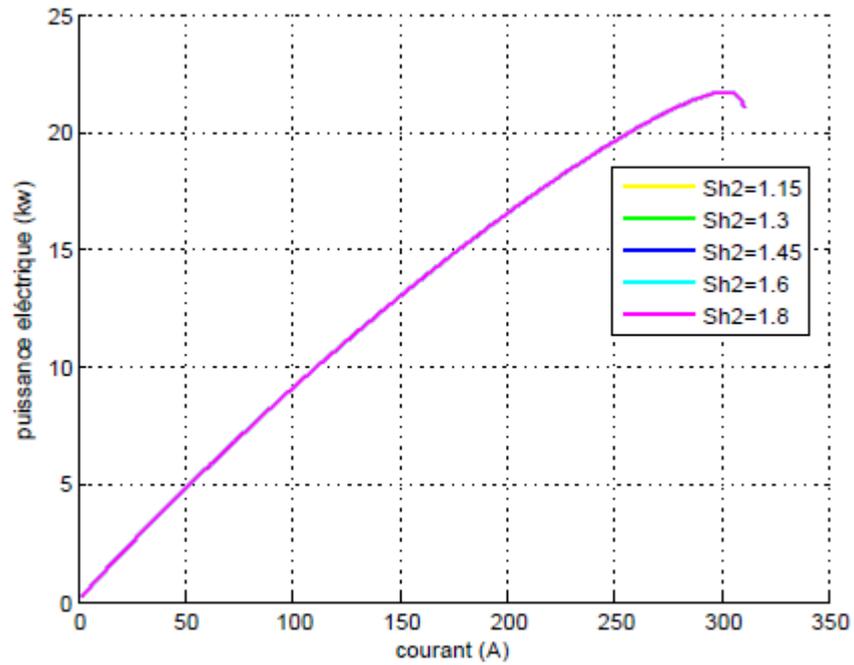


Figure 4.20 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la puissance électrique de la pile.

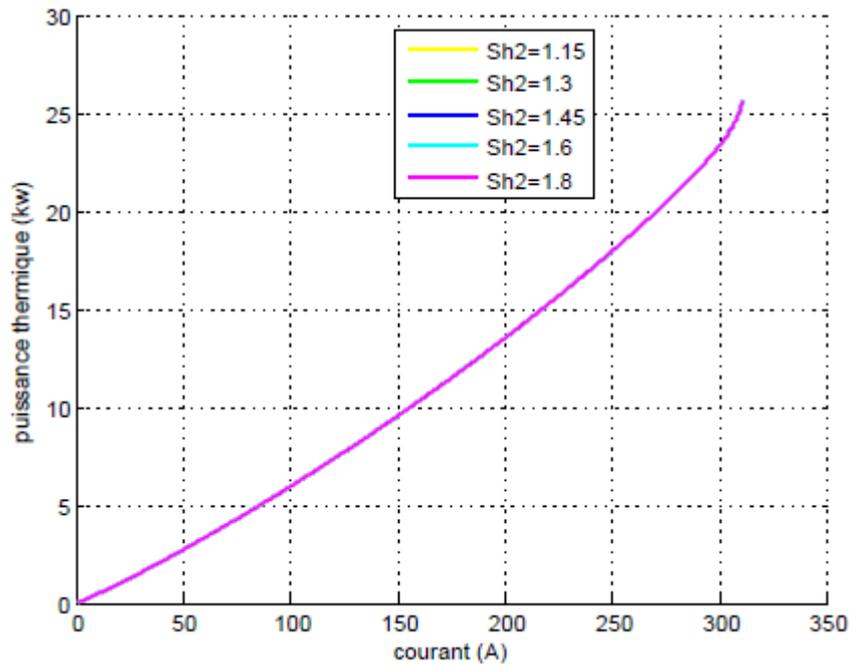


Figure 4.21 : Effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur la puissance thermique de la pile.

Les figures (4.22) et (4.23) illustrent l'effet de coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur les rendements électrique et thermique. On remarque qu'à chaque fois qu'on augmente le débit d'hydrogène, le rendement électrique diminue tandis que le rendement thermique augmente.

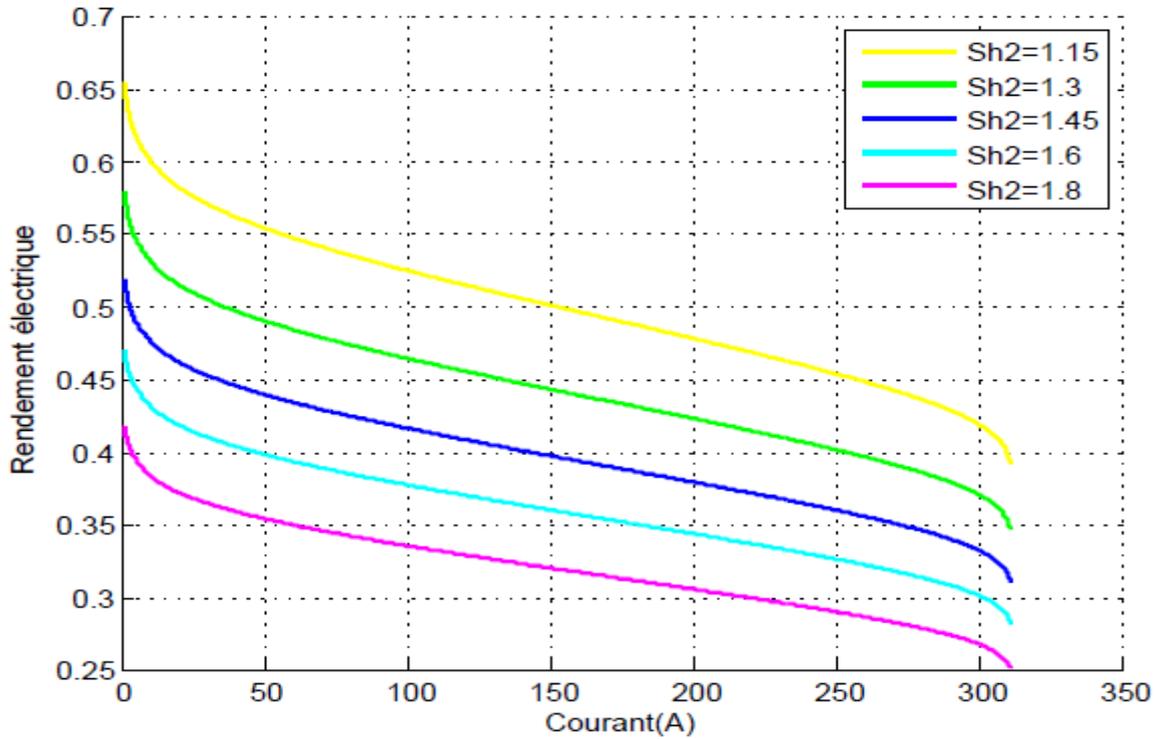


Figure 4.22 : Effet du coefficient stœchiométrique d'H₂ sur le rendement électrique.

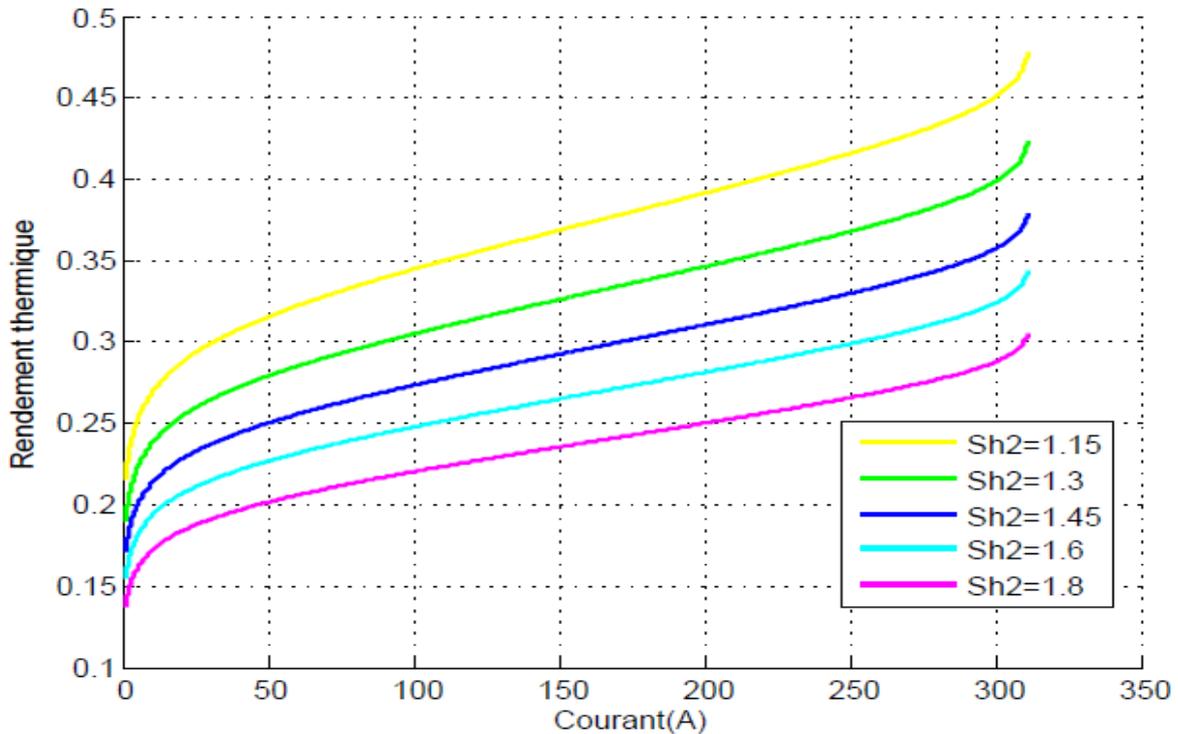


Figure 4.23 : Effet du coefficient stœchiométrique de d'H₂ sur le rendement thermique.

4.4. Choix du point nominal de fonctionnement

Pour obtenir les caractéristiques voulues en tension et courant les cellules de pile PEMFC doivent opérer autour d'un point de fonctionnement optimum choisi sur leur courbe de polarisation. L'intensité maximale de la pile est généralement la valeur du courant pour laquelle nous passons de la région de résistance ohmique à la région de diffusion (polarisation de concentration, (Figure 4.24), ce qui représente la zone typique de fonctionnement d'une pile à combustible [38]. La tension de la pile est proportionnelle au nombre de cellules en série N_{cell} et à la tension de fonctionnement des cellules correspondant. Par conséquent, l'obtention d'une tension élevée en pleine charge nécessite un nombre très élevé de cellules élémentaires.

La tension commune de conception de cellule PEM est de 0,7 volts, mais cette valeur peut varier entre 0,6 et 0,8 volts selon le courant électrique tiré de la réaction électrochimique [38, 39].

En raison des fluctuations de charge typiques aux piles à combustible destinées aux voitures, nous estimons qu'une tension moyenne des cellules de 0,7 volts peut être représentative pour des cycles de conduite standard [39].

La figure 4.24 montre deux positions pour le point de fonctionnement d'une cellule de pile PEMFC avec leurs énergies : électrique et calorifique perdue. En pratique, deux configurations pour la pile de type PEMFC doivent être différenciées [40].

- **Disposition au point « A »**

Pour de faibles densités de courant, correspond une tension de cellule élevée. Par conséquent, un haut rendement thermique défini par rapport à la puissance calorifique. Afin d'obtenir la quantité de puissance requise dans ces conditions, la surface active des électrodes sera surdimensionnée, ce qui constitue un poids, volume et coût plus significatifs, puisque les coûts matériels sont directement proportionnels au secteur actif des cellules.

Ainsi, concevoir une pile PEMFC pour un niveau de rendement plus élevé augmente les frais financiers, mais diminue le coût du carburant.

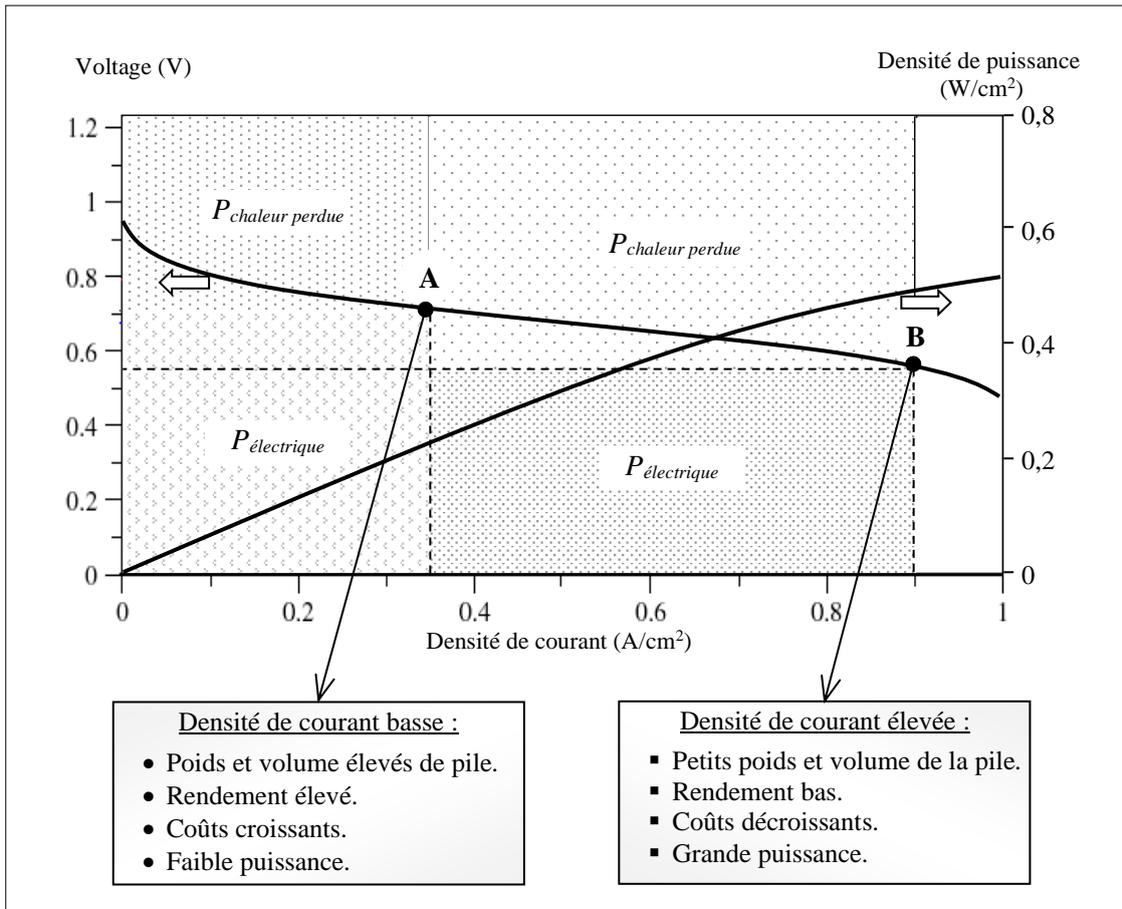


Figure 4.24 : Deux positions du point nominal d’opération d’une cellule PEMFC avec leurs atouts et désavantages [56].

• **Disposition au point « B »**

La même pile fonctionnant sous une tension plus basse devient compacte, légère et bon marché et pourra générer une grande densité de courant, avec une puissance disponible beaucoup plus importante mais un rendement plus faible. En même temps, il faut noter que le fonctionnement des cellules sous charge élevée (forte intensité de courant) réduit la durée de vie de la pile PEMFC [56].

Le choix du point de fonctionnement constitue donc un compromis entre rendement élevé et puissance élevée. Pour les applications automobiles, le point de fonctionnement nominal d’une pile est choisi assez nettement en dessous de la densité de courant offrant la meilleure densité de puissance. Cela donne un fonctionnement nominal autour de 0.6V par cellules. Pour les applications stationnaires, le rendement est en général privilégié par rapport à la puissance et les tensions de cellule peuvent être plus élevées.

Dans notre travail la pile à combustible étudiée est destinée pour entraîner un véhicule de traille moyenne. Pour cela le point de fonctionnement nominal choisi correspond à 0.7 volts. Dans ce qui suit nous présentons les résultats obtenus.

La figure (4.25) montre l'évolution de la puissance en fonction de la température. On remarque que l'augmentation de la température entraîne une augmentation des puissances électrique et thermique. Ces améliorations sont dues au fait de l'augmentation du courant électrique même si la tension est fixée à 0.7 volts.

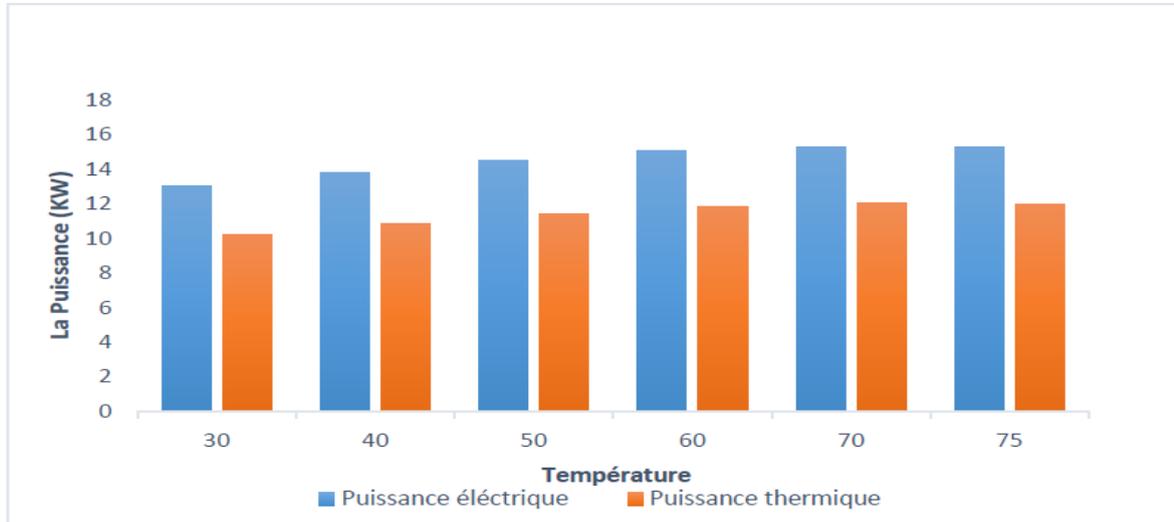


Figure 4.25 : Evolution de la puissance en fonction de la température.

A partir de la figure (4.26), on constate que l'augmentation de la température de fonctionnement de la PEMFC n'induit aucun effet sur le rendement électrique et thermique. Le rendement électrique est de 48.70% alors que le rendement thermique est de 38.26%.

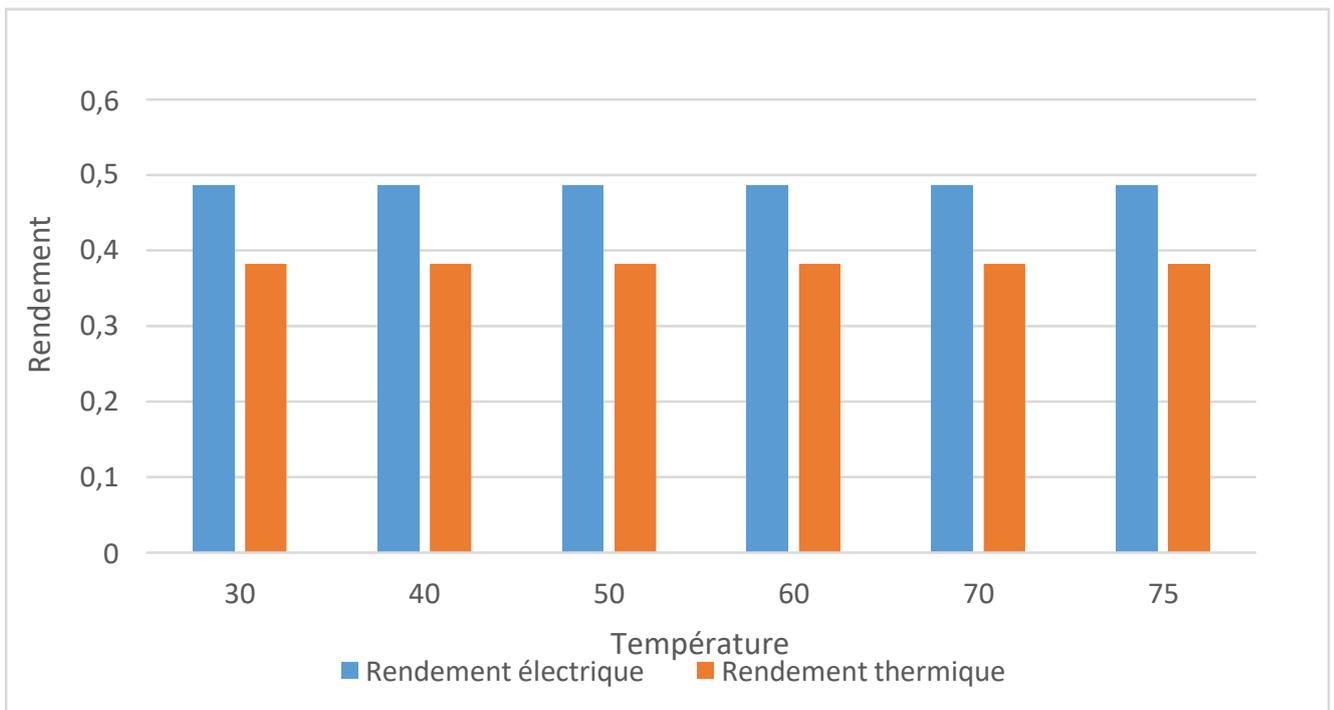


Figure 4.26 : Evolution du rendement en fonction de la température.

L'effet de la variation de pression de fonctionnement sur la puissance électrique et thermique pour le point de fonctionnement (0.7 Volts) est illustré par la figure (4.27). Les résultats obtenus montrent une augmentation considérable des deux puissances en passant d'une pression de 1.2 bar à une pression de 3.2 bar. Pour une pression de 3.2 bar la puissance électrique maximale est de 20.48 kW alors que celle de la puissance thermique est de 16.09 kW.

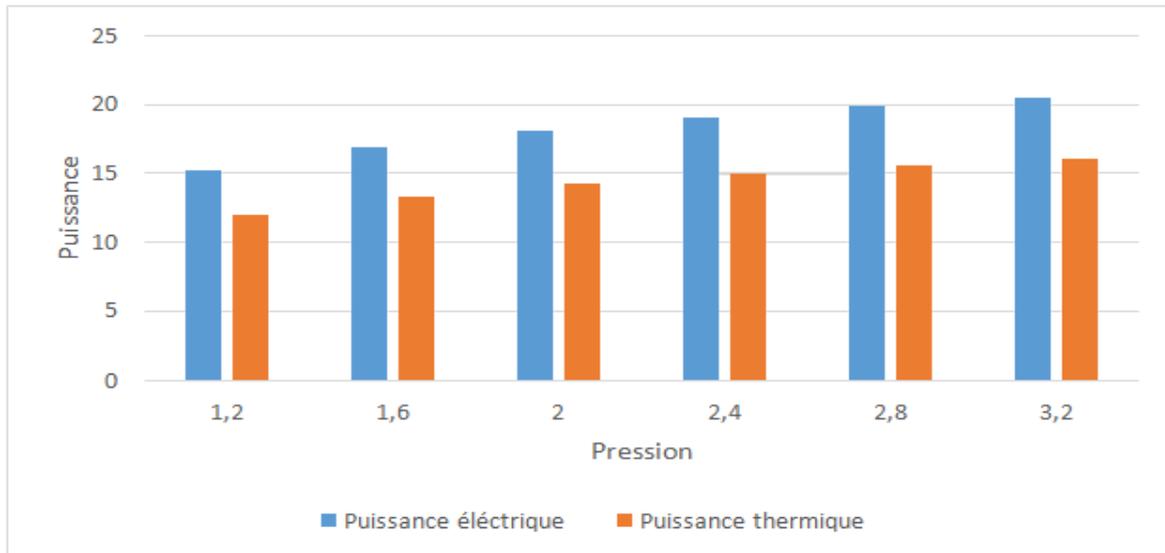


Figure 4.27 : Évolution la puissance en fonction de la pression.

La variation de pression de fonctionnement (voir figure 4.28) toute on maintenant la tension de la cellule à 0.7 volts n'a aucun effet sur le rendement thermique et électrique de la pile.

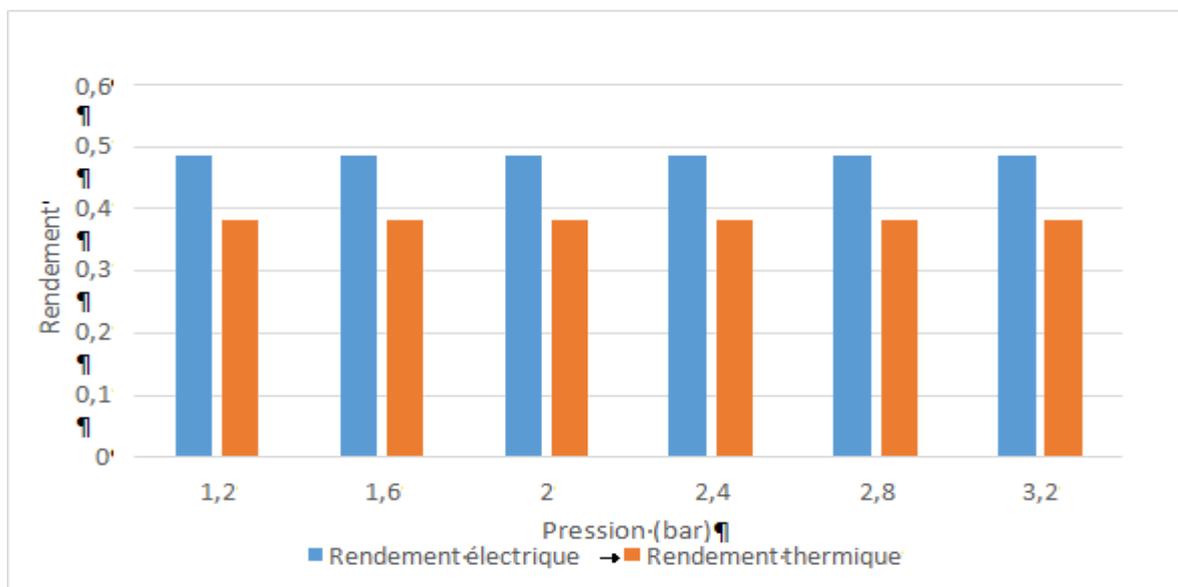


Figure 4.28 : rendement en fonction de la pression.

L'effet de la variation de l'humidité relative sur les rendements électrique et thermique pour le point de fonctionnement (0.7 Volts) est discuté par la figure (4.29). Les résultats obtenus montrent que les rendements ne change pas en variant l'humidité relative de 0.5 au 1.

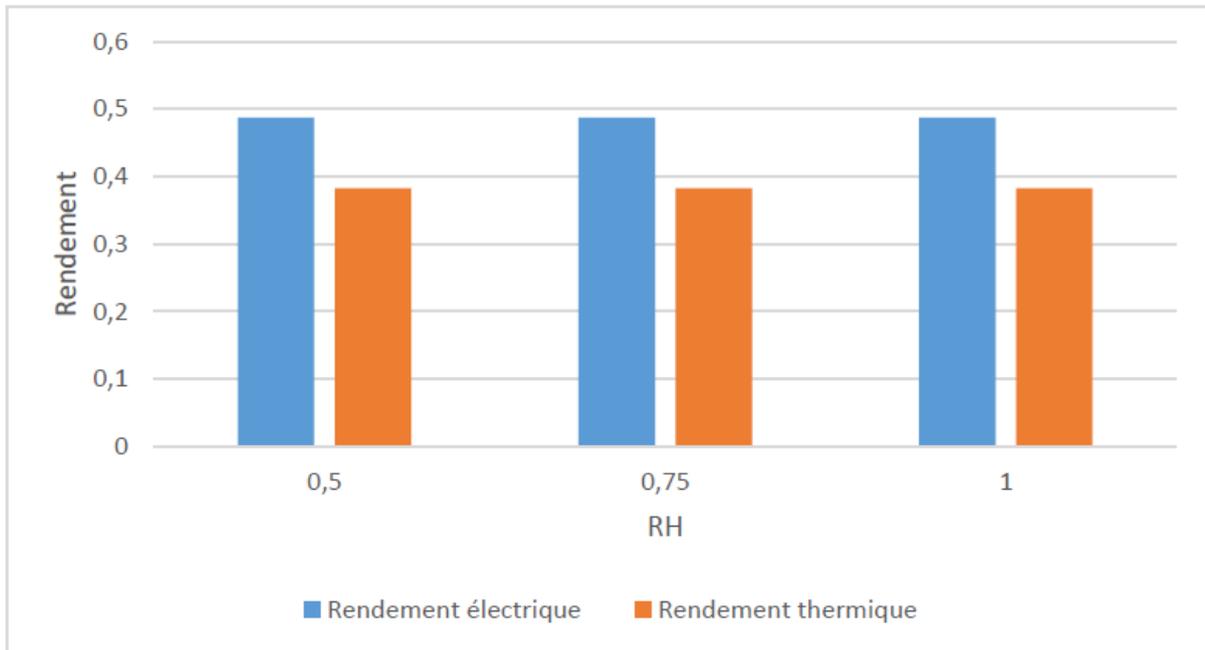


Figure4.29 : la variation du rendement en fonction du R_{H2} .

L'effet de la variation de l'humidité relative sur les puissances électrique et thermique pour le point de fonctionnement (0.7 Volts) est donné par la figure (4.30). Une légère diminution est obtenue lorsque l'humidité relative augmente.

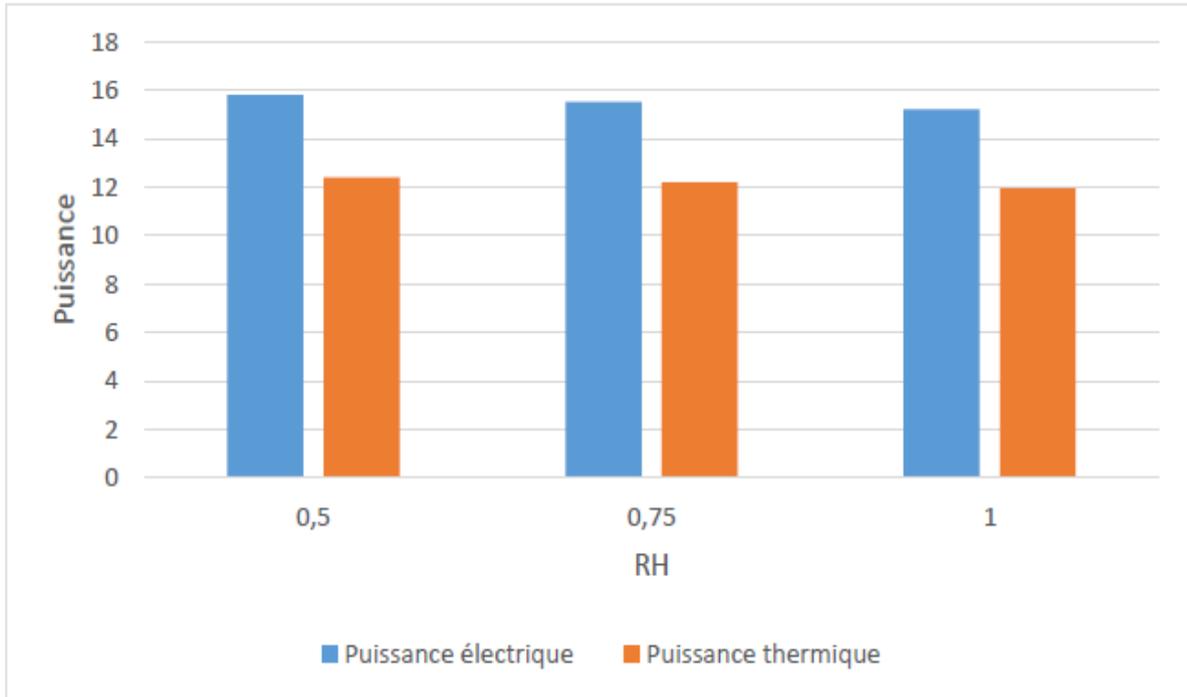


Figure 4.30 : la variation de la puissance en fonction de la R_{H_2} .

Dans la figure (4.31) on représente l'effet du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène sur les deux puissances électrique et thermique. Ces derniers gardent leur valeur malgré l'augmentation du coefficient stœchiométrique de l'hydrogène de 1.15 au 1.8.

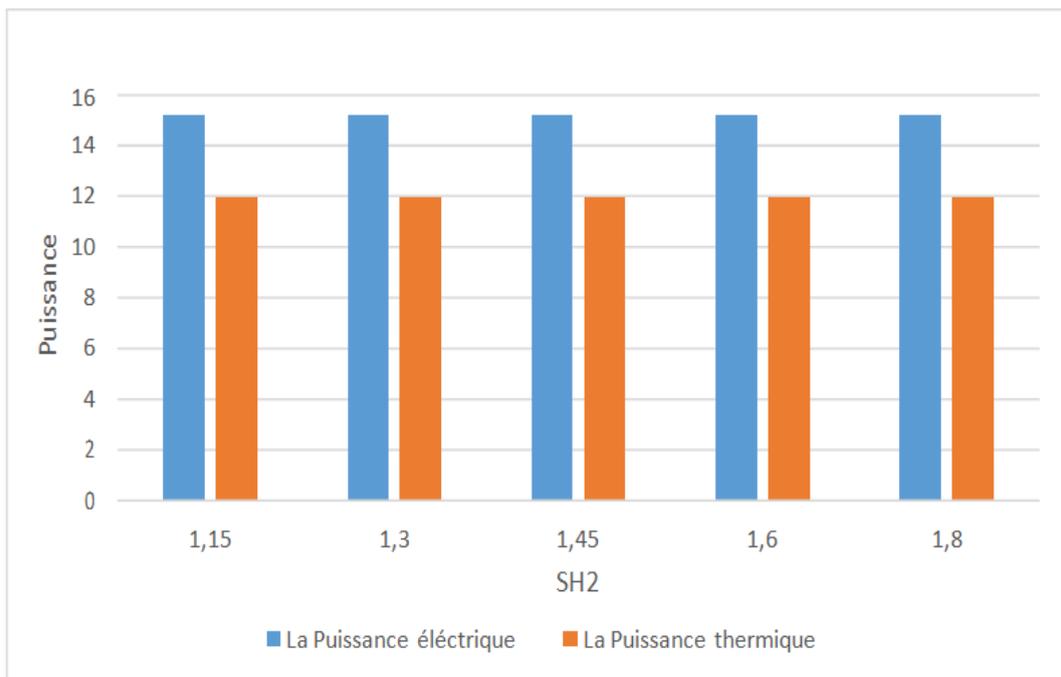


Figure 4.31 : puissance en fonction du S_{H_2} .

La figure (4.32) montre l'effet de changement coefficient stœchiométrique de l'hydrogène de 1.15 au 1.8 sur les rendements électrique et thermique. Les résultats montrent une diminution des deux rendements en passant d'une valeur de 48.7% à 31.11% pour la puissance électrique et de 38.26% à 24.44 % pour le rendement thermique.

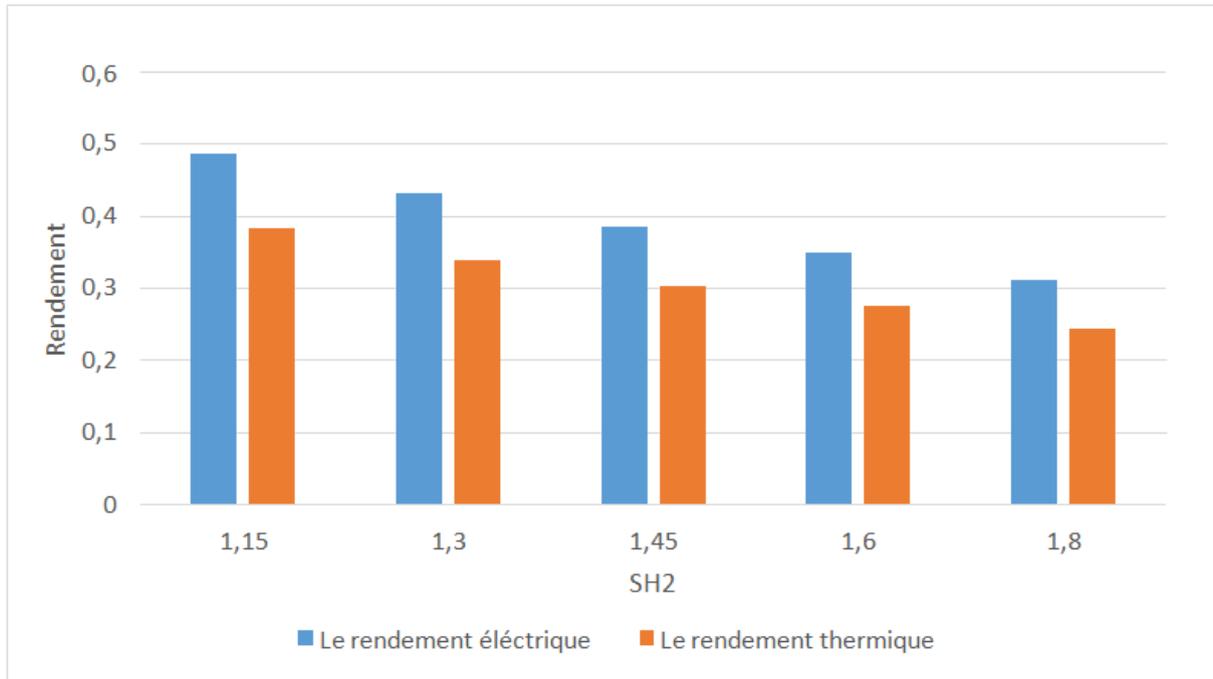


Figure 4.32 : rendement en fonction du SH₂

4.5. Conclusion :

Après avoir choisi un point de fonctionnement de la pile sur la courbe caractéristique (courant tension) une analyse paramétrique nous a permis de conclure que les meilleures performances de la PEMFC peuvent être obtenues à des températures et des pressions élevées avec une humidité relative et un débit d'hydrogène adéquats.

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette étude est l'évaluation des performances d'une pile à combustible de type PEMFC. Cette pile est destinée pour la propulsion d'un véhicule de taille moyenne. En premier lieu un modèle mathématique est adopté, ensuite un programme de calcul est élaboré pour simuler le comportement de la pile. Une fois que les résultats du cas de base sont analysés, une étude paramétrique autorisant l'analyse du comportement de la pile PEMFC est effectuée.

A travers les résultats obtenus nous avons conclu que les meilleures performances de la pile peuvent être obtenues pour des températures et des pressions de fonctionnement élevées avec une humidité relative et un débit d'hydrogène adéquats. De plus nous n'avons constaté que la variation du débit d'hydrogène a un impact considérable sur le rendement thermique et électrique du système.

La pile étudiée permet de délivrer une puissance de 20.48 KW avec un rendement électrique de 48.7% (pour une température de fonctionnement de 338.15 K, une pression opératoire de 3.2 bars un coefficient stéréométrique d'hydrogène de 1.2 et une humidité relative de 100%) ce qui est très appréciable pour les applications automobiles.

Références

- [1] Hwang, J. J., & Hwang, H. S. (2002). Parametric studies of a double-cell stack of PEMFC using Grafoil™ flow-field plates. *Journal of Power Sources*, 104(1), 24-32.
- [2] Yin, KM (2005). Étude paramétrique de la cathode d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons à l'aide d'un modèle d'agglomérat. *Journal de la société électrochimique*, 152 (3), A583.
- [3] Alaefour, I., Karimi, G., Jiao, K. et Li, X. (2012). Mesure de la distribution de courant dans une pile à combustible à membrane échangeuse de protons avec différents arrangements d'écoulement - Une étude paramétrique. *Énergie appliquée*, 93, 80-89.
- [4] Reddy, EH, Monder, DS et Jayanti, S. (2013). Etude paramétrique d'un système de refroidissement externe pour une pile à combustible à membrane électrolyte polymère haute température. *Génie thermique appliqué*, 58 (1-2), 155-164.
- [5] Ferng, YM, Su, A. et Hou, J. (2014). Etude paramétrique pour améliorer les performances d'une PEMFC haute température basée sur PBI. *Conversion et gestion de l'énergie*,
- [6] Babu, ARV, Kumar, PM, & Rao, GS (2018). Étude paramétrique de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons pour l'étude des performances améliorées utilisées dans les véhicules à pile à combustible. *Journal d'ingénierie d'Alexandrie*,
- [7] Lee, JY, Lee, JH et Kim, TS (2019). Analyse thermo-économique de l'utilisation d'un cycle de Rankine organique pour la récupération de chaleur à la fois de la pile de cellules et du reformeur dans une PEMFC pour la production d'électricité. *Journal international de l'énergie hydrogène*, 44 (7), 3876-3890.
- [8] Chugh, S., Chaudhari, C., Sonkar, K., Sharma, A., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2020). Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance. *international journal of hydrogen energy*, 45(15), 8866-8874.
- [9] Li, Y., Ma, Z., Zheng, M., Li, D., Lu, Z. et Xu, B. (2021). Analyse et optimisation des performances d'un véhicule PEMFC haute température basé sur un algorithme d'optimisation par essaim de particules. *Membranes*, 11 (9), 691.
- [10] Li, Y., Shao, W., Ma, Z., Zheng, M. et Song, H. (2022). Analyse des performances d'un système HT-PEMFC avec des membranes 6FPBI dopées avec un liquide ionique

- polymère réticulable. *Journal international des sciences moléculaires*, 23 (17), 9618.
- [11] R. Galley and C. Gatignol, Rapport sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2001. n°3216.
- [12] L. Antoni, Cours : Les piles à combustible. Ecole Energies et Recherches, 2006.
- [13] Q. Li, et al., Approaches and Recent Development of Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cells Operating above 100°C. *Chemistry of Materials*, 2003. 15(26): p. 4896–4915.
- [14] J. Zhang, et al., High temperature PEM fuel cells. *J. Power Sources*, 2006. 160(2): p. 872–891.
- [15] S. Bose, et al., Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: Recent advances and challenges. *Progress in Polymer Science*, 2011. 36(6): p. 813–843.
- [16] F. Barbir. *PEM Fuel Cells : Theory and Practice*. Academic Press, second edition, 2012.
- [17] C. Turpin. Pile à combustible et composants électrochimiques de stockage : caractérisation, modélisation et mise en oeuvre dans des systèmes énergétiques, accreditation to supervise reasearch. Technical report, Institut National Polytechnique de Toulouse, January 2008.
- [18] M.-C. Pera, D. Hissel, H. Gualous, and C. Turpin. *Electrochemical Components*. John Wiley & Sons, 2013.
- [19] M.-C. Péra, D. Hissel, H. Gualous, and C. Turpin. *Composants électrochimiques*. Lavoisier, 2014.
- [20] J. Andre, Optimisation des propriétés de conduction électrique et de passivité d'acier inoxydable pour la réalisation de plaques bipolaires de pile à combustible de type PEMFC Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [21] M. Ji and Z. Wei, A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energies*, 2009. 2(4): p. 1057–1106.
- [22] S. Shimpalee, U. Beuscher, and J.W. Van Zee, Analysis of GDL flooding effects on PEMFC performance. *Electrochimica Acta*, 2007. 52(24): p. 6748–6754.
- [23] S. Litster and G. McLean, PEM fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources*, 2004. 130(1–2): p. 61–76.
- [24] Y. Paik, et al., Influence of water and degree of sulfonation on the structure and

dynamics of SPEEK studied by solid-state ^{13}C and ^1H NMR. *Polymer*, 2009. 50(12): p. 2664–2673.

[25] G. Alberti, et al., Polymeric proton conducting membranes for medium temperature fuel cells (110–160 degrees C). *J. Membr. Sci.*, 2001. 185(1): p. 73–81.

[26] M. Marrony, et al., Durability study and lifetime prediction of baseline proton exchange membrane fuel cell under severe operating conditions. *Journal of Power Sources*, 2008. 182(2): p. 469–475.

[27] T. Madden, et al., Degradation of Polymer–Electrolyte Membranes in Fuel Cells I. Experimental. *Journal of The Electrochemical Society*, 2009. 156(5): p. B657–B662.

[28] M. Aoki, H. Uchida, and M. Watanabe, Novel evaluation method for degradation rate of polymer electrolytes in fuel cells. *Electrochem. Commun.*, 2005. 7(12): p. 1434–1438.

[29] J. Healy, et al., *Aspects of the Chemical Degradation of PISA Ionomers used in PEM Fuel Cells*. 2005, WILEY–VCH Verlag. p. 302–308.

[30] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and T.J. Harris, ‘Performance Modelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I, Mechanistic Model Development’, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 142, N°8, 1995..

[31] M.W Fowler, R.F. Mann, J.C Amphlett, B.A. Peppley and P.R. Roberge, ‘Incorporation of Voltage Degradation into a Generalised Steady State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell’, *Journal of Power Sources*, Vol. 106, pp. 274 - 283, 2002.

[32] J.M. Corrêa, F.A. Farret and L.N. Canna, ‘An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electromechanical Model’, in *Proc. IEEE IECON'01*, pp. 141 – 146, 2001.

[33] F. Amrouche, ‘Caractérisation Expérimentale d’un Assemblage -Stacks- de Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons’, *Mémoire de PFE*, USTHB, Novembre 2004.

[34] R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A.I. Hooper, H.M. Jensen, B.A. Peppley and P.R. Roberge, ‘Development and Application of a Generalised Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell’, *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 173 - 180, 2000.

[35] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A.

Rodrigues, 'Parametric Modelling of the Performance of a 5 kW Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Stack', *Journal of Power Sources*, Vol. 49, pp. 349 - 356, 1994.

[36] J. Larminie, A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, second ed., John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 2003.

[37] Qin Y, Du Q, Fan M, Chang Y, Yin Y. Study on the operating pressure effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell power system. *Energy Convers Manag* 2017;142:357e65.

[38] David Corgier, « Contraintes Techniques des Systèmes Piles à Combustible pour les Applications Autobus », Département Systèmes de Traction Electrique – IRISBUS.

[39] Ulf Bossel, « Efficiency of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles », *European Fuel Cell Forum*, October 2003.

[40] Gerhard Konrad, Marc Sommer, Birgit Loschko, Andreas Schell and Andreas Docter, « System Design for Vehicle Applications », *Handbook of Fuel Cells - fundamentals, technology and applications*, V.3, 2003.