

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



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Installations Energétiques et Turbomachines

THEME:
OPTIMISATION ET ANALYSE PARAMETRIQUE D'UN
SYSTEME DE PILE A COMBUSTIBLE PEMFC

Proposé et encadré par :

Dr. ABDI Hamid

Réalisé par :

GOUDJIL Mohamed lamine

BENABDELLAH mohamed

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

Remerciements

*Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos gratitude à notre encadreur de ce mémoire **Dr. ABDI HAMID** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Nous tenons à remercier les membres du jury pour leur précieux temps pour lire et revoir ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont Contribué à notre formation ainsi qu'à tout le personnel du département de Mécanique.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Enfin, nous voudrions exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

*Je dédie mon travail à mon père, ma mère et mon frère qui ont fait des sacrifices et crus en
moi tout au long de mon parcours scolaire*

À ma famille et à tous mes amis et collègues.

A toute la famille du Département

De Mécanique.

Et à tous ceux que je connais de près ou de loin.

MOHAMED LAMINE

BANABDELLAH MOHAMED

ملخص

تدفع مشاكل المناخ والحاجة إلى تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الباحثين إلى إيجاد وسائل أقل تلويثاً لإنتاج الطاقة. مشكلة أخرى تأتي من الاحتياطات المحدودة من الوقود الأحفوري. هذا هو بالضبط سبب اعتبار تقنية خلايا الوقود ذات إمكانات كبيرة للمستقبل. إنه مكون جديد ، وهو الآن مرشح لإنتاج الكهرباء. إنه يشكل عرضاً غنياً بشكل متزايد يجعل من الممكن تغطية احتياجات الكهرباء الجديدة. يعد استخدام خلايا الوقود تقنية تحول الطاقة الكيميائية مباشرة إلى طاقة كهربائية. يتم تقديمه كوسيلة بيئية لإنتاج الطاقة حيث أن النفايات الوحيدة التي تنتجها البطارية هي الماء..

استخدام نموذج ديناميكي حراري لنظام خلية وقود غشائي لتبادل البروتونات (PEMFC) يحتوي على المكونات المساعدة الرئيسية. يتكون النظام من خلية وقود PEMFC ومبادل حراري وخزان مياه ومضخات تبريد ومكونات معالجة الغاز الداخل (مرطب وضغط). سيتم إجراء دراسة بارامترية من حيث مقارنة الطاقة والأداء الكهربائي لخلية الوقود والنظام العام. سيتم تقديم خوارزمية متعددة الأهداف لتحسين معلمات التشغيل لنظام PEMFC لزيادة كفاءة وقوة النظام.

يتم إدخال خوارزمية التحسين لتحديد معلمات النموذج الكهروكيميائي للخلية ؛ بمجرد التحقق من صحة النموذج ، تم إجراء دراسة حدودية من حيث مقارنة الطاقة والأداء الكهربائي لخلية الوقود والنظام العام. نتائج المحاكاة قابلة للمقارنة بقوة مع تلك التي تم الحصول عليها تجريبياً. تظهر نتائج الدراسة البارامترية تأثير معاملات التشغيل على سلوك البطارية والنظام العام

كلمات رئيسية : PEMFC , خوارزمية PSO ، خلية الوقود ، كفاءة النظام ، الطاقة ، الكفاءة.

Résumé

Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre poussent les chercheurs à trouver des moyens de production d'énergie moins polluants. Un autre problème vient des réserves limitées en énergies fossiles. C'est précisément la raison pour laquelle la technologie des piles à combustible est considérée comme une solution d'avenir pour la production d'électricité. L'utilisation de la pile à combustible est une technologie qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est présentée comme étant un moyen écologique de production d'énergie puisque le seul déchet que la pile produit est l'eau.

Dans ce travail, un modèle thermodynamique de système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) contenant les principaux composants auxiliaires a été utilisé. Le système est composé d'une pile à combustible PEMFC, d'un échangeur de chaleur, d'un réservoir d'eau, de pompe à eau et de composants de traitement des gaz à l'entrée (humidificateur et compresseur). Un algorithme d'optimisation est introduit pour identifier les paramètres du modèle d'électrochimique de la pile ; une fois que le modèle est validé, une étude paramétrique en termes de comparaison des performances énergétiques et électriques de la pile à combustible et du système global a été réalisée.

Les résultats de simulation sont fortement comparables à ceux obtenus expérimentalement. Les résultats de l'étude paramétrique montrent l'influence des paramètres de fonctionnement sur le comportement de la pile et le système global.

Mots clés : PEMFC, algorithme PSO, Efficacité du système, puissance, rendement.

Abstract

The climate problems and the need to reduce greenhouse gas emissions are pushing researchers to find less polluting means of energy production. Another problem is the limited reserves of fossil fuels. This is precisely why fuel cell technology is seen as a future solution for power generation. The use of fuel cells is a technology that converts chemical energy directly into electrical energy. It is presented as an ecological means of producing energy since the only waste that the fuel cell produces is water.

In this work, a thermodynamic model of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system containing the main auxiliary components has been used. The system consists of a PEMFC fuel cell, heat exchanger, water tank, and water pump and inlet gas treatment components (humidifier and compressor). An optimization algorithm has been introduced to identify the parameters of the electrochemical fuel cell model. Once the model is validated, a parametric study in terms of comparison of the energy and electrical performance of the fuel cell and the overall system is given.

The simulation results are strongly comparable to those obtained experimentally. The results of the parametric study show the influence of operating parameters on the behavior of the PEMFC fuel cell and the overall system.

Keywords: PEMFC, PSO algorithm, fuel cell, System efficiency, power, efficiency.

Table de matière

Introduction générale	1
Etat de l'art	3
Introduction.....	3
Etat des recherches.....	3
Le but de notre travail.....	6
Chapitre I : généralités sur les piles à combustible	7
I.1/ Introduction	7
I.2/ historique de la pile à combustible	7
I.3/ les principaux composants d'une PAC.....	8
I.4/ types de pile à combustible.....	9
I.4.1/ pile à combustible à membrane échangeuse de proton PEMFC	10
I.4.1.1/ les composants de la pile PEMFC.....	11
a) membrane polymères ioniques.....	12
b) les électrodes	12
c) les plaques bipolaires	12
I.5/ applications des piles à combustible.....	13
I.5.1/ applications mobiles.....	13
I.5.2/ applications stationnaire	13
I.5.3/ applications embarquées	14
I.6/ conclusion	14
Chapitre II : Modélisation du système de pile PEMFC et méthode de résolution.....	15
II.1/ Introduction	15
II.2/ description du système de pile PEMFC.....	16
II.3/ élaboration du modèle mathématique	16
II.3.1/ les caractéristiques du système PEMFC.....	16
II.3.2/ la description physique de la PEMFC.....	17
II.3.2.1/ modèle mathématique de la PEMFC.....	18
• Tension du à circuit ouvert.....	19

• Surtension d'activation	19
• Surtension ohmique Vohm	20
• Surtension de concentration	20
• Tension de sortie de la pile PEMFC.....	21
II.3.2.2/ compresseur	21
II.2.3.3/ humidificateur.....	22
II.3.2.4/ pompe et autres équipements	23
II.3.2.5/ système PEMFC.....	24
II.4/ méthode de résolution.....	24
II.4.1/ présentation de l'algorithme PSO	24
II.4.2/ avantages de l'algorithme PSO.....	25
II.4. 3/ optimisation par essais particulaires (PSO).....	25
II.4.4/ les différentes étapes de PSO [27]	28
II.5.5/ fonction objectif	30
II.6/ conclusion	30
Chapitre III : Résultats et interprétations.....	31
III.1/ Introduction.....	31
III.2/ calcul et validation.....	31
III.3/ performances de la pile et du système.....	34
III.3.1/ cas de base.....	34
III.3.2/ effet des paramètres de fonctionnant sur les performances du système PEMFC..	37
• a / Effet de la température.....	37
• b) Effet de la variation de la pression.....	39
1) Effet de la variation de la pression à l'anode.....	39
2) Effet de la variation de la pression à la cathode.....	39
• c) Effet de la variation de l'humidité relative.....	41
III.4/ conclusion.....	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie.....	45

Liste des figures

<u>Figure I.1</u> : L'expérience de Sir William Grove.....	8
<u>Figure I.2</u> : Les principaux composants d'une pile à combustible.....	9
<u>Figure I.3</u> : Schéma représente le fonctionnement d'une PEMFC.....	11
<u>Figure II.1</u> : Schéma du système PEMFC.....	17
<u>Figure II.2</u> : Schéma du PEMFC.....	18
<u>Figure II.3</u> : Processus de recherche de la solution optimale par l'algorithme PSO.....	27
<u>Figure II.4</u> : Organigramme de calcul PSO.....	29
<u>Figure III.1</u> : Processus de convergence du PSO.....	33
<u>Figure III.2</u> : Comparaison des résultats et ceux obtenus expérimentales.....	34
<u>Figure III.3</u> : Variation de la tension en fonction du courant, extraite de la référence [29]....	34
<u>Figure III.4</u> : Variation de tension en fonction de la densité du courant.....	35
<u>Figure III.5</u> : Variations des puissances en fonction de la densité du courant.....	36
<u>Figure III.6</u> : Variations des puissances consommées par le compresseur, l'humidificateur et la pompe.....	36
<u>Figure III.7</u> : Variations des rendements de la pile et du système en fonction de la densité du courant.....	37
<u>Figure III.8</u> : Effet de la variation de la température sur les performances de la pile et le système.....	38
<u>Figure III.9</u> : Effet de la variation de la pression à l'anode sur les performances de la pile et le système.....	40
<u>Figure III.10</u> : Effet de la variation de la pression à la cathode sur les performances de la pile et le système.....	41
<u>Figure III.11</u> : Effet de la variation de l'humidité relative sur les performances de la pile et le système.....	42

Liste des tableaux

<u>Tableau I.1</u> : Caractéristiques des piles à combustible.....	10
<u>Tableau III.1</u> : Paramètres de pile et conditions de fonctionnement.....	31
<u>Tableau III.2</u> : Valeurs des limites des paramètres à identifier [5]	32
<u>Tableau III.3</u> : Données expérimentales [29]	32

Liste des symboles

Lettres latines

A	surface active	(cm ²)
b	coefficient semi-empirique	(V)
c_1-c_2	coefficients d'accélération	-
C_{H_2O}	chaleur spécifique de de l'eau	(kJ/kg k)
c_{O_2}	concentration d'oxygène	(mol / cm ³)
C_P	chaleur spécifique à pression constant	(kJ/kg k)
C_v	chaleur spécifique à volume constant	(kJ/kgk)
E_{Nernst}	potentiel thermodynamique de la réaction	(V)
F	constante de Faraday	(C/mol)
F_{obj}	fonction objectif	-
$f_{H_2O_air}$	flux molaire de la vapeur humidifié contenue dans l'air	(mol/s)
$f_{H_2O_H_2}$	flux molaire de la vapeur d'eau contenue dans l'hydrogène	(mol/s)
f_w	débit d'eau de refroidissement	(l/min)
J	densité de courant	(A/ cm ²)
J_{max}	densité de courant maximale	(A/ cm ²)
I_{fc}	courant électrique de la pile	(A)
G_{best}	global best performance	-
l	épaisseur de la membrane	(m)
LHV	tension égale de la valeur de chauffage inférieure de l'hydrogène	(V)
M	nombre de point expérimental	-

\dot{m}	débit d'air	(kg/s)
\dot{m}_{H_2O}	masse molaire de l'eau	(kg/mol)
M_{O_2}	masse molaire de l'oxygène	(kg/mol)
N	nombre de cellules	-
N_{H_2}	flux molaire de l'hydrogène	(mol/s)
N_{N_2}	flux molaire de l'azote	(mol/s)
N_{O_2}	flux molaire de l'oxygène	(mol/s)
P_a	pression des gaz à l'entrée de l'anode	(atm)
P_{best}	personnel best performance	-
P_c	pression des gaz à l'entrée de la cathode	(atm)
P_{comp}	puissance du compresseur	(kW)
P_{el-st}	puissance électrique de la pile	(KW)
P_{el-sys}	puissance électrique du système	(KW)
P_{H_2}	pression de l'hydrogène	(atm)
P_{H_2O}	pression de la vapeur d'eau	(atm)
P_{N_2}	pression de l'azote	(atm)
P_{O_2}	pression de l'oxygène	(atm)
P_{Humid}	puissance de l'humidificateur	(kW)
P_{pump}	puissance de la pompe	(kW)
P_{th-st}	puissance thermique de la pile	(KW)
P_{th-sys}	puissance thermique du système	(KW)
r_1 et r_2	deux nombres aléatoires tirés uniformément dans [0, 1]	-
RH	humidité relative des gaz	(%)
R_M	résistance de la membrane	(Ω)
R_c	résistance de contacte	(Ω)
S_a	coefficient stoechiométrique des gaz à l'anode	-

S_c	coefficient stoechiométrique des gaz à la cathode	-
S_{H2}	coefficient stoechiométrique de l'hydrogène	-
T	température de fonctionnement de la pile à combustible	(K)
V_{act}	surtension d'activation	(V)
V_{com}	surtension de concentration	(V)
V_{ohm}	surtension ohmique	(V)
V_{cell}	tension de la cellule	(V)
V_{stack}	tension de la pile	(V)
W	coefficients d'inertie	-
x	facteur de constriction	-

Lettres grecques

ξ	Coefficient semi-empirique	
λ	la teneur en eau	
μ	facteur d'utilisation du carburant	
ρ_M	résistivité de la membrane	(Ω cm)
η_{el-st}	rendement électrique de la pile	(%)
η_{el-sys}	rendement électrique du système	(%)
η_{th-st}	rendement thermique de la pile	(%)
η_{th-sys}	rendement thermique du système	(%)
η_{sys}	rendement global du système	(%)
Δh_{H2O}	différence d'enthalpie	(kJ/mol)
ΔT_{gas}	écart de température	(k)

Abbreviation

AFC	Alkaline Fuel Cell
ALO	Ant Lion Optimizer
DA	Dragonfly Algorithm
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
EME	Electrode-Membrane- Electrode
GDL	Couche de Diffusion gaz "Gas Diffusion Layer"
GWO	Gray Wolf Optimizer
HADE	Hybride Adaptive Différentiel Evolution
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PAC	Pile A Combustible
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PSO	Particle Swarm Optimization
SOA	Seagull Optimization Algorithm
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell

INTRODUCTION GENERALE

En raison de la demande croissante de production d'électricité distribuée avec un minimum de polluants, une production d'énergie électrique efficace et propre est devenue nécessaire. Ces dernières années, parmi les différentes sources de production d'énergie, les piles à combustible ont attiré beaucoup d'attentions en raison de leurs faibles pollutions, de leurs efficacités élevées, de leurs réponses dynamiques supérieures et de leurs bonnes stabilités. Les piles à combustible peuvent être utilisées dans des applications telles que le transport, les systèmes de production d'énergie fixes et portables. Cependant, en raison d'une variété d'avantages, la pile à combustible commence déjà à servir l'humanité de nombreuses façons utiles.

Parmi les différents types de piles à combustible, la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) peut être une grande alternative dans les années à venir, en raison de sa température de fonctionnement faible, réponse rapide, basse pression de fonctionnement, haute densité de courant, aucun déchet et zéro émission si elle est alimentée en l'hydrogène pur

Pour une meilleure compréhension des caractéristiques, de la simulation et de l'analyse de conception des systèmes d'alimentation PEMFC, un modèle mathématique peut indiquer une description précise de la performance PEMFC est un outil extrêmement utile. Le système PEMFC est un système non linéaire, multi-variable et fortement couplé, ceci entraîne la difficulté de modéliser un tel système par des méthodes conventionnelles. Dans la littérature diverse modèle ont été développés pour le système PEMFC. Malgré de nombreuses avancées dans la modélisation PEMFC ; en raison de diverses hypothèses et approximations faites dans la modélisation, il existe toujours des écarts entre les résultats de simulation et les performances réelles. Afin d'améliorer la précision des modèles pour qu'ils puissent mieux révéler les performances réelles de la PEMFC, il est essentiel d'utiliser une technique d'optimisation pour identifier les paramètres des modèles. Ce modèle décrit avec une précision acceptable le comportement de la pile PEMFC. Certains paramètres empiriques du modèle électrochimique de la pile ne sont identifiés que par des plages de variation. Leur détermination par une méthode d'optimisation est l'un des objectifs de notre travail.

Ces dernières années, l'algorithme PSO (Particle swarm optimization) en tant que technique de calcul évolutif a attiré beaucoup d'attention dans la recherche sur les systèmes

de piles à combustible. Les avantages de PSO sont : qu'il est facile à mettre en œuvre, il y a moins de paramètres à régler, une vitesse de convergence rapide.

Dans notre travail l'algorithme PSO a été adopté à l'identification des paramètres du modèle électrochimique d'une PEMFC. D'autre part une étude paramétrique en termes de comparaison des performances énergétiques et électriques de la pile à combustible et du système global sera réalisée.

Ce document est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous donnons une synthèse sur le principe de fonctionnement des piles à combustibles, leurs caractéristiques, leurs constituants, leurs domaines d'application et leurs avantages.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la pile à combustible de type PEMFC ainsi que le système global.
- Dans le troisième chapitre on expose les résultats obtenus avec leurs discussions.
- En fin ce mémoire sera achevé par des conclusions.

ETAT DE L'ART

INTRODUCTION :

De nos jours, on parle de plus en plus du changement climatique, de la pollution de l'air qui entraîne la dégradation de l'environnement ainsi que la déplétion des ressources d'énergie fossile qui concerne la sécurité d'approvisionnement de l'énergie. Tous ces problèmes nous amènent à chercher des solutions efficaces et durables. Quelques solutions possibles sont entre autres : augmentation de l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie existants et optimisé leurs utilisations.

Le développement d'énergies alternatives est une nécessité pour répondre au besoin spécifique des transports, ces énergies devront être facilement stockables.

Le carburant utilisé pour alimenter les piles à combustible PEMFC est l'hydrogène. Les sources d'hydrogène peuvent être multiples, sa production pourrait être par électrolyse par exemple. Il sera évidemment nécessaire de transporter et stocker cet hydrogène.

Dans une pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC, l'hydrogène se combine avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité en ne rejetant que de l'eau. C'est un carburant de choix pour la propulsion des voitures équipées par un moteur électrique et qui produisent leur propre énergie sans pollution.

Au cours de ces dernières années plusieurs travaux de recherche ont été intéressés à l'amélioration des performances des piles PEMFC

ETAT DES RECHERCHES :

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude de la pile à combustible de type PEMFC en utilisant des différentes approches et modèles mathématiques qui peuvent contribuer à maîtriser les paramètres de fonctionnement et de conception de la pile. Nous citons dans ce qui suit quelques travaux de recherches sur les piles à combustible PEMFC.

- **Mr F. Amrouche et al** : Dans ce travail l'auteur présente un modèle semi empirique basé sur les travaux de " Amphlett et al". Le modèle a été modifié et validé

par des résultats des travaux expérimentaux effectués au "Laboratoire Hydrogène Solaire - CDER". La modification du modèle électrochimique de "Amphlett et al". a été effectuée par la proposition d'un nouveau coefficient empirique lié au modèle physique des piles utilisées. De plus, une modification de la modélisation de la cinétique électrochimique et de la conduction électrique des piles à combustible PEMFC. Ceci a permis d'exploiter et d'améliorer les modèles existants, grâce à l'optimisation et la validation des concepts selon des approches diverses dans des conditions optimales de fonctionnement de ces piles à combustible [1].

- **Mr Belhout Karim** : L'objectif de cette étude concerne la modélisation numérique, bidimensionnelle, stationnaire d'une pile à combustible PEMFC pour étudier la concentration en masse, la distribution des vitesses de réactifs, la distribution de la densité de courant, et les courbes de densité de courant à des tensions de fonctionnement différentes. Le modèle comprend le transport de gaz, le transport de charges dans les couches de diffusion. Toutes les équations du modèle sont résolues par la méthode des éléments finis. Les résultats de la modélisation piles à combustible PEM à des tensions de fonctionnement différentes sont ensuite comparées les unes aux autres [2].
- **Cao et al. (2019)** : ont modélisé une PEMFC sur la base de l'examen des données expérimentales et de l'utilisation d'une version développée de Seagull Optimization Algorithm (SOA). Le but était de présenter une conception optimale pour simuler la PEMFC et identifier les paramètres inconnus du modèle. Les résultats de la simulation ont été analysés sur la base de deux études de cas. La méthode proposée a été également comparée à différents algorithmes pour montrer les performances de l'algorithme SOA [3].
- **Isa et al. (2019)** : ont présenté une étude comparative sur l'estimation optimale des paramètres du modèle d'une PEMFC basée sur deux méta-heuristiques différentes, Dragonfly Algorithm (DA) et Ant Lion Optimizer (ALO). Les résultats obtenus ont été analysés et comparés, il a été montré que l'utilisation de l'algorithme ALO donne de meilleurs résultats que l'algorithme DA [4].

- **Xu et al. (2019)** : ont proposé une méthode simple pour optimiser et identifier les paramètres du modèle d'une PEMFC. L'algorithme d'optimisation utilisé est un algorithme simplex de Nelder–Mead basé sur la stratégie d'aigle. L'efficacité de la méthode a été étudiée sur la base de deux études de cas expérimentales pour identifier sept et neuf paramètres inconnus du modèle. Les résultats de la méthode proposée ont été comparés à l'algorithme JAYA standard et également à quatre autres algorithmes [5].
- **Aghajani et Ghadimi (2018)** : ont introduit une autre technique pour la sélection des paramètres optimaux du modèle d'une PEMFC. La technique proposée est basée sur une méthode hybride de l'algorithme Gray Wolf Optimizer (GWO). L'algorithme GWO proposé a été hybridé par des opérateurs de mutation et de croisement pour obtenir de meilleures performances du modèle. L'algorithme proposé a d'abord été validé, puis utilisé pour déterminer les performances de la PEMFC [6].
- **En 2019, Gomes et al.** ont introduit un nouvel algorithme basé sur le comportement particulier des tournesols pour rechercher la solution optimale. L'algorithme proposé offre un bon équilibre entre l'exploitation et l'exploration dans le processus d'optimisation. En outre, l'algorithme a la capacité de conserver une plus grande diversité pour obtenir la solution optimale. Le seul problème de cet algorithme est sa convergence prématurée. Pour cela les auteurs ont proposé une version développée de cet algorithme pour l'identification des paramètres du modèle d'une PEMFC [7].
- **Mahamad Nabab Alam** : a utilisé l'algorithme PSO «Particle Swram Optimization» afin d'obtenir les valeurs optimales des paramètres du modèle d'une PEMFC. Il a donné un exemple de calcul qui a permis de démontrer l'efficacité de l'algorithme utilisé. Il a été recommandé que l'algorithme puisse être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation plus complexes [8].
- **En 2015, Zhe Sun et al.** : ont proposé l'algorithme HADE (hybride adaptative différentiel évolution) pour identifier les paramètres du modèle d'une PEMFC. Ils ont introduit d'abord un facteur d'échelle adaptative et une probabilité de croisement dynamique pour améliorer la convergence et éviter la convergence prématurée. Des

fonctions de référence ont été testés et comparés avec d'autres algorithmes (GA, PSO, standard DE et adaptive DE). L'algorithme présente de meilleures performances de convergence. Les sept paramètres non linéaires du modèle de pile PEMFC ont été optimisés selon des données expérimentales réelles. Les résultats de la comparaison avec les travaux précédents révèlent que l'algorithme HADE est efficace et fiable pour l'identification des paramètres du modèle de la pile PEMFC [9].

LE BUT DE NOTRE TRAVAIL :

Dans ce travail, un modèle thermodynamique de système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) contenant les principaux composants auxiliaires sera utilisée. Le système est composé d'une pile à combustible PEMFC, d'un échangeur de chaleur, d'un réservoir d'eau, de pompe et de composants de traitement des gaz à l'entrée (humidificateur et compresseur). Une identification des paramètres inconnus du modèle électrochimique d'une PEMFC sera effectuée. Une fois que le modèle est validé par comparaison à des résultats expérimentaux ; une étude paramétrique en termes de comparaison des performances énergétiques et électriques de la pile à combustible et du système global sera réalisée.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE

I.1/ INTRODUCTION :

L'énergie constitue l'un des principaux défis que l'humanité devra relever dans les décennies à venir et l'efficacité énergétique est devenue une considération primordiale dans presque toutes les étapes de conception des systèmes énergétiques [10].

Dans ce chapitre nous présentons le principe de fonctionnement d'un système énergétique qui est considéré efficace pour la production de l'électricité et de la chaleur, communément appelé pile à combustible (PAC). Le chapitre est organisé comme suit : au début nous donnons un bref historique sur le développement des piles à combustibles ainsi que ces différents types de piles, puis le rôle des éléments constituant la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. A la fin du chapitre nous présentons les applications de la pile à combustible PEMFC.

I.2/ HISTORIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE :

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité. Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20^{ème} siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur les batteries électriques (Figure I.1). Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes.

Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec une pile à combustible : il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible.

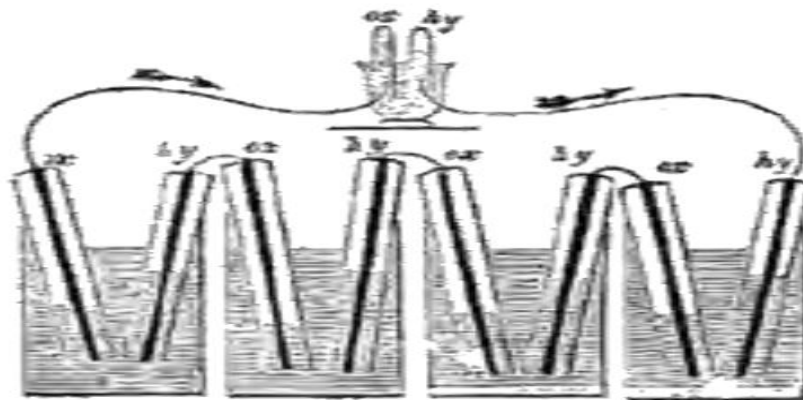


Figure I.1 : L'expérience de Sir William Grove.

I.3/ LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE PAC:

Une pile à combustible est constituée des trois principaux éléments montrés par la figure (I.2) [11].

- L'anode qui est alimentée par un combustible ;
- La cathode qui est alimentée par un comburant;
- L'électrolyte, solide ou liquide, qui sépare les deux électrodes, assure la diffusion des ions intermédiaires de la réaction d'oxydation du combustible.

L'électrolyte sert à empêcher le passage des électrons qui passent à travers le circuit électrique.

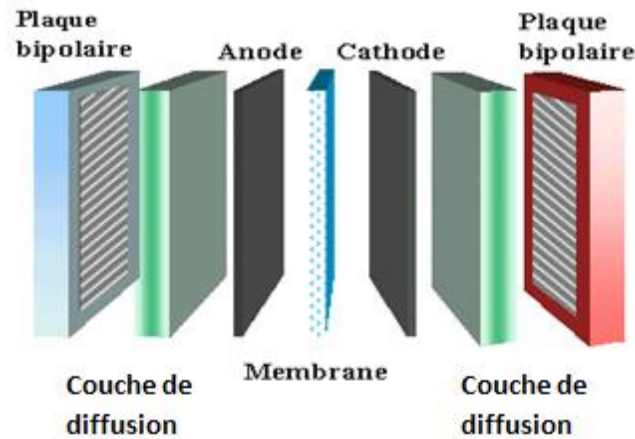


Figure I.2 : Les principaux composants d'une pile à combustible.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air,).

I.4/ TYPES DE PILES A COMBUSTIBLE :

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte, la température de fonctionnement de la pile et, d'autre part, le type d'ions assurant la conduction ionique. On trouve ainsi :

- La pile à membrane échangeuse de proton (PEMFC, Polymère électrolyte fuel cell) (80°C)
- La pile à combustible alcaline (AFC, Alkaline fuel cell) (100°C)
- La pile à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric acid fuel cell) (200°C)
- La pile à carbonates fondus (MCFC, Molten carbonate fuel cell) (700 °C)
- La pile à électrolyte solide (SOFC, Solid oxyde fuel cell) (800°C-1000°C)

Le tableau ci-dessous regroupe les différents types de pile à combustible [11].

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Les différents types de pile à combustible. Electrolyte	KOH Solution	Membrane Polymère Conductrice De protons	Membrane Polymère Conductrice de protons	Acide Phosphorique	Li_2CO_3 et KCO_3 fondu dans une matrice $LiAlO_2$	ZrO_2 et Y_2O_3
Ions dans L'électrolyte	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Niveau de Température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H_2	H_2 (Pur ou reformé)	Méthanol	H_2 (Pur ou reformé)	H_2 (Pur ou reformé)	H_2 (Pur ou reformé)
Oxydants	O_2	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines D'application	Spatial	Automobile Portable, Cogénération Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée, d'électricité, maritime	Cogénération Production centralisée, d'électricité, maritime

Tableau I.1 : Caractéristiques des piles à combustible.

I.4.1/ PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTON PEMFC :

L'électrolyte de la pile PEMFC pile à combustible à membrane échangeuse de proton est généralement une membrane polymère perfluorée capable de transporter les ions d'hydrogène. Les demi-équations électrochimiques ayant lieu à l'anode et à la cathode sont les suivantes



Ces piles fonctionnent à une température inférieure à 100 °C. La faible température de fonctionnement leur confère une aptitude à démarrer relativement rapidement. Ces piles présentent certains avantages, on peut citer:

- L'électrolyte est solide. Il n'y a donc pas de risque de fuite de l'électrolyte.

- La température de fonctionnement est faible ce qui permet à avoir un démarrage rapide.
- La puissance massique est élevée, la densité de puissance peut atteindre 1kW/kg.

Elles présentent cependant certains inconvénients, On citera à titre d'exemple :

- Les membranes doivent être maintenues en permanence dans un bon état d'hydratation pour favoriser le transport des protons. Dans le cas contraire, il y a un risque de détérioration de la membrane.
- Elles sont sensibles au monoxyde de carbone (CO) qui empoisonne les sites catalytiques.

I.4.1.1/ LES COMPOSANTS DE LA PILE PEMFC :

La pile à combustible PEMFC (figure I.3) est constituée d'un collecteur de courant (y compris les canaux de gaz), la couche de diffusion de gaz, et la couche de catalyseur sur côtés anode et cathode ainsi qu'une membrane polymère conductrice d'ions. Les réactifs pénètrent dans la cellule par des canaux de gaz, qui sont noyées dans les collecteurs de courant (plaque bipolaire). Les couches de diffusion de gaz (GDL) sont utilisées pour distribuer uniformément les réactifs sur la surface des couches de catalyseur (CLC), ainsi que pour fournir une connexion électrique entre les couches de catalyseur et les collecteurs de courant.

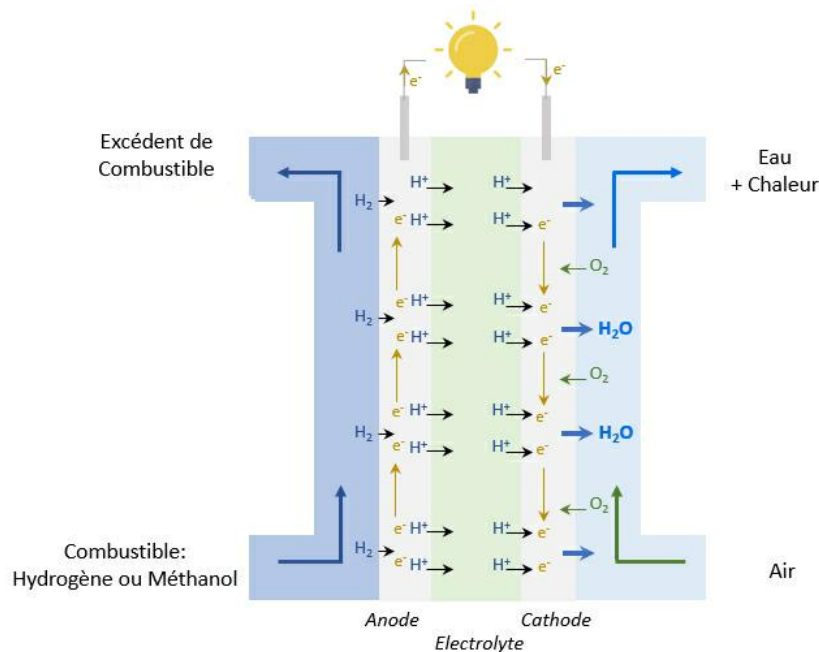


Figure I.3 : Schéma représente le fonctionnement d'une PEMFC.

- **a) MEMBRANES POLYMERES IONIQUES :**

Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC. Ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes. De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction ionique.

Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique [12].

- **b) LES ELECTRODES :**

Les électrodes sont le lieu des réactions d'oxydoréduction. Les électrodes doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Etre poreuses pour permettre la diffusion des gaz jusqu'aux sites de réaction. Elles sont généralement en feutre de carbone ou en papier carbone ;
- Etre imprégnées d'une pate constituée de catalyseur contenant du carbone platine sur la face en contact avec l'électrolyte ;
- Etre de bonnes conductrices électroniques
- Etre flexibles pour augmenter la surface de contact avec l'électrolyte.

La partie de l'électrode imprégnée de pate constitue la zone active. La partie non imprégnée constitue la zone difusionnelle.

- **c) LES PLAQUES BIPOLAIRES :**

Les plaques bipolaires ont pour fonction la collecte du courant électrique, la distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode. Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant, une imperméabilité au gaz supérieure à la membrane échangeuse de protons. Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite.

I.5/ APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES :

I.5.1/ APPLICATIONS MOBILES :

Parmi les applications mobiles des piles à combustibles on trouve, le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En termes de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh. [17].

I.5.2/ APPLICATIONS STATIONNAIRES :

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est concentrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests. Pour le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent l'électricité et la chaleur. Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène [17].

I.5.3/ APPLICATIONS EMBARQUEES :

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd.

Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante. [17]

I.6/ CONCLUSION :

Nous venons d'étudier à travers ce chapitre des généralités sur la PAC. Nous avons passé en revue les constituants de la PEMFC. L'intérêt pour la pile à combustible particulièrement la PEMFC a connu une croissance importante qui se poursuivra sûrement dans les années à venir. Les avantages de la pile à combustible sont nombreux. Ce générateur produit sans bruit de l'énergie électrique et thermique et ne produisant que de l'eau et ne rejetant aucun gaz à effet de serre.

Les points freinant la commercialisation des piles à combustible peuvent être résumé par la durée de vie, la difficulté de maîtrise de la gestion de l'eau, liée surtout aux conditions d'hydratation convenable de la membrane, à cela s'ajoute le cout élevé des matériaux utilisés dans la fabrication et aux difficultés d'usinage surtout des canaux de distribution des gaz et de refroidissement sur les plaques bipolaires.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UN SYSTEME DE PILE PEMFC ET METHODE DE RESOLUTION

II.1/ INTRODUCTION :

Le développement des nouvelles énergies est un défi majeur pour le 21^{ème} siècle pour faire face au réchauffement climatique et également pour avoir des alternatives aux énergies fossiles. Les technologies d'utilisation de l'hydrogène comme carburant et plus particulièrement pour alimenter les piles à combustible à basse température à membrane échangeuse de proton (PEMFC « Proton Exchange Membrane Fuel Cell ») prévalent de nombreux atouts pour être les générateurs d'énergie de plusieurs domaines. Les PAC pourraient se retrouver dans de nombreux domaines comme le transport automobile, les applications portables et les applications stationnaires. Ils peuvent être utilisés pour les sites isolés (couplé avec un générateur électrique comme les éoliennes par exemple). Les PEMFC produisent de l'énergie électrique et thermique à partir d'énergie chimique.

Dans ce chapitre nous présentons la description et la modélisation d'un système de pile à combustible de type PEMFC. Il s'agit aussi d'appliquer une méthode d'optimisation sur le système de pile à combustible à fin d'identifier les paramètres inconnus du modèle électrochimique de la PEMFC. De plus, dans la plupart des études sur les systèmes et installations de piles à combustible, les consommations thermiques et électriques consommés par les dispositifs auxiliaires du système PEMFC sont souvent ignorés, ce qui a des effets importants sur les performances thermodynamiques de l'ensemble du système de pile à combustible. Pour analyser clairement ces effets ; une modélisation des auxiliaires sera également effectuée est les consommations seront prise en considération.

II.2/ DESCRIPTION DU SYSTEME DE PILE PEMFC :

La figure II.1 présente la configuration d'un système PEMFC typique incluant la pile PEMFC, l'échangeur de chaleur, le réservoir d'eau, la pompe à eau et les dispositifs de traitement des gaz à l'entrée de la pile, l'humidificateur et le compresseur.

Le principe de fonctionnement du système est : l'hydrogène et l'air sont près-comprimé et humidifié par le compresseur et l'humidificateur, puis envoyé à l'anode et à la cathode de la PEMFC. Dans la pile, les réactions électrochimiques qui se déroulent sont l'oxydation de l'hydrogène et la réduction de l'oxygène. Il y aura donc une génération de l'énergie électrique et de l'eau comme produit de la réaction, de plus une quantité de chaleur sera libérée. L'énergie électrique peut être envoyée au réseau ou fournir de l'électricité aux bâtiments et aux véhicules. L'eau générée à (368 K) est utilisée par l'humidificateur. La plupart de la chaleur résiduelle est récupérée par le cycle d'eau de refroidissement qui est entraîné par des pompes à eau pour fournir de l'énergie thermique aux autres dispositifs, climatisation, refroidisseur à absorption, radiateur de chauffage et ainsi de suite.

II.3/ ELABORATION DU MODELE MATHEMATIQUE :

Le modèle thermodynamique du système PEMFC comprend la pile PEMFC et les dispositifs auxiliaires tels que : le compresseur, l'humidificateur, la pompe et autres accessoires. Une modélisation précise de ces composants est nécessaire pour garantir le fonctionnement normal, car la quantité d'énergie consommée par ces derniers à une influence importante sur les performances totales du système.

II.3.1/ LES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME PEMFC :

Le système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est composé de 75 cellules connectées en série, d'un échangeur de chaleur, d'un réservoir d'eau, de pompe de refroidissement et de composants de traitement des gaz à l'entrée (humidificateur et compresseur).

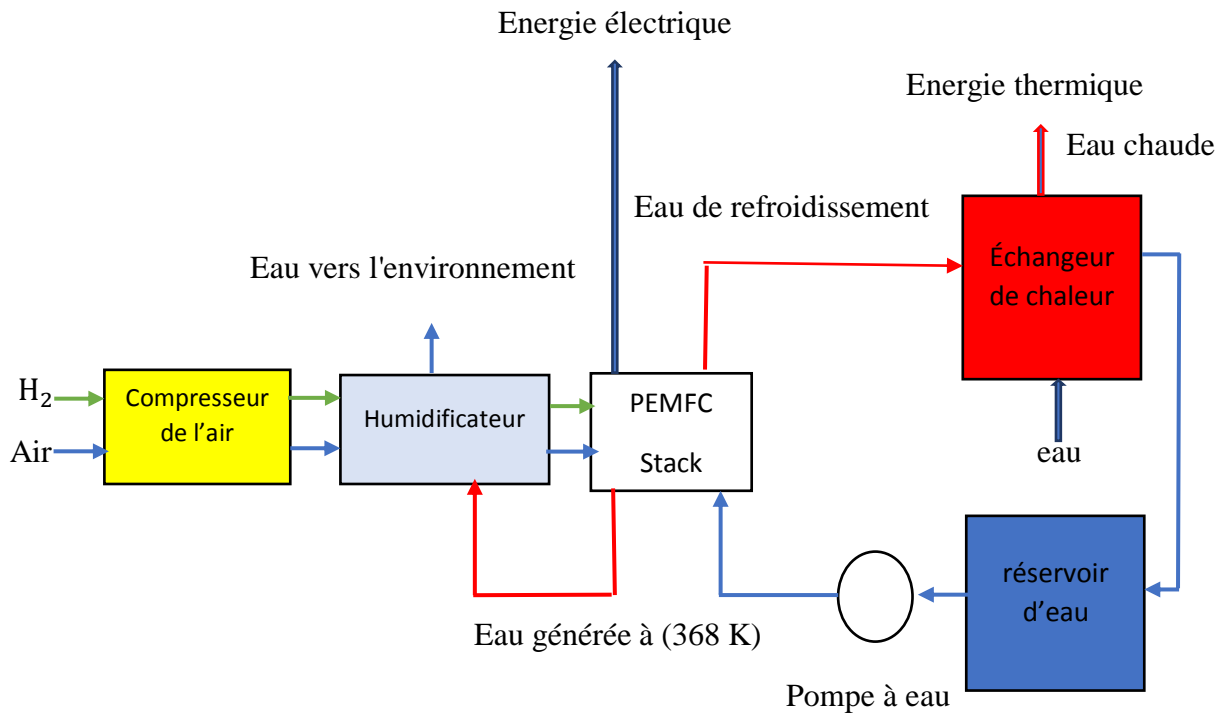
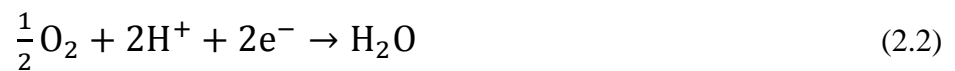


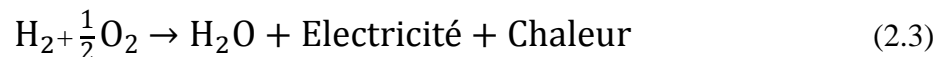
Figure II.1 : Schéma du système PEMFC.

II.3.2/ LA DESCRIPTION PHYSIQUE DE LA PEMFC :

Comme le montre la figure II.2, chaque cellule de la pile PEMFC est constituée d'un électrolyte et deux électrodes. L'électrolyte a une propriété spéciale qui permet aux ions positifs (protons) de passer et elle bloque le passage des électrons. L'hydrogène alimente l'électrode, appelée anode, et à l'aide d'un catalyseur, se sépare en électrons et les protons. Les réactions correspondantes sont [21] :



La réaction globale est donc :



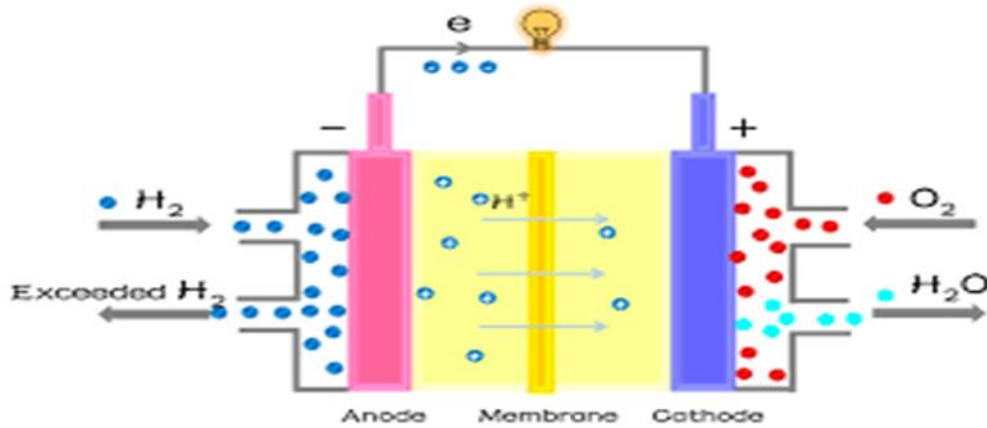


Figure II.2: Schéma du PEMFC.

II.3.2.1/ MODELE MATHEMATIQUE DE LA PEMFC :

Le modèle mathématique est développé sur la base des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La pureté de l'hydrogène est de 100% et il réagit complètement dans la pile à combustible.
- L'air est composé de 21% d'oxygène et 79% d'azote. Tous les gaz seront traités comme gaz parfaits.
- La concentration et la température du gaz dans la pile sont uniformes
- Les conditions de fonctionnement de la pile sont en accord avec celle d'une cellule élémentaire.
- Les pertes thermiques dans la pile sont négligeables.

En général, la tension de sortie réelle d'une cellule de pile à combustible est inférieure à la tension l'idéal à cause des surtensions par, activation, ohmique et par concentration. Par conséquent, la tension de sortie réelle [22] peut être exprimée comme suit :

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{com}} \quad (2.4)$$

E_{Nernst} : Est la tension d'équilibre réversible, et le V_{act} , V_{ohm} et V_{com} représentent respectivement, la surtension d'activation, la surtension ohmique et la surtension de concentration.

• **TENSION DU A CIRCUIT OUVERT :**

Le potentiel de Nernst E_{Nernst} d'une cellule est obtenu en circuit ouvert et peut être calculé par l'équation de Nernst [19, 20].

$$E_{Nernst} = E_0 - (8.5 \times 10^{-3})(T - 298.15) + (4.3085 \times 10^{-5}) \times T \times [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (2.5)$$

E_0 (Environ 1,229 V) est le potentiel standard de la réaction l'hydrogène/l'oxygène à l'état standard (298,15 K et 1 atm), T est la température de fonctionnement, P_{H_2} et P_{O_2} représente respectivement la pression partielle de l'hydrogène et de l'oxygène [22]. Elles sont données par les équations (2.6) et (2.7).

$$P_{H_2} = 0.5 RH_a \times P_{H_2O} \left[\left[\exp \left[\frac{1.635(I_{fc}/A)}{T^{1.334}} \right] \times \frac{RH_a \times P_{H_2O}}{P_a} \right]^{-1} - 1 \right] \quad (2.6)$$

$$P_{O_2} = RH_C \times P_{H_2O} \left[\left[\exp \left[\frac{4.192(I_{fc}/A)}{T^{1.334}} \right] \times \frac{RH_C \times P_{H_2O}}{P_C} \right]^{-1} - 1 \right] \quad (2.7)$$

P_a et P_C sont la pression des gaz à l'entrée de l'anode et de la cathode, RH_a et RH_C représente respectivement l'humidité relative de la vapeur d'eau à l'anode et la cathode. Le symbole A est la surface active de la membrane et P_{H_2O} dénote la pression de saturation de la vapeur d'eau qui est donnée comme suit [22] :

$$\text{Log}_{10}(P_{H_2O}) = 2.95 \times 10^{-2} \times (T - 273.15) - 9.18 \times 10^{-5} \times (T - 273.15)^5 + 1.44 \times 10^7 \times (T - 273.15)^3 - 2.18 \quad (2.8)$$

• **SURTENSION D'ACTIVATION :**

La surtension d'activation V_{act} est causée par la limité de taux de transfert de charges, elle peut être exprimée par [19, 22] :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T(\ln(c_{O_2})) + \xi_4(\ln(I_{fc}))] \quad (2.9)$$

Les paramètres ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 et ξ_4 sont des coefficients paramétriques de chaque modèle de cellule, I_{fc} est le courant électrique, et c_{O_2} est la concentration d'oxygène dissous à l'interface membrane/catalyseur, elle est définie par la loi Henrys [18].

$$c_{O_2} = P_{O_2} / (5.08 \times 10^6 \times \exp(-498 / T)) \quad (2.10)$$

- **SURTENTION OHMIQUE** V_{ohm} :

La perte de tension ohmique V_{ohm} est produite en raison de la résistance de la membrane de des électrodes et les résistances de contacte entre la membrane et les électrodes. Elle peut s'exprimer comme suit :

$$V_{ohm} = I_{fc}(R_M + R_C) \quad (2.11)$$

R_M et R_C représentent respectivement, la résistance équivalente de la membrane et la R_C est la résistance de contacte des différents composants de la cellule. L'expression correspondante à R_M est décrite comme suit.

$$R_M = \frac{\rho_M}{A} l \quad (2.12)$$

ρ_M Est la résistivité de la membrane en (Ω cm). Le symbole de A représente la surface active de la cellule (cm^2). l est l'épaisseur de la membrane (cm). La résistivité de la membrane peut être calculée comme suit [20] :

$$PM = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \times (I_{fc}/A) \times 0.062 \times (T/303)^2 \times (I_{fc}/A)^{2.5} \right]}{[\lambda - 0.634 - 3 \times (I_{fc}/A)] \exp [(4.18) \times (T - 303/T)]} \quad (2.13)$$

λ : Représente la teneur en eau de la membrane.

- **SURTENTION DE CONCENTRATION** :

La surtension en raison des diffusions de masse [20,22] V_{com} peut être représentée comme suit :

$$V_{com} = -b \ln (1 - (j/j_{max})) \quad (2.14)$$

b est un coefficient paramétrique qui doit être estimé, j et j_{max} représentent respectivement la densité du courant et la densité de courant maximale (A/cm²).

• **TENSION DE SORTIE DE LA PILE PEMFC :**

La pile PEMFC est construite de plusieurs cellules. La tension de la pile PEMFC peut être calculée par :

$$V_{stack} = N \cdot V_{cell} \quad (2.15)$$

N est le nombre de cellules dans une pile à combustible PEMFC.

Les puissances électrique et thermique de la pile (kW) peuvent être exprimées respectivement par les équations (2.) et (2.17) :

$$P_{el-st} = V_{st} \cdot I_{fc} \quad (2.16)$$

$$P_{th-st} = N \cdot (LHV - V_{cell}) \cdot I_{fc} \quad (2.17)$$

LHV est la tension de la cellule c'est l'eau produite est à l'état vapeur, elle est de (1,25 V) [27]. Le rendement électrique et thermique de la pile sont respectivement données par :

$$\eta_{el-st} = u_f \cdot \frac{V_{cell}}{LHV} = \frac{1}{S_{H2}} \cdot \frac{V_{cell}}{LHV} \quad (2.18)$$

$$\eta_{th-st} = u_f \cdot \frac{LHV - V_{cell}}{LHV} = \frac{1}{S_{H2}} \cdot \left(1 - \frac{V_{cell}}{LHV}\right) \quad (2.19)$$

u_f est le facteur d'utilisation de l'hydrogène; S_{H2} est le coefficient stoechiométrique de l'hydrogène ($S_{H2} = 1.15$).

II.3.2.2/COMPRESSEUR :

La haute pression est l'une des paramètres de garantie de la bonne performance de la PEMFC, comme la pile à combustible fonctionne à haute pression, les gaz à l'entrée doivent être comprimés par le compresseur. La consommation d'énergie peut être importante (le

rendement du compresseur est supposé être de 100%). La puissance du compresseur est calculée par :

$$P_{Comp} = C_p \Delta T_{gaz} \dot{m} \quad (20-a)$$

$$\Delta T_{gaz} = T_2 - T_1 = T_1 \left((P_2/P_1)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right) \quad (20-b)$$

$$\gamma = C_p / C_v \quad (20-c)$$

C_p et C_v sont respectivement, la chaleur spécifique du gaz à l'entrée à pression et volume constants ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); ΔT_{gas} est l'élévation de la température du gaz à l'entrée après compression (K). P_1 , P_2 sont respectivement les pressions de gaz avant et après compression, (atm); γ est le rapport de C_p et C_v .

Le débit d'air (kg/s) est calculé par :

$$\dot{m} = \frac{1}{0.21} N_{O_2} M_{O_2} \quad (2.21)$$

M_{O_2} masse molaire de l'oxygène et N_{O_2} représente le flux molaire de l'oxygène donné par :

$$N_{O_2} = S_c \frac{I_{fc}}{4F} \quad (2.22)$$

F : constante de Faraday, S_c coefficient stoechiométrique de l'air.

II.2.3.3/ HUMIDIFICATEUR :

La consommation de chaleur par l'humidification du gaz peut être égale à la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer l'eau d'une température (298K) jusqu'à l'état vapeur saturée.

La formule de calcul peut être donnée comme suit :

$$P_{Humid} = \Delta h_{H_2O} (f_{H_2O_air} + f_{H_2O_H_2}) \quad (2.23)$$

$f_{H_2O_air}$ et $f_{H_2O_H_2}$ sont respectivement, les flux molaires de la vapeur humidifié contenue dans l'air et l'hydrogène, (mol s^{-1}).

$$f_{H_2O_air} = \frac{RH (N_{O_2} + N_{N_2}) P_{H_2O}^{sat}}{P_c - RH P_{H_2O}^{sat}} \quad (2.24)$$

$$f_{H_2O-air} = \frac{RH(N_{H_2})P_{H_2O}^{sat}}{Pa - RH P_{H_2O}^{sat}} \quad (2.25)$$

RH : humidité relative de la vapeur d'eau, $P_{H_2O}^{sat}$ pression de la vapeur saturée.

Les flux molaire de l'hydrogène et de l'azote sont donnés respectivement par les équations (2.26) et (2.27).

$$N_{H_2} = Sa \frac{I_{fc}}{2F} \quad (2.26)$$

$$N_{N_2} = Sc \frac{I_{fc}(0.79/0.21)}{4F} \quad (2.27)$$

Δh_{H_2O} est la différence d'enthalpie entre l'état de l'eau à 298 K et l'état de la vapeur saturée à la température d'entrée du gaz (kJ mol^{-1}).

$$\Delta h_{H_2O} = C_{H_2O} \cdot \dot{m}_{H_2O} (T - T_{ambi}) \quad (2.28)$$

C_{H_2O} et \dot{m}_{H_2O} sont respectivement chaleur spécifique de l'eau ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) et la masse molaire de l'eau (kg mol^{-1}).

II.3.2.4/ POMPE ET AUTRES EQUIPEMENTS :

La pompe à eau et ces accessoire, les régulateurs, les vannes et les capteurs consomment une puissance électrique remarquable qui a une influence sur les performance du système de pile à combustible. La puissance consommée (en kW) peut être calculé comme suit [25] :

$$P_{pump} = (0.00152 f_w^3 - 0.00093 f_w^2 + 0.57 f_w + 386.4) \cdot 10^{-3} \quad (2.29)$$

$$f_w = 6 \times 10^4 (P_{th-st} - P_{Humid}) / p_w \cdot C_w \cdot f_w \cdot \Delta T. \quad (2.30)$$

f_w est le débit d'eau de refroidissement (l min^{-1}).

II.3.2.5/ SYSTEME PEMFC :

Les performances thermodynamique du système PEMFC est le résultat d'une prise en compte de la puissance produite par la PEMFC et la consommation d'énergie des composants auxiliaires.

- Puissance électrique du système PEMFC :

$$P_{el_sys} = P_{el_st} - P_{comp} - P_{pump} \quad (2.31)$$

- Rendement électrique du système :

$$\eta_{el_sys} = P_{el_sys} / (S_{H2} \cdot LHV \cdot I_{fc} \cdot N \cdot 10^{-3}) \quad (2.32)$$

- Rendement thermique du système :

$$\eta_{th_sys} = P_{th_st} / (S_{H2} \cdot LHV \cdot I_{fc} \cdot N \cdot 10^{-3}) \quad (2.33)$$

Rendement globale du système :

$$\eta_{sys} = (P_{th_st} + P_{el_st} - P_{comp} - P_{pump} - P_{Humid}) / (S_{H2} \cdot LHV \cdot I_{fc} \cdot N \cdot 10^{-3}) \quad (2.34)$$

II.4/ METHODE DE RESOLUTION :

Le modèle électrochimique de la pile PEMFC possède sept paramètres inconnus (ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_4 , λ , R_C et b) pour l'identification de ces dernier une fonction objective sera adoptée. Le but est de minimiser l'écart total au carré entre les tensions calculés et ceux obtenus expérimentalement. Un algorithme d'optimisation par essais particulières (Particle Swarm Optimization algorithm, PSO) sera utilisé pour l'identification des paramètres inconnus du modèle.

II.4.1/ PRESENTATION DE L'ALGORITHME PSO :

PSO est une méthode d'optimisation globale méta-heuristique proposée à l'origine par le docteur James Kennedy et Russell Eberhart en 1995 [26, 27]. Basé sur la recherche du comportement des mouvements des oiseaux et des troupeaux de poissons. Lors de la recherche de nourriture, les oiseaux sont soit dispersés où aller ensemble avant de localiser l'endroit où ils peuvent trouver la nourriture. Alors que les oiseaux sont à la recherche de nourriture d'un endroit à un autre, il y a toujours un oiseau qui peut sentir la nourriture très bien, c'est-à-dire que l'oiseau est perceptible de l'endroit où l'on peut trouver les aliments, la

meilleure information sur les ressources alimentaires. Parce qu'ils transmettent l'information, surtout la bonne information à tout moment lors de la recherche de la nourriture d'un endroit à l'autre, conduit par la bonne information, les oiseaux vont éventuellement se rassembler à l'endroit où la nourriture peut être trouvée. Aussi loin que l'algorithme PSO est concerné, la solution est comparée à l'essaim d'oiseaux, le déplacement des oiseaux d'un endroit à un autre est égal au développement de l'essaim de solution, une bonne information est égale à la solution la plus optimiste, et la nourriture ressources est égal à la solution la plus optimiste pendant tout le parcours. La solution la plus optimiste obtenue par la coopération de chaque individu. Cet algorithme peut être utilisé pour résoudre les problèmes complexes d'optimisation, en raison de ses nombreux avantages, y compris sa simplicité et sa mise en œuvre facile, l'algorithme peut être utilisé largement dans le domaine tels que l'optimisation des fonctions, la classification des modèles, l'étude des machines, la formation réseau neutre, le signal procession, commande d'adaptation automatique et etc.

II.4.2/ AVANTAGES DE L'ALGORITHME PSO :

- Il est fondé sur l'intelligence. il peut être appliqué à la fois à la recherche scientifique et à l'utilisation du génie.
- PSO n'ont pas de chevauchement et de calcul de mutation. La recherche peut être effectuée par la vitesse de la particule. Pendant le développement de plusieurs générations, seule la particule la plus optimiste peut transmettre des informations sur les autres particules, et la vitesse de la recherche est très rapide.
- Le calcul dans PSO est très simple par rapport aux autres méthodes d'optimisation.
- PSO adopte le codage réel.

II.4. 3/ OPTIMISATION PAR ESSAIMS PARTICULAIRES (PSO) :

L'optimisation par essaims particulaires (Particle Swarm Optimization algorithm) PSO est inspirée du comportement social et coopératif é par diverses espèces pour combler leurs besoins dans l'espace de recherche. L'algorithme est guidé par l'expérience personnelle (*Pbest*), et l'expérience globale (*Gbest*) et le mouvement actuel des particules pour décider de leurs prochaines positions dans l'espace de recherche. En outre, les expériences sont

accélérées par deux facteurs C_1 et C_2 , le mouvement actuel est multiplié par un facteur d'inertie w qui varie entre $[w_{min}, w_{max}]$.

La population initiale (swarm) de taille N et de dimension D est désignée par $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$, T désigne l'opérateur Transposé. Chaque individu (particule) X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) est donné par $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}]$. En outre, la vitesse initiale de la population est $V = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$ ainsi, la vitesse de chaque particule X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) est donné par $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,D}]$. L'index i varie de 1 à N alors que l'index j varie de 1 à D . L'algorithme détaillé est décrits ci-dessous [26].

Les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche par :

$$U^i(j) = U^i(j)_{min} + K(U^i(j)_{max} - U^i(j)_{min}) \quad i = 1, \dots, Net, j = 1, \dots, V \quad (2.35)$$

Avec : N est le nombre des individus de la population et V le nombre des variables de décisions.

Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci-dessous. Le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés respectivement par les équations (2.36) et (2.37).

$$V_{i,j}^{t+1} = w V_{i,j}^t + C_1 r_{1,i,j}^t (Pbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t) + C_2 r_{2,i,j}^t (Gbest_{i,j}^t - X_{i,j}^t) \quad j \in \{ 1, 2, \dots, D \} \quad (2.36)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + V_{i,j}^{t+1} \quad j \in \{ 1, 2, \dots, D \} \quad (2.37)$$

r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1.]$

$w V_{i,j}^t$: composante d'inertie du déplacement.

$C_1 r_{1,i,j}^t$: composante cognitive du déplacement.

$C_2 r_{2,i,j}^t$: composante sociale du déplacement.

w : contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.

C_1 : contrôle le comportement cognitif de la particule.

C_2 : control l'aptitude sociale de la particule.

En équation (2.36) $Pbest_{i+j}^t$ représente la meilleure performance personnel j^{th} composante de i^{th} individuel, tandis que $Gbest_{i+j}^t$ représente la performance globale de la j^{th} du meilleur individu de la population jusqu'à l'itération t .

Clerc et Kennedy ont démontré qu'une bonne convergence peut être obtenue en rendant dépendants les paramètres w , C_1 et C_2 . L'équation (2.36) après introduction du coefficient de constriction (χ) s'écrit:

$$V_{i,j}(t+1) = \chi [V_{i,j}(t) + r_1 \phi_1 (Pbest_{i,j}(t) - X_{i,j}(t)) + r_2 \phi_2 (Gbest_{i,j}(t) - X_{i,j}(t))] \quad (2.37)$$

Avec :

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}}$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 ; \quad \phi = 4.1 \text{ et } \phi_1 = \phi_2 \text{ et } \phi = 4,1$$

La Figure II.3, montre le processus de recherche de la solution optimale par l'algorithme PSO dans un espace de recherche.

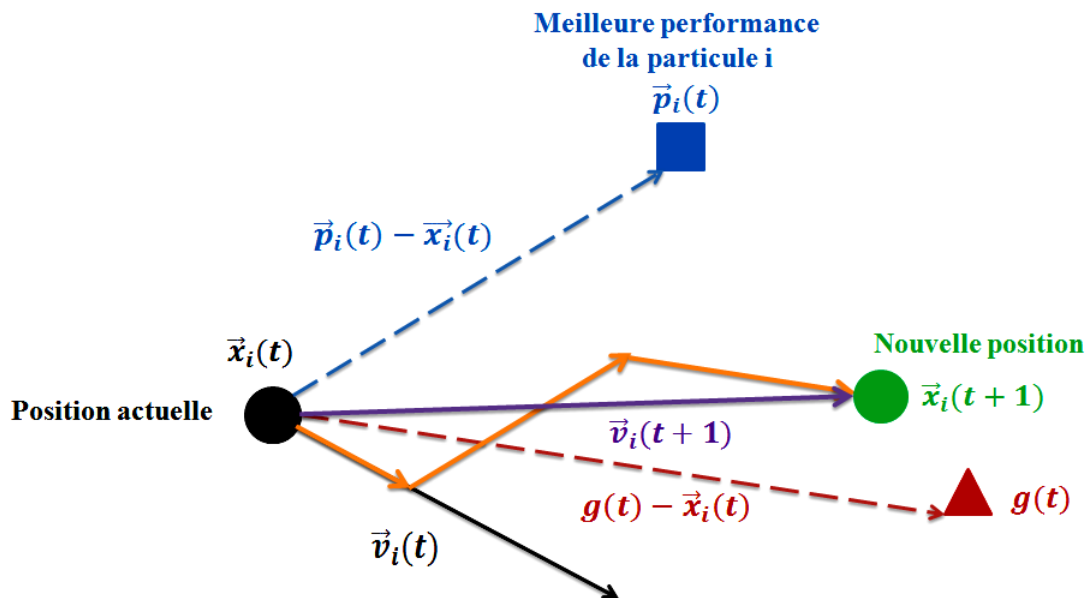


Figure II.3 : Processus de recherche de la solution optimale par l'algorithme PSO.

II.4.4/ LES DIFFERENTES ETAPES DE PSO [27] :

1. Définir les paramètres de l'algorithme PSO.
2. Initialiser la population de particules ayant des positions X et des vitesses est V .
3. Définir l'itération $t = 1$.
4. Calculer l'aptitude des particules $F_i^t = f(X_i^t), \forall i$ et trouver l'indice de la meilleure particule b .
5. Sélectionnez $Pbest_i^t = X_i^t, \forall i$ et $Gbest_i^t = X_b^t$.
6. Mise à jour de la vitesse et de la position des particules.
7. Evaluer la fonction objectif $F_i^{t+1} = f(X_i^{t+1}), \forall i$ et trouver l'indice de la meilleure particule $b1$.
8. Mettre à jour les $Pbest$ de la population $\forall i$.
 Si $F_i^{t+1} < F_i^t$ alors $Pbest_i^{t+1} = X_i^{t+1}$; si non $Pbest_i^{t+1} = Pbest_i^t$
9. Mettre à jour $Gbest$ de la population.
 SI $F_{b1}^{t+1} < F_b^t$ alors $Gbest^{t+1} = Pbest_{b1}^{t+1}$ et $b = b1$ si non $Gbest^{t+1} = Gbest^t$
10. Si $t < t_{max}$ alors $t = t + 1$ aller à l'étape 6 sinon passez à l'étape 11
11. Imprimer la solution optimale en $Gbest^t$

Un organigramme détaillé de l'algorithme PSO tenant compte des étapes ci-dessus est présenté à la Figure II.4:

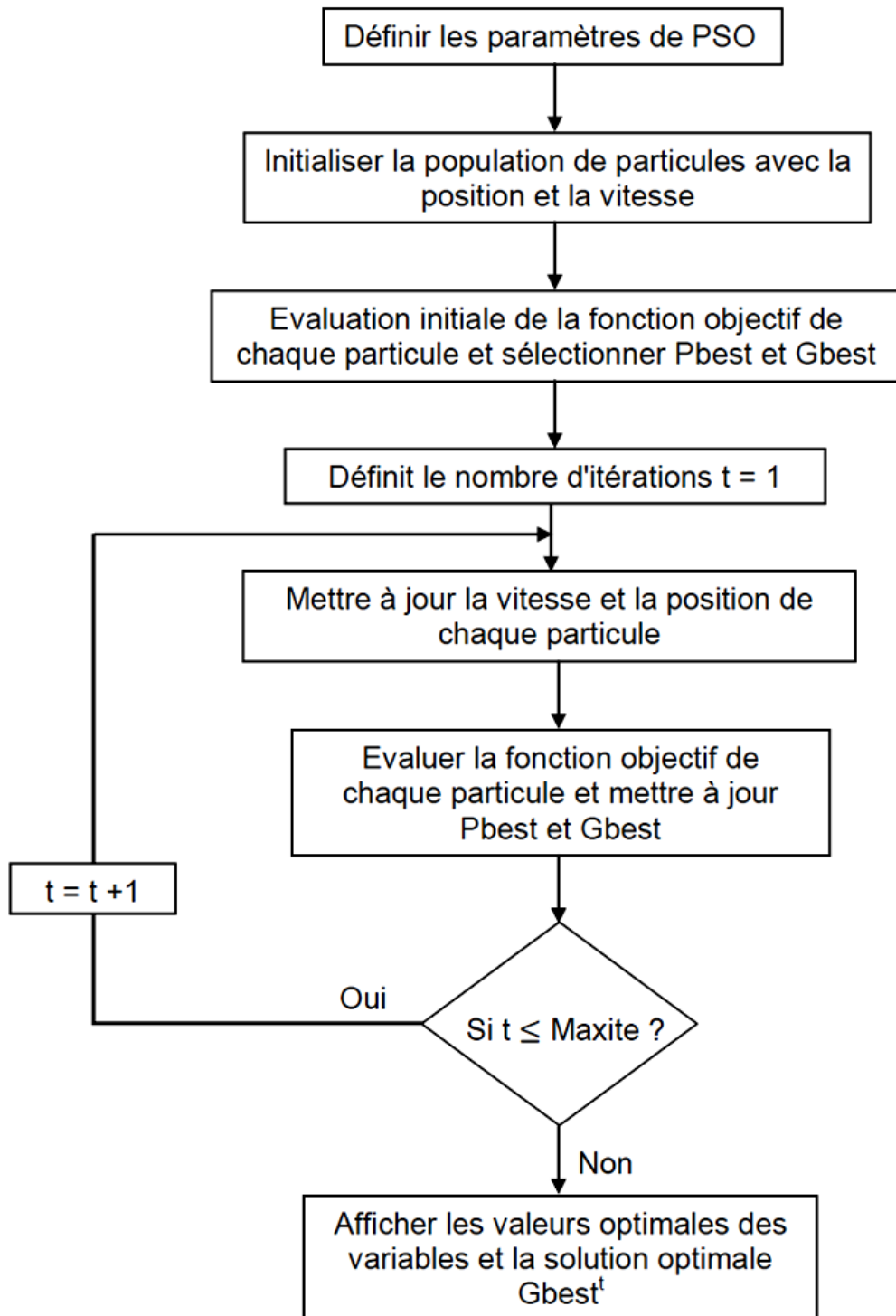


Figure II.4 : Organigramme de calcul PSO.

II.5.5/ FONCTION OBJECTIF :

Les paramètres du modèle électrochimique de la PEMFC peuvent être extraits par l'algorithme PSO. On définit donc, une fonction objectif. Le but est de minimiser l'écart total au carré entre la tension mesurée et celle calculée par le modèle.

$$F_{obj}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \lambda, R_C \text{ et } b) = \min \left[\sum_{i=1}^M (V_{stack} - V_{sm})^2 \right] \quad (2.38)$$

($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \lambda, R_C$ et b) représenter les paramètres de discision, V_{sm} , tension mesurée, V_{stack} est la tension calculé et M nombre de points.

II.6 /CONCLUSION :

Dans ce chapitre les caractéristiques et la description du système global d'une PEMFC sont présenté. Ensuite, une modélisation détaillée de la pile PEMFC ainsi que les différentes auxiliaires est donnée. La procédure de résolution du modèle mathématique ainsi que l'algorithme de résolution sont également décortiqués.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1/ INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulation du système de pile à combustible PEMFC. On distingue trois parties :

- La première partie concerne l'identification des sept paramètres inconnus du modèle électrochimique ($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \lambda, R_C$ et b) de la pile à combustible. Ces derniers sont déterminés par l'utilisation de l'algorithme d'optimisation PSO pour minimiser la fonction objectif adoptée. A partir de la caractéristique, courant-tension obtenue par une série de tests, le modèle mathématique sera adapté aux données expérimentales données dans [29].
- Après avoir validé le modèle mathématique ; une analyse des performances du système sera présentée.
- Dans la troisième partie, on s'intéresse à l'effet des paramètres de fonctionnement sur les performances du système pile à combustible PEMFC.

III.2/ CALCUL ET VALIDATION :

La pile est le cœur du système pile à combustible. Dans ce travail la pile étudiée est composé de 75 cellules. Ces caractéristiques techniques ainsi que les paramètres de fonctionnement sont présentées dans la tableau III.2 [29].

Variable	Valeur	Remarque
T	368.15 K	Température de fonctionnement de la pile
A	200 cm ²	Surface active
N	75 cellules	Nombre de cellules
l	1×10^{-5} m	Épaisseur de la membrane
Pa	1 atm	Pression de gaz d'entrée à l'anode
Pc	1 atm	Pression d'entrée du gaz à la cathode
jmax	1000×10^{-3} A/cm ²	Densité de courant

Tableau III.1 : Paramètres de pile et conditions de fonctionnement.

Les paramètres de l'algorithme PSO sélectionnés dans ce travail sont:

- Taille de la population : 400
- Nombre maximal d'itérations : 200

Les paramètres de décision ainsi que leurs limites supérieures et inférieures sont illustrés dans le tableau III.2:

Paramètre	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	λ	RC (Ω)	β
Min	-1.19969	0.001	3.6×10^{-5}	-2.6×10^{-4}	10	1×10^{-4}	0.0136
Max	-0.8532	0.005	9.8×10^{-5}	-9.54×10^{-5}	24	8×10^{-4}	0.5

Tableau III.2 : Valeurs des limites des paramètres à identifier [5].

Rappelons que la fonction objectif à optimiser représente la somme de l'écart au carré des tensions calculée et mesurée, elle est donnée par :

$$F_{obj}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \lambda, R_C \text{ et } b) = \min \left[\sum_{i=1}^M (V_{stack} - V_{sm})^2 \right] \quad (3.1)$$

($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \lambda, R_C$ et b) représenter les paramètres de discision, V_{sm} , tension mesurée, V_{stack} est la tension calculé et M nombre de points.

Trois ensembles de données expérimentales sont donnés dans le tableau III.3 (T=348k, 45.6 % RH et T= 353k, 56 % RH et T= 358k, 68.4 % RH) pour déterminer les paramètres et pour la validation du modèle. [29].

Courant mA/cm ²	Tension V		
	T= 348k, 45.6 % RH	T= 353k, 56 % RH	T= 358k, 68.4 % RH
101.01	61.9608	65	61.0784
202.02	57.7451	60.9804	59.1176
304.473	55.8824	58.5294	57.451
405.483	53.8235	55.3922	55.9804
506.494	51.4706	52.9412	54.5098
611.833	48.0392	50	51.9608
717.172	45	46.9608	48.4314
821.068	42.3529	44.5098	46.4706
932.179	38.1373	40.4902	43.0392

Tableau III.3 : Données expérimentales [29].

La solution optimisée du problème à pour valeur optimale 54.6207 (voir figure III.1) elle est obtenue pour des paramètres de discision de : $\xi_1 = -1.19997$, $\xi_2=0.0034$, $\xi_3=3.6 \times 10^{-5}$, $\xi_4= -9.54 \times 10^{-5}$, $\lambda= 10$, $R_c= 7.4751 \times 10^{-4}$, $b=0.0338$.

La Figure II.1 indique le processus de convergence de l'algorithme PSO, il représente la variation de la fonction objectif en fonction des itérations. La valeur optimale de la fonction est de 54.6207.

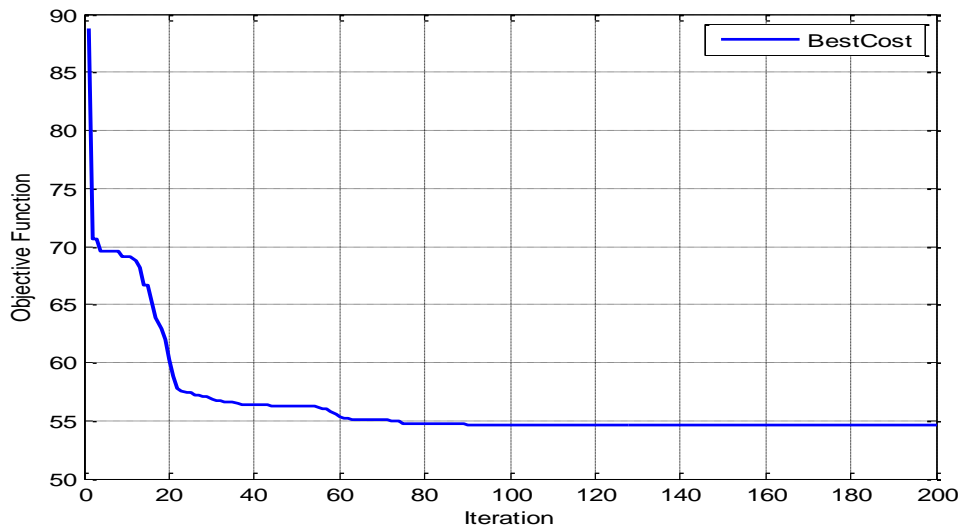


Figure III.1 : Processus de convergence du PSO.

Validation des résultats de simulation :

La Figure III.2 montre la variation de la tension en fonction de la densité du courant électrique de la pile à combustible pour des températures et d'humidités relatives différentes. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les données expérimentales de la référence [29]. Cependant, les écarts entre les résultats de simulation et expérimentaux sont dues principalement au fait que le modèle mathématique ne tient pas compte des pertes de tensions réelles provoquées par les connexions en série des cellules de la pile PEMFC.

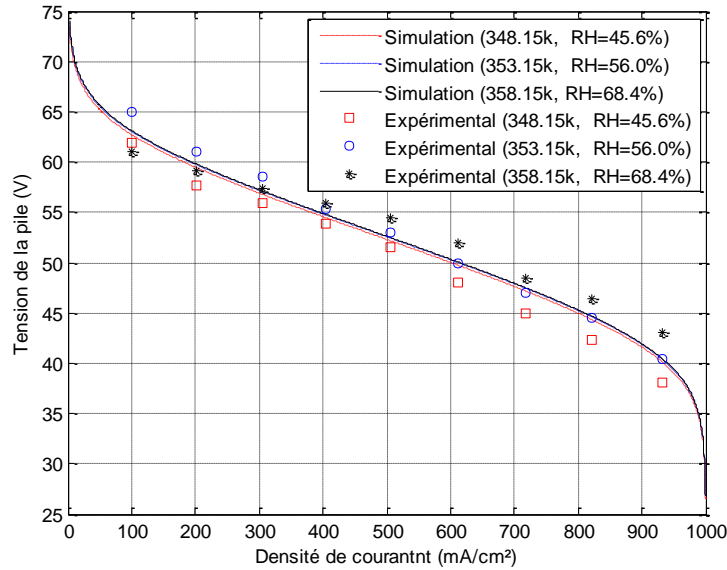


Figure III.2 : Comparaison des résultats et ceux obtenus expérimentales.

Comme deuxième validation ; on constate à partir des courbes (I - V) de la figure III.3 extraite de la référence [29], que nos résultats montrés dans la figure III.2 sont comparable de point de vue quantitatif et qualitatif.

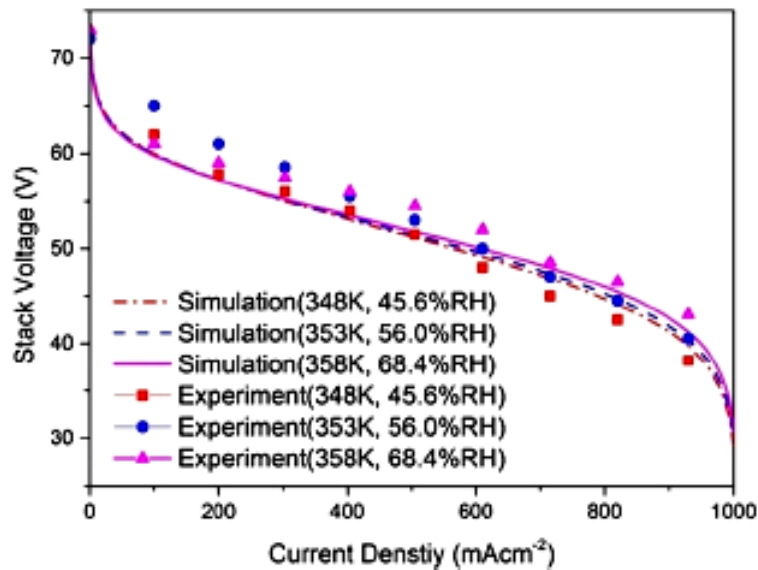


Figure III.3 : Variation de la tension en fonction du courant, extraite de la référence [29]

III.3/ PERFORMANCES DE LA PILE ET DU SYSTEME

III.3.1/ CAS DE BASE

Nous présentons tout d'abord les résultats de simulation obtenus pour un cas de base dont, les paramètres de fonctionnement choisis sont : les pressions des gaz à l'entrée de

l'anode et la cathode sont respectivement $P_a = 1 \text{ atm}$ et $P_c = 1 \text{ atm}$, une humidité relative $RH = 100\%$, alors que la température de fonctionnement $T = 368.15 \text{ K}$.

La figure III.4 montre la variation de la tension en fonction de la densité du courant. On constate que l'augmentation de la densité de courant de 100 à 1000 mA/cm^2 entraîne une diminution de la tension de la pile à cause des surtensions d'activation ohmique et de concentration.

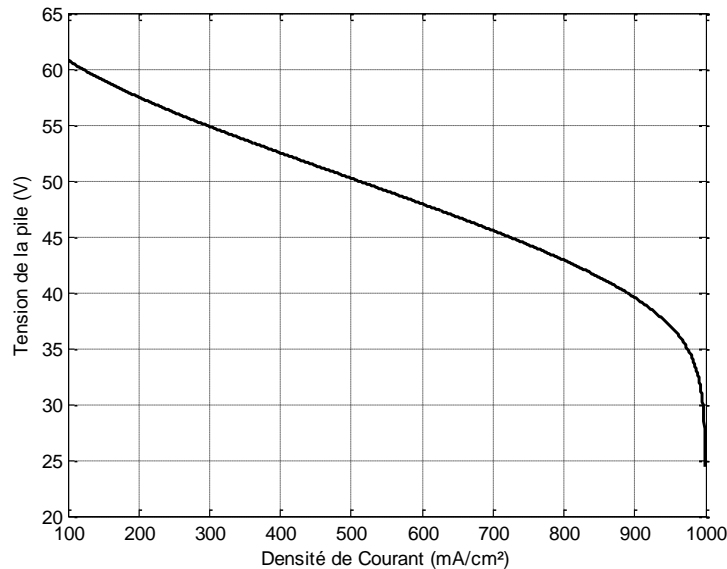


Figure III.4 : Variation de la tension en fonction de la densité du courant.

La figure III.5 illustre la variation des différentes puissances de la pile PEMFC et du système en fonction de la densité du courant électrique. L'augmentation de la densité du courant provoque une augmentation des différentes puissances que soit électrique ou thermique. On note également que les puissances électriques délivrées par la pile et le système passent par un maximum à une densité de courant de 900 mA/cm^2 . L'écart entre les deux courbes est dû à la puissance consommée par la pompe comme le montre la figure III.6. La consommation en énergie du compresseur est nulle car le compresseur est à l'arrêt (pression d'admission à l'entrée de la pile $P_c = P_{atm}$). D'autre part l'écart entre la puissance thermique du système et celle de la pile est dû à la portion d'énergie consommée par l'humidificateur des gaz comme l'indique la figure III.6.

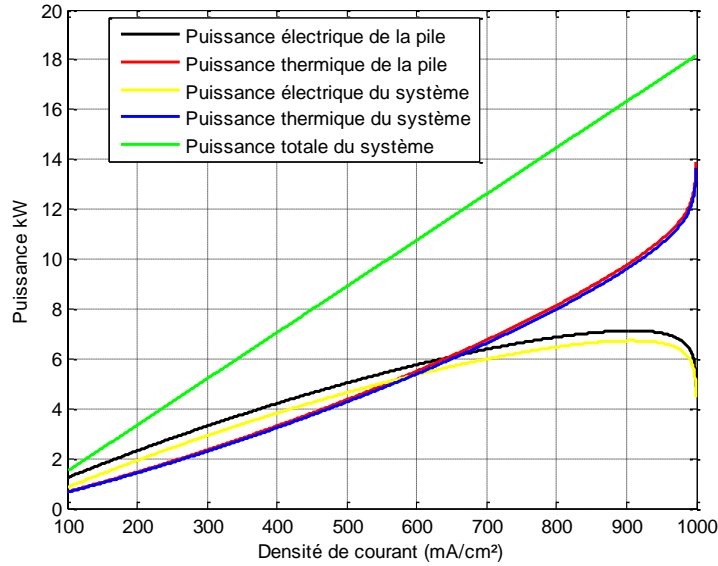


Figure III.5 : Variations des puissances en fonction de la densité du courant.

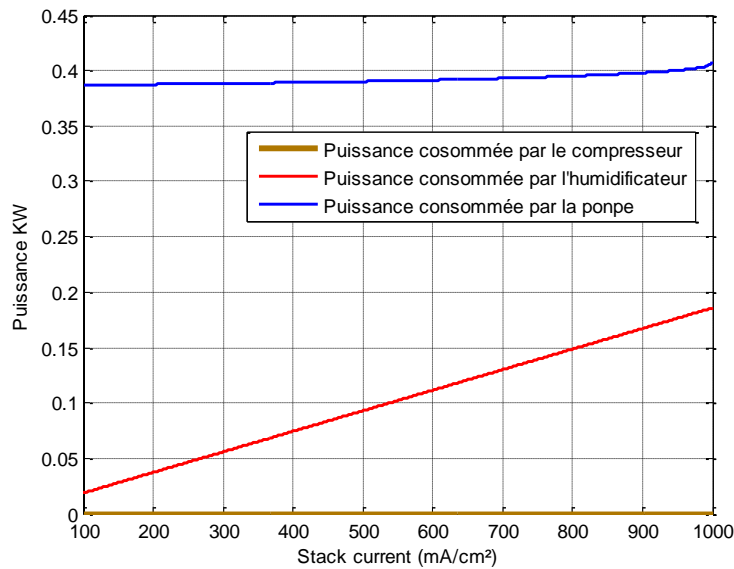


Figure III.6 : Variations des puissances consommées par le compresseur, l'humidificateur et la pompe.

L'effet de la variation de la densité du courant sur les rendements du système et la pile à combustible est montré par la figure III.7. On remarque que l'augmentation de la densité de courant entraîne une augmentation des rendements thermiques du système et de la pile, la différence entre les des deux courbes est due à la chaleur consommée par l'humidification du gaz. On constate aussi que le rendement global passe d'une valeur de 68.15% à 84.20%, le rendement électrique de la pile chute d'une valeur de 56.42 % à 22.61%. On peut observer qu'à mesure que la densité de courant augmente, l'écart entre les courbes du rendement électrique de la pile et le système diminue en raison de la proportion d'énergie électrique

consommée par les dispositifs auxiliaires et la diminution considérable de la puissance électrique de sortie de la pile.

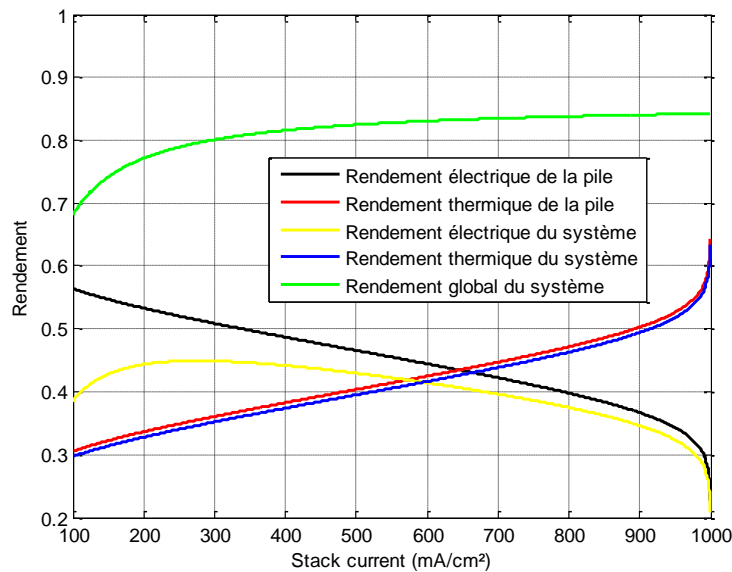


Figure III.7 : Variations des rendements de la pile et du système en fonction de la densité du courant.

III.3.2/ EFFET DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT SUR LES PERFORMANCES DU SYSTEME PEMFC :

- **a/ Effet de la température**

Pour étudier l'effet de la variation de la température sur les performances de la pile et le système, on fixe les pressions d'admission à l'anode et la cathode à 1 atm. Les gaz à l'entrée de l'anode et la cathode sont maintenus à une humidité relative RH=100%. Les figures (III.8, a-f) décrivent les effets de la température de fonctionnement sur les rendements de la pile et du système PEMFC ainsi que la puissance électrique de la pile. Avec l'augmentation de la température de fonctionnement la puissance électrique augmente comme le montre la figure (III.8-a). L'augmentation de la puissance électrique entraîne systématiquement une amélioration du rendement électrique (figure III.8-b). On constate à partir de la figure (III.8-c) que l'augmentation de la température provoque une diminution du rendement thermique de la pile. Nous pouvons observer sur la figure (III.8-d) que l'augmentation de la température de fonctionnement a un effet positif sur le rendement électrique du système, par contre on constate une diminution du rendement thermique du système (figure III.8-e) en raison de l'augmentation de la puissance thermique consommée par l'humidificateur des gaz pour des températures de plus en plus élevées. La figure III.8-f montre l'effet de la variation de la

température sur le rendement global du système. Il est clair que l'effet de la température est pratiquement négligeable en raison que l'augmentation de la puissance électrique du système est accompagnée par une même diminution de la puissance thermique du système.

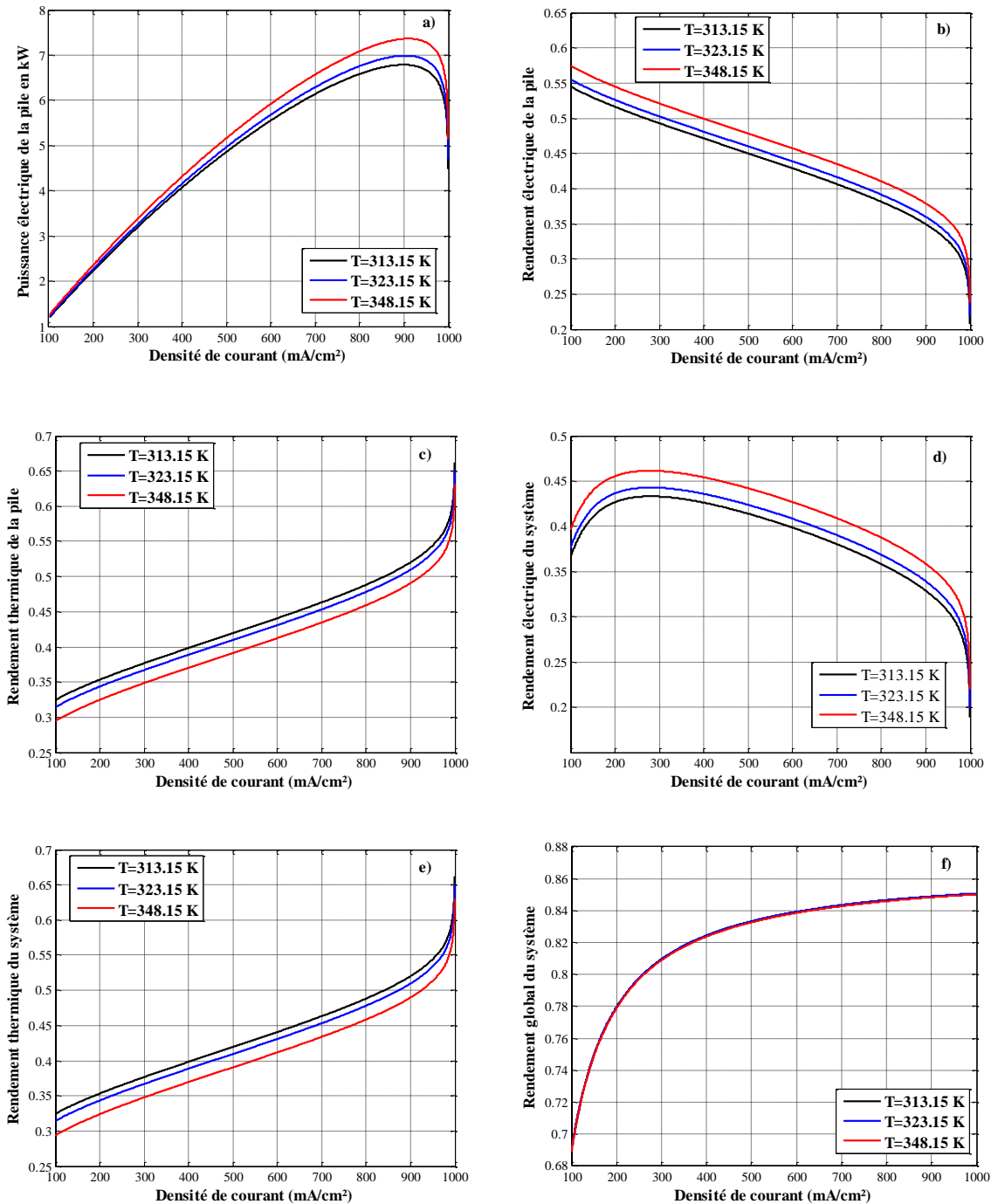


Figure III.8 : Effet de la variation de la température sur les performances de la pile et le système.

- **b) Effet de la variation de la pression**

- 1) **Effet de la variation de la pression à l'anode**

Les figures (III.9 a-f) montrent l'effet de la pression d'hydrogène à l'anode sur les performances la pile PEMFC et du système. On note que la température de fonctionnement est maintenue à 368.15 K, la pression à la cathode est de 1 atm, alors que l'humidité relative à l'admission $RH=100\%$. Avec l'augmentation de la pression d'hydrogène de 1 à 3 atm, la puissance électrique produite par la pile PEMFC augmente comme le montre la figure (III.9 a) indiquant que la pression d'hydrogène joue un rôle important dans les performances électriques de la PEMFC. On peut également constater sur la figure (III.9 b) que l'augmentation de pression de l'hydrogène conduit à une amélioration du rendement électrique de la pile et à une baisse du rendement thermique comme l'indique la figure (III.9 c). A partir de la figure (III.9 d), nous pouvons noter que l'augmentation de pression d'hydrogène peut améliorer de manière observable le rendement électrique, par contre elle entraîne une diminution du rendement thermique du système comme le montre la figure (III.9 e). Les résultats présentés par la figure (III.9 f) indique que l'augmentation de la pression des gaz à l'anode na aucun effet sur le rendement global du système.

- 2) **Effet de la variation de la pression à la cathode**

Afin de montrer l'influence de la variation de la pression à l'entrée de la cathode, nous présentons sur les figures (III.10 a-f) les performances de la pile et du système PEMFC. On note que la température de fonctionnement est maintenue à 368.15 K, la pression à l'anode est de 1 atm, alors que l'humidité relative à l'admission $RH=100\%$. Avec l'augmentation de la pression de l'air de 1 à 3 atm, la puissance électrique de la pile augmente (voir figure III.10 a), entraînant également une amélioration du rendement électrique de la pile PEMFC comme l'indique la figure (III.10 b). On peut voir aussi une la diminution du rendement thermique de la pile comme l'indique la figure (III.10 c). Nous avons constaté aussi que l'élévation de la pression d'air entraîne une augmentation du rendement électrique du système (Figure III.10 d) et une diminution du rendement thermique comme le montre la figure (III.10 e). D'après les résultats montés par la figure (III.10 e) on peut conclure que la variation de la pression à la cathode n'a pas beaucoup de contribution à l'amélioration de l'efficacité globale du système.

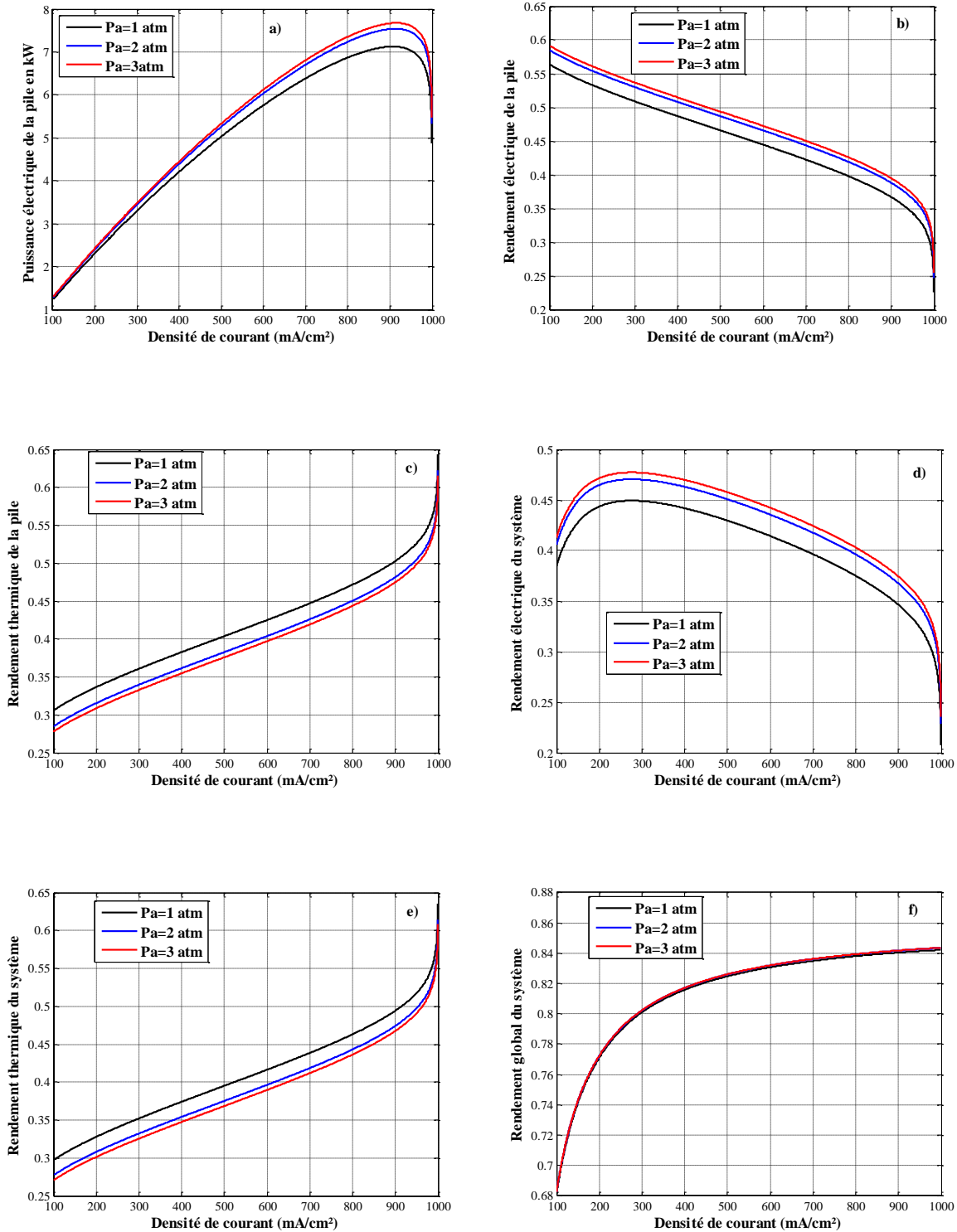


Figure III.9: Effet de la variation de la pression à l'anode sur les performances de la pile et le système.

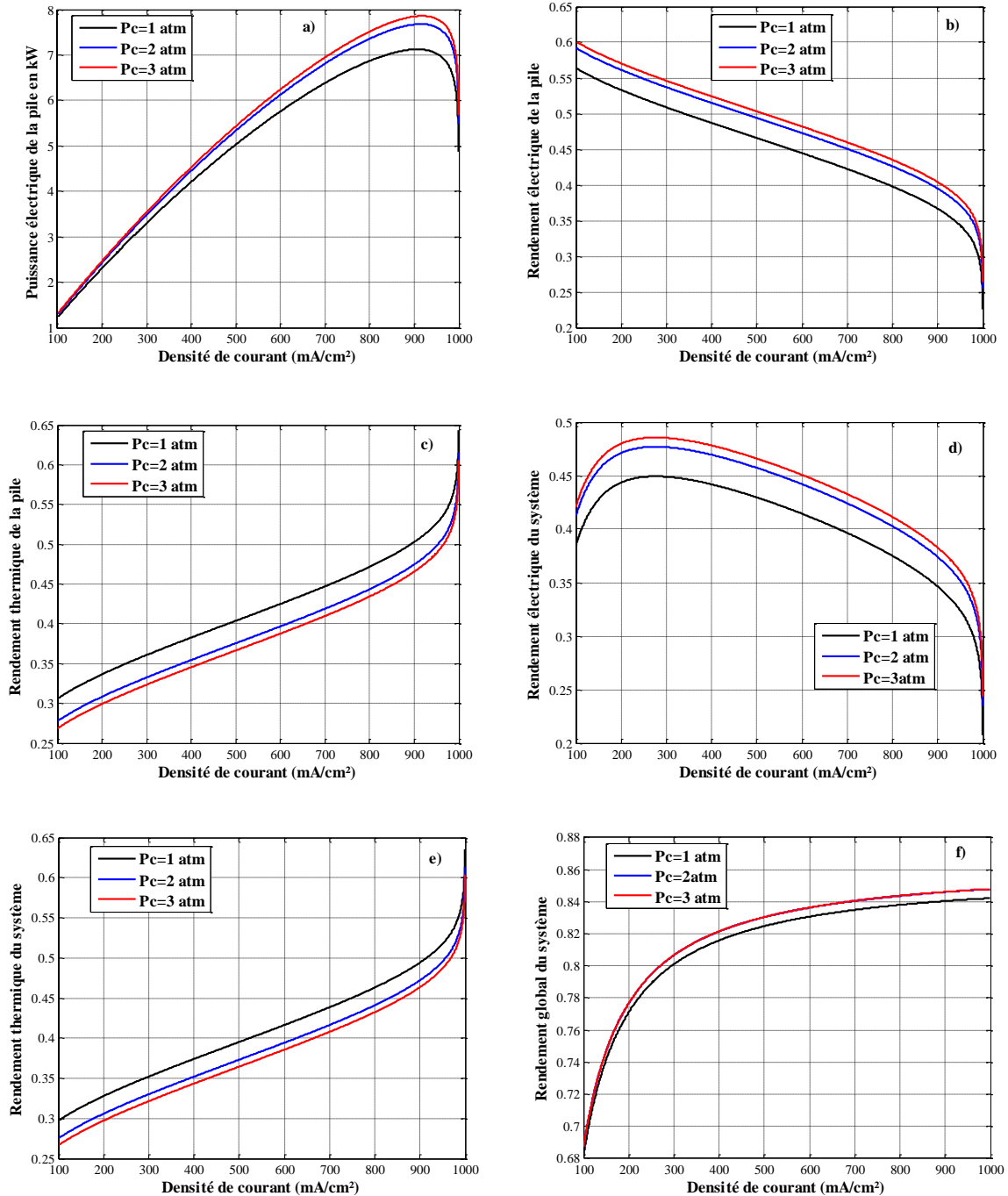


Figure III.10: Effet de la variation de la pression à la cathode sur les performances de la pile et le système.

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

Pour illustrer l'influence de la variation de l'humidité relative à l'admission, nous présentons sur les figures (III.11 a-f) les performances de la pile et du système PEMFC. On note que la température de fonctionnement est maintenue à 368.15 K, la pression à la cathode et à l'anode est de 1 atm. Lorsque l'humidité relative passe de 50% à 100%, la puissance électrique de la pile diminue (figure III.11 a), cette diminution provoque une diminution du

rendement électrique comme l'indique la figure (III.11 b). On peut également voir sur la figure (III.11 c) qu'avec l'augmentation de l'HR une amélioration du rendement thermique de la pile est obtenue. Nous avons également observé une diminution du rendement électrique du système (voir figure III. 11 d) et une amélioration du rendement thermique du système (voir figure III.11 e). De la figure (III.11 e) on constate une légère diminution du rendement global du système pour une humidité relative élevée.

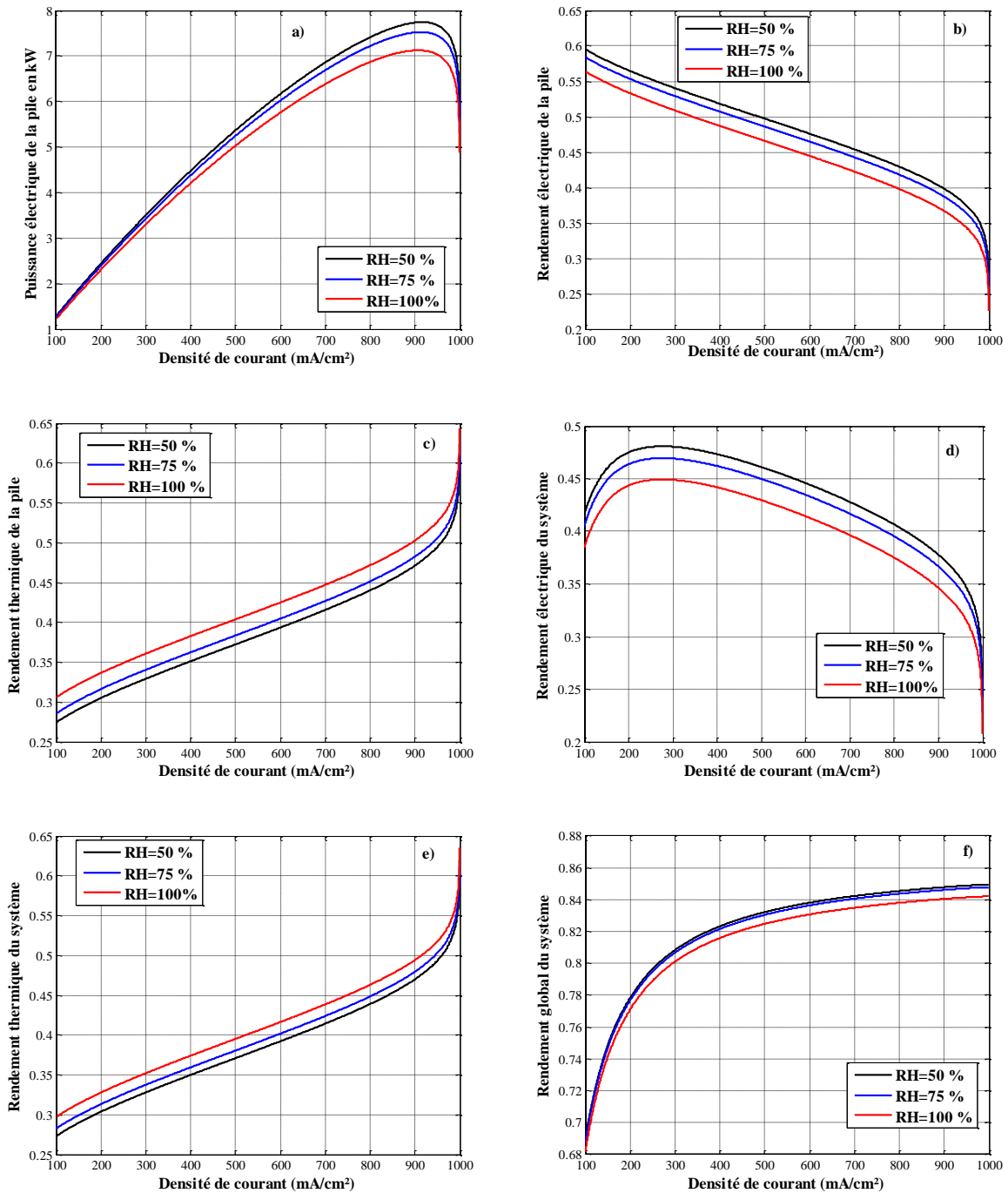


Figure III.11: Effet de la variation de l'humidité relative sur les performances de la pile et le système.

III.4/ CONCLUSION :

Dans ce chapitre, l'algorithme PSO est proposé pour identifier les sept paramètres du modèle électrochimique de la pile PEMFC adapté aux applications d'ingénierie. Les résultats obtenus de simulation obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales.

L'analyse des performances de la pile et du système de l'étude paramétrique a montré que les conditions de fonctionnement ont des effets considérables sur le comportement thermique et électrique du système.

Conclusion générale

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'une recherche de l'analyse des performances d'un système de pile à combustible PEMFC, pour cela, nous avons tout d'abord identifié les paramètres du modèle électrochimique de la pile par l'utilisation de l'algorithme PSO. En suite une étude paramétrique permettant d'analyser l'effet des paramètres de fonctionnement sur les performances de la pile et du système a été effectuée, car un choix adéquat de ces paramètres de fonctionnement est indispensable.

A travers la modélisation de l'ensemble du système PEMFC, nous avons constaté que l'énergie consommée par les différents auxiliaires du système constituée une part non négligeable de la puissance finale produite par le système.

Des études paramétriques en termes de comparaisons des performances énergétiques, électriques et thermiques de la pile à combustible et du système global sont réalisées. Les effets de la variation des principaux paramètres de fonctionnement (y compris la température de fonctionnement, l'humidité relative du gaz à l'entrée de la pile et les pressions des gaz à l'entrée de l'anode et de la cathode) sur les performances de la pile et le système PEMFC sont discutés. Les résultats montrent des effets remarquables sur les performances de la pile à combustible et le système.

Bibliographie

- [1] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa, Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale, Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, 2005.
- [2] Belhout karim, Simulation d'une pile à combustible de type PEMFC, Thèse, USDB, 2012.
- [3] Cao Y., Li Y., Zhang G., Jermsittiparsert K., Razmjoooy N. Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm, *Energy Rep.*, 5 (2019), pp. 1616-1625.
- [4] Isa Z.M., Nayan N.M., Arshad M.H., Kajaan N.A.M. Optimizing PEMFC model parameters using ant lion optimizer and dragonfly algorithm: a comparative study *Int. J. Electr. Comput. Eng.* (2088–8708) (2019).
- [5] Xu S., Wang Y., Wang Z. Parameter estimation of proton exchange membrane fuel cells using eagle strategy based on JAYA algorithm and Nelder–Mead simplex method *Energy*, 173 (2019), pp. 457-467.
- [6] Aghajani Gholamreza, Ghadimi Noradin Multi-objective energy management in a micro-grid *Energy Rep.*, 4 (2018), pp. 218-225
- [7] L. Liu, F. Zhou, M. Tao, Z. Zhang, A novel method for multi-targets isar imaging based on particle swarm optimization and modified clean technique, *IEEE Sensors Journal* 16 (1) (2016) 97–108.
- [8] Mahamad Nabab Alama, « Particle Swarm Optimization: Algorithm and its Codes in MATLAB », Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee-247667, India, on 07 March 2016.
- [9] Zhe Sun, Ning Wang, Yunrui Bi, Dipti Srinivasan, Parameter identification of PEMFC model based on hybrid adaptive differential evolution algorithm, Zhejiang University, Hangzhou 310027, PR China, 2015.
- [10] Azzedine Hocine Abdelhak, « Modélisation électrique des générateurs électrochimique à membrane échangeuse de protons PEMFC », thèse de magister, USTOMB, 2006.

- [11] Zerhouni Fatima Zohra, « Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC », thèse de doctorat, USTOMB, 2009.
- [12] Jérôme Lachaize, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE, 2004.
- [13] Cécile Gongrand, « Analyse des transferts d'eau dans le micro piles à combustible », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE, 2006.
- [14] Jia, J.; Wang, Y.; Li, Q.; Cham, Y.T.; Han, M.; "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell ", IEEE transactions on Energy conversion, 24(1) :283 – 291, March 2009.
- [15] A.S. Corbeau. Les piles à combustible. Site internet <http://www.annso.freesurf.fr/>, 2003.
- [16] Bossel, U. «Does a Hydrogen Economy Make Sense? », Proceedings of the IEEE, 94(10):1826 – 1837, Oct. 2006.
- [17] I. SADLI ; « modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance » ; thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine ; 2006.
- [18] Amphlett JC, Baumert R, Mann RF, Peppley BA, Roberge PR, Harris TJ. Per-formance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell.J Electrochem Soc 1995;142(1):1e8.
- [19] Mann RF, Amphlett JC, Hooper MA, Jensen HM, Peppley BA, Roberge PR. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. J Power Sources 2000;86 (1):173e80.
- [20] Larminie J, Dicks A, McDonald MS. Fuel cell systems explained, vol. 2. New York: Wiley; 2003.
- [21] Correa JM, Farret FA, Canha LN, Simoes MG. An electrochemical-based fuel- cell model suitable for electrical engineering automation approach. IEEE Trans Industrial Electron 2004;51(5):1103e12.
- [22] Mo ZJ, Zhu XJ, Wei LY, Cao GY. Parameter optimization for a PEMFC model with a hybrid genetic algorithm. Int J Energy Res 2006;30(8):585e97.

- [23] Zhu Q, Wang N, Zhang L. Circular genetic operators-based RNA genetic algorithm for modeling proton exchange membrane fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2014; 39(31):17779e90.
- [24] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, in: *IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [25] I.S. Han, S.K. Park, C.B. Chung, Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency, *Energy Convers. Manage.* 113 (2016) 52–65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.045>.
- [26] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: *IEEE Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 39–43.
- [27] M. N. Alam, B. Das, V. Pant, A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination, *Electric Power Systems Research* 128 (2015) 39–52. doi: 10.1016/j.epsr.2015.06.018.
- [28] J. Larminie, A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, second ed., John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 2003.
- [29] X. Chen et al, Parametric analysis and optimization of PEMFC system for maximum power and efficiency using MOEA/D. *Applied Thermal Engineering* 121 (2017) 400–409.