



*blique 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**

**Evaluation des performances d'un système combiné de chauffage,  
refroidissement et de production d'électricité pour une  
application résidentielle**

Proposé et encadré par :

**Promoteur : Dr. ABDI Hamid**

**Co-promoteur : Dr. KETFI Omar**

Réalisé par :

**EL-BEY Abdellah**

**DJEGHDJOUGH Abderaouf**

**Année universitaire 2020/2021**



## **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, Malik et Lydia, Nabil, Fatima et Sabrina 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 sources 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 : Abderaouf Djaghdjough*

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

***Abdellah El-Bey***

## ملخص

تحتوي هذه المذكرة على دراسة نموذجية تشمل نظام (CCHP) نظام تبريد وتسخين بالإضافة لإنتاج الكهرباء يعتمد على بطارية وقود من نوع (PEMFC) التي تتكون من مجموعة خلايا غشائية لتبادل البروتونات تقوم باستهلاك الهيدروجين كوقود اولي لإنتاج طاقة كهربائية وطاقة حرارية تستعمل هذه الطاقة المنتجة من طرف البطارية لتشغيل نظام (CCHP) للوصول الى الهدف المرجعي وهو تبريد و تدفئة مسكن يشمل عائلة مكونة من خمسة افراد بإضافة الى توفير حاجياتهم من المياه الساخنة للاستعمال اليومي . يتم الاعتماد على برنامج حساب رياضي لدراسة النظام والتطرق الى كفاءة ادائه ومراقبة البطارية عن طريق سلوك خلية الوقود وملحقاتها اثناء التشغيل ومنه تحديد مدى تأثير كثافة التيار الكهربائي ودرجة حرارة الوسط الخارجي على أداء نظام (CCHP) بالإضافة إلى ذلك، يتم تقديم أداء نظام (CCHP) في الصيف والشتاء. وتجدر الإشارة إلى أن أقصى كفاءة لنظام (CCHP) يمكن أن تصل إلى 60.7% في الصيف و 68.5% في الشتاء

الكلمات الدالة: CCHP، PEMFC، بروميد الليثيوم، كثافة التيار الكهربائي، الكفاءة القصوى.

## Résumé

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressé à l'étude d'un système combiné de production de climatisation /chauffage et d'électricité (combined cooling heating and power systems) (CCHP) incorporant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Le système CCHP proposé peut fournir simultanément de l'énergie électrique, de l'eau chaude et du chauffage/refroidissement pour répondre aux besoins d'une famille de cinq personnes.

Un modèle mathématique en régime permanent du système CCHP est adopté afin de déterminer les performances de ce dernier. De plus une analyse paramétrique a été faite pour étudier le comportement de la pile à combustible ainsi que ces accessoires. Les effets des paramètres clés, notamment la densité du courant électrique et la température ambiante, sur les performances du système CCHP sont discutée. En outre, les performances du système CCHP en été et en hiver sont présentées. Il est à noter que l'efficacité maximale du système CCHP peut atteindre 60,7% en été et 68,5% en hiver.

**Mots clés :** CCHP, PEMFC, Bromure de lithium, densité du courant électrique, efficacité maximale.

## **Abstract**

In this thesis, we are interested in the study of combined cooling, heating and power systems (CCHP) incorporating a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). The proposed CCHP system can simultaneously provide electric power, hot water and heating/cooling to meet the needs of a family of five persons.

A steady-state mathematical model for the system is adopted to determine the performances of this system. In addition, a parametric analysis was carried out to study the behavior of the fuel cell and its accessories. The effects of key parameters, including electric current density and ambient temperature, on the performance of the CCHP system are discussed. In addition, the performance of the CCHP system in summer and winter is presented. It should be noted that the maximum efficiency of the CCHP system can reach 60.7% in summer and 68.5% in winter

**Keywords:** CCHP, PEMFC, lithium bromide, electric current density, maximum efficiency.

## Table de matière

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART.....</b>	<b>3</b>
1.1. Introduction.....	3
1.2. Etat des recherches.....	3
1.3. But du travail.....	7
<b>CHAPITRE 2 : GENERALITE SUR LE SYSTEME COMBINE DE REFROIDISSEMENT/CHAUFFAGE ET DE PRODUCTION D'ELECTRICITE (CCHP).....</b>	<b>8</b>
2.1. Introduction.....	8
2.2. CCHP système fonctionnement.....	9
2.3. Le meilleur choix de la pile à combustible pour le system CCHP.....	10
2.4. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	10
2.4.1. Etude technique.....	10
2.4.1.1. Les composants Fonctionnels.....	11
a) Membrane polymère ionique (Electrolyte).....	12
b) Les électrodes.....	12
c) Les plaques bipolaires.....	13
d) Les plaques de diffusion.....	13
2.4.1.2. Les périphériques.....	14
2.4.2. Etude électrochimique (Phénomène de Polarisation).....	14
a) Polarisation d'activation.....	15
b) Polarisation ohmique.....	15
c) Polarisation de concentration.....	15
2.4.3. Le principe de fonctionnement du système de la pile PEMFC.....	17
2.5. La machine à absorption.....	18
2.5.1. Les propriétés de la machine à absorption à simple effet.....	19

2.5.2. La machine à absorption au bromure de lithium à simple effet.....	19
2.5.2.1. Principe de fonctionnement.....	20
2.5.2.2. Les bilans de masse et d'énergie de la machine à absorption.....	21
2.6. Conclusion.....	23
<b>CHAPITRE 3 : MODELISATION D'UN SYSTEME COMBINE DE REFROIDISSEMENT/CHAUFFAGE ET D'ELECTRICITE.....</b>	<b>24</b>
3.1. Introduction.....	24
3.2. Description du système.....	24
3.3. Modélisation mathématique du système CCHP.....	25
3.3.1. Modèle mathématique du système PEMFC.....	26
3.3.1.1. Modélisation de la pile PEMFC.....	26
3.3.1.2. Modélisation des accessoires du système de la pile PEMFC.....	30
3.4. Les pertes dues aux accessoires du système CCHP.....	34
3.5. Modélisation de la machine à absorption.....	34
3.6. Modèle mathématique du système CCHP résidentiel.....	35
3.7. Conclusion.....	37
<b>CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION .....</b>	<b>38</b>
4.1. Introduction.....	38
4.2. Performances du système PEMFC.....	38
4.3. Performances du système CCHP.....	44
4.4. Effet de la température ambiante.....	47
4.5. Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Bibliographie.....	54

## Liste des Figures

<b>Fig. 2.1</b>	CCHP système basée sur PEMFC	9
<b>Fig. 2.2</b>	Schéma de base d'une pile à combustible à électrolyte polymère solide	11
<b>Fig. 2.3</b>	Schéma des composants fonctionnels d'une pile PEMFC	12
<b>Fig. 2.4</b>	électrode d'une pile PEMFC	13
<b>Fig. 2.5</b>	Les plaques bipolaires.	13
<b>Fig. 2.6</b>	Les plaques de diffusion	14
<b>Fig. 2.7</b>	(a) Tension de la pile en fonction de la densité de courant (b) Densité de puissance en fonction de la densité de courant	15
<b>Fig. 2.8</b>	Schéma simplifié du Système de la pile PEMFC	17
<b>Fig. 2.9</b>	Absorbeur au bromure de lithium a simple effet (CARRIER 16 DN)	18
<b>Fig.2.10</b>	Machine à absorption au bromure de lithium à simple effet	21
<b>Fig. 3.1</b>	Système combiné de refroidissement, de chauffage et d'électricité (CCHP)	25
<b>Fig. 3.2</b>	Schéma simplifié du système PEMFC	30
<b>Fig. 3.3</b>	La machine à absorption	34
<b>Fig. 3.4</b>	Diagramme des flux de chaleur	36
<b>Fig. 4.1</b>	Variation du potentiel de Nernst et des surtensions en fonction de la densité du courant	40
<b>Fig. 4.2</b>	Variation de la tension de la cellule en fonction de la densité du courant	41
<b>Fig. 4.3</b>	Variation de la tension de la pile en fonction du courant électrique	41

<b>Fig. 4.4</b>	Evolutions des puissances consommées par les auxiliaires de la pile en fonction de la densité du courant	42
<b>Fig. 4.5</b>	Variations des différentes puissances en fonction de la densité du courant	43
<b>Fig. 4.6</b>	Variation des différents rendements de la pile et du système PEMFC	44
<b>Fig. 4.7</b>	Effet de la variation de la densité du courant sur la capacité de refroidissement	45
<b>Fig. 4.8</b>	Rendement du CCHP en fonction de la densité du courant	45
<b>Fig. 4.9</b>	Variation de la puissance du générateur et de l'évaporateur en fonction de la densité du courant	46
<b>Fig. 4.10</b>	Rendement du système (CCHP et CHP) en fonction de la densité du courant	47
<b>Fig. 4.11</b>	Moyenne mensuelle de la température ambiante	49
<b>Fig. 4.12</b>	Moyenne mensuelle du besoin en eau chaude	49
<b>Fig. 4.13</b>	Variation de la puissance du générateur et de l'évaporateur/ période estivale	50
<b>Fig. 4.14</b>	Rendement mensuel moyen du système CCHP	50
<b>Fig. 4.15</b>	Rendement mensuel moyen du système CHP	51
<b>Fig. 4.16</b>	Puissance mensuelle moyenne pour le chauffage des locaux	52

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 2.1</b>	Bilans massiques et énergétiques sur les composants de la machine à absorption au bromure de lithium à simple effet	22
<b>Tableau 4.1</b>	Paramètres de fonctionnement de la pile PEMFC	38
<b>Tableau 4.2</b>	Paramètres du modèle et propriétés des gaz	39
<b>Tableau 4.3</b>	Les paramètres du système CCHP	44
<b>Tableau 4.4</b>	Performance du système obtenu lorsque la pile délivre une puissance électrique maximale de 7.3301 KW.	48

## Liste des Symboles

### Lettres latines

$A$	Surface active	$\text{cm}^2$
$b$	Coefficient paramétrique	V
$C_P$	Chaleur spécifique à pression constante de l'air	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
$C_V$	Chaleur spécifique de l'air à volume constant	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
$C_{P_{H_2O}}$	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
$C_{P_{H_2}}$	Chaleur spécifique de l'hydrogène	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
$C_{PW}$	Chaleur spécifique de l'eau liquide	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
$C_{O_2}$	concentration d'oxygène à l'interface membrane/catalyseur	$\text{mol/cm}^3$
COP	Coefficient de performance de la machine à absorption	-
$E_0$	Potentiel standard	V
$E_{nernst}$	Potentiel de Nernst	V
$F$	Constante de Faraday	$\text{A} \cdot \text{s/mol}$
$f_W$	Débit de refroidissement	$l/min$
$f_{H_2O-air}$	flux molaires de la vapeur d'eau contenue dans l'air	$\text{mol/s}$
$f_{H_2O-H_2}$	flux molaires de la vapeur d'eau contenue dans l'hydrogène	$\text{mol/s}$
$I$	Courant électrique	A
$I_{max}$	Courent électrique Maximale	A
$J$	Densité du courant	$\text{A/cm}^2$
$J_{max}$	Densité du courant maximale	$\text{A/cm}^2$
$l$	Epaisseur de la membrane	cm
$LHV$	tension de la cellule si l'eau produite est à l'état vapeur	V
$m$	Nombre de personne de la famille	-
$\dot{m}_{air}$	Débit d'air	$\text{kg/s}$
$M_{air}$	Masse molaire de l'air	$\text{g/mol}$
$\dot{m}_{H_2}$	Débit d'hydrogène	$\text{kg/s}$
$M_{H_2}$	Masse molaire de l'hydrogène	$\text{g/mol}$
$m_{H_2O}$	Masse molaire de la vapeur d'eau	$\text{kJ/mol}$

$N$	Nombre de cellules	-
$N_{O_2}$	Flux molaire de l'oxygène	mol/s
$N_{H_2}$	Flux molaire de l'hydrogène	mol/s
$N_{N_2}$	Flux molaire de l'azote	mol/s
$P_a$	Pression à l'entrée de l'anode	atm
$P_{comp}$	Puissance consommé par le compresseur	kW
$P_{el\_st}$	Puissance électrique de la pile	kW
$P_{el\_sys}$	Puissance électrique du system	kW
$P_{hg}$	Puissance consommé par le préchauffage	kW
$P_{Humid}$	Puissance consommé par l'humidificateur	kW
$P_{pump}$	Puissance consommé par la pompe et autres équipements	kW
$P_{st}$	Puissance globale de la pile	kW
$P_{sys}$	Puissance globale du system pile	kW
$P_{th-st}$	Puissance thermique de la pile	kW
$P_{th\_sys}$	Puissance thermique du system pile	kW
$Q_E$	Effet frigorifique	kW
$Q_G$	Puissance thermique consommée par le générateur	kW
$Q_{hw}$	Besoin en eau chaude	kW
$Q_P$	Puissance thermique perdue (échangeur, cuve, tube.....)	kW
$Q_{th}$	Puissance thermique destinée au chauffage	kW
$R_C$	Résistance de contact	$\Omega$
$R_M$	Résistance de la membrane	$\Omega$
$S_C$	Stichométrie d'air	-
$S_{H_2}$	Stichométrie d'hydrogène	-
$T_{hw}$	Température du besoin	K
$V$	Volume d'eau par personne	$m^3$
$V_{act}$	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

$\xi$	Coefficient paramétrique	-
$\lambda$	Teneur en eau de la membrane	-
$\gamma$	Coefficient adiabatique de l'air	-
$\rho_M$	Résistivité de la membrane	$\Omega$ cm
$\rho_W$	Masse volumique de l'eau	$\text{Kg/m}^3$
$\eta_{el-st}$	Rendement électrique de la pile	%
$\eta_{th-st}$	Rendement thermique de la pile	%
$\eta_{el\_sys}$	Rendement électrique du system pile	%
$\eta_{th\_sys}$	Rendement thermique du system pile	%
$\eta_{sys}$	Rendement global du system pile	%
$\eta_{CCHP}$	Rendement du CCHP	%
$\eta_{CHP}$	Rendement du CHP	%
$\mu_f$	Facteur d'utilisation de l'hydrogène	-
$\Delta T$	Ecart de température	K
$\Delta h_{H_2O}$	Différence d'enthalpie	$\text{kJ/mol}$

### Abbreviation

MCCHP	Micro Combined Cooling Heating and Power systems
CCHP	Combined Cooling Heating and Power systems
CHP	Combined Heating and Power systems
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell
LiBr	Lithium Bromide
ORC	Organic Rankine Cycle

## Introduction générale

Le développement énergétique, y compris la production, la distribution et la consommation d'énergie, est vital pour tout pays qui vise un progrès constant. Compte tenu de l'augmentation de la demande d'énergie et de la diminution des ressources en combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, il est devenu indispensable de s'orienter vers des solutions modernes permettant de stabiliser le marché en terme d'énergie et de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Ces dernières années, les systèmes combinés de refroidissement, de chauffage et d'électricité (combined cooling heating and power systems) CCHP ont fait l'objet d'une attention accrue, en particulier dans le domaine des systèmes électriques à petite échelle pour les applications résidentielles. Les technologies de trigénération présentent des avantages importants pour le secteur résidentiel, qui est un grand consommateur d'énergie représentant environ 40% de la consommation énergétique mondiale [1]. En effet, au lieu de satisfaire séparément les demandes d'électricité, de chaleur et de refroidissement, une production combinée pourrait permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie et de réduire considérablement les émissions.

Les systèmes CCHP sont très attractifs, en raison des économies d'énergie obtenues par la récupération de la chaleur résiduelle et de la capacité à répondre aux demandes d'énergie de différents types de services publics autonomes [2]. Les recherches sont très actives dans la conception, le développement et l'optimisation de ces technologies et dans la planification opérationnelle en fonction des questions énergétiques et économiques. Un système de trigénération typique comprend un moteur d'entraînement, un système de récupération de chaleur et des technologies à activation thermique.

Les piles à combustible, se présentent donc comme une technologie très prometteuse permettant de produire de la chaleur résiduelle lors du fonctionnement. Elles conviennent donc parfaitement aux applications de production combinée de chaleur et d'électricité, et contribuent à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et les conditions de vie [3]. Les systèmes de micro-cogénération basés sur des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et des piles à combustible à oxyde solide (SOFC) ont été largement étudiés. Grâce à un rendement plus élevé, à une réduction du bruit et de la pollution, la pile PEMFC

est plus utilisée dans les systèmes de trigénérations CCHP [4]. Ces deniers sont capables de fournir simultanément de l'électricité, du chauffage et du refroidissement ce qui permet d'assurer un fonctionnement estival et hivernal. Actuellement, tous les travaux visant l'étude des systèmes CCHP, se concentrent sur l'intégration des systèmes de cogénération avec des refroidisseurs de nature différente, tels que le refroidisseur à absorption. Le système à absorption utilisant le bromure de lithium à simple effet est le plus répandue en climatisation pour les applications résidentielles [5].

Dans ce mémoire, une analyse paramétrique du système CCHP résidentiel, comprenant un moteur de puissance PEMFC et un refroidisseur à absorption au bromure de lithium à simple effet, est effectuée par des modèles unidimensionnels et de thermochimiques. L'objectif principal est d'étudier la faisabilité énergétique et les performances de l'ensemble du système en régime permanent, en faisant varier les conditions de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC et du refroidisseur à absorption à simple-effet, en particulier, la relation entre les performances de la pile et de la machine à absorption. De plus, une comparaison entre les performances du système en été et en hiver sera effectuée.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Nous présentons dans le premier chapitre une synthèse sur les travaux de recherches ayant étudiés les systèmes CCHP basée sur les PEMFC pour des applications résidentielles.
- Dans le deuxième chapitre, une étude générale sur le système de tri-génération CCHP basé sur la pile PEMFC sera présentée.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation énergétique des éléments principaux du système CCHP.
- Les résultats de simulation issus du modèle mathématique adopté ainsi que du programme de calcul élaboré sont présentés au chapitre quatre.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre 1

## Etat de l'art

### 1.1. Introduction :

Au cours de ces dernières décennies, on a pris de plus en plus conscience de l'impact des activités anthropiques sur l'environnement et la santé publique. Cette prise de conscience a conduit à la mise au point et à l'application de méthodes et de technologies visant à réduire les effets de la pollution [6]. Une étude a été faite sur des sources d'énergie avec des technologies de conversion d'énergie plus efficace et moins polluante. En d'autres termes, les limites des réserves de combustibles fossiles et leur ampleur sur l'environnement, en particulier dans les grandes villes, ainsi que la faible efficacité des convertisseurs d'énergie conventionnels, a conduit à l'utilisation des convertisseurs d'énergie plus efficaces et des sources d'énergie renouvelables. L'une des méthodes qui permettent de résoudre ces problèmes consiste à utiliser le système combiné de refroidissement/chauffage et de production d'électricité (CCHP) [7].

En général, les systèmes de tri-génération CCHP améliorent l'efficacité du système de conversion d'énergie. En outre, les avantages de ces systèmes se distinguent dans la réduction de la consommation du carburant et les polluants environnementaux, la prévention des pertes de distribution d'électricité, la transition vers une production d'électricité, la réduction des investissements et de la flexibilité dans le but de passer des combustibles fossiles aux énergies renouvelables. L'un des convertisseurs d'énergie les plus utilisés actuellement sont les piles à combustibles à membrane échangeuse de protons PEMFC. Nous présentons dans ce qui suit des travaux de recherches sur les systèmes CCHP basée sur les PEMFC pour des applications résidentielles.

### 1.2. Etats des recherches :

Durant ces dernières années, un certain nombre d'efforts de recherche ont été menés pour améliorer les performances des systèmes de tri-génération CCHP, on peut citer :

**X.Q.Kong ; R.Z. Wang 2003** : Ce travail traite la problématique d'évaluation de l'efficacité énergétique et l'analyse de la faisabilité économique d'un système de tri-génération à petite échelle pour la production combinée de refroidissement, de chauffage et d'électricité

(CCHP) avec un moteur Stirling. Les paramètres décisifs pour l'évaluation de l'efficacité énergétique de tels systèmes sont, le taux d'énergie primaire et l'économie d'énergie primaire, tandis que l'analyse de la faisabilité économique de ces systèmes met en relation le coût et l'économie annuelle totale. L'analyse des résultats du système de tri-génération avec moteur Stirling montre qu'un système CCHP permet d'économiser le carburant en termes de consommation et offre l'assurance des avantages économiques [8].

**X.Q. Kong ; R.Z. Wang 2004** : Cet article traite le problème de la gestion optimale de l'énergie des systèmes CCHP composé d'une turbine à gaz, d'une machine à absorption et d'une chaudière à récupération de chaleur. Un modèle mathématique a été présenté pour déterminer les stratégies optimales qui minimisent le coût global de l'énergie pour le système CCHP. Il a été montré aussi dans ce travail que le fonctionnement optimal de ce système dépend des conditions de charge à satisfaire. En termes de coût énergétique, ils ont montré que parfois, il n'est pas recommandé de faire fonctionner la turbine lorsque le rapport coût électricité / gaz est très faible [9].

Le travail présenté par **M. Mortazaei ; M. Rahimi en 2016** est basé sur l'utilisation de l'énergie de la biomasse pour faire fonctionner les piles à combustible. À cet égard, les auteurs ont proposé deux nouveaux systèmes de tri-génération (produisant de l'électricité et du chauffage parallèlement au refroidissement) basés sur une pile à combustible à oxyde solide alimentée soit par le gaz de synthèse soit par le biogaz. Les performances des systèmes ont été analysées et comparées les unes aux autres de point de vue thermodynamique. L'application du principe de la conservation, de la masse, de l'énergie ainsi que l'exergie pour chaque composant du système par l'utilisation du solveur d'équations d'ingénierie ont été considérés. Grâce à une étude paramétrique, les effets de certaines variables clés telles que la densité de courant et le facteur d'utilisation du carburant sur les performances des systèmes ont été étudiés. En outre, la considération du système comme une combinaison de trois sous-systèmes, à savoir le système de production d'électricité, le système de production de chaleur et d'électricité et le système de tri-génération, une évaluation de l'impact environnemental en termes d'émissions de dioxyde de carbone a été réalisée pour les deux combustibles à base d'oxyde solide à base de digesteur. Un basé sur une cellule et un gazogène. Un basé sur une cellule et un gazogène. Il a été constaté que l'utilisation du biogaz issu du digesteur conduit à un rendement plus exergetique (14,56%) et moins énergétique (14,31%), avec une émission

de dioxyde de carbone de 17,87 tonnes/MWh pour le système de tri-génération. La valeur de ce paramètre est de 21,32 tonnes/MWh lorsque le gazéificateur est utilisé comme fournisseur de combustible pour la pile à combustible à oxyde solide [10].

**G.Gong et Z.Wan en 2016** Ont étudié un système CCHP résidentiel hybride basé sur des technologies de piles à combustible et solaires qui peuvent fournir de l'énergie électrique, du chauffage et du refroidissement. Le système CCHP se compose de piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), d'un capteur solaire à concentration parabolique, d'une machine à absorption à double effet et de leurs accessoires. Les effets des paramètres de fonctionnement clés des systèmes : densité de courant, température de fonctionnement et rayonnement solaire sur les performances thermodynamiques du système ont été analysés et discutés. Les résultats montrent que la température de fonctionnement du PEMFC a une influence significative sur les performances de sortie du concentrateur solaire. L'efficacité maximale du système hybride peut atteindre 80,5%. L'analyse économique et environnementale du système CCHP a été également effectuée, les résultats indiquent que le projet est réalisable [11].

**B. Zhao 2017** : Dans cet article, le principe et le développement du système de gazéification de la biomasse et du CCHP sont clarifiés, la faisabilité de combiner les deux systèmes ensemble est analysée de point de vue théorique et technique, et la signification active est également indiquée. Les auteurs ont conclu qu'il est possible de développer un CCHP avec énergie de biomasse dans un pays agricole qui peut prospérer à l'avenir [12].

**Romdhane ; Louahlia-Gualous 2018** : Ont proposé un nouveau micro système combiné de refroidissement, de chauffage et d'alimentation en électricité (MCCHP) basé sur une pile à combustible PEMFC pour différents sites Français. Un modèle mathématique a été développé et utilisé pour prédire les performances et les économies d'énergie annuelles du système MCCHP. Le système a été analysé sur la base de différents paramètres opérationnels. Les résultats montrent que le système MCCHP économise de l'énergie tout au long de l'année en respectant les contraintes climatiques Françaises et les besoins énergétiques de la maison. La meilleure stratégie opérationnelle est que MCCHP respecte la demande d'électricité où le taux moyen annuel d'économie d'énergie du carburant est d'environ 35% [13].

Le but du travail proposé par **Raffaello Cozzolino, 2018** avait pour objectif d'évaluer la faisabilité énergétique et la détermination des performances d'un système CCHP résidentiel basé sur une centrale de pile à combustible PEMFC à faible puissance et une machine à absorption au bromure de lithium à demi-effet. L'analyse a été menée à l'aide de simulations numériques. Les résultats numériques ont montré de bonnes performances en termes d'énergie et de facteur d'utilisation de l'exergie [14].

**Chen ; Zhou 2019** : Un micro système combiné de refroidissement chauffage et d'électricité (CCHP) intégré au système de reformage du méthanol assisté par énergie géothermie et incorporant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) a été étudié. Le nouveau système CCHP comprend un sous-système de reformage à la vapeur de méthanol basé sur la géothermie, un PEMFC, une micro turbine à gaz et une machine à absorption au bromure de lithium (LiBr). L'énergie géothermique est utilisée comme source de chaleur pour conduire le reformage à la vapeur du méthanol afin de produire de l'hydrogène. Le méthanol et l'hydrogène n'ayant pas réagi sont utilisés par la turbine à gaz et le PEMFC pour produire de l'électricité. Pour l'analyse thermodynamique et économique, les effets des paramètres thermodynamiques (température géothermique et rapport molaire de l'eau au méthanol) et des facteurs économiques (tels que le prix du méthanol, le prix de l'hydrogène et la durée de vie) sur les performances du système proposé ont été étudiés. Le nouveau système réalise un potentiel thermodynamique et économique, et offre un moyen alternatif et prometteur pour utiliser efficacement les ressources géothermiques [15].

**F.Wong ; A.Yildizbasi 2020** : Il s'agit d'une analyse multi-objectif d'un système combiné de chauffage, refroidissement, et d'alimentation en électricité (CCHP) basé sur une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'optimisation a été réalisée du point de vue environnemental, thermodynamique et économique. Le système comprend une machine à absorption, un système de récupération de chaleur, un humidificateur, un compresseur de gaz et une pile PEMFC de 5 kW. Pour obtenir une efficacité optimale du système étudié, un modèle mathématique a été développé. Les résultats de la simulation sont appliqués pour analyser le système en termes de coût annuel, de réduction des émissions de polluants et d'efficacité énergétique et exergetique [7].

**Z. Ding 2020 :** L'idée clé de cette étude est la conception d'une nouvelle structure d'un système CCHP hybride et l'évaluation de ses performances. Un système ORC est intégré au système CCHP. Des travaux d'investigation et d'optimisation ont été menés avec des approches d'études expérimentales et de simulation. Un rapport d'évaluation complet indique que l'efficacité du système au cours de chaque processus d'étude diffère tout en fournissant des charges différentes. Il a été constaté que le système intégré satisfait pleinement les charges domestiques avec un rendement élevé [16].

### **1.3. But du travail :**

L'objectif Principal de notre travail est d'évaluer les performances du système CCHP basée sur PEMFC pour une application résidentielle. Il s'agit d'étudier un système énergétique permettant de fournir de l'énergie électrique, de l'eau chaude et du chauffage/refroidissement (CCHP) des locaux pour répondre simultanément à la demande d'un appartement. Le système est principalement composé d'une pile PEMFC, d'un système de récupération de chaleur, d'une machine à absorption à simple effet et des composants auxiliaires de la pile. Un modèle mathématique en régime permanent du système global sera adopté. Les effets des paramètres de fonctionnement sur les performances du système seront également analysés, en particulier, la relation entre les performances de la pile et de la machine à absorption. De plus, les performances du système en été et en hiver seront comparées.

## Chapitre 2

### Généralité sur le système combiné de refroidissement/chauffage et de production d'électricité (CCHP)

#### 2.1. Introduction :

L'énergie a une importance telle que nous en sommes devenus dépendants. L'économie de plusieurs pays producteurs de pétrole est basée sur les hydrocarbures, alors que ceux-ci tendent à disparaître. Il est donc devenu indispensable de remplacer cette source d'énergie fossile par une nouvelle plus propre et plus efficace.

Le système combiné de refroidissement/chauffage et de production d'électricité (CCHP) avec une efficacité d'utilisation d'énergie et une faible émission de polluants est un moyen prometteur de résoudre les problèmes de série. Le système CCHP est une sorte de système de sources d'énergie distribuées, qui peut fournir de l'électricité, de l'eau chaude, du chauffage et du refroidissement simultanément en consommant de l'énergie primaire [17]. Au cours de la dernière décennie, cette technologie a été largement appliquée dans de nombreux pays en tant que producteur d'électricité [18].

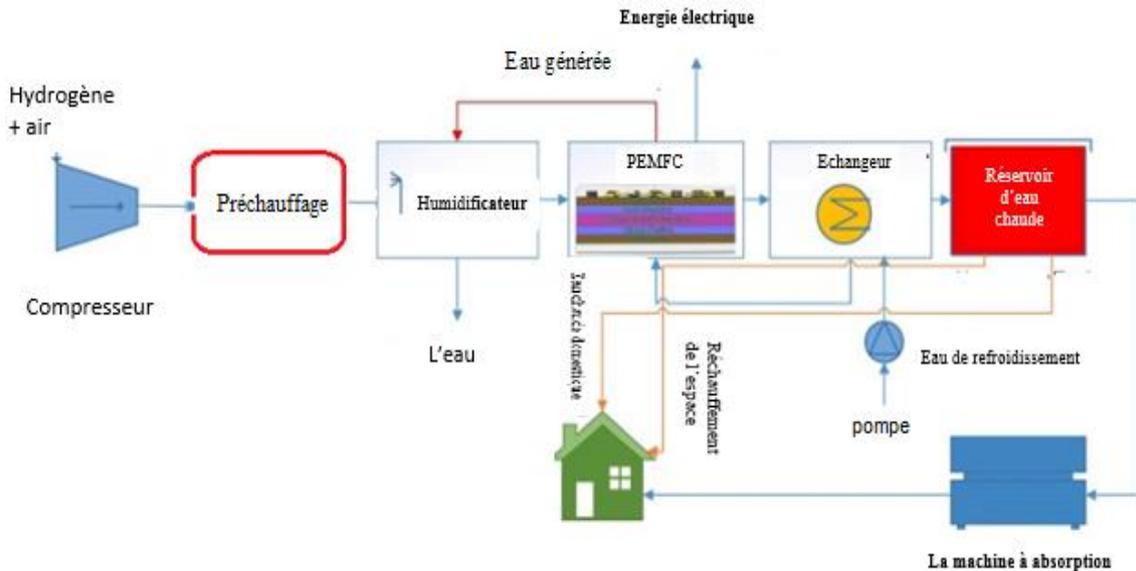
Pour différentes occasions, il existe de nombreux types de moteurs utilisés dans le système CCHP, y compris la turbine à vapeur, la turbine à gaz, le moteur à combustion interne, le moteur Stirling et la pile à combustible. Comparée à d'autres types de moteurs, en raison d'efficacité de production d'énergie plus élevée, d'une émission de polluants plus faible et de meilleures performances avec une charge partielle, la technologie des piles à combustible devient progressivement le choix populaire du moteur CCHP [19].

La pile à combustible génère de l'énergie de l'eau et de la chaleur résiduelle, elle est très appropriée pour les applications résidentielles de système CCHP et utile pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'énergie et les conditions de vie. Actuellement, la recherche sur le système CCHP intégré aux piles à combustible est très répandue, en particulier sur les systèmes des piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et à oxyde solide (SOFC). Grâce à un rendement plus élevé, à une réduction du bruit et de la pollution, la pile PEMFC est la plus utilisée dans les systèmes tri-génération CCHP [20].

Dans ce chapitre, une étude générale sur le système tri-génération CCHP basé sur PEMFC sera présentée, nous définirons les fonctionnements de ces principaux composants et évaluons ces avantages et ces inconvénients.

## 2.2. CCHP système fonctionnement :

La figure (2.1) présente le principe de fonctionnement du système CCHP basé sur PEMFC, les principaux composants sont indiqués ci-dessous:



**Fig. 2.1 :** CCHP système basée sur PEMFC

- a. **Compresseur :** pour la compression de l'air et de l'hydrogène vers l'humidificateur.
- b. **Humidificateur :** pour humidifier l'air d'entrée et l'hydrogène afin de les injecter dans la pile PEMFC.
- c. **Préchauffage :** pour chauffer l'air d'une température ambiante à une température d'entrée désirée.
- d. **La pile PEMFC :** pour convertir l'énergie des gaz humidifiés en énergie électrique.
- e. **Echangeur de chaleur :** pour fournir de l'eau à haute température.
- f. **La machine à absorption :** pour la production de l'eau froide.

Après la pressurisation, préchauffement et l'humidification de l'hydrogène et de l'air par le compresseur, le préchauffage et l'humidificateur, ils sont acheminés vers la cathode et l'anode de la pile PEMFC en tant que combustibles, respectivement. En plus de générer de l'énergie électrique basée sur la réaction électrochimique dans la pile, une partie de l'énergie est transformée en chaleur résiduelle. L'énergie électrique peut être utilisée pour alimenter différents appareils ménagers et applications domestiques. L'énergie restante qui est sous forme de chaleur résiduelle peut être récupérée par un refroidisseur à absorption dans un réservoir d'eau chaude pour les applications de refroidissement et de chauffage [21].

### **2.3. Le meilleur choix de la pile à combustible pour le system CCHP :**

Une étude a été présentée dans la référence [22] consacrée à une réalisation et à une comparaison entre les technologies PEMFC et SOFC appliquées aux systèmes micro-CHP, dans le but de trouver la technologie de pile à combustible la plus efficace dans ce type d'applications, une étude énergétique/exégétique a été menée pour les deux types de piles.

La comparaison énergétique et exégétique a montré que le système de cogénération basé sur la pile PEMFC, fonctionnant à la pression atmosphérique et à basse température (353.15 K), utilise plus efficacement l'apport énergétique du combustible que le système de pile SOFC.

De plus, le système de cogénération basé sur la pile PEMFC présente de nombreux avantages technologiques et de construction directement liés à ses faibles conditions de fonctionnement. En outre, une meilleure intégration (par exemple, l'utilisation de la chaleur résiduelle) du processeur de combustible qui a été considéré comme une unité autonome dans cette étude et qui peut encore améliorer les performances du système de cogénération. Compte tenu de ces observations, le système de cogénération basé sur la pile PEMFC est le système le plus avantageux dans le cas des applications de cogénération résidentielle.

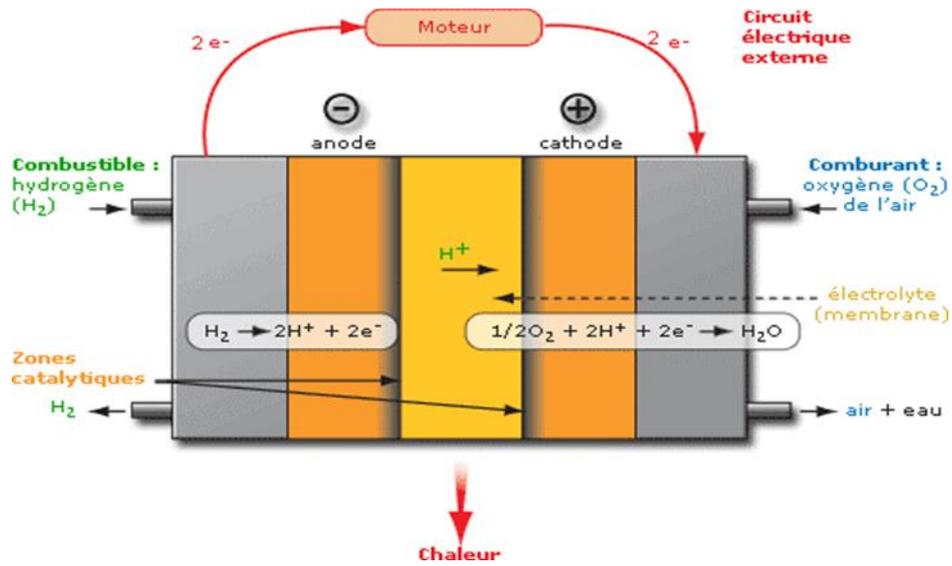
### **2.4. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :**

Parmi les divers systèmes existant des piles à combustible, la pile PEMFC est la plus prometteuse particulièrement pour les applications terrestres telles que le transport et la production électrique locales, à cause de la simplicité de conception et la basse température de fonctionnement.

Dans ce qui suit nous présentons le fonctionnement de la pile PEMFC à partir d'une étude technique qui montre le rôle de chaque composant de la pile, suivi d'une étude électrochimique qui permet de déduire les influences des conditions opératoires sur le fonctionnement.

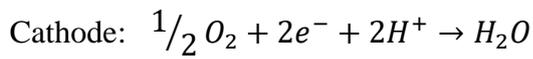
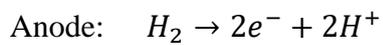
#### **2.4.1. Etude technique :**

La réaction principale dans la pile PEMFC est celle de l'oxygène avec l'hydrogène produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Nous utilisons l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme oxydant. L'hydrogène est introduit à l'anode, ses protons traversent la membrane (électrolyte) jusqu'à la cathode, alors que les électrons y sont conduits à travers le circuit électrique. A la cathode: l'oxygène, les protons et les électrons se combinent pour former de l'eau [23]. Sa schématique de base est illustré dans la figure (2.2).



**Fig. 2.2 :** Schéma de base d'une pile à combustible à électrolyte polymère solide

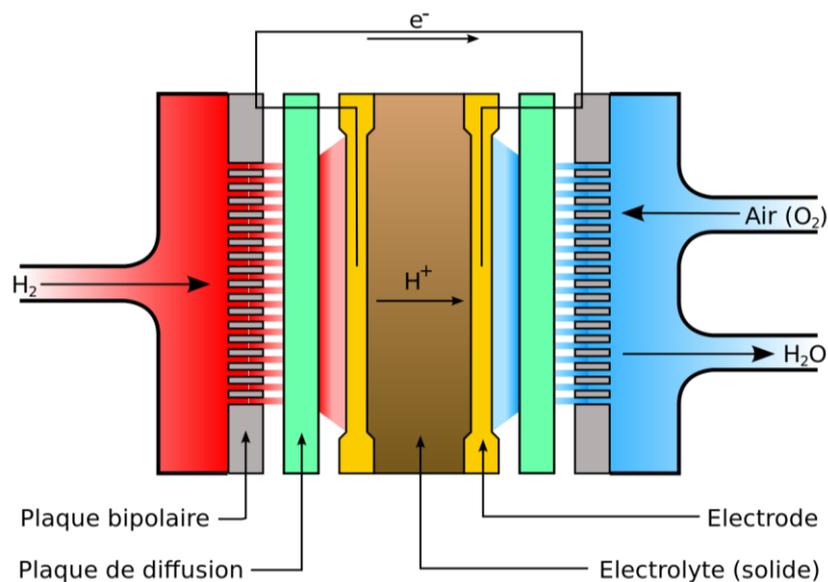
Les principales réactions dans la PEMFC



La réaction globale est donc:  $\frac{1}{2} O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$

#### 2.4.1.1. Les composants Fonctionnels:

Les composants fonctionnels d'une pile PEMFC unitaire sont donnés dans la figure 2.3 :



**Fig. 2.3 :** Schéma des composants fonctionnels d'une pile PEMFC

**a) Membrane polymère ionique (Electrolyte) :**

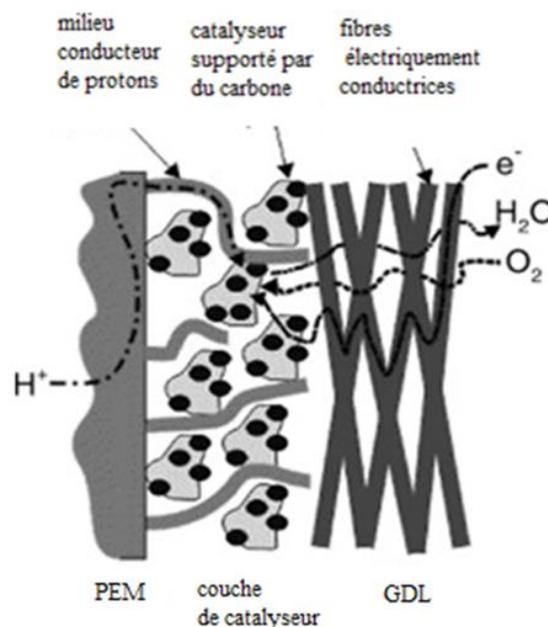
La membrane conductrice de protons constitue le cœur de la pile PEMFC. C'est la conductivité électrique qui détermine la recombinaison électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à des densités de courant élevées et sont principalement liées à la membrane. De plus, ces dernières doivent avoir une bonne résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, être imperméables aux gaz et maintenir une forte teneur en eau à des températures élevées, car cela régule la conductivité ionique. La membrane est ensuite connectée à deux électrodes, une de chaque côté, pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser les réactions chimiques [24].

**b) Les électrodes :**

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

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

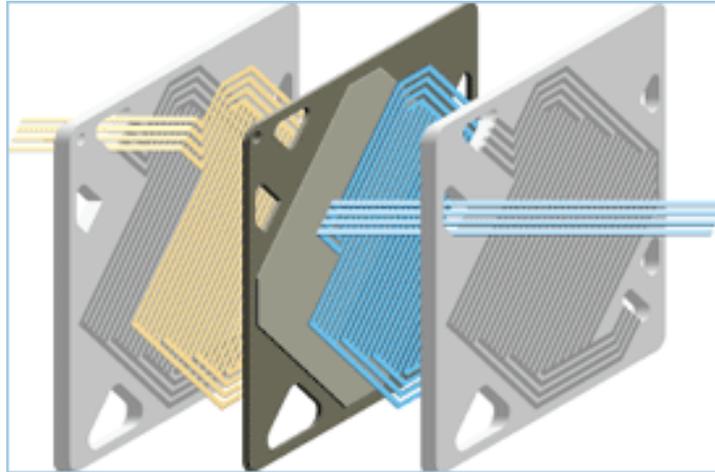
La partie de l'électrode imprégnée de pâte constitue la zone active. La partie non imprégnée constitue la zone diffusionnelle.



**Fig. 2.4 :** électrode d'une pile PEMFC

**c) Les plaques bipolaires :**

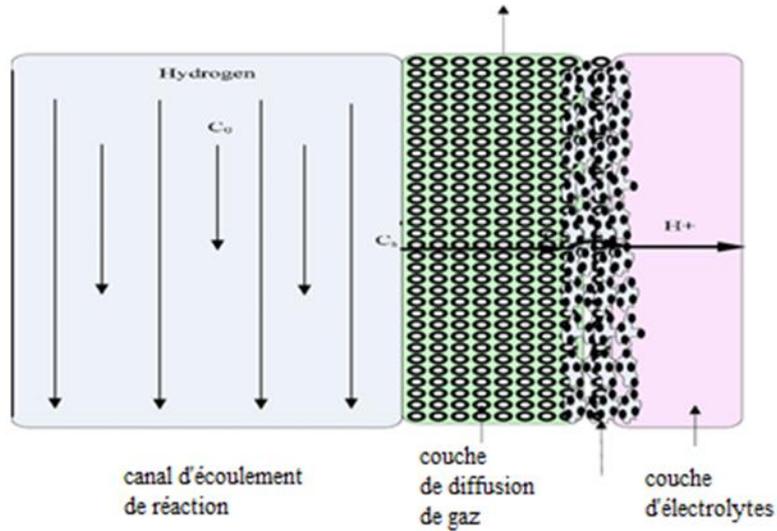
La fonction de la plaque bipolaire figure (2.5) est de collecter le courant électrique et de distribuer et séparer le gaz à l'anode et à la cathode. Par conséquent, le matériau de la plaque bipolaire doit avoir une conductivité électrique suffisante, et sa perméabilité aux gaz est supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons. Les plaques les plus courantes est en graphite.



**Fig. 2.5:** Les plaques bipolaires

**d) Les plaques de diffusion :**

Entourant les électrodes, ces plaques, d'une épaisseur de 100 à 300  $\mu\text{m}$  ont un double rôle: permettront la diffusion des gaz jusqu'aux électrodes et le transfert des électrons de l'anode vers la cathode, elles doivent donc être à la fois conductrices et poreuses. De plus elles assurent un rôle essentiel dans la gestion de l'eau en lui permettant, à la fois, d'être évacuée ou d'humidifier la membrane. La nature poreuse de ces supports permet aux gaz de diffuser, et en se dispersant, d'entrer en contact avec la surface entière de la membrane [25] figure (2.6).



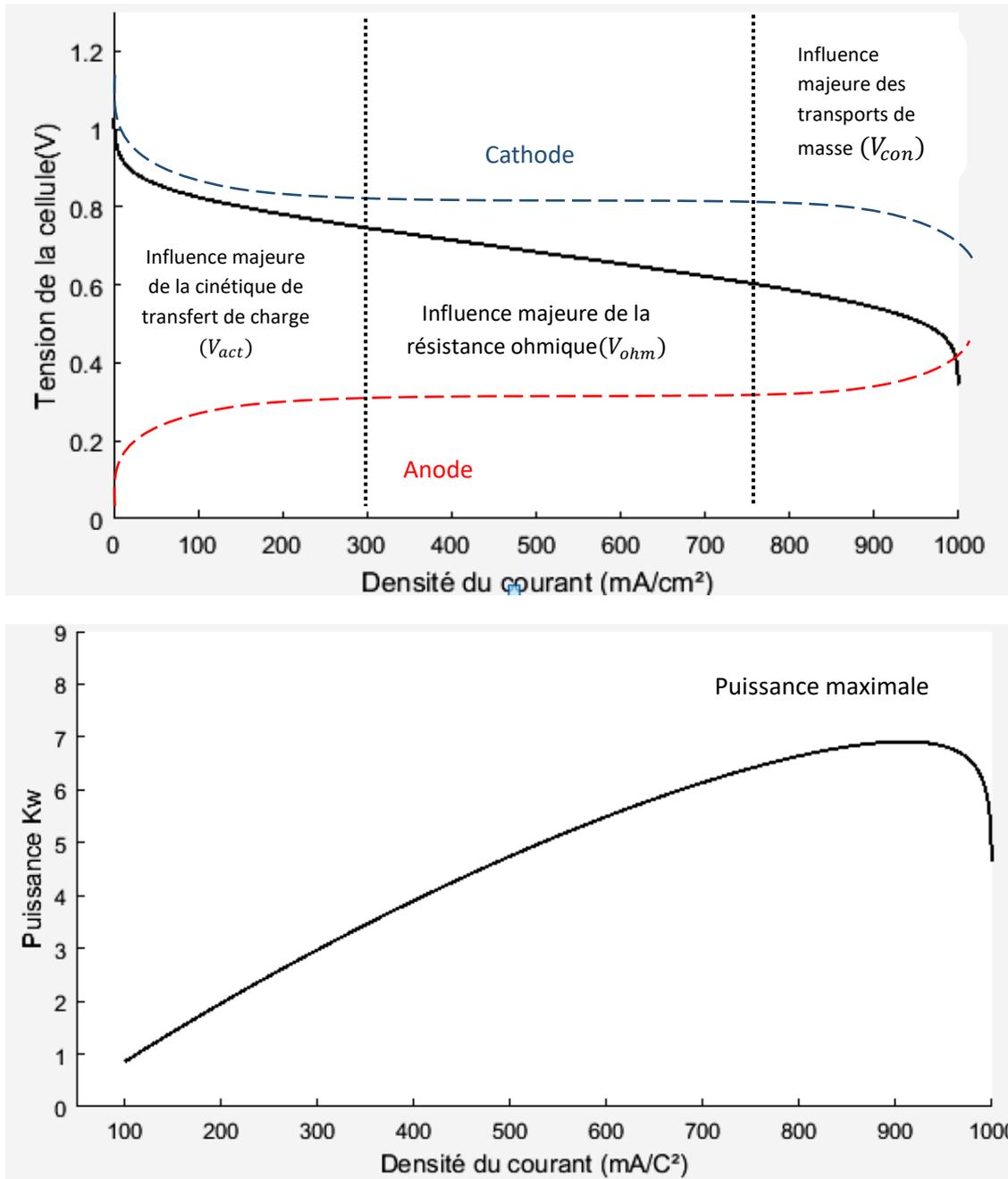
**Fig. 2.6 :** Les plaques de diffusion

**2.4.1.2. Les périphériques :**

Comme toute pile à combustible, la pile PEMF nécessite différents systèmes pour son fonctionnement : approvisionnement, refroidissement, contrôle et régulation. Le système de pile à combustible PEMFC est composé de nombreuses cellules connectées en série, d'un compresseur d'air, d'un humidificateur, d'un préchauffage, d'un échangeur de chaleur, d'un réservoir d'eau et de pompe de refroidissement. Ces composants cités sont illustré dans la figure (2.1). Ces périphériques sont utilisés dans le but d'assurer des meilleures performances de la pile PEMFC. Un seul inconvénient est présent, certain périphériques consommes une énergie importante ce qui influent considérablement sur le rendement globale du système.

**2.4.2. Etude électrochimique (Phénomène de Polarisation) :**

La tension utilisable, lorsque la pile est traversée par un courant raisonnable, s'éloigne de l'équilibre en raison des pertes irréversibles illustrées dans la figure (2.7).



**Fig. 2.7 :** (a) Tension de la pile en fonction de la densité de courant  
(b) Densité de puissance en fonction de la densité de courant

On peut constater sur la figure (2.7) qu'à faible densité de courant, la polarisation d'activation ( $V_{act}$ ) est dominante pour des faibles densités de courant. Les pertes ohmiques ( $V_{ohm}$ ), qui sont directement proportionnelles à la densité du courant, deviennent ensuite prépondérantes sur une large gamme de densité de courant. Dans la troisième zone, à hautes densités de courant, les pertes dues au transport du gaz deviennent dominantes (Pertes de concentration) ( $V_{con}$ ).

**a) Polarisation d'activation ( $V_{act}$ ):** La polarisation d'activation est présente quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. En d'autres termes, la polarisation d'activation est directement reliée au taux de la réaction électrochimique. Dans les deux cas, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation.

**b) Polarisation ohmique ( $V_{ohm}$ ):** Les pertes ohmiques sont dues à la résistance rencontrée par le flux d'ions dans l'électrolyte et à la résistance rencontrée par les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. Les pertes ohmiques sont principalement dues à l'électrolyte et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. L'électrolyte et les électrodes obéissent à la loi d'Ohm

**c) Polarisation de concentration ( $V_{con}$ ):** Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel due à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactifs, un gradient de concentration se forme. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de la concentration : la faible diffusion des gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactifs ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. A des densités de courant élevées, la lenteur du transport des réactifs ou des produits vers le site de réaction est la principale contribution à la polarisation de la concentration.

2.4.3. Le principe de fonctionnement du système de la pile PEMFC :

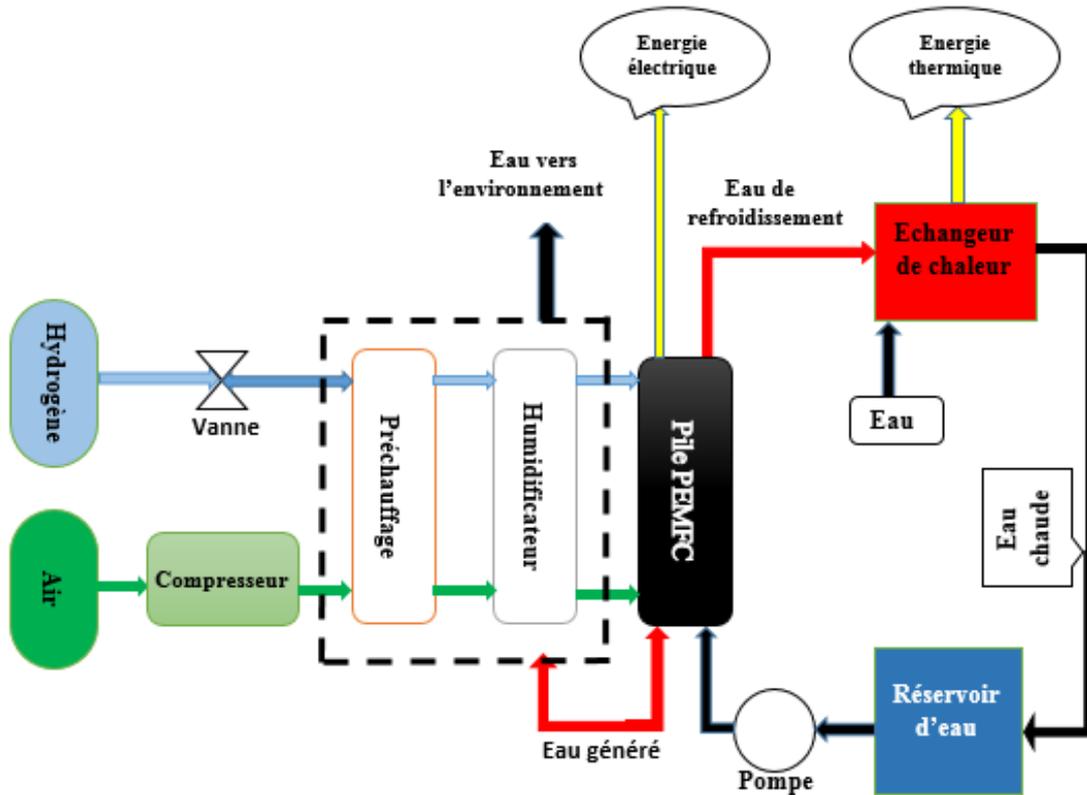


Figure 2.8 : Schéma simplifié du Système de la pile PEMFC

L'hydrogène et l'air sont mis pressurisés et humidifiés par le compresseur de gaz et l'humidificateur, l'air pressurisé et humidifié est introduit dans le préchauffage puis envoyés à la cathode et l'hydrogène à l'anode de la pile PEMFC. L'hydrogène et l'oxygène de l'air subissent une réaction électrochimique sous l'effet d'un catalyseur en générant de l'énergie électrique et de l'eau et libérant une quantité de chaleur résiduelle. L'énergie électrique est envoyée à la résidence. L'eau générée dans la réaction est utilisée par l'humidificateur pour fournir de la chaleur et de l'eau supplémentaires.

La plupart de la chaleur perdue est récupérée par le cycle de refroidissement de l'eau qui est entraîné par des pompes à eau pour fournir de l'énergie thermique aux autres dispositions, tels que la climatisation, le machine à absorption, le radiateur de chauffage [26].

## 2.5. La machine à absorption :



**Figure 2.9 :** Absorbeur au bromure de lithium a simple effet (CARRIER 16 DN)

Un refroidisseur à absorption est un cycle en boucle fermée qui utilise la chaleur perdue pour fournir un refroidissement ou une réfrigération. Jusqu'à présent, l'utilisation des refroidisseurs à absorption a été limitée par leurs efficacités relativement faibles à fournir du froid par rapport aux cycles de compression de vapeur. Un refroidisseur à absorption a généralement un coefficient de performance (COP) compris entre 0,5 et 1,5, alors que les cycles modernes de compression de vapeur ont des COP supérieurs à 3,0 [27]. Cependant, les refroidisseurs à absorption sont encore largement utilisés car ils peuvent utiliser la chaleur à basse température (<100 °C) pour fournir du froid. Dans ce contexte, le COP d'un refroidisseur à absorption ne doit pas être comparé au COP d'autres cycles de refroidissement, car l'énergie d'entrée d'un refroidisseur à absorption peut être essentiellement gratuite, car elle aurait été inutilisée dans la plupart des procédés. Ainsi, dans les procédés où la chaleur perdue à basse température est disponible et où le refroidissement est souhaité, il est souvent avantageux de mettre en œuvre un refroidisseur à absorption pour augmenter l'efficacité énergétique globale du procédé [28].

Cependant, il faut tenir compte de la période de récupération associée à l'investissement en capital et au refroidissement gratuit fourni par les refroidisseurs à absorption. Les refroidisseurs à absorption utilisent un couple réfrigérant-absorbant comme fluide de travail. Les deux combinaisons de fluides de travail les plus courantes sont eau/bromure de lithium (LiBr) et ammoniac( $NH_3$ )/eau. Notre étude se concentre sur l'intégration d'une machine à absorption (eau/bromure de lithium) dans un système de pile à combustible. Les cycles

peuvent être à demi, simple, double ou même triple effet. Les cycles à effets multiples nécessitent plus de composants et de la chaleur perdue à plus haute température, mais ont des COP plus élevés. Notre étude se concentre sur la machine à absorption à simple effet [29].

### **2.5.1. Les propriétés de la machine à absorption à simple effet :**

Les performances de la machine à absorption sont étroitement liées aux propriétés thermodynamiques, physiques et chimiques des fluides de travail utilisés, Pour cela, le couple Réfrigérant/Absorbant ( $H_2O$  /LiBr) doit satisfaire [30] :

- La température d'ébullition du réfrigérant pur doit présenter une large différence avec celle de l'absorbant ;
- La fraction du réfrigérant dans le mélange doit être la plus élevée possible ;
- La chaleur de vaporisation du réfrigérant doit être élevée ;
- Le mélange doit être chimiquement stable ;
- Le mélange doit être non toxique et non explosif ;
- Le mélange doit être non corrosif ;
- Le mélange doit être le moins cher possible ;

### **2.5.2. La machine à absorption au bromure de lithium à simple effet :**

Au cours des dernières années, le système d'absorption de bromure de lithium et d'eau est devenu important dans la réfrigération pour la climatisation. Il possède plusieurs avantages par rapport aux autres types de systèmes d'absorption tels que [31] :

- 1) Il a le coefficient de performance (COP) le plus élevé par rapport aux autres machines d'absorption à un seul étage au même cycle thermodynamique.
- 2) Ses composants sont plus simples, car il peut fonctionner efficacement sans avoir besoin de colonnes de rectification. Un générateur de base est suffisant en raison de la non-volatilité de l'absorbant (LiBr), ne permettant que la vapeur d'eau d'être chassée du générateur.
- 3) Moins de travail de pompe est nécessaire par rapport aux autres unités en raison du fonctionnement à des pressions de vide.

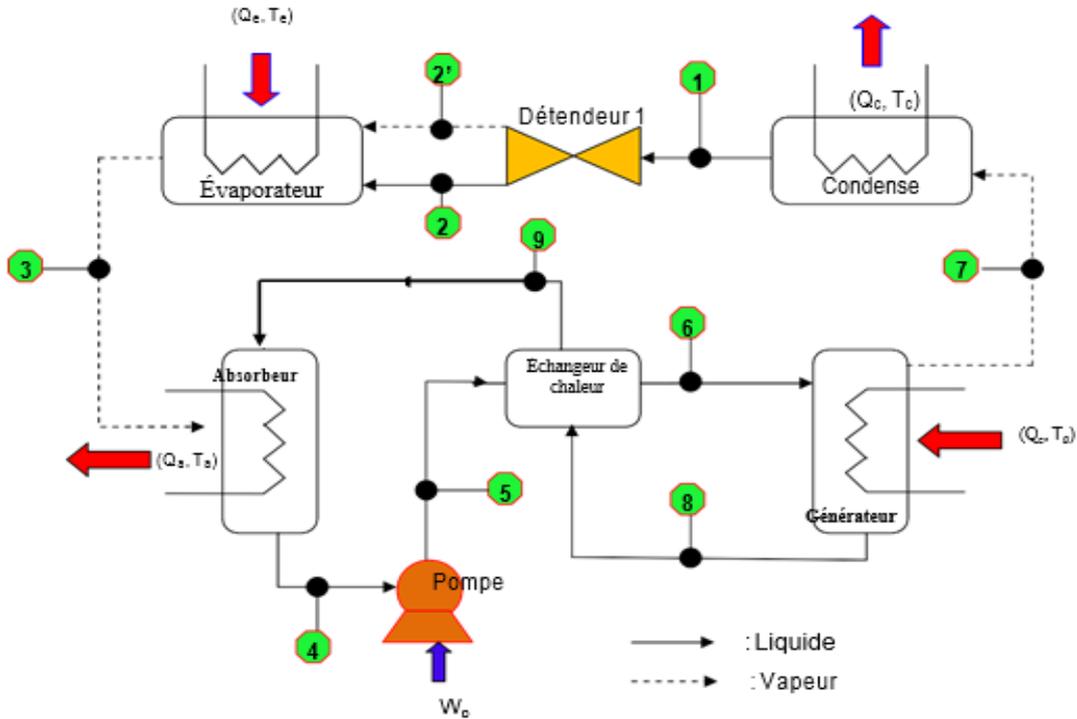
D'autre part, le système d'absorption de bromure de lithium/eau présente certains inconvénients tels que:

- 1) Il est limité à des températures d'évaporation relativement élevées puisque le réfrigérant est de l'eau. Cela signifie que la température d'évaporation au-dessus de 0°C doit généralement être satisfaite pour éviter le gel de l'écoulement.
- 2) La cristallisation du sel LiBr à des concentrations modérées ( $> 0,65$  kg de solution LiBr / Kg) fera basculer la plage de fonctionnement du cycle.
- 3) Les systèmes doivent être conçus dans des unités hermétiquement fermées car ils fonctionnent à des pressions de vide. Un mauvais fonctionnement en résulterait en cas de fuite d'air dans le système.

#### **2.5.2.1. Principe de fonctionnement :**

Comme le montre la figure (2.10), la machine à absorption utilisant le bromure de lithium (LiBr) à simple effet est constitué de : [30]

- **Un évaporateur** : permet d'absorber la chaleur de la source chaude.
- **Un générateur** : Où se fait la séparation réfrigérant-absorbant.
- **Un condenseur** : Permet de restituer la chaleur vers l'extérieur.
- **Un absorbeur** : Ce dernier permet la régénération de la solution riche.
- **Un échangeur de chaleur** : Echange thermique entre solution riche et solution pauvre.
- **Le détendeur** : Maintenir la différence de pression entre le condenseur (haute pression) et l'évaporateur (basse pression).
- **Une pompe** : pour la circulation de la solution.



**Fig. 2.10 :** Machine à absorption au bromure de lithium à simple effet [31]

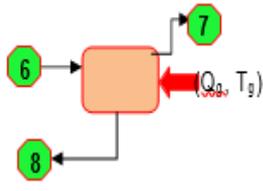
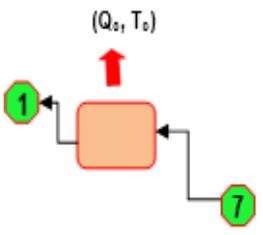
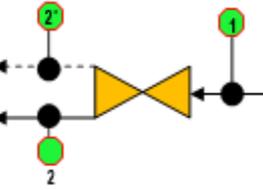
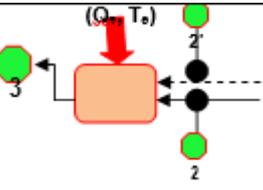
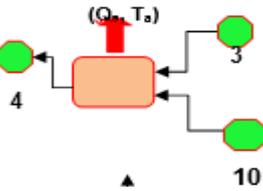
Le principe de fonctionnement peut être décrit comme suit [29] :

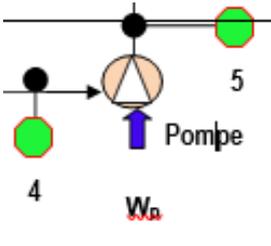
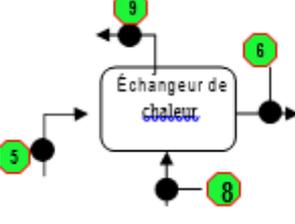
- Dans le générateur, La solution de  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  est chauffée par une source de chaleur (eau de refroidissement de la pile PEMFC) à une pression et une température élevées, puis séparée en vapeur de réfrigérant et en solution de  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  concentrée (solution de  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  forte).
- Dans le condenseur, La vapeur du fluide frigorigène est condensée en un flux de fluide frigorigène liquide à haute pression, puis envoyée à l'évaporateur.
- Dans l'évaporateur, le flux de liquide réfrigérant est évaporé à basse pression et à basse température, ce qui provoque une élimination de la chaleur de l'eau réfrigérée.
- Ensuite, la vapeur se dérive vers l'absorbeur.
- La solution de  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  diluée (solution de  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  faible) est pompée dans le générateur pour le cycle suivant.

### 2.5.2.2. Les bilans de masse et d'énergie de la machine à absorption :

Les bilans de masse et d'énergie ont été établis en se référant au schéma représentatif de la figure (2.10). Le tableau 2.1 récapitule les différentes équations résultantes [31] :

**Tableau 2.1** : Bilans massiques et énergétiques sur les composants de la machine à absorption au bromure de lithium à simple effet

	<i>Schéma de principe de chaque composant</i>	<i>Équations des bilans</i>
<b>Générateur</b>		<p><b>Bilan massique global</b> : <math>\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8</math> (2.1)  <math>\dot{m}</math> : Débit massique du flux correspondant en kg/s</p> <p><b>Bilan massique partiel</b> : <math>x_6 \cdot \dot{m}_6 = x_7 \cdot \dot{m}_7 + x_8 \cdot \dot{m}_8</math> (2.2)  <math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène</p> <p><b>Bilan énergétique</b> : <math>\dot{m}_6 \cdot H_6 + \dot{Q}_g = \dot{m}_7 \cdot H_7 + \dot{m}_8 \cdot H_8</math> (2.3)  <math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant (kJ/kg)</p> <p><b>Puissance fournie</b> : <math>\dot{Q}_g = \dot{m}_7 \cdot (H_7 - H_6) + \dot{m}_8 \cdot (H_8 - H_6)</math> (2.4)</p>
<b>Condenseur</b>		<p><b>Bilan massique global</b> : <math>\dot{m}_1 = \dot{m}_7 = \dot{m}</math> (2.5)  <math>\dot{m}</math> : Débit massique du calorigène pur en kg/s</p> <p><b>Bilan massique partiel</b> : <math>x_1 \cdot \dot{m}_1 = x_7 \cdot \dot{m}_7</math> (2.6)  <math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène.</p> <p><b>Bilan énergétique</b> : <math>\dot{m}_1 \cdot H_1 + \dot{Q}_c = \dot{m}_7 \cdot H_7</math> (2.7)  <math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant kJ/kg</p> <p><b>Puissance fournie</b> : <math>\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (H_7 - H_1)</math> (2.8)</p>
<b>Détendeur</b>		<p><b>Bilan massique global</b> : <math>\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2'}</math> (2.9)  <math>\dot{m}</math> : Débit massique du flux correspondant</p> <p><b>Bilan massique partiel</b> : <math>x_1 \cdot \dot{m}_1 = x_2 \cdot \dot{m}_2 + x_{2'} \cdot \dot{m}_{2'}</math> (2.10)  <math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène.</p> <p><b>Bilan énergétique</b> : <math>\dot{m}_1 \cdot H_1 = \dot{m}_2 \cdot H_2 + \dot{m}_{2'} \cdot H_{2'}</math> (2.11)  <math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant (kJ/kg)</p> <p><b>Puissance fournie</b> : Pas de puissance fournie</p>
<b>Evaporateur</b>		<p><b>Bilan massique global</b> : <math>\dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2'} = \dot{m}_1 = \dot{m}</math> (2.12)  <math>\dot{m}</math> : Débit massique du flux correspondant</p> <p><b>Bilan massique partiel</b> : <math>x_1 \cdot \dot{m}_1 = x_3 \cdot \dot{m}_3</math> (2.13)  <math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène</p> <p><b>Bilan énergétique</b> : <math>\dot{m}_1 \cdot H_1 + \dot{Q}_e = \dot{m}_3 \cdot H_3</math> (2.14)  <math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant kJ/kg</p> <p><b>Puissance fournie</b> : <math>\dot{Q}_e = \dot{m}_3 \cdot H_3 - \dot{m}_1 \cdot H_1 = \dot{m} \cdot (H_3 - H_1)</math> (2.15)</p>
<b>Absorbeur</b>		<p><b>Bilan massique global</b> : <math>\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10}</math> (2.16)</p> <p><b>Bilan massique partiel</b> : <math>x_4 \cdot \dot{m}_4 = x_3 \cdot \dot{m}_3 + x_{10} \cdot \dot{m}_{10}</math> (2.17)  <math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène.</p> <p><b>Bilan énergétique</b> : <math>\dot{m}_4 \cdot H_4 + \dot{Q}_a = \dot{m}_3 \cdot H_3 + \dot{m}_{10} \cdot H_{10}</math> (2.18)  <math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant</p> <p><b>Puissance fournie</b> : <math>\dot{Q}_a = \dot{m}_3 \cdot H_3 + \dot{m}_{10} \cdot H_{10} - \dot{m}_4 \cdot H_4 = \dot{m}_3 \cdot (H_3 - H_4) + \dot{m}_{10} \cdot (H_{10} - H_4)</math> (2.19)</p>

<p style="text-align: center;"><b>Pompe</b></p>		<p><b>Bilan massique global :</b> <math>\dot{m}_4 = \dot{m}_5</math> (2.20)</p> <p><b>Bilan massique partiel :</b> <math>x_4 \cdot \dot{m}_4 = x_5 \cdot \dot{m}_5</math> (2.21)</p> <p><math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène</p> <p><b>Bilan énergétique :</b> <math>\dot{m}_4 \cdot H_4 + W_p = \dot{m}_3 \cdot H_3</math> (2.22)</p> <p><math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant</p> <p><b>Puissance fournie :</b> <math>W_p = \dot{m}_4 \cdot (H_5 - H_4)</math> (2.23)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Echangeur</b></p>		<p><b>Bilan massique global :</b> <math>\dot{m}_5 + \dot{m}_8 = \dot{m}_6 + \dot{m}_9</math> (2.24)</p> <p><b>Bilan massique partiel :</b> <math>x_5 \cdot \dot{m}_5 + x_8 \cdot \dot{m}_8 = x_6 \cdot \dot{m}_6 + x_9 \cdot \dot{m}_9</math> (2.25)</p> <p><math>x</math> : Fraction massique du fluide frigorigène</p> <p><b>Bilan énergétique :</b> <math>\dot{m}_5 \cdot H_5 + \dot{m}_8 \cdot H_8 = \dot{m}_6 \cdot H_6 + \dot{m}_9 \cdot H_9</math> (2.26)</p> <p><math>H</math> : Enthalpie du flux correspondant (kJ/kg)</p> <p><b>Puissance fournie :</b> Pas de puissance fournie</p>

On a donc :

- $\dot{m}_7 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2'} = \dot{m}_3 = \dot{m}_c$  : Débit massique du fluide frigorigène.
- $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_r$  : Débit massique de la phase riche en réfrigérant
- $\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_p$  : Débit massique de la phase pauvre en réfrigérant

## 2.6. Conclusion :

Pour des meilleures performances du Système CCHP pour une résidence, la pile à combustible PEMFC est le moteur le plus convenable à cause de son rendement plus élevé, de son réduction du bruit et de la pollution.

Pour la réfrigération et la climatisation d'une résidence, la machine à absorption au bromure de lithium à simple effet est le choix le plus sûr à cause de ces performances et de sa simplicité par rapport aux autres machines.

## Chapitre 3

### Modélisation d'un système combiné de refroidissement, de chauffage et de production d'électricité (CCHP)

#### 3.1. Introduction :

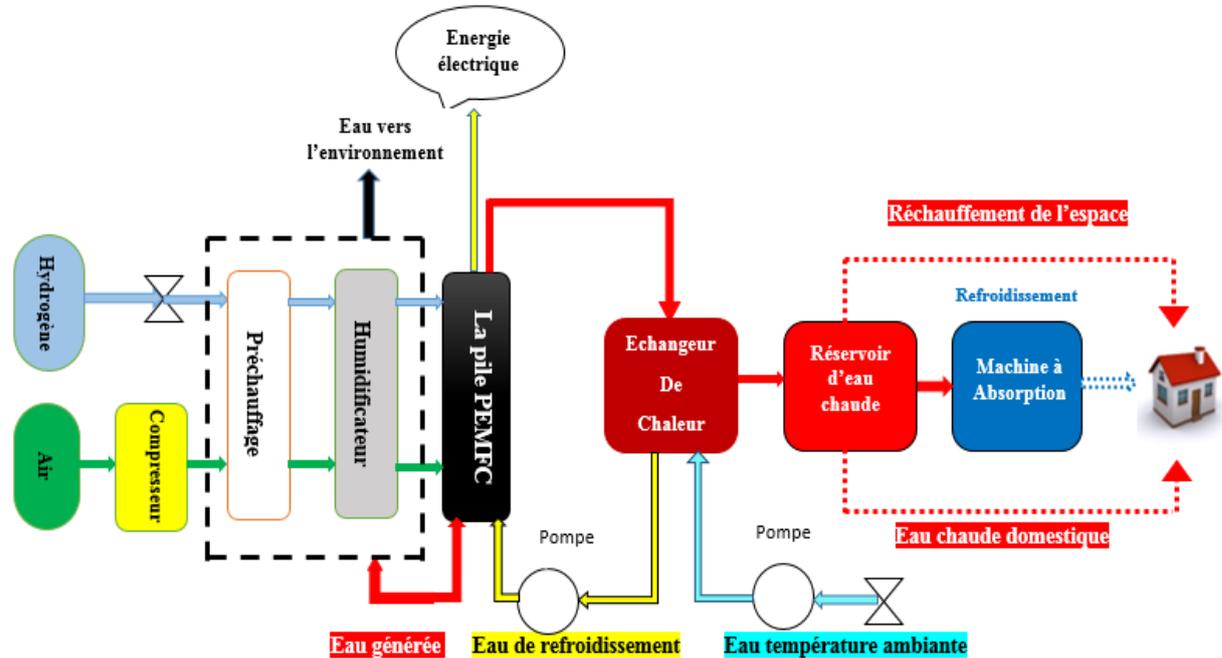
En raison de la croissance considérable de la consommation d'énergie et de la pollution de l'environnement, les énergies alternatives renouvelables et les systèmes d'alimentation efficaces ont reçu une grande attention de la part des gouvernements et des chercheurs. Les systèmes combinés de refroidissement, de chauffage et d'électricité à haut rendement et à faibles émissions polluantes sont des technologies prometteuses pour résoudre ces problèmes. Ils peuvent fournir suffisamment d'énergie pour répondre à la demande des applications industrielles, commerciales et résidentielles avec un faible taux de consommation d'énergie primaire et d'émissions des gaz à effet de serre. Un système (combined cooling heating and power system) (CCHP) utilisant des énergies renouvelables peut être classé en fonction du moteur principal (par exemple, piles à combustible, capteurs solaires, chaudières à biomasse, centrales éoliennes). En particulier, en raison de leur petite taille, de leur faible niveau sonore et de leur coût, les piles à combustible et les capteurs solaires sont les moteurs principaux les plus populaires et les plus appropriés pour les systèmes CCHP résidentiels [11].

Dans ce chapitre nous présentons la description et la modélisation du système CCHP résidentiel basé sur la pile à combustible de type PEMFC, comprenant une machine à absorption au bromure de lithium à simple effet ainsi que les différents accessoires du système. L'objectif principal est d'étudier l'effet des paramètres clés sur les performances de la pile à combustible, la machine à absorption et de l'ensemble du système dans des conditions d'exploitation en mode été/hiver.

#### 3.2. Description du système :

Comme le montre la figure (3.1), le système CCHP est composé d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC, d'un échangeur de chaleur, d'une machine à absorption à simple effet et des accessoires (humidificateurs, système de préchauffage des gaz, compresseur d'air et des pompes...etc.). L'hydrogène et l'air sont préchauffés et humidifiés, puis dirigés vers la pile PEMFC pour produire de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique est convertie en courant alternatif, elle est ensuite envoyée pour alimenter un habitat résidentiel. La chaleur dégagée par la réaction électrochimique est récupérée par l'eau de refroidissement de la pile. Une partie de cette

chaleur est utilisée pour le préchauffage et l'humidification des gaz à l'entrée de la pile, une partie sert à faire fonctionner la machine à absorption à simple effet. La chaleur résiduelle est utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire. [11].



**Fig. 3.1** : Système combiné de refroidissement, de chauffage et d'électricité (CCHP)

### 3.3. Modélisation mathématique du système CCHP :

La modélisation énergétique du système CCHP proposé dans cette étude a pour but de déterminer les différentes puissances des éléments principaux ainsi que les différents rendements. Pour ce faire un certain nombre d'hypothèses doivent être prises en considération dans notre modélisation.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- 1) Le système fonctionne au régime permanent.
- 2) La chute de pression dans la pile à combustible est négligeable et la pression dans les canaux d'écoulement des gaz est constante.
- 3) L'air entrant dans la pile PEMFC est un mélange de 79% d'azote et 21% d'oxygène.
- 4) L'air et l'hydrogène à l'admission sont complètement humidifiés.
- 5) La pile PEMFC est parfaitement isolée et les pertes de chaleur vers l'environnement sont négligeables.

- 6) La température et la pression de fonctionnement de la pile sont respectivement, 90°C et 1atm.
- 7) La température des gaz et celle de l'eau à la sortie de la pile à combustible sont égales à la température de fonctionnement de la pile.
- 8) La température à l'entrée de la pile est inférieure à celle de fonctionnement.
- 9) Les pertes thermiques à travers la cuve, l'échangeur de chaleur et les tubes représentent 5% de la puissance thermique délivrée par le système PEMFC

### 3.3.1. Modèle mathématique du système PEMFC :

#### 3.3.1.1. Modélisation de la pile PEMFC :

Rappelons que notre système CCHP est basé sur une pile PEMFC, donc il est indispensable de déterminer la puissance délivrée par la pile. Le potentiel de sortie réel d'une cellule élémentaire de pile à combustible ( $V_{cell}$ ) décroît par rapport au potentiel de Nernst ( $E_{nernst}$ ), à cause des surtensions survenant lors du fonctionnement. Ces derniers sont : la surtension d'activation ( $V_{act}$ ), la surtension ohmique ( $V_{ohm}$ ) et la surtension de concentration ( $V_{con}$ ). La tension réelle à la sortie de la cellule s'exprime comme suit :

$$V_{cell} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (3.1)$$

- **Tension de Nernst ( $E_{nernst}$ ) :**

Le potentiel de Nernst d'une cellule est obtenu en circuit ouvert, il est exprimé par l'équation suivante [33] :

$$E_{nernst} = E_0 - 0.85 \times 10^{-3} \cdot (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot (\log(P_{H_2}) + 0.5 \times \log(P_{O_2})) \quad (3.2)$$

$E_0$  (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.  $P_{N_2}$  est la pression partille de l'azote. Elles sont données par les équations suivantes [32] :

$$P_{H_2} = 0.5 \cdot RH_a \cdot P_{H_2O}^{Sat} \left( \frac{1}{\left( e^{\left( \frac{1.635 \cdot (1/A)}{T^{1.334}} \right)} \cdot \left( RH_a \cdot \frac{P_{H_2O}^{Sat}}{Pa} \right) \right)} - 1 \right) \quad (3.3)$$

$$P_{O_2} = P_c - (RH_c \cdot P_{H_2O}^{Sat}) - P_{N_2} \cdot e^{\frac{0.291 \cdot (I/A)}{T^{0.832}}} \quad (3.4)$$

$$P_{N_2} = \frac{0.79}{0.21} \cdot P_{O_2} \quad (3.5)$$

$P_a$  et  $P_c$  sont la pression des gaz à l'entrée de l'anode et de la cathode,  $RHa$  et  $RHc$  représente respectivement l'humidité relative de la vapeur d'eau à l'anode et la cathode. Le symbole  $A$  représente la surface active de la membrane et  $P_{H_2O}^{Sat}$  dénote la pression de saturation de la vapeur d'eau qui est donnée par [33] :

$$P_{H_2O}^{Sat} = \exp [\log(10) \cdot (2.95 \times 10^{-2} \cdot (T - 273.15) - 9.18 \times 10^{-5} \cdot (T - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7} \cdot (T - 273.15)^3 - 2.18)] \quad (3.6)$$

- **Surtension d'Activation ( $V_{act}$ ) :**

La surtension d'activation  $V_{act}$  est causée par la limité de taux de transfert de charges, elle donnée par [33] :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I)] \quad (3.7)$$

Les paramètres  $\xi$  sont des coefficients paramétriques de chaque modèle de cellule,  $I$  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 :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6} \cdot e^{\frac{498}{T}} \quad (3.8)$$

- **Surtension Ohmique ( $V_{ohm}$ ) :**

Les surtensions Ohmiques ayant lieu au niveau de l'électrolyte et les électrodes obéissent à la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante [33] :

$$V_{ohm} = I \cdot (R_M + R_C) \quad (3.9)$$

$R_C$  est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.  $R_M$  est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante [33] :

$$R_M = \frac{\rho_M}{A} l \quad (3.10)$$

$\rho_M$  est la résistivité de la membrane en ( $\Omega$  cm). Le symbole  $A$  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 [33] :

$$\rho_M = \frac{181.6 \cdot \left[ 1 + 0.03 \cdot \left( \frac{l}{A} \right) + 0.062 \cdot \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{l}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda - 0.634 - 3 \cdot \left( \frac{l}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4.18 \cdot \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (3.11)$$

$\lambda$  : Représente la teneur en eau de la membrane

- **Surtension de Concentration ( $V_{con}$ ) :**

Le transport de masse affecte les concentrations d'hydrogène et d'oxygène. Ceci, à son tour, provoque une diminution des pressions partielles de ces gaz. La réduction des pressions d'oxygène et d'hydrogène dépend du courant électrique et des caractéristiques physiques du système. Pour déterminer une équation de cette chute de tension, la densité de courant maximale est définie,  $J_{max}$  ( $mA/cm^2$ ), sous laquelle le carburant est utilisé au même rythme que la vitesse d'alimentation maximale. La densité de courant ne peut pas dépasser cette limite car le carburant ne peut pas être fourni à un débit plus élevé. Les valeurs typiques pour  $J_{max}$  sont comprises entre 500 et 1500 ( $mA/cm^2$ ). Ainsi,  $V_{con}$  est la chute de tension (V) due au transport de masse et peut être déterminée par [33] :

$$V_{con} = -b \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (3.12)$$

$b$  est un coefficient paramétrique qui doit être estimé,  $J$  et  $J_{max}$  représentent respectivement la densité du courant et la densité de courant maximale.

- **Tension de sortie de la pile PEMFC :**

La pile PEMFC est composée de plusieurs cellules connectées en série. La tension de la pile PEMFC peut être calculée par [34] :

$$V_{st} = N \cdot V_{cell} \quad (3.13)$$

$N$  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 suivantes [34] :

$$P_{el-st} = V_{st} \cdot I \quad (3.14)$$

$$P_{th-st} = N \cdot (LHV - V_{cell}) \cdot I \quad (3.15)$$

$$P_{st} = P_{el-st} + P_{th-st} \quad (3.16)$$

$LHV$  est la tension de la cellule si l'eau produite est à l'état vapeur, elle est de (1,25 V). Le rendement électrique et thermique de la pile sont respectivement données par [34] :

$$\eta_{el-st} = \mu_f \cdot \frac{V_{cell}}{LHV} = \frac{1}{S_{H_2}} \cdot \frac{V_{cell}}{LHV} \quad (3.17)$$

$$\eta_{th-st} = \mu_f \cdot \frac{LHV - V_{cell}}{LHV} = \frac{1}{S_{H_2}} \cdot \left(1 - \frac{V_{cell}}{LHV}\right) \quad (3.18)$$

$\mu_f$  est le facteur d'utilisation de l'hydrogène,  $S_{H_2}$  est le coefficient stœchiométrique de l'hydrogène ( $S_{H_2} = 1.15$ )

### 3.3.1.2. Modélisation des accessoires du système de la pile PEMFC :

Les puissances consommées par les accessoires de la pile à combustible doivent être déterminées afin d'évaluer les performances du système global. La figure (3.3) indique ces différents accessoires.

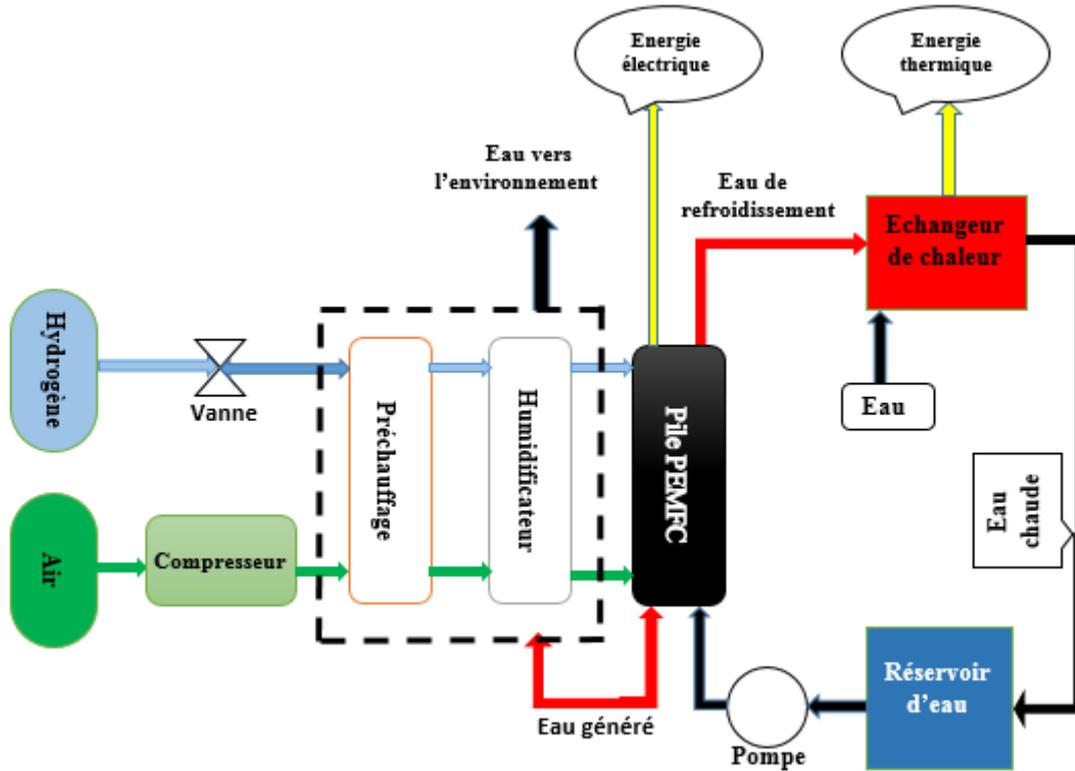


Fig. 3.2 : Schéma simplifié du système PEMFC

- **Compresseur d'air :**

La haute pression est l'une des paramètres pour garantir la bonne performance de la pile à combustible PEMFC. L'air à l'entrée doit être comprimé par le compresseur. La consommation d'énergie peut être importante (le rendement du compresseur est supposé être de 100%). La puissance consommée par le compresseur est calculée par [34] :

$$P_{comp} = C_P \cdot \Delta T_{gas} \cdot \dot{m}_{air} \quad (3.19)$$

$$\Delta T_{gas} = T_2 - T_1 = T_1 \cdot \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right) \quad (3.20)$$

$$\gamma = C_P / C_V \quad (3.21)$$

$C_p$  et  $C_v$  sont respectivement, la chaleur spécifique de l'air à l'entrée à pression et volume constants ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

$\Delta T_{gas}$  est l'élévation de la température du gaz à l'entrée après compression (K).

$P_1$  et  $P_2$  sont respectivement les pressions de gaz avant et après compression, (atm).

$\gamma$  est le rapport de  $C_p$  et  $C_v$ .

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

$$\dot{m}_{air} = \frac{1}{0.21} \cdot N_{O_2} \cdot M_{air} \quad (3.22)$$

$M_{air}$  est la masse molaire de l'air,  $N_{O_2}$  représente le flux molaire de l'oxygène à l'entrée de la cathode. Il est déterminé par:

$$N_{O_2} = S_c \cdot \frac{I}{4 \cdot F} \cdot N \quad (3.23)$$

$N$  est le nombre de cellule ;  $S_c$  est le coefficient stœchiométrique de l'air ;  $F$  est la constante de Faraday ( $F=96485 \cdot \text{s/mol}$ )

- **Humidificateur :**

La puissance thermique consommée par l'humidificateur du gaz peut être égale à la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer l'eau d'une température (298K) jusqu'à l'état de la vapeur saturée [34].

$$P_{Humid} = \Delta h_{H_2O} \cdot (f_{H_2O-air} + f_{H_2O-H_2}) \quad (3.24)$$

$f_{H_2O-air}$  et  $f_{H_2O-H_2}$ , sont respectivement, les flux molaires de la vapeur d'eau contenue dans l'air et l'hydrogène ( $\text{mol/s}$ )

$$f_{H_2O-air} = \frac{RH_c \cdot (N_{O_2} + N_{N_2}) \cdot P_{H_2O}^{sat}}{P_c - RH_c \cdot P_{H_2O}^{sat}} \quad (3.25)$$

$$f_{H_2O-H_2} = \frac{RH_a \cdot N_{H_2} \cdot P_{H_2O}^{sat}}{P_a - RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat}} \quad (3.26)$$

Les flux molaires de l'hydrogène et de l'azote sont respectivement données par :

$$N_{H_2} = S_a \cdot \frac{I}{2 \cdot F} \cdot N \quad (3.27)$$

$$N_{N_2} = S_c \cdot \frac{I \cdot (0.79/0.21)}{4 \cdot F} \cdot N \quad (3.28)$$

$\Delta h_{H_2O}$  est la différence d'enthalpie entre l'état de l'eau à 298.15 K et l'état de la vapeur saturée à la température d'entrée du gaz ( $kJ/mol$ ) [34]

$$\Delta h_{H_2O} = C_{P_{H_2O}} \cdot M_{H_2O} \cdot (T - T_{amb}) \quad (3.29)$$

$C_{P_{H_2O}} \cdot M_{H_2O}$  sont respectivement la chaleur spécifique de la vapeur d'eau ( $kJ/kg \cdot K$ ) et la masse molaire ( $kJ/mol$ )

- **Préchauffage :**

Le préchauffage des gaz de la température ambiante  $T_{amb}$  jusqu'à la température désirée à l'entrée de la pile peut être donné comme suit [32] :

$$P_{hg} = (\dot{m}_{air} \cdot C_p + \dot{m}_{H_2} \cdot C_{P_{H_2}}) \cdot (T - T_{amb}) \quad (3.30)$$

$\dot{m}_{air}$  et  $\dot{m}_{H_2}$  sont respectivement le débit massique de l'air et celui de l'hydrogène. Le débit d'hydrogène ( $kg/s$ ) est calculé par :

$$\dot{m}_{H_2} = N_{H_2} \cdot M_{H_2} \quad (3.31)$$

$C_p$  et  $C_{P_{H_2}}$  sont la chaleur spécifique de l'air et de l'hydrogène ( $kJ/kg \cdot K$ ).

- **Pompe et autres équipements :**

La pompe à eau et ces accessoires, les régulateurs, les vannes et les capteurs consomment une puissance électrique remarquable qui a une influence sur les performances du système de pile à combustible. La puissance consommée (en kW) peut être calculé comme suit [34] :

$$P_{pump} = (0.00152 \cdot f_W^3 - 0.00093 \cdot f_W^2 + 0.57 \cdot f_W + 386.4) \cdot 10^{-3} \quad (3.32)$$

$f_W$  est le débit de refroidissement ( $l/min$ ).

$$f_W = 6 \times 10^4 \cdot (P_{th-st} - P_{humid}) / (\rho_W \cdot C_{P_W} \cdot \Delta T_W) \quad (3.33)$$

➤ **Les Puissances du système :**

Les performances du système PEMFC sont les résultats d'une prise en compte de la puissance produite par la PEMFC et la consommation d'énergie des composants auxiliaires, elles peuvent être données comme suit [34] :

1. Puissance électrique du système :

$$P_{el\_sys} = P_{el\_st} - P_{comp} - P_{pump} \quad (3.34)$$

2. Puissance thermique du système :

$$P_{th\_sys} = P_{th\_st} - P_{humid} - P_{hg} \quad (3.35)$$

3. Puissance globale du système :

$$P_{sys} = P_{el\_st} + P_{th\_st} - (P_{comp} + P_{pump} + P_{humid} + P_{hg}) \quad (3.36)$$

➤ **Les Rendements du système :**

1. Rendement électrique du système :

$$\eta_{el\_sys} = \frac{P_{el\_sys}}{S_{H_2} \cdot LHV \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3}} \quad (3.37)$$

2. Rendement thermique du système

$$\eta_{th\_sys} = \frac{P_{th\_sys}}{S_{H_2} \cdot LHV \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3}} \quad (3.38)$$

3. Rendement globale de système

$$\eta_{sys} = \frac{P_{el\_st} + P_{th\_st} - (P_{comp} + P_{pump} + P_{humid} + P_{hg})}{S_{H_2} \cdot LHV \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3}} \quad (3.39)$$

### 3.4. Les pertes dues aux accessoires du système CCHP :

La chaleur perdue par l'échangeur de chaleur, les cuves de stockage d'eau ainsi que les tubes de raccordement ...etc, représentent 5% de la puissance thermique générée par le système de pile à combustible. Cette dernière peut être exprimée par :

$$Q_P = 0,05 \cdot P_{th\_sys} \quad (3.40)$$

### 3.5. Modélisation de la machine à absorption :

La machine à absorption proposée dans notre système est de simple effet. Elle fonctionne par le couple  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ . Son schéma de principe de fonctionnement est montré par la figure (3.3). Il est à noter que [35] :

- Le condenseur et l'évaporateur ne contiennent que de l'eau pure, L'équilibre thermodynamique est atteint dans chaque composant,
- Les coefficients d'échanges interne et externe des échangeurs de chaque composant sont constants,
- la vapeur sortant de l'évaporateur est saturée,
- toutes les variables thermodynamiques (T, P, X...) sont supposées uniformes dans l'espace de chaque composant,
- Le générateur et le condenseur sont soumis à la même pression, de même pour l'évaporateur et l'absorbeur.
- On suppose que les détentes sont isenthalpiques.

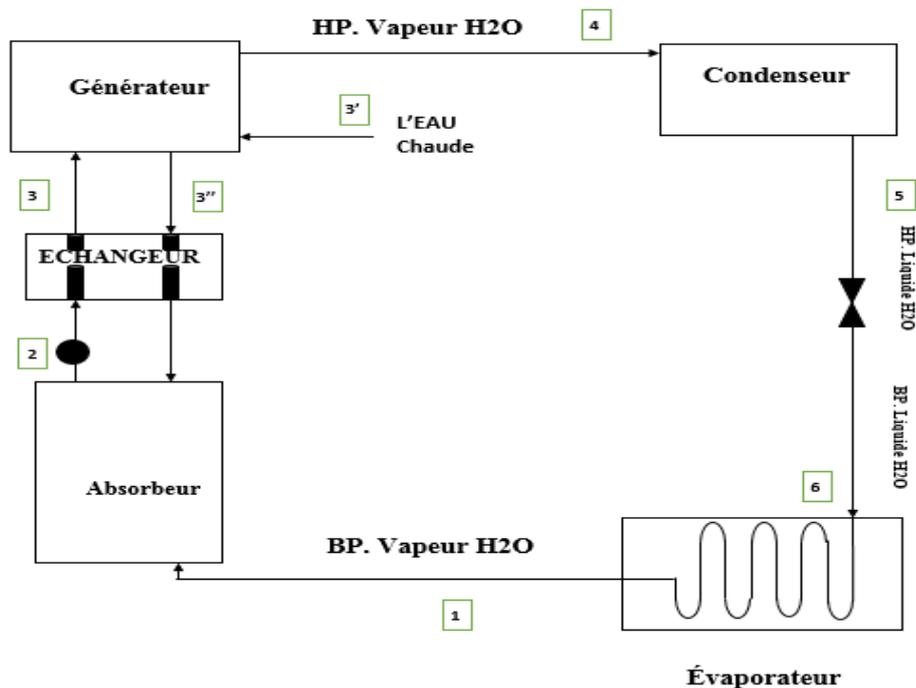


Figure 3.3 : La machine à absorption à simple effet.

La capacité de refroidissement de l'évaporateur est donnée par [32] :

$$Q_E = COP \cdot Q_G \quad (3.41)$$

avec:

$$Q_G = P_{th\_sys} - Q_P - Q_{hw} \quad (3.42)$$

$Q_G$  est la puissance thermique fournie au générateur de chaleur.

COP est le coefficient de performance.

La quantité de chaleur du besoin en eau chaude pour une famille composée de ( $m$ ) personnes peut être exprimée par [33].

$$Q_{hw} = \frac{V \cdot m \cdot 10^3 \cdot (T_{hw} - T_{amb}) \cdot C_{PW}}{Journée} \quad (3.43)$$

$V$  est le volume d'eau par personne ( $m^3$ ) ;

$m$  est le nombre de personne résidé ;  $m = 5$  ;

$T_{hw}$  est la température du besoin;  $T_{hw} = 50 + 273.15$  k;

$T_{amb}$  est la température ambiante;  $T_{amb} = 298,15$  k;

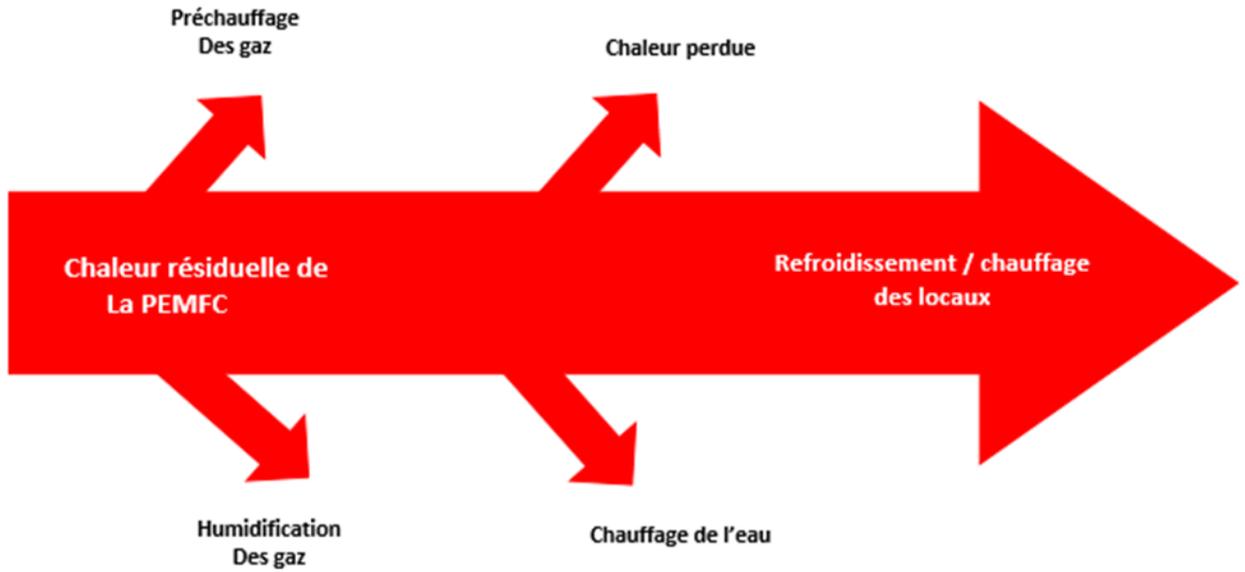
$C_{PW}$  est la chaleur spécifique de l'eau liquide (J/kg K) ;

durée de la Journée =  $3600 \cdot 24$  (Seconde) ;

### 3.6. Modèle mathématique du système CCHP résidentiel :

Afin de simuler le comportement du système CCHP, un certain nombre de paramètres d'entrée est nécessaire. Il s'agit de ; la température du gaz à l'entrée, la pression du gaz à l'entrée, la température de fonctionnement, la densité de courant, le COP de la machine à absorption.

La chaleur thermique transportée par l'eau de refroidissement de la pile à combustible est utilisée pour le préchauffage et l'humidification des gaz à l'entrée de la pile, l'alimentation en eau chaude sanitaire, la climatisation/chauffage des locaux de l'habitat résidentiel, alors d'une partie est perdue par (la cuve, l'échangeur, ...). La figure (3.4) montre les flux de chaleur ayant lieu dans le système global.



**Figure 3.4 :** Diagramme des flux de chaleur

- **Efficacité du système :**

- **En été :**

L'énergie électrique et la chaleur sont générées par la pile à combustible. L'énergie électrique est fournie à l'habitat résidentielle après avoir converti le courant continu en courant alternatif. La chaleur fournie par la pile est utilisée pour produire de l'eau chaude pour répondre à la demande de la famille, le reste est utilisé pour le refroidissement/chauffage des locaux. Le rendement du système en été est [32] :

$$\eta_{CCHP} = \frac{Q_{hw} + Q_E + P_{el\_sys}}{S_{H_2} \cdot LHV \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3}} \quad (3.44)$$

- **En hiver :**

Comme il n'y a pas de demande de refroidissement des locaux en hiver, le système CCHP fonctionne comme un système de cogénération (CHP). L'énergie électrique générée par la pile à combustible est fournie à la résidence, alors que la chaleur produite par le système PEMFC est fournie pour produire de l'eau chaude sanitaire ainsi que le chauffage des locaux. Le rendement du système en hiver est défini comme suit [32] :

$$\eta_{CHP} = \frac{Q_{hw} + Q_{th} + P_{el\_sys}}{S_{H_2} \cdot LHV \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3}} \quad (3.45)$$

$Q_{th}$  est la puissance de chauffage de residence (kW), Elle est présentée par l'équation suivante [32] :

$$Q_{th} = P_{th\_sys} - Q_P - Q_{hw} \quad (3.46)$$

### 3.7. Conclusion

Une modélisation du système résidentiel CCHP basée sur la pile à combustible PEMFC a été présentée dans ce chapitre. Un modèle thermodynamique a été adopté pour chaque composant du système. Cette modélisation a pour objectifs :

- De prédire les puissances consommées par les accessoires du système pile à combustible.
- D'évaluer les flux de chaleur nécessaires à faire fonctionner la machine à absorption, le chauffage de l'eau sanitaire ainsi que la quantité de chaleur fournie au chauffage des locaux.

## 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. Ensuite, une évaluation des puissances consommées par les accessoires du système pile à combustible et les puissances électriques et thermiques délivrées. De plus une analyse des performances du système CCHP est présentée. La dernière partie du chapitre est consacrée à l'étude de l'effet de la variation de la température ambiante lorsque le système PEMFC développe une puissance électrique maximale

#### 4.2. Performances du système PEMFC :

La pile à combustible étant le moteur principal du système CCHP. 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), [32, 36].

**Tableau 4.1 :** Paramètres de fonctionnement de la pile PEMFC.

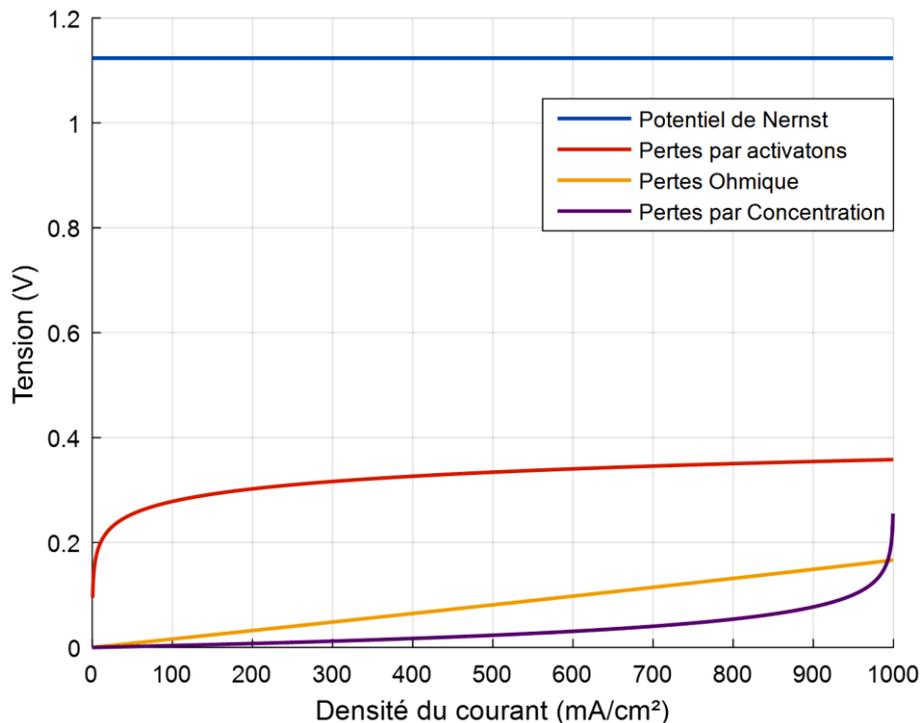
<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>
Pression à l'entrée de l'anode	atm	$P_a$	1
Pression à l'entrée de la cathode	atm	$P_c$	1
Pression à l'entrée du compresseur	atm	$P_1$	1
Température ambiante	K	$T_{amb}$	298.15
Température de fonctionnement	K	$T$	363.15
Température à l'entrée du compresseur	K	$T_1$	298.15
Température à l'entrée à la pile	K	$T_2$	353.15
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	-	$S_c$	2.5

**Tableau 4.2 :** Paramètres du modèle et propriétés des gaz

<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>
Nombre de cellules	-	$N$	75
Courant électrique Maximale	A	$I_{max}$	200
Surface active	cm <sup>2</sup>	$A$	200
Potentiel standard	V	$E_0$	1.229
Coefficient paramétrique	-	$\xi_1$	-1.199689999903810
Coefficient paramétrique	-	$\xi_2$	0.003427275264190
Coefficient paramétrique	-	$\xi_3$	$3.600000000631713 \times 10^{-5}$
Coefficient paramétrique	-	$\xi_4$	$-9.539999999999999 \times 10^{-5}$
Résistance de contact	$\Omega$	$R_C$	$7.529032912706569 \times 10^{-4}$
Epaisseur de la membrane	cm	$l$	0.001
Teneur en eau de la membrane	-	$\lambda$	10.000000003277432
Coefficient paramétrique	Volt	$b$	0.033582170064090
Densité du courant maximale	A/cm <sup>2</sup>	$J_{max}$	1
Chaleur spécifique à pression constante de l'air	kJ/kg · K	$C_P$	1.004
Chaleur spécifique de l'air à volume constant	kJ/kg · K	$C_V$	0.717
Chaleur spécifique de la vapeur d'eau	kJ/kg · K	$C_{P_{H_2O}}$	1.8723
Chaleur spécifique de l'hydrogène	kJ/kg · K	$C_{P_{H_2}}$	14.266
Chaleur spécifique de l'eau liquide	kJ/kg · K	$C_{P_W}$	4.185
Coefficient adiabatique de l'air	-	$\gamma$	1.4
Masse molaire de l'air	g/mol	$M_{air}$	28.976
Masse volumique de l'eau	Kg/m <sup>3</sup>	$\dot{m}_W$	1000
Masse molaire de l'hydrogène	g/mol	$M_{H_2}$	18
Constante de Faraday	A · s/mol	$F$	96485

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 1.12V pour une température de fonctionnement de 363.15 K, tandis que les surtensions (d'activation, ohmique et par concentration) augmentent pour des densités de courant plus élevées. On note que les pertes par activations augmentent plus précisément à des faibles densités de courant, cette augmentation est due 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.

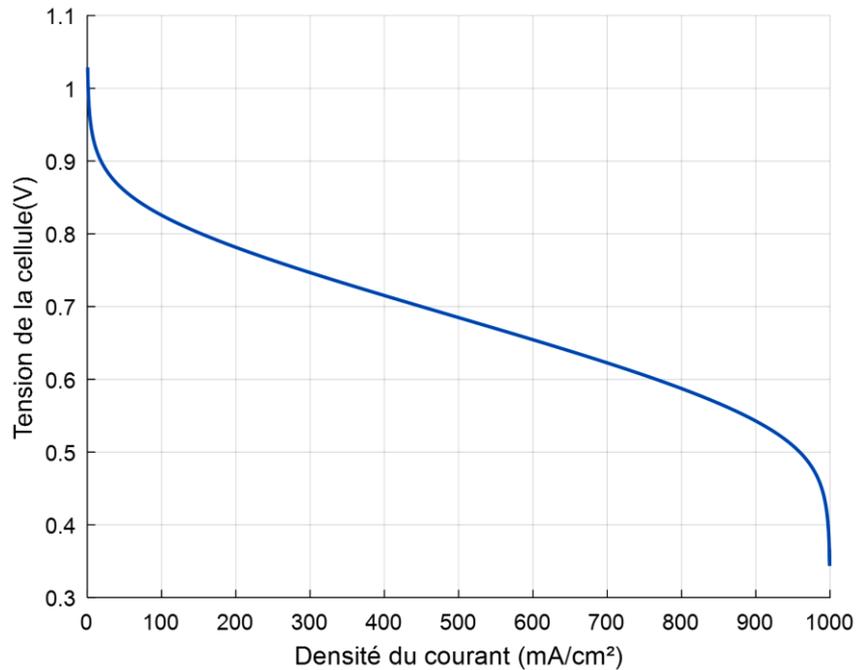


**Figure 4.1** : Variation du potentiel de Nernst et des surtensions en fonction de la densité du courant

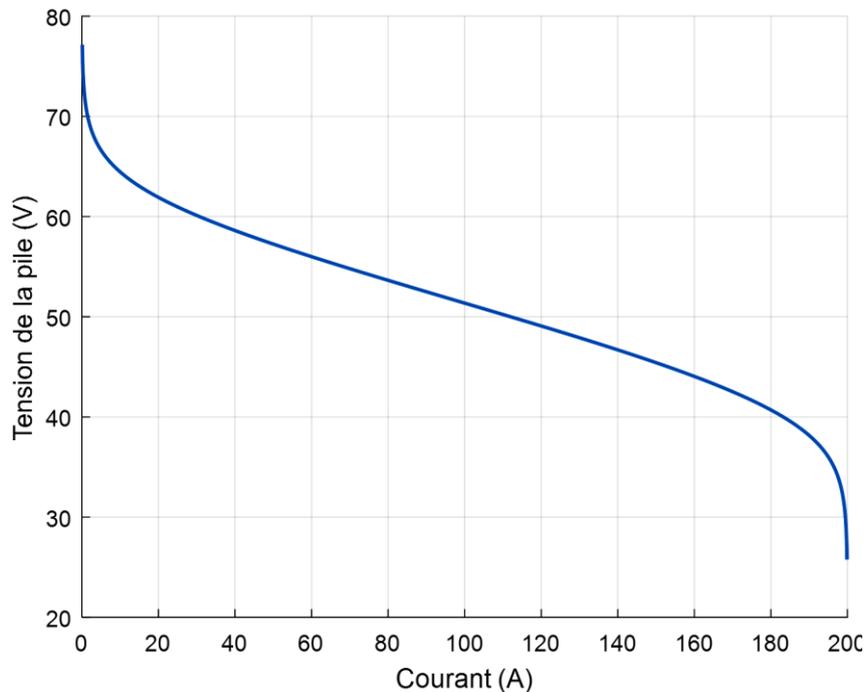
Les figures (4.2) et (4.3) montrent respectivement la variation de la tension d'une cellule unitaire et celle de l'ensemble des cellules (pile) en fonction du courant délivré. Les deux courbes peuvent être découpées en 3 domaines :

- Un domaine aux faibles courants (0 à 200 mA/cm<sup>2</sup>) pour lequel les résistances d'activation dominent

- Un domaine aux courants intermédiaires (200 à 800 mA/cm<sup>2</sup>), 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 aux forts courants (800 à 1000 mA/cm<sup>2</sup>), dominé par la résistance au transport de matière.



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

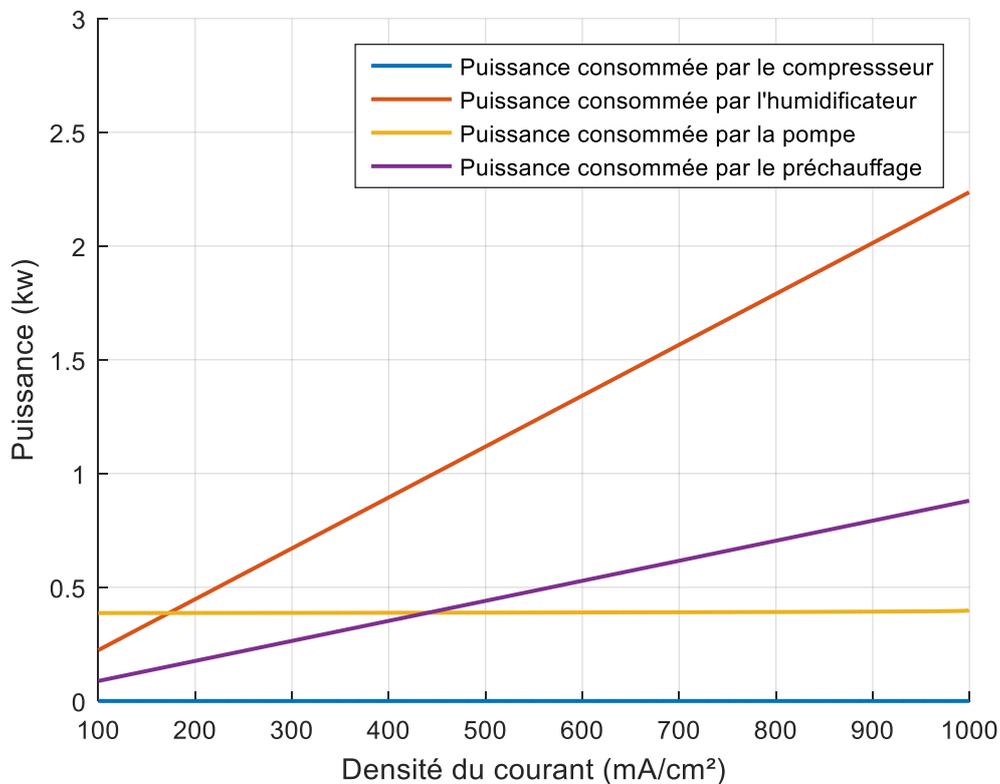


**Figure 4.3 :** Variation de la tension de la pile en fonction du courant électrique.

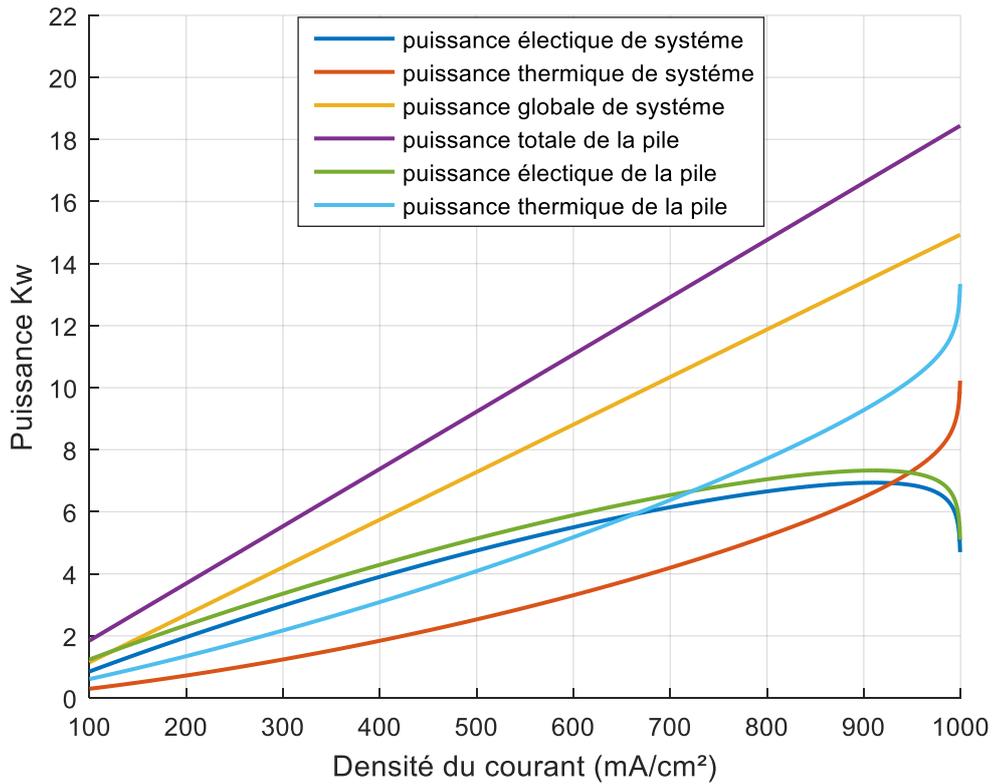
La figure (4.4) montre la variation des différentes puissances consommées par les accessoires du système pile PEMFC en fonction de la densité du courant électrique. On remarque que l'augmentation de la densité du courant provoque une augmentation des différentes puissances consommées en exception celle du compresseur qui est nulle car, le compresseur est à l'arrêt (pression d'admission à l'entrée de la pile  $P_c = P_{atm}$ ).

La figure (4.5) montre l'évolution des différentes puissances en fonction de la densité du courant électrique. La puissance globale du système est la somme de la puissance électrique et thermique développée par le système, de même pour la puissance totale de la pile. L'écart entre eux est dû aux puissances consommées par les accessoires.

On note également que l'écart entre les puissances électriques délivrées par la pile et le système est dû à la puissance consommée par la pompe. Alors que l'écart entre la puissance thermique du système et celle de la pile est dû aux puissances consommées par l'humidificateur et le système de préchauffage des gaz à l'entrée de la pile.

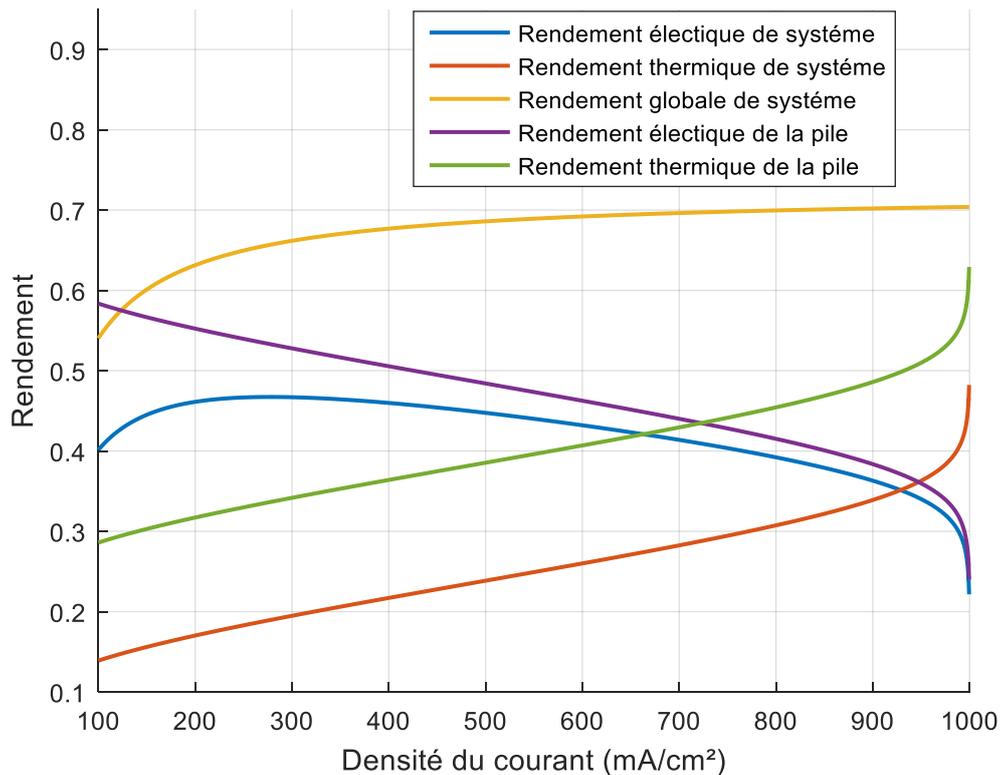


**Figure 4.4 :** Evolutions des puissances consommées par les auxiliaires de la pile en fonction de la densité du courant



**Figure 4.5 :** Variations des différentes puissances en fonction de la densité du courant

L'effet de la variation de la densité du courant sur les rendements du système et de la pile à combustible est montré par la figure (4.6). On constate que l'augmentation de la densité du courant entraîne une diminution du rendement électrique du système et celui de la pile. En comparant les deux courbes, on peut observer qu'à mesure que la densité du courant augmente, l'écart diminue en raison de la proportion d'énergie électrique consommée par les appareils auxiliaires, cette consommation provoque une diminution de la puissance électrique à la sortie de la pile. Alors qu'à mesure que la densité du courant augmente, les rendements thermiques du système et de la pile augmentent respectivement. La différence entre les deux courbes est due à la puissance thermique consommée par l'humidification et le système de préchauffage des gaz. Sur la même figure, on peut constater que l'évolution du rendement global du système PEMFC peut être subdivisé en deux intervalles, de 100 à 700 mA/Cm<sup>2</sup> ou le rendement augmente, au-delà d'une valeur de 700 mA/cm<sup>2</sup> le rendement globale du système est optimum avec une proportion de 70%.



**Figure 4.6 :** Evaluation des différents rendements de la pile et du système PEMFC

### 4.3. Performances du système CCHP :

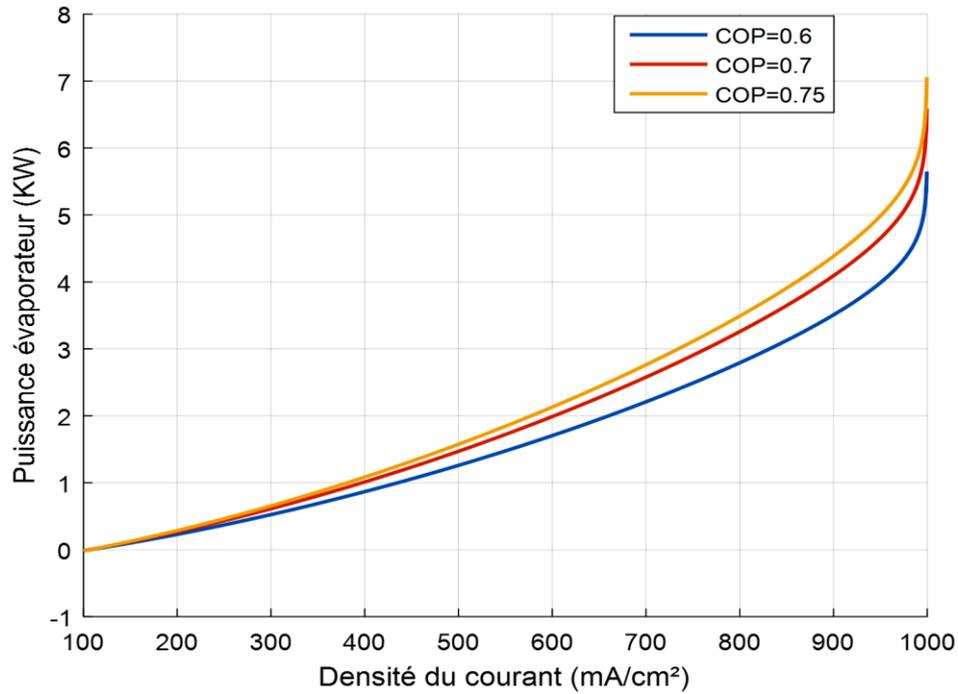
Afin de déterminer les performances du système CCHP, des paramètres de fonctionnement sont nécessaires pour la modélisation. Ces derniers sont résumés dans le tableau (4.3).

**Tableau 4.3 :** Les paramètres du système CCHP

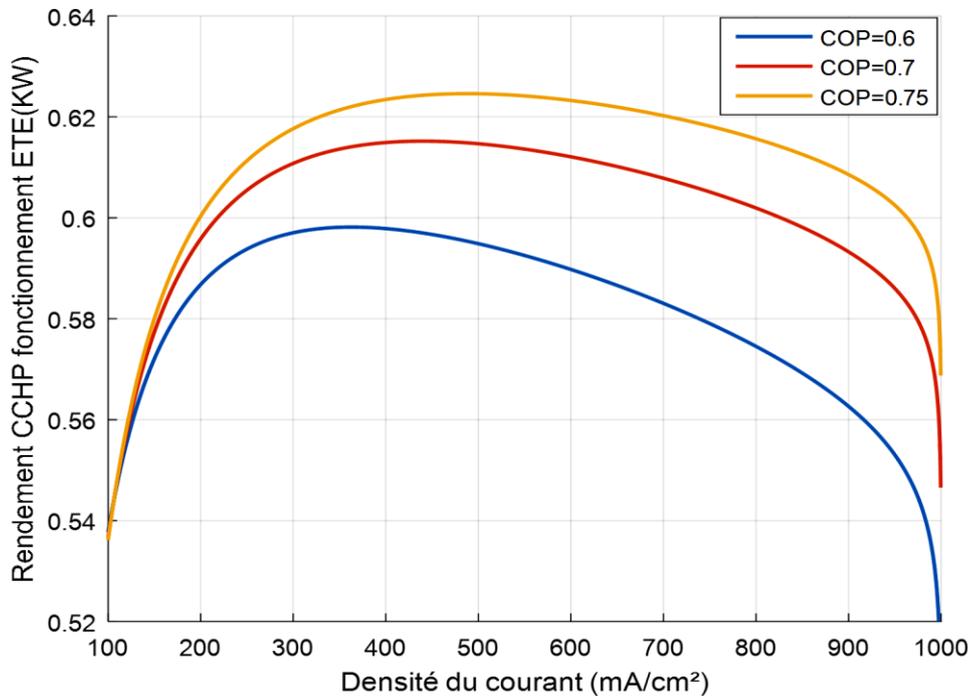
<i>Paramètres</i>	<i>unités</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>
Volume d'eau par personne	$m^3$	$V$	0.05
Nombre de personne de la famille	-	$m$	5
Température du besoin	K	$T_{hw}$	50+273.15
Coefficient de performance de la machine à absorption	-	COP	0.6-0.75

La capacité de refroidissement produite par la machine à absorption est affectée indirectement par la densité de courant de la pile à combustible, comme le montre la figure (4.7). On constate que la capacité de refroidissement augmente avec la densité du courant, elle atteint des valeurs maximales 5.6480, 6.5894 et 7.0601 kW à 1000 mA/cm<sup>2</sup> respectivement pour des COP de 0.6, 0.7 et 0.75. Ceci est dû au fait de l'augmentation de la puissance

thermique de la pile à combustible pour des densités de courant élevées. On peut conclure que, plus la chaleur résiduelle de la pile à combustible est importante, plus la capacité de refroidissement offerte par la machine à absorption est élevée. D'une manière similaire, on constate sur la figure (4.8) donnant la variation du rendement du CCHP que, plus la chaleur fournie au générateur est importante plus l'effet frigorifique est important, ce qui engendre un rendement plus élevé.

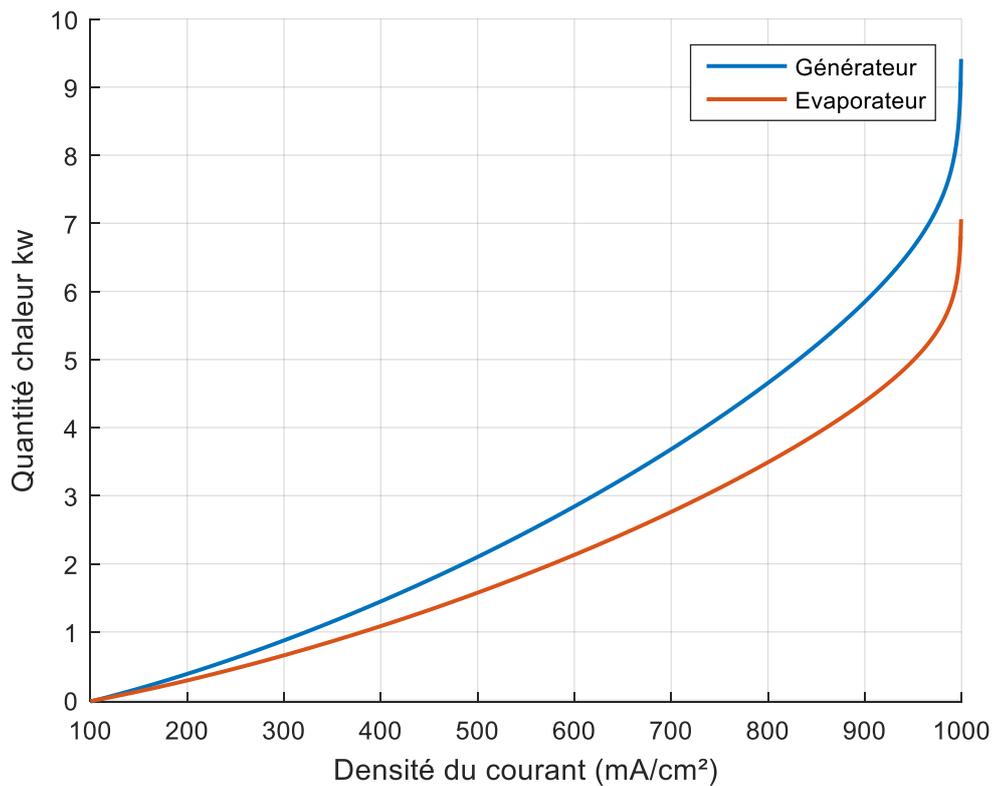


**Figure 4.7 :** Effet de la variation de la densité du courant sur la capacité de refroidissement



**Figure 4.8 :** Rendement du CCHP en fonction de la densité du courant

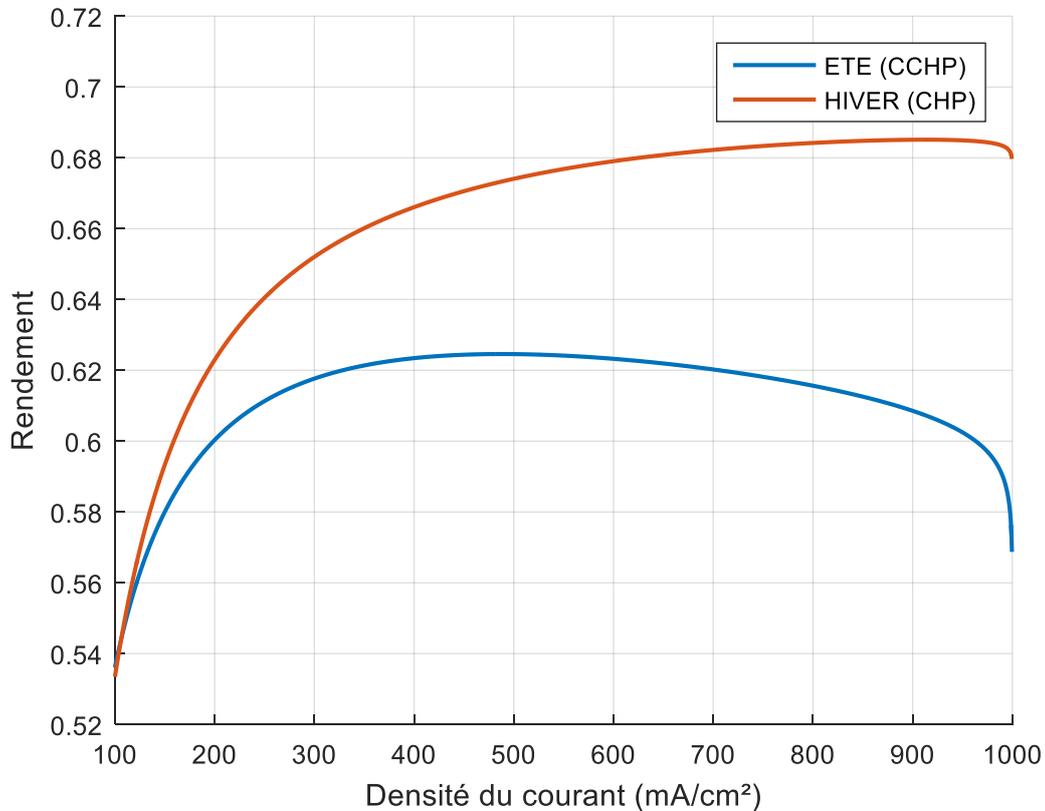
La puissance thermique fournie au générateur et celle produite par l'évaporateur de la machine à absorption pour un COP de 0.75 sont affectées indirectement par la densité de courant produite par la pile à combustible, comme le montre la figure (4.9). On note que l'augmentation de la densité du courant électrique entraîne une augmentation des deux puissances. La raison principale est que plus la chaleur résiduelle produite par la pile à combustible est récupérée, plus la puissance du générateur et d'évaporateur s'évalueront.



**Figure 4.9 :** Variation de la puissance du générateur et de l'évaporateur en fonction de la densité du courant

La figure (4.10) montre la variation des rendements énergétiques du système CCHP et CHP pour un COP=0.75. On remarque que ces derniers sont influencés de manière significative par la variation de la densité de courant. Pour le fonctionnement estival, on remarque que lorsque la densité de courant passe de 100 à 500 mA/cm<sup>2</sup>, le rendement du CCHP augmente considérablement d'une valeur de 53,5% à 62,8%, ensuite il subit une diminution jusqu'à une valeur de 57% pour une densité de courant de 1000 mA/cm<sup>2</sup>. Cette diminution est due à l'effet dominant de diminution du rendement électrique du système PEMFC. En outre, la contribution de la puissance thermique sur le rendement du CCHP est

affaiblie par la machine à absorption, bien que la puissance thermique soit proportionnellement liée avec la densité de courant. En comparant le mode de fonctionnement estival (CCHP) et le mode de fonctionnement hivernal (CHP). On constate que, le rendement du système (CHP) atteint une valeur maximale de 68,5% à 950 mA/cm<sup>2</sup>, L'amélioration est due au fait que la puissance fournie pour la production du froid est économisé en hiver.



**Figure 4.10 :** Rendement du système (CCHP et CHP) en fonction de la densité du courant

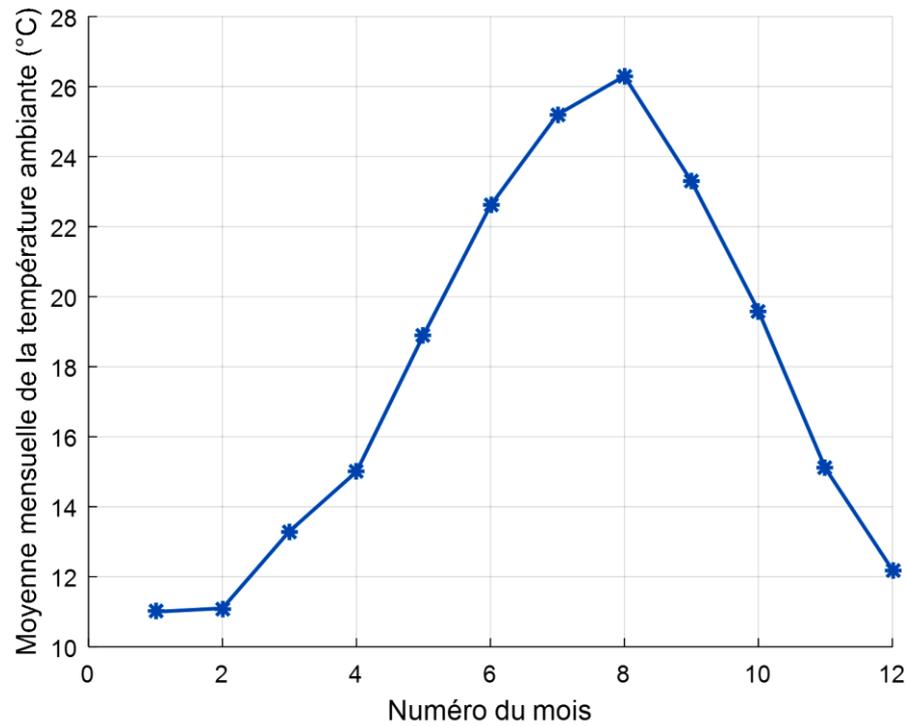
#### 4.4. Effet de la température ambiante :

Afin d'étudier l'effet de la variation de la température ambiante au cours de l'année sur le comportement du système de trigénération, nous fixons le courant électrique correspondant à une puissance électrique maximale produite par la pile PEMFC et ont déterminé les performances du système CCHP. Ces derniers sont présentés dans le tableau (4.4) :

**Tableau 4.4 :** Performance du système obtenu lorsque la pile délivre une puissance électrique maximale de 7.3301 KW

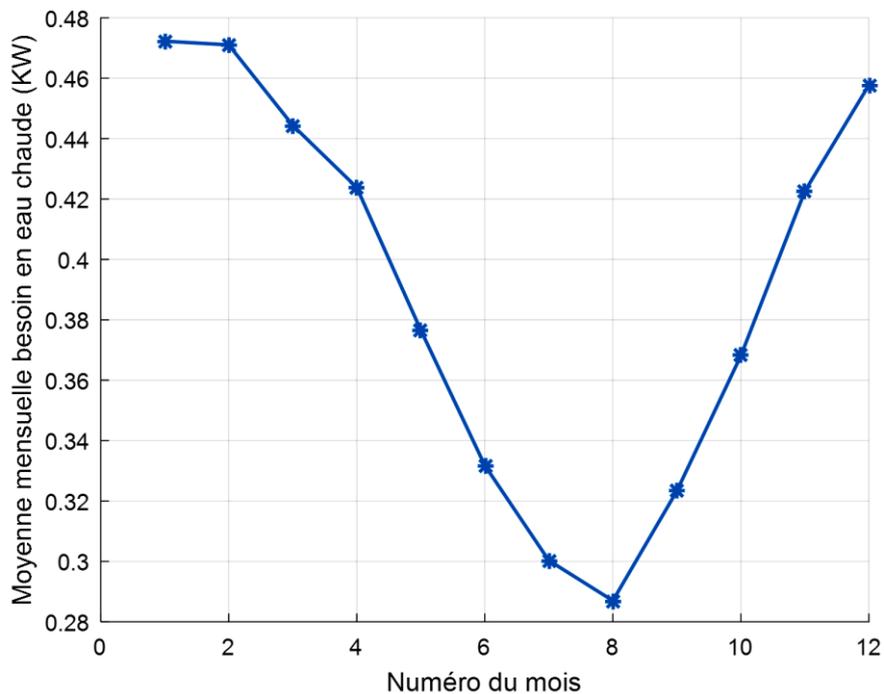
<i>Symboles</i>	<i>Paramètres/ Unités</i>	<i>Valeurs</i>
$I$	Courant électrique, A	182.1889
$J$	La densité du courant électrique, A/cm <sup>2</sup>	0.9109445
$V_{cell}$	Tension de cellule, Volt	0.5364
$V_{st}$	Tension de la pile, Volt	40.2333
$P_{el\_st}$	Puissance électrique de la pile, kW	7.3301
$P_{th\_st}$	Puissance thermique de la pile, kW	9.4769
$P_{st}$	Puissance globale de la pile, kW	16.8069
$P_{el\_sys}$	Puissance électrique du system, kW	6.9370
$P_{th\_sys}$	Puissance thermique du system pile, kW	6.6370
$P_{sys}$	Puissance globale du system pile, kW	13.5740
$\eta_{el\_st}$	Rendement électrique de la pile, %	37.92
$\eta_{th\_st}$	Rendement thermique de la pile, %	49.03
$\eta_{el\_sys}$	Rendement électrique du system pile, %	35.89
$\eta_{th\_sys}$	Rendement thermique du system pile, %	34.34
$\eta_{sys}$	Rendement global du system pile, %	70.23
$\eta_{CCHP}$	Rendement du CCHP, %	60.75
$\eta_{CHP}$	Rendement du CHP, %	68.51
$Q_G$	Puissance thermique consommée par le générateur, kW	6.0024
$Q_E$	Effet frigorifique, kW	4.5018
$Q_P$	Puissance thermique perdue (échangeur, cuve, tube.....), kW	0.3319
$Q_{th}$	Puissance thermique destinée au chauffage, kW	6.0024
$Q_{hw}$	Besoin en eau chaude, kW	0.3027
COP	Coefficient de performance	0.75

La figure (4.11) présente la moyenne mensuelle de la température ambiante au cours de l'année pour le site de Dar El-Beida de la wilaya d'Alger [37]. Elle représente l'allure d'une cloche dont le sommet se situe au mois d'Août.



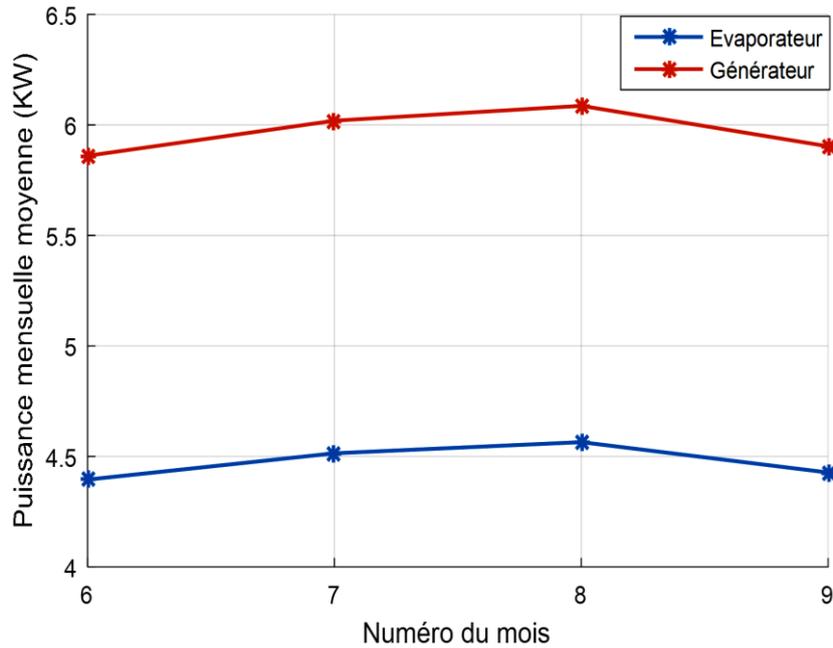
**Figure 4.11 :** Moyenne mensuelle de la température ambiante [37]

La figure (4.12) présente la puissance thermique du besoin en eau chaude pour une famille de cinq personnes. Il est clair la puissance nécessaire pour garantir une température de besoin de 50°C augmente pendant la saison hivernale à cause d'une baisse de la température ambiante, alors qu'en saison estivale la puissance dépensé est plutôt plus faible à cause de l'augmentation de la température ambiante.



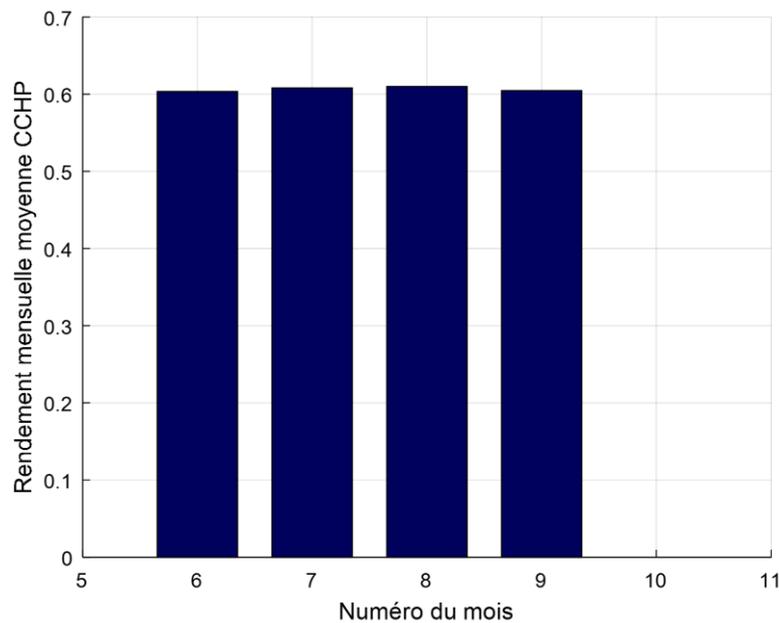
**Figure 4.12 :** Moyenne mensuelle du besoin en eau chaude

La figure (4.13) montre respectivement la variation de la puissance fournie au générateur et celle produite par l'évaporateur de la machine à absorption durant la période estival. Un maximum est obtenu pour le mois le plus chaud (mois d'Août), ou la machine doit fournir plus de puissance pour vaincre les apports de chaleur dus à l'élévation de la température ambiante.



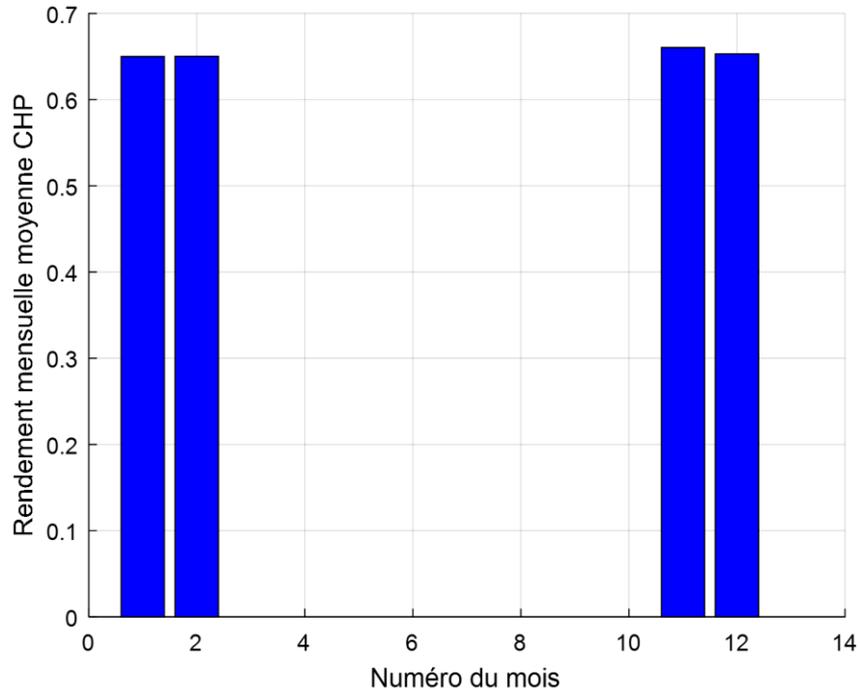
**Figure 4.13 :** Variation de la puissance du générateur et de l'évaporateur/ période estivale

La variation du rendement mensuel moyen du système CCHP pour la saison estivale est montrée par la figure (4.14). On constate une légère variation de 60% à 62% due à une faible amplitude de la température ambiante pendant cette période.



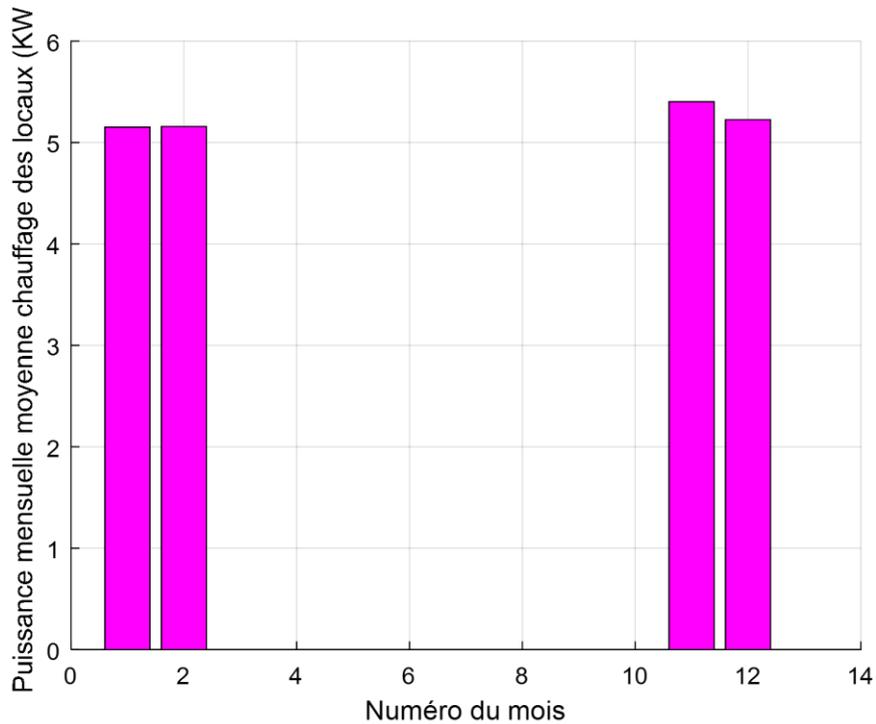
**Figure 4.14 :** Rendement mensuel moyen du système CCHP

Pour la saison hivernale la machine à absorption est à l'arrêt, le système est censé de produire de l'électricité et de la chaleur nécessaire au chauffage de l'eau et des locaux. Le rendement mensuel moyen du système CHP varie entre 63% et 66% comme le montre la figure (4.15).



**Figure 4.15** : Rendement mensuel moyen du système CHP

La puissance mensuelle moyenne fournie pour faire chauffer les locaux d'un habitat résidentiel au cours de la saison hivernale est illustrée dans la figure (4.16). Le maximum de la puissance fournie est obtenu pour le mois de Novembre, ceci peut être expliqué par la diminution de la puissance nécessaire au chauffage de l'eau sanitaire pour satisfaire la demande de la famille.



**Figure 4.16 :** Puissance mensuelle moyenne pour le chauffage des locaux

#### 4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, les résultats de l'étude paramétrique ont été analysés, les conditions de fonctionnements de la pile et du système ont été spécifiées. L'analyse des résultats obtenus a montré que le système de trigénération basé sur une pile PEMFC est très rentable pour satisfaire un habitat résidentiel en énergie électrique, en eau chaude et pour le chauffage/climatisation. Nous avons conclure aussi que la variation de la température ambiante a des effets considérables sur le comportement thermique et électrique du système.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'évaluation des performances d'un système énergétique de trigénération (CCHP) permettant de fournir simultanément de l'énergie électrique et thermique, cette dernière peut être utilisée pour le chauffage et la climatisation et d'assurer le besoin d'eau chaude sanitaire pour un habitat résidentiel. Une étude paramétrique permettant d'analyser le comportement de la pile PEMFC et ces accessoires, d'évaluer les effets des paramètres clés notamment la densité du courant électrique et la température ambiante sur les performances du système CCHP a été faite.

A travers les résultats obtenus pour l'ensemble du système CCHP, nous avons constaté que l'énergie consommée par les différents accessoires de la pile PEMFC constitue une partie non négligeable de la puissance totale produite par la pile à combustible. En outre, les résultats montrent que le système de trigénération basé sur une pile PEMFC est très rentable en termes de puissances fournies et des rendements énergétiques obtenus. Nous avons notés aussi que, le système (CCHP, fonctionnement estival ; CHP, fonctionnement hivernal) peut répondre aux besoins de confort d'un habitat résidentiel.

De plus, nous avons éprouvé que la variation de la densité du courant ainsi que la température ambiante ait des impacts considérables sur le comportement thermique et électrique du système en été et en hiver.

En perspectives, ce travail peut être poursuivi en effectuant une étude d'optimisation du système moyennant des algorithmes évolutionnaires afin de déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement. Comme deuxième perspective, nous proposons d'évaluer les performances du système pour différents sites d'implantations.

## Références

- [1]Sibilio, S.; Rosato, A.; Ciampi, G.; Scorpio, M.; Akisawa, A. Building-integrated trigeneration system: Energy, environmental and economic dynamic performance assessment for Italian residential applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 62, 920–933.
- [2]Abdollahi, G.; Sayyaadi, H. Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system. *Energy Build.* 2013, 60, 330–344.
- [3]Schick Tanz, M.D.; Wapler, J.; Henning, H.M. Primary energy and economic analysis of combined heating, cooling and power systems. *Energy* 2011, 36, 575–585
- [4]Barelli, L.; Bidini, G.; Gallorini, F.; Ottaviano, A. An energetic exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011, 36, 3206–3214
- [5]Raffaello Cozzolino ; Thermodynamic Performance Assessment of a Novel Micro-CCHP System Based on a Low Temperature PEMFC Power Unit and a Half-Effect Li/Br Absorption Chiller ID Department of Engineering, Niccolò Cusano University, via Don Carlo Gnocchi 3, 00166 Rome, Italy.
- [6]Jerry Spiegel ; Lucien Y.Maystre ; Chap 55 – la lutte contre la pollution de l’environnement ; Encyclopédie de sécurité et de santé au travail ; ilocis ; ilo055
- [7]Shenghui Chen, Feng Wang & Abdullah Yildizbasi (2020): A new Technique for Optimizing of a PEMFC based CCHP System, *International Journal of Ambient Energy*, DOI: 10.1080/01430750.2020.175878
- [8]R.Z. Wang; Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by Stirling engine; Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University; doi:10.1016/j.enconman.2003.09.009
- [9]X.Q. Kong, R.Z. Wang ; Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines ; Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China ; 1359-4311/\$ ; doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.06.014
- [10] M. Mortazaei, M. Rahimi ; A comparison between two methods of generating power, heat and refrigeration via biomass based Solid Oxide Fuel Cell: A thermodynamic and environmental analysis ; Faculty of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran ; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.074>

- [11] Chen, X., Gong, G., Wan, Z., Zhang, C., & Tu, Z. (2016). Performance study of a dual power source residential CCHP system based on PEMFC and PTSC. *Energy Conversion and Management*, 119, 163–176. doi:10.1016/j.enconman.2016.04.054
- [12] Guan, H., Sun, R., Zhang, W., Fan, X., Jiang, J., & Zhao, B. (2017). Study on the application of combined cooling, heating and power system with biomass energy in China. doi:10.1063/1.4993029
- [13] J. Romdhane et H. Louahlia-Gualous, "Energy assessment of PEMFC based MCCHP with absorption chiller for small scale French residential application," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 19661-19680, 2018
- [14] Raffaello Cozzolino, 2018. "Thermodynamic Performance Assessment of a Novel Micro-CCHP System Based on a Low Temperature PEMFC Power Unit and a Half-Effect Li/Br Absorption Chiller," *Energies*, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(2), pages 1-21, February.
- [15] X. Chen, H. Zhou, Z. Yu, W. Li, J. Tang, C. Xu, et al. "Thermodynamic and economic assessment of a PEMFC-based micro-CCHP system integrated with geothermal-assisted methanol reforming," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019
- [16] Jie Ji; System Design and Optimisation Study on a Novel CCHP System Integrated with a Hybrid Energy Storage System and an ORC ; *Hindawi Complexity* Volume 2020, Article ID 1278751, 14 pages , doi.org/10.1155/2020/1278751
- [17] Maghanki MM, Ghobadian B, Najafi G, Galogah RJ. Micro combined heat and power (MCHP) technologies and application. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 28:510–24. doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.053
- [18] Moussawi HA, Fardoun F, Gualous HL. Review of tri-generation technologies *Design* 2016; 120 (10) ; *Energy conversion and management* ; ISSN : 0196-8904
- [19] X. Chen. Z. Wan ; Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system ; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.05>
- [20] Barelli L, Bidini G, Gallorini F, Ottaviano A. An energetic/exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:3206e14.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.079>
- [21] Y. Zhi, W. Weiqing, W. Haiyun, H. Khodaei, Improved Butterfly Optimization Algorithm for CCHP Driven by PEMFC, *Applied Thermal Engineering* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114766>

- [22] Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., & Ottaviano, A. (2011). An energetic–exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), 3206–3214. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.11.079
- [23] Amrouche Fethia; Cractérisation expirimentale d'un assemblage de pile PEMFC ; Université de science et de technologie Houari Boumedién ; thèse d'Ingénieur d'Etat ; Novembre 2004
- [24] 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.
- [25] A.S.Corbeau (research associate engineering, department (Européan gaz) Cambridge Energy Research Associates CERA.2004.<http://www.annso.freesurf.fr>
- [26] G.Gong ; Z.Wan ; Parametric analysis and optimization of PEMFC system for maximum power and efficiency using MOEA/D ; <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.144> 1359-4311/2017
- [27] Domanski P. Theoretical evaluation of the vapor compression cycle with a liquid-line/suction-line heat exchanger, economizer, and ejector. US Department of Commerce Report; 1995
- [28] Srihirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S. A review of absorption refrigeration technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2001;5:343–72.
- [29] Y. Hwang ; Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus ; doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.018
- [30] B.Chendoul ; L.Kairouani ; Simulation d'un cycle frigorifique à absorption classique ; 2016 ; <https://www.researchgate.net/publication/306359590>
- [31] F.L.Lansing ; DSN engineering section ; Computer moduling of a single stage Lithium Bromide/Water Absorption refregiration unit ; JPL deep space network progress report 42-32 ; 1978
- [32] G. Gong ; Z. Wan ; 2015 ; Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller ; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.139>
- [33] Zhi-jun Mo ; 2006 Parameter optimization for a PEMFC model with a hybrid genetic algorithm ; Fuel cell institute ; shanghai jiatong University ; DOI : 10.1002/er.1170
- [34] G.Gong ; Z.Wan ; 2017 ; Parametric analysis and optimization of PEMFC system for maximum power and efficiency using MOEA/D ; [dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.144](http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.144)

- [35] Olivier MARC ; Modélisation dynamique, simulation et éléments de validation expérimentale d'une machine à absorption, utilisée dans une installation de rafraîchissement solaire ; Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique Appliquées à l'Energie et à l'Environnement (PIMENT) - Université de La Réunion : IUT Département Génie Civil 97410 Saint Pierre ; 2012.
- [36] Goudjil Lamine ; Benabdellah Mohamed ; Optimisation et analyse paramétrique d'un système de pile à combustible PEMFC, Mémoire de Master, Université Blida 1 ; Département de Mécanique ; 2020.
- [37] Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment ; Réglementation thermique du bâtiment C 3.2 et C 3.4 ; Annexe B.9 : température sèches (mensuelle, maximale, de base) (en °C) ;