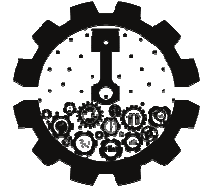


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité Energétique et Installations Energétiques et  
Turbomachines.

**Prédiction et analyse des performances d'un système combiné  
composé de pile à combustible et une machine frigorifique à  
éjecteur**

**Promoteur :**

Dr. ABDI Hamid

MOULOUA Oumaima

**Réalisé par :**

HACEINI Imene

**Année universitaire : 2023/2024**

## **Remerciement**

*Alhamdullilah, Merci mon dieu, pour la santé, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de ces années d'étude et durant la préparation et l'élaboration de ce travail.*

*On voudrait remercier ensuite notre famille pour leurs précieux soutien et leurs encouragements à poursuivre notre mémoire de fin d'études.*

*Ce mémoire est non seulement le résultat de notre persévérance, sacrifice et patience, mais aussi de l'intervention et de la conscience de nombreuses personnes. Nous souhaitons ici les en remercier.*

*Nous tenons également à remercier très chaleureusement Dr. ABDI Hamid qui nous a permis de bénéficier de son encadrement à travers ses expériences et ses leçons précieuses, ainsi que sa disponibilité et son dévouement pour notre réussite à l'élaboration de ce modeste mémoire, il trouve ici notre profonde gratitude et nos sincères remerciements.*

*On tient également à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements au Pr. BOUMEDANE, qui nous a orientés avec patience pour continuer notre modeste travail et pour sa disponibilité.*

*Nous tenons à remercier nos amis, nos enseignants et toute l'équipe du département de Mécanique, c'est l'une des meilleures expériences que nous ayons vécues.*

*Au terme de ce parcours, nous remercions enfin celles et ceux qui nous sont chers, leurs attentions et encouragements nous ont accompagnés tout au long de ces années. Nous sommes redevables à nos parents, pour leur soutien moral et matériel, ainsi que pour leur confiance indéfectible dans nos choix.*

# إهداء

الحمد لله حباً وشكراً وامتناناً علماً بالبدء والختام.

إبرو وخالية فارقتني، البسمة وضحكة لا تغيب عن بالي، دمت بنعيم الله حتى نلتقي، رحمة الله هي اجديتي.

إلمنى هبني الحياة والأمل، إلسنديو مصدر القوة والأمان: أميو أبي.

أهدى ثمرة جهديوسنينيا إلى أمي، إلمعنا لحبو التفانيو الاجتهاد، إلبسمة الحياة وسر الوجود، ما هو إلانجاحكو أنا السبب

إلأقرب بالناس إلقلبي: إخوتيمنا لوأنس.

إلمكناتقنيو نحننشقا لطر يقمعا، إلرقيقة إلدرب: أميمة.

إلصديقتي عمري سارة.

صديقاتي وزميلاتي فتحة، مروة، أميمة، يسرى، ميادة وشهيناز وكلمن ذكر هالقلبو نسيها لقلم.

إلى الصديق و العوض، إلى الذي علمني العطاء والصبر سيد احمد.

شكر الكل من ساندني في رحلتي، شكر المنكانو ناليطو التالكالسنين.

إيمان

# إهداء

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِشُكْرِهِ تَدُومُ النِّعَمُ ، و الصلاة و السلام على من بَلَغَ الرِّسَالَةَ و أَدَّى الأَمَانَةَ  
سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ صَلَّى اللهُ عَلَيْهِ وَ سَلَّمَ

إِلَى كُلِّ مَنْ مَاتَ لِتَحْيَا أَرْضُهُ ... إِلَى أَهْلِ الْعِزَّةِ وَ الْكِرَامَةِ  
عِزَّةً

إِلَى مَنْ وَهَبْتَنِي الْحَيَاةَ وَ عَلَّمْتَنِي الْعَطَاءَ بِدُونِ إِنْتِظَارٍ ... إِلَى الْيُسْرِ فِي عَالَمِ الْعُسْرِ  
أُمِّي

إِلَى مَنْ أَحْمَلَ اسْمَهُ بِكُلِّ فَخْرٍ ... إِلَى الضِّلَعِ الثَّابِتِ فِي إِعْوَاجِ الْحَيَاةِ ... إِلَى بَنِكَ أَمْوَالِي وَ رَصِيدِي الْحَيِ  
الْلاْمُنْتَاهِي

أَبِي  
إِلَى مَنْ أَسْتَنْدَ عَلَيْهِمْ رِغْمَ كُلِّ الشَّجَارَاتِ ... إِلَى الْأَمَانِ وَ الْإِزْعَاجِ ... إِلَى أَجْمَلِ الْمُتَنَاقِضَاتِ  
إِخْوَتِي

إِلَى صَدِيقَةِ الْعَمْرِ وَ أَنْيْسَةِ الرُّوحِ ... إِلَى وَطْنِي الصَّغِيرِ  
رِشَا

إِلَى رِفَاقِ الْخُطْوَةِ الْأُولَى وَ مَاقِبِلِ الْأَخِيرَةِ ... إِلَى مَنْ كَانُوا فِي السَّنَوَاتِ الْعِجَافِ سَحَابًا مَمْطَرًا  
إِيمَانًا ، شَهِينًا ، مِيَادَةً وَ آخَرُونَ

إِلَى كُلِّ مَنْ سَاعَدَنِي ، وَ كَانَ لَهُ دَوْرٌ قَرِيبٌ أَوْ بَعِيدٌ فِي إِتْمَامِ هَذَا الْعَمَلِ الْمُتَوَاضِعِ

أُمِّيَّة

يهدف هذا العمل إلى دراسة الكفاءة الطاقوية للنظام المقترح المركب من خلية وقود - نظام تبريد بالقاذف. تعتبر خلية الوقود مصدرا لإنتاج الطاقة الكهربائية و تستعمل لتشغيل نظام التبريد عن طريق استخدام جزء من حرارتها التي تسترجع من خلال السائل المبرد. كما يعتبر القاذف بديلا للضاغط مما يسمح بتخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية. النتائج المتحصل عليها كانت باستخدام البرامج MATLAB و EES. قمنا بدراسة تغيرات معامل الأداء، كفاءة النظام و معامل السحب تحت ظروف تشغيل مختلفة لخلية الوقود، و كذا سلوكها. كما لاحظنا أن كميات الطاقة التي تنتجها خلية الوقود يمكن الاستفادة منها لتشغيل أنظمة أخرى بالتوازي مع نظامنا.

**الكلمات المفتاحية:** PEMFC ، القاذف، آلة التبريد، الكفاءة الطاقوية.

## Résumé

---

Le travail présenté concerne la simulation d'un système frigorifique à éjecteur utilisant la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. La pile produit non seulement de l'électricité, mais utilise également une partie de sa chaleur résiduelle pour chauffer le réfrigérant. L'éjecteur remplaçant le compresseur, permet de réduire la consommation d'énergie électrique, ce qui entraîne une efficacité plus élevée. Dans ce travail, nous présentons des résultats obtenus en utilisant les logiciels : MATLAB (MATrix LABoratory) et EES (Engineering Equation Solver). Nous avons étudié les variations du coefficient de performance, efficacité du système globale et le facteur d'entraînement pour différentes conditions de fonctionnement de la pile à combustible, ainsi que le comportement et les performances de la PEMFC. Nous avons constaté que la pile produit des quantités d'énergie significatives pour faire fonctionner non seulement notre machine frigorifique, mais aussi d'autres systèmes en parallèle.

**Mots clés :** PEMFC, éjecteur, machine frigorifique, COP.

## **Abstract**

---

The presented work concerns the simulation of an ejector refrigeration machine using the proton exchange membrane fuel cell as a primary mover. The fuel cell not only produces electricity, but also uses part of its thermal energy to heat the refrigerant. The ejector replaces the compressor, allowing it to reduce the electrical consumption energy, which results a higher efficiency. The results obtained were acquired by using the following programs: MATLAB (MATrix LABoratory), Refprop (REference Fluid Thermodynamic and Transport PROPERTIES) and EES (Engineering Equation Solver). We have studied the variations of the coefficient of performance, the system efficiency and the entertainment ratio under different operating conditions of the fuel cell, along with behavior and performances of the PEMFC. We have find that the PEMFC can produce significant quantities of energy, sufficient to operate other systems besides our refrigeration machine.

**Keywords:** PEMFC, ejector, refrigeration machine, COP.

## Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1 : .....	3
1.1 Introduction : .....	3
1.2 Etat de recherche : .....	4
• Keenan et al (1942): .....	4
• Selvaraju and Mani (2006) : .....	5
• Lucas and Koehler (2012): .....	5
• Besagni et al (2016) : .....	5
• Takleh et Zare (2019) : .....	6
• Cao et al (2022): .....	6
1.3 Le but de travail : .....	7
Chapitre 2 .....	8
2.1 Introduction : .....	8
2.2 Composents du système : .....	8
2.2.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons : .....	8
2.2.2 Machine frigorifique : .....	11
• Principe de fonctionnement des systèmes de réfrigération à éjecteur : .....	12
2.2.3 Ejecteur : .....	14
• Classification des éjecteurs : .....	15
• Principe de fonctionnement de l'éjecteur : .....	18
2.3 Description du système : .....	19
2.3.1 Principe de fonctionnement du système combiné: .....	20
2.4 Les fluides frigorigènes : .....	21



2.4.1 Types des fluides frigorigènes :	21
• Les CFC (Chaines Carbonées Fluoro-chlorées) :	21
• Les HCFC (Hydro chlorofluorocarbures) :	22
• Les HFC (Hydrofluorocarbures) :	22
• Les HC (hydrocarbures) :	22
• Les composés inorganiques (série 700) :	22
2.4.2 Choix du fluide frigorigène:	23
• Critères de performance :	23
• Critères technico-économiques:	24
• Critères de limite de fonctionnement :	25
• Critères d'environnement et de sureté :	26
2.5 Conclusion :	27
Chapitre 3 :	28
3.1 Introductions :	28
3.2 Modélisation mathématique du système :	29
3.2.1 Modèle électrique de la PEMFC:	29
3.2.2 Modèle thermique de la PEMFC:	32
3.2.3 Modélisation de la machine frigorifique à éjecteur :	33
3.2.4 Critères de performance :	37
3.3 Organigramme de calcul :	38
3.4 Conclusion :	42
Chapitre 4	43
4.1 Introduction :	43
4.2 Conditions de simulation :	43
4.3 Résultats de simulation :	45
4.3.1 effet de la variation de la densité de courant :	45

4.3.2 Effet de variation de la pression de fonctionnement de la pile à combustible : .....	49
4.3.3 Effet de variation de la température de générateur : .....	52
4.4 Resultat de l'étude thermodynamique du cycle frigorifique:.....	56
4.4.1 diagramme de Sankey: .....	59
4.5 Conclusion :.....	59
Conclusion générale : .....	60
References .....	61

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1:</b> Classification des éjecteurs. ....	17
<b>Tableau 2.2 :</b> Nomenclature chimique des réfrigérants.....	21
<b>Tableau 2.3:</b> Propriétés thermodynamiques limites des réfrigérants. ....	24
<b>Tableau 2.4:</b> Données environnementales de sécurité .....	27
<b>Tableau 4.1:</b> Paramètres de simulation .....	43
<b>Tableau 4.2 :</b> Propriétés thermodynamiques du cycle étudié.....	57

### Table des figures

<b>Figure (2.1):</b> Schéma d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.....	11
<b>Figure (2.2) :</b> Schéma de la machine frigorifique. ....	13
<b>Figure (2.3) :</b> Diagramme T-S correspondant au cycle. ....	13
<b>Figure (2.4) :</b> Schéma d'un éjecteur. ....	14
<b>Figure (2.5) :</b> La configuration de l'éjecteur selon la position de la buse [14].....	16
<b>Figure (2.6) :</b> Configuration géométrique et évolution de la pression et la vitesse le long de l'éjecteur .....	19
<b>Figure(2.7):</b> Schéma du système combiné composé de PEMFC et une machine frigorifique à éjecteur. ....	20
<b>Figure (2.8):</b> Courbe de saturation des fluides de travaux (sec, humide et isentropique). ....	24
<b>Figure (3.1):</b> Schéma du système combiné. ....	29
<b>Figure (3.2):</b> Représentation schématique de l'éjecteur à étudier. ....	35
<b>Figure (3.3):</b> Organigramme de calcul des performances de la PEMFC .....	39
<b>Figure (3.4):</b> Organigramme de calcul des performances de l'éjecteur .....	39
<b>Figure (4.1) :</b> Courbe caractéristique d'une cellule en fonction de la densité de courant. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure (4.2) :</b> Variation de la tension de la pile à combustible en fonction de la densité du courant.....	46
<b>Figure (4.3) :</b> Evolution de la puissance de la pile, puissance thermique nette, et la puissance électrique nette de la pile en fonction de la densité du coursant. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure (4.4):</b> Variation du rendement électrique de la pile à combustible en fonction de la densité de courant.....	48
<b>Figure (4.5) :</b> Evolution de la puissance électrique nette et la puissance thermique nette de la pile en fonction de sa pression de fonctionnement. ....	49
<b>Figure (4.6):</b> Evolution du coefficient de performance en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC.....	50
<b>Figure (4.7) :</b> Evolution de l'efficacité du système combiné en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC.....	51
<b>Figure (4.8) :</b> L'influence de la température du condenseur sur l'efficacité du système combiné.....	52
<b>Figure (4.9) :</b> Evolution du COP en fonction de la température du générateur.....	52

<b>Figure (4.10)</b> : Evolution du coefficient d'entraînement en fonction de la température du générateur.....	53
<b>Figure (4.11)</b> : Variation de l'efficacité du système combiné.....	54
<b>Figure (4.12)</b> : L'influence de la température du condenseur sur le coefficient de performance .....	50
<b>Figure (4.13)</b> :Variation de la puissance électrique nette et la puissance thermique nette en fonction de la température de fonctionnement de la PEMFC.....	56
<b>Figure (4.14)</b> : Diagramme T-S du cycle de réfrigération à éjecteur pour le fluide frigorigène R141b .....	58
<b>Figure (4.15)</b> : Diagramme de Sankey de la PEMFC .....	59

## Nomenclature

$a$	Vitesse du son, $m.s^{-1}$
$A$	Section, $m^2$
$A_{cell}$	Surface active, $cm^2$
$C$	Concentration, $J/mol.K$
$COP$	Coefficient de performance
$E_{nernst}$	Tension de Nernst, $V$
$F$	Constante de Faraday, $C. mol^{-1}$
$h$	Enthalpie spécifique, $Kj. Kg^{-1}$
$HHV$	Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, $Kj.mol^{-1}$
$I$	Densité de courant, $A$
$i_L$	Densité de courant maximale, $A. cm^{-2}$
$L$	Épaisseur de la membrane, $cm$
$\dot{m}$	débit
$M$	Nombre de Mach
$n_e$	Nombre des électrons
$N_{cell}$	Nombre des cellules dans la pile
$P$	Pression, $KPa$
$\dot{Q}$	Quantité de chaleur, $W$
$r_{mem}$	Résistance de la membrane, $\Omega. cm$
$R$	Constante universelle des gaz parfaits, $J. mol^{-1}. K^{-1}$
$R_{int}$	Résistance totale interne de la pile, $\Omega$
$s$	Entropie spécifique, $Kj. Kg^{-1} K^{-1}$
$s_{gen}$	Entropy generation rate, $KW. K^{-1}$
$t$	Temperature, $^{\circ}C$
$T$	Température, $K$
$v$	vitesse, $m.s^{-1}$
$V$	Tension, $V$
$\dot{W}_{fc}$	Travail net de la pile, $KW$
$x$	Fraction molaire

## Lettres grecques

$\eta$  Rendement

$\gamma$  Gamma

$\varepsilon$  Coefficient d'échange

## Indices

act	activation
air	air
amb	ambient
c	condenseur
comp	compresseur
conc	concentration
cons	consommation
d	diffuseur
e	évaporateur
fc	pile à combustible
g	générateur
gen	produits générés de la réaction chimique
H <sub>2</sub>	hydrogène
H <sub>2</sub> O	eau
in	entrée
m	section de mélange
ohm	ohmique
out	sortie
O <sub>2</sub>	oxygène
p1	
py	fluide primaire
s	entropie
s,l	sensible, latente
sat	condition de saturation
sy	fluide secondaire
t	col de la tuyère primaire

## **Abréviations**

AME	Assemblage Membrane et Electrodes
ASHRAE Engineers	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning
CAM	Constant Area-Mixing ejector (éjecteur à section de mélange constante)
CCP	Combined Cooling and Power system
COP	Coefficient Of Performance (coefficient de performance)
CPM constante)	Constant Pressure Mixing ejector (éjecteur à pression de mélange
EERC	Ejector Expansion Refrigeration Cycle
EES	Engineering Equation solver
GDL	Gaz Diffusion Layer
GWP	Global Warming Potential (potentiel de l'effet de serre)
HCFC	Hydro-chlorofluorocarbone
HFC	Hydro-fluore
IUPAC	International Union of Standards and Technology
ODP d'ozone)	Ozone Depletion Potential (potentiel d'appauvrissement de la couche
ORC	Organic Rankine Cycle (cycle organique de Rankine)
TEWI	impact de réchauffement total équivalent
PEMFC	Pile à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons



## **INTRODUCTION GENERALE**

Le début du 21<sup>e</sup> siècle a marqué l'émergence d'un intérêt accru pour les énergies renouvelables. La quantité limitée de ressources fossiles, ainsi que l'accroissement rapide de la demande énergétique dans le monde en raison de l'industrialisation et de la croissance démographique, rendent nécessaires des sources d'énergie durables capables de répondre à ces besoins sans nuire à l'environnement. Face à ce défi, le système combiné PEMFC-machine frigorifique à éjecteur (pile à combustible à membrane échangeuse de protons et machine frigorifique à éjecteur) se présente comme une solution prometteuse pour la production de froid avec une énergie propre et une consommation réduite d'électricité.

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) offre une conversion directe et propre de l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec un seul sous-produit, de l'eau. Elle présente des caractéristiques attrayantes telles qu'une densité de puissance élevée et une faible émission de polluants. Ces propriétés font de la PEMFC une technologie prometteuse pour alimenter diverses applications. Malheureusement, au cours des réactions chimiques ayant lieu au niveau de la PEMFC près de 50% de l'énergie chimique introduite est perdue sous forme de chaleur. Pour cela, un système énergétique de cogénération (Production d'électricité et du froid) utilisant une pile à combustible PEMFC comme générateur où une partie de la chaleur dégagée par cette dernière est récupérée pour la production du froid.

Dans le cadre de notre travail, une prédiction et une analyse des performances d'un système combiné PEMFC-Machine frigorifique ont été élaborées, en évaluant son rendement global, le coefficient de performance de la machine frigorifique, la puissance générée par la pile et le facteur d'entraînement. L'objectif est de prédire le comportement du système en faisant varier les différentes conditions de fonctionnement.

Le premier chapitre traite de l'historique et de l'état de l'art des systèmes de réfrigération à éjection utilisant les piles à combustible de type membrane échangeuse de proton (PEMFC), ainsi que l'objectif de ce travail.

Notre système est décrit en détails dans le deuxième chapitre, l'aspect généralités sur les piles à combustible, la description et le principe de fonctionnement ainsi que l'éjecteur, ses types, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques. Des généralités sur les réfrigérants ont été mentionnées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre concerne l'étude thermodynamique du système pile à combustible de type PEMFC couplé à un système de réfrigération à éjecteur. Le système fonctionne selon le principe 'Produire du froid avec la chaleur récupérée de la pile'. La modélisation mathématique du système est établie sur la base des équations de bilans de conservation et des considérations de la dynamique des gaz. A la fin de ce chapitre, le programme de calcul développé est résumé sous forme d'organigramme.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation adoptés. La détermination des performances énergétiques du système ainsi décrit, est établie moyennant les logiciels MATLAB et EES. L'influence de plusieurs paramètres thermodynamiques sur les performances du système ont été analysées et interprétées.

## **Chapitre 1 :**

### **ETAT DE L'ART**

#### **1.1 Introduction :**

L'énergie c'est le confort et le développement, elle alimente nos maisons, nos entreprises et nos moyens de transport. Cependant, la demande d'énergie augmente rapidement à cause de la croissance démographique et l'industrialisation. Par conséquent, l'utilisation des combustibles fossiles a provoqué un déséquilibre environnemental comme la pollution de l'air, le changement climatique et l'effet de serre. Cette influence négative a accéléré la recherche des nouvelles sources d'énergie plus durables et saines qui peuvent réduire ces problèmes tout en répondant à nos besoins énergétiques. L'hydrogène est parmi les solutions grâce à son abondance dans la nature.

De l'autre côté, l'une des stratégies pour optimiser la consommation de cette énergie et augmenter l'efficacité de la production énergétique, c'est les systèmes de cogénération (combined cooling and power system CCP). Le système de cogénération permet, dans une même installation, de produire simultanément grâce à un générateur deux types d'énergie : électricité et chaleur, à partir d'un seul combustible. La chaleur dissipée du générateur est récupérée pour produire le froid.

Le choix du générateur est pour les systèmes de cogénération. Les plus importants sont le moteur Stirling, le moteur à combustion interne et la pile à combustible. Outre le coût élevé de fabrication des piles à combustible, elles peuvent être considérées comme l'un des moteurs principaux les plus souhaitables des systèmes de production d'énergie car elles présentent de nombreux avantages, y compris des rendements entre 30 et 90 %. Ces piles à combustibles ont d'autres avantages tels que le faible bruit et la pollution environnementale, une structure flexible par rapport à la puissance prévue, la portabilité et la compatibilité avec d'autres unités de production d'énergie et de chaleur (cao, et al., 2022) . L'un des types de piles à combustible est la PEMFC qui convertit l'énergie chimique d'un combustible et d'un oxydant, fournis en continu à partir de sources externes, en énergie électrique dans un processus direct [2]. L'utilisation la plus courante des PEMFC est dans les petits bâtiments. La commercialisation d'unités de micro-génération d'énergie pour la co-production d'électricité et d'énergie thermique avec des piles à combustible a progressé au cours de la dernière

décennie [1]. Ellama et al ont étudié de manière approfondie les systèmes de cogénération basés sur des piles à combustible pour une utilisation dans des applications résidentielles [2].

Ces dernières années, les chercheurs se sont intéressés aux systèmes de réfrigération à absorption en utilisant la chaleur à des températures plus basses telle que l'énergie solaire ou les systèmes qui dégagent la chaleur telles que les piles à combustible qui sont également plus écologiques. Bien que ces systèmes semblent avoir de nombreux avantages, leur coefficient de performance (COP) faible a mené des nouvelles recherches pour augmenter le COP de ces systèmes, particulièrement l'application de différents réfrigérants ainsi que des changements dans les performances du cycle, tels que l'utilisation de l'éjecteur [1].

Théories proposées dans ce travail :

- La chaleur générée par la PEMFC est récupérée et utilisée pour la production du froid.
- La machine frigorifique est équipée par un éjecteur au lieu d'un compresseur afin de minimiser la consommation de l'électricité produite par la PEMFC.
- La PEMFC est refroidie par le réfrigérant de la machine à éjection.

Le but de ce chapitre consiste à mettre de l'avant tous les éléments qui nous aideront à bien analyser le comportement des éjecteurs dans le cadre de la production du froid par voie de récupération de rejets thermiques de la pile à combustible.

## **1.2 Etat de recherche :**

- **Keenan et al (1942):**

Ils sont le premier groupe à étudier la théorie à l'intérieur de l'éjecteur et à proposer un modèle basé sur les relations entre la dynamique des gaz et la théorie du mélange. Néanmoins, leur modèle présentait de nombreuses faiblesses et ne pouvait justifier l'effet de capacité constante lorsque la pression de sortie (pression du condenseur) diminue. Par la suite, des études théoriques ont été menées sur cette étude [1].

Ce travail représente les résultats de l'investigation dont laquelle l'auteur a étudié les performances de la forme plus simple de l'éjecteur pour fonctionner d'une manière utile.

Une tentative a été faite pour analyser les données de manière aussi indépendante que possible des autres travaux sur les éjecteurs et pour comparer les performances avec celles prédites analytiquement. L'objectif de l'étude était de tester l'utilité et la validité de la méthode d'analyse, et non de concevoir un nouveau type d'éjecteur [6].

- **Selvaraju and Mani (2006) :**

L'étude expérimentale de la performance d'un système de réfrigération à éjecteur de vapeur est décrite. Le système utilise R134a comme fluide de travail et a une capacité de refroidissement nominale de 0,5 kW. L'influence des températures du générateur, de l'évaporateur et du condenseur sur les performances du système est étudiée. Ce type de système peut fonctionner avec de l'énergie thermique de faible qualité telle que l'énergie solaire, chaleur perdue, etc. Les conditions de fonctionnement sont choisies en conséquence, température du générateur entre 338 K et 363 K, température du condenseur entre 299 K et 310,5 K et température de l'évaporateur entre 275 K et 285,5 K. Six configurations des éjecteurs de différentes dimensions géométriques ont été sélectionnés pour l'étude paramétrique. Les performances du système de réfrigération à différentes températures de fonctionnement sont présentées [4].

- **Lucas and Koehler (2012):**

Dans cette étude, une comparaison expérimentale entre le cycle de réfrigération standard du détendeur de CO<sub>2</sub> et le cycle de réfrigération à éjecteur est présentée. Des variations de haute pression pour différentes pressions d'évaporation et températures de sortie du refroidisseur de gaz ont été effectuées. De plus, l'efficacité de l'éjecteur, le taux d'entraînement et la récupération de pression par l'éjecteur ont été étudiés dans ces conditions. Les deux cycles étudiés ont été réalisés en utilisant le même banc d'essai, minimisant ainsi les erreurs de comparaison. Par rapport au COP maximum du cycle du détendeur, des améliorations du COP du cycle d'éjecteur de 17 % ont été atteintes avec des efficacités d'éjecteur allant jusqu'à 22 % [7].

- **Besagni et al (2016) :**

Le besoin croissant de confort thermique a conduit à une augmentation rapide du recours aux systèmes de refroidissement et, par conséquent, à la demande en électricité pour les systèmes de climatisation des bâtiments. Les systèmes de réfrigération à éjecteur alimentés par la chaleur semblent être une alternative prometteuse aux technologies de réfrigération

traditionnelles basées sur des compresseurs pour réduire la consommation d'énergie. Cet article présente une revue complète de la littérature sur les systèmes de réfrigération à éjecteur et les fluides de travail. Il analyse en profondeur la technologie et le comportement des éjecteurs, les propriétés des réfrigérants et leur influence sur les performances des éjecteurs et toutes les technologies de réfrigération des éjecteurs, en mettant l'accent sur les tendances passées, présentes et futures. La revue est structurée en quatre parties. Dans la première partie, la technologie des éjecteurs est décrite. Dans la deuxième partie, une description détaillée des propriétés du réfrigérant et de leur influence sur les performances de l'éjecteur est présentée. Dans la troisième partie, une revue centrée sur les cycles de réfrigération à jet principal est proposée, et les systèmes de réfrigération à éjecteur sont rapportés et catégorisés. Enfin, un aperçu de toutes les technologies d'éjecteur, de la relation entre les fluides de travail et les performances de l'éjecteur, en mettant l'accent sur les tendances passées, présentes et futures, est présenté [18].

- **Takleh et Zare (2019) :**

Un nouveau cycle de réfrigération par éjecteur-expansion (EERC) est proposé, analysé et optimisé dans cet article. En supposant un modèle de mélange à pression constante pour la simulation de l'éjecteur, une analyse thermodynamique détaillée et complète, basée sur les premières et deuxièmes lois, est menée et la performance du système est étudiée pour six réfrigérants appropriés. Le système proposé est ensuite optimisé en considérant l'efficacité exergetique comme fonction objective et une comparaison est faite avec l'EERC standard et le système de réfrigération par compression de vapeur conventionnel dans les conditions optimisées. Les résultats ont indiqué que, parmi les six réfrigérants étudiés, le R1234ze est le meilleur pour lequel le système proposé a des valeurs d'efficacité exergetique supérieures de 5,7 % et 15,5 % à celles de l'EERC standard et du cycle de réfrigération par compression de vapeur conventionnel, respectivement, à une température de condensation de 40 °C et une température d'évaporation de 5 °C. De plus, il est conclu que pour des températures de condensation plus élevées et des températures d'évaporation plus basses, la valeur de l'amélioration des performances est plus élevée [11].

- **Cao et al (2022):**

Dans ce travail, un examen thermodynamique pour un système de cogénération d'électricité et de refroidissement basé sur une pile à combustible à membrane échangeuse de protons

(PEM) a été effectué. Pour récupérer l'énergie perdue dans la pile à combustible, une unité de réfrigération à absorption est utilisée en deux modes : avec et sans éjecteur. Ce système comprend une pile à combustible PEM (PEM-FC), une unité de réfrigération par absorption, un réservoir de stockage d'hydrogène, un éjecteur et un compresseur d'air. L'énergie thermique produite dans la pile à combustible est entièrement reçue par un fluide de travail et est transmise au générateur du refroidisseur par absorption. La simulation du système a été réalisée sous deux critères : l'économie d'énergie et l'économie de carburant. Les résultats ont montré que l'efficacité énergétique de l'unité de refroidissement et de production d'énergie combinée (CCP) et du système CCP équipé de l'éjecteur (CCP-E) était respectivement de 63,72 % et 78,33 %. Cela indique que l'ajout de l'éjecteur au système augmente l'efficacité énergétique du système de 23 %. Les pourcentages d'économie de carburant du système CCP et du CCP-E étaient de 44,43 % et 45,9 %, respectivement. Les résultats ont également montré que l'ajout de l'éjecteur dans le système de réfrigération augmente les performances du système jusqu'à 44 %. La présence de l'éjecteur provoque une augmentation du flux de fluide de travail dans l'évaporateur grâce à l'aspiration du flux secondaire, et la capacité de refroidissement augmente de manière significative. De plus, avec l'augmentation de la pression du générateur et de l'évaporateur, le taux d'aspiration du système de refroidissement équipé de l'éjecteur diminue et augmente, respectivement [1].

### **1.3 Le but de travail :**

L'intégration de PEMFC avec une machine de réfrigération à éjecteur présente des défis techniques et opérationnels, mais offre un potentiel significatif pour des solutions énergétiques durables. Ce travail vise à analyser les performances de ce système combiné pour la production du froid tout en utilisant la chaleur perdue de la pile à combustible pour alimenter le cycle de réfrigération à éjection.

## **Chapitre 2**

# **SYSTEME COMBINE PEMFC- MACHINE FRIGORIFIQUE A EJECTEUR**

### **2.1 Introduction :**

Les piles à combustible convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique, elles sont plus efficaces que d'autres sources d'énergie conventionnelles car leurs efficacités ne sont pas limitées par le cycle de Carnot et elles produisent une puissance continue tant qu'elles sont alimentées en combustible. Ainsi, les PEMFC produisent de l'énergie avec un minimum de polluants.

Le système combiné de réfrigération et de production d'énergie (CCP) basé sur la pile à combustible est une solution avantageuse face à l'augmentation de la consommation d'énergie et à l'épuisement des ressources des combustibles fossiles dans le monde. Ces systèmes CCP ont reçu beaucoup d'attention au cours de la dernière décennie en raison de leurs hautes efficacités et de leur faible production de pollution.

D'autre part, les systèmes de réfrigération représentent un taux important de la consommation d'électricité qui est estimé d'environ 15% de la consommation mondiale. Il est donc souhaitable de penser à de nouveaux équipements et techniques plus efficaces et économiques, tels que le remplacement du compresseur, qui consomme une énergie électrique significative, par un processus qui utilise l'énergie thermique pour la compression plutôt que l'énergie mécanique. Cette approche, qui rappelle les méthodes de compression trouvées dans les systèmes de réfrigération par injection, peut être adaptée de manière unique grâce à la mise en œuvre d'un éjecteur et en conservant la PEMFC comme moteur principal de ce système de cogénération.

### **2.2 Composants du système:**

#### **2.2.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons :**

La pile à combustible se présente comme étant l'une des technologies alternatives, pour la production d'électricité et de chaleur à partir de la conversion de l'énergie chimique. Elle



constitue en un dispositif de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur), permettant la valorisation des pertes thermiques inhérentes à la production d'électricité. Différents types de piles à combustibles sont rencontrés dans l'industrie : la pile à combustible alcaline (AFC), la pile à combustible acide de type membrane échangeuse de proton (PEMFC), la pile à combustible avec électrolyte à carbonate fondu (MCFC), la pile à combustible à oxydes solides (SOFC) et la pile à combustible acide phosphorique (PAFC).

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) en est un exemple type, la réaction électrochimique qui se produit au sein de cette PEMFC permettant la génération d'électricité est exothermique. La récupération de cette énergie peut être exploitée pour chauffer l'eau et l'espace des habitations ou être utilisée pour la production du froid.

La structure de la PEMFC illustrée dans la Figure (2.1) et son principe de fonctionnement de la PEMFC sont expliqués dans ce chapitre. La PEMFC contient deux électrodes, une couche de diffusion de gaz (GDL), un électrolyte ou membrane échangeuse de protons (PEM), plaques bipolaires formant des canaux, et une couche catalytique. L'assemblage membrane et électrodes (AME) est aussi appelé cœur de la pile.

**Plaques bipolaires :** Le rôle des plaques bipolaires est de séparer les deux réactifs de deux cellules adjacentes, de permettre leur distribution sur la surface de la cellule et le passage de l'eau de refroidissement. Les plaques terminales sont monopolaires. Ces plaques bipolaires doivent être imperméables aux gaz, aux liquides et aux ions, et conduire les électrons (faible résistance électronique demandée), tout en étant les plus légères possible. Elles ajoutent ainsi de la rigidité mécanique à l'assemblage permettant une résistance aux sollicitations mécaniques (vibrations, choc...). Elles doivent conduire la chaleur pour permettre le refroidissement. Elles doivent aussi être résistantes aux sollicitations chimiques [15].

Elles sont fabriquées à partir de deux plaques métalliques qui ont été gravées de canaux pour la distribution des gaz et plaquées l'une contre l'autre. Dans la plupart des PEMFC, le pH est compris entre 2 et 3 et les températures entre 60 et 80°C. Ces conditions environnementales découragent l'utilisation d'aluminium, acier, titane ou nickel. La corrosion produit un effet des ions métalliques qui diffusent à travers la membrane et affectent sa conductivité ionique. Pour cette raison, les plaques bipolaires sont recouvertes de matériaux conducteurs non métalliques comme le graphite, des polymères conducteurs ou des métaux nobles [15].

**Couche de diffusion des gaz (GDL Gas Diffusion Layer) :** Le rôle des GDL est de diffuser et d'homogénéiser la répartition des gaz ( $H_2$ ,  $O_2$  et  $H_2O$ ) afin de compenser la

structurent/canal des plaques bipolaires. La GDL doit aussi être hydrophobe pour permettre l'évacuation de l'eau produite à la cathode. La GDL agit aussi comme un conducteur thermique et électrique. La résistance électrique de contact est souvent dominante sur sa résistance volumique. La GDL apporte aussi un support physique à la membrane pour empêcher ses déformations [15].

**Électrodes (anode et cathode) :** sont le siège de deux demi-réactions qui ont lieu de part et d'autre de la membrane [15].

Les molécules d'hydrogène se convertissent en protons et électrons dans l'anode, selon la réaction [10]:



Dans la cathode, après l'air est humidifié par l'humidificateur, l'oxygène passe à travers le canal de flux d'air de la cathode vers la GDL puis se diffuse vers l'interface du catalyseur où il se combine avec les protons d'hydrogène et les électrons pour former de l'eau selon [10]:



La réaction globale est écrite:



Ces réactions sont facilitées par la présence d'un catalyseur. Le catalyseur est déposé sur un support carbone (platine ou platinoïde). Les gaz  $\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$ , les électrons et les protons  $\text{H}^+$  réagissent à la surface de l'électrode. Pour faciliter la réaction, il est nécessaire d'avoir une surface effective de contact entre les réactifs et le catalyseur le plus grand possible. Le platine et ses dérivés étant coûteux, la taille des particules de catalyseur est le plus petit possible afin de maximiser la surface de contact à volume équivalent. A ces débuts, la technologie PEMFC utilisait des quantités importantes de platine (plus de 28 mg/cm<sup>2</sup>), aujourd'hui la quantité de platine peut atteindre des chargements aussi faibles que 0,1 mg.cm<sup>-2</sup> avec des particules de 1 nm à l'état de recherche [15].

**Membrane :** Le rôle de la membrane ou électrolyte est de laisser traverser les protons  $\text{H}^+$  produits à l'anode qui réagiront à la cathode avec l'oxygène de l'air pour former de l'eau. L'électrolyte doit donc conduire les protons mais être un isolant électronique. Il doit aussi empêcher le passage des gaz (Gas crossover) et doit résister aux sollicitations chimiques dues à un environnement réducteur à l'anode et oxydant à la cathode. Dans le cas de la PEMFC, l'électrolyte est une membrane polymère (souvent du Nafion). Les paramètres les plus

importants de la membrane sont la conductivité protonique, les propriétés de transport de l'eau, la perméabilité au gaz et la résistance mécanique. Toutes ces propriétés dépendent de sa teneur en eau, bilan entre sa production et son transport. L'eau est générée à la cathode par la réaction chimique et trois phénomènes conduisent à son transport [15] :

- L'électro-osmose, des molécules d'eau sont entraînées par le déplacement des protons,
- La diffusion par gradient de concentration,
- La perméabilité liée à une différence de pression.

Les PEMFC fonctionnent dans un intervalle de température basse de 50° à 95°C et ont généralement une température de fonctionnement de 75°C. Ces types de piles à combustible possèdent une membrane flexible et, par conséquent, ne se brisent pas et conviennent à l'utilisation domestique et au transport.

Les piles à combustible en polymère utilisent un catalyseur en platine pour accélérer la réaction chimique, et la présence de ce catalyseur a placé ce type de pile à combustible dans la catégorie des piles à combustible coûteuses [2].

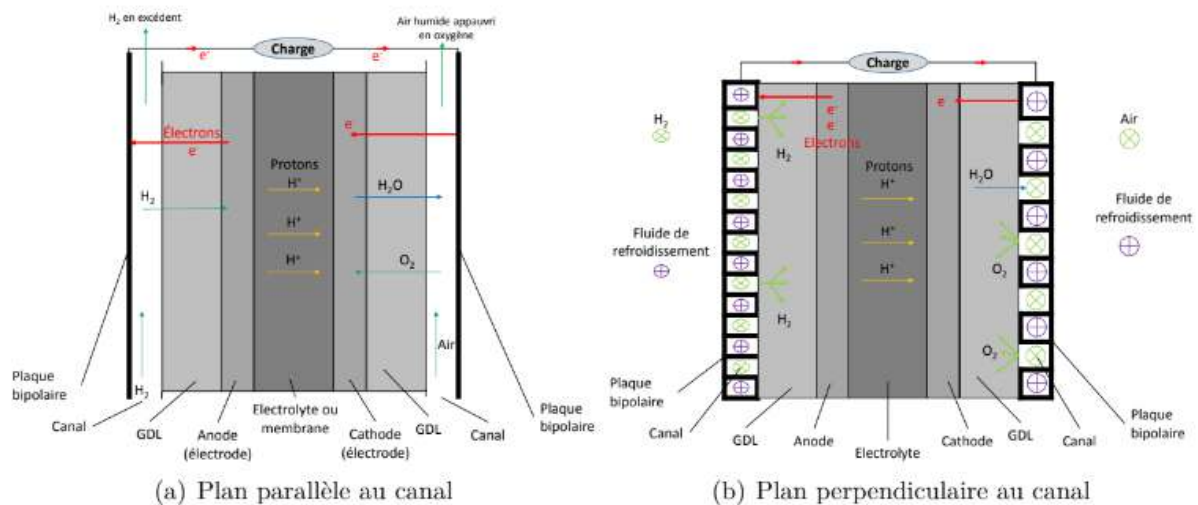


Figure (2.0-1): Schéma d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.

### 2.2.2 Machine frigorifique :

Une machine frigorifique est un circuit fermé dans lequel circule un fluide frigorigène, qui extrait cycliquement de la chaleur d'un réservoir thermique froid pour la céder à un autre réservoir thermique plus chaud. Selon l'énoncé de Clausius la chaleur ne peut pas passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud sans l'apport d'un travail extérieur. Ce qui permet de comprendre le principe de fonctionnement d'un système frigorifique qui exploite

cette limitation en utilisant un compresseur qui fournit ce travail en comprimant le fluide frigorigène. Les plus connues de ces systèmes sont : le cycle frigorifique à compression de vapeur, le cycle frigorifique à absorption, et le cycle frigorifique à éjection.

- **Principe de fonctionnement des systèmes de réfrigération à éjecteur :**

Le cycle frigorifique à éjecteur est similaire au système de réfrigération à compression, à l'exception que le compresseur est remplacé par un éjecteur (Figure (2.2)). Il est formé de deux boucles :

- **La boucle frigorifique BF:** est le cycle fermé à l'intérieur d'une machine frigorifique où le fluide frigorigène subit différentes transformations. Elle est constituée des éléments suivants : l'éjecteur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. A la sortie du condenseur (2), le fluide frigorigène est à l'état liquide saturée. Une partie est entraînée par la pompe (fluide primaire), alors que le reste subit une détente isenthalpique à travers le détendeur (5) et passe à l'évaporateur afin de produire du froid. A la sortie de l'évaporateur (6) le fluide frigorigène secondaire est à l'état vapeur saturée à faible niveau énergétique (Basse Pression et Basse Température) et il est entraîné par le fluide primaire circulant dans la boucle motrice.
- **La boucle motrice BM:** est le cycle de puissance, constituée des éléments suivants : l'éjecteur, le condenseur, la pompe et le générateur. Le fluide primaire (motrice) sort de la pile à combustible (4) sous forme de vapeur saturée et entre dans la tuyère primaire de l'éjecteur à un niveau énergétique élevé (Haute Pression et Haute Température) où elle est accélérée. A la sortie de la tuyère, le fluide moteur aspire la vapeur saturée du circuit frigorifique BF, permettant ainsi le mélange des deux fluides, Ce dernier passe par le diffuseur (8) et est comprimé jusqu'à l'état (1). Et enfin acheminé vers le condenseur (1) où la chaleur sera rejetée.

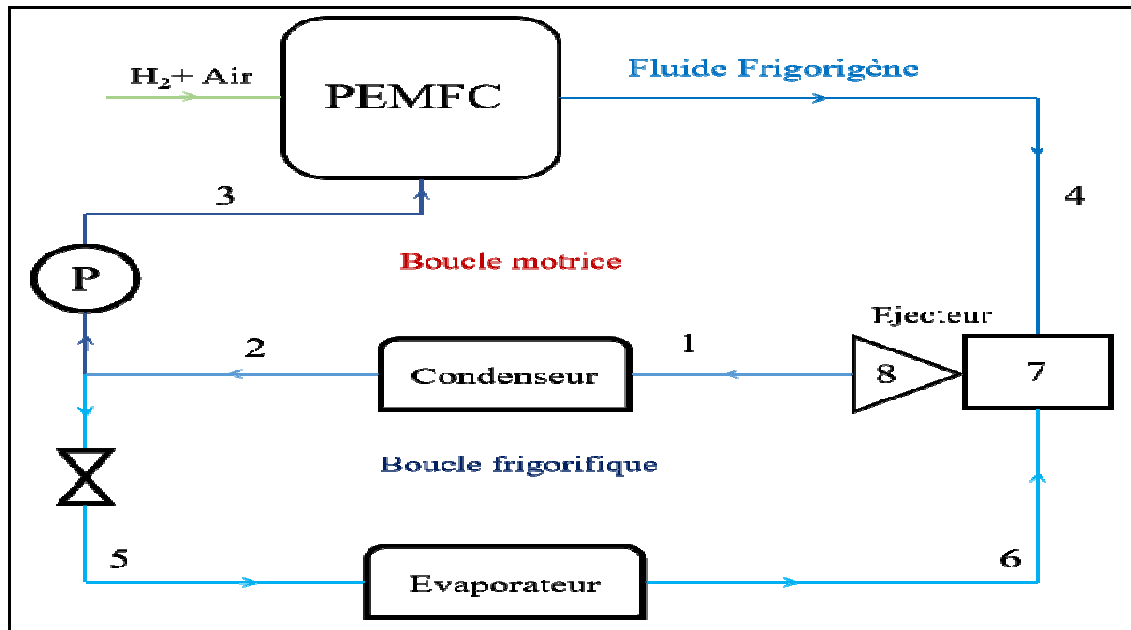


Figure (0-2.2) :Schéma de la machine frigorifique.

Les transformations thermodynamiques correspond au système sont illustrées sur le

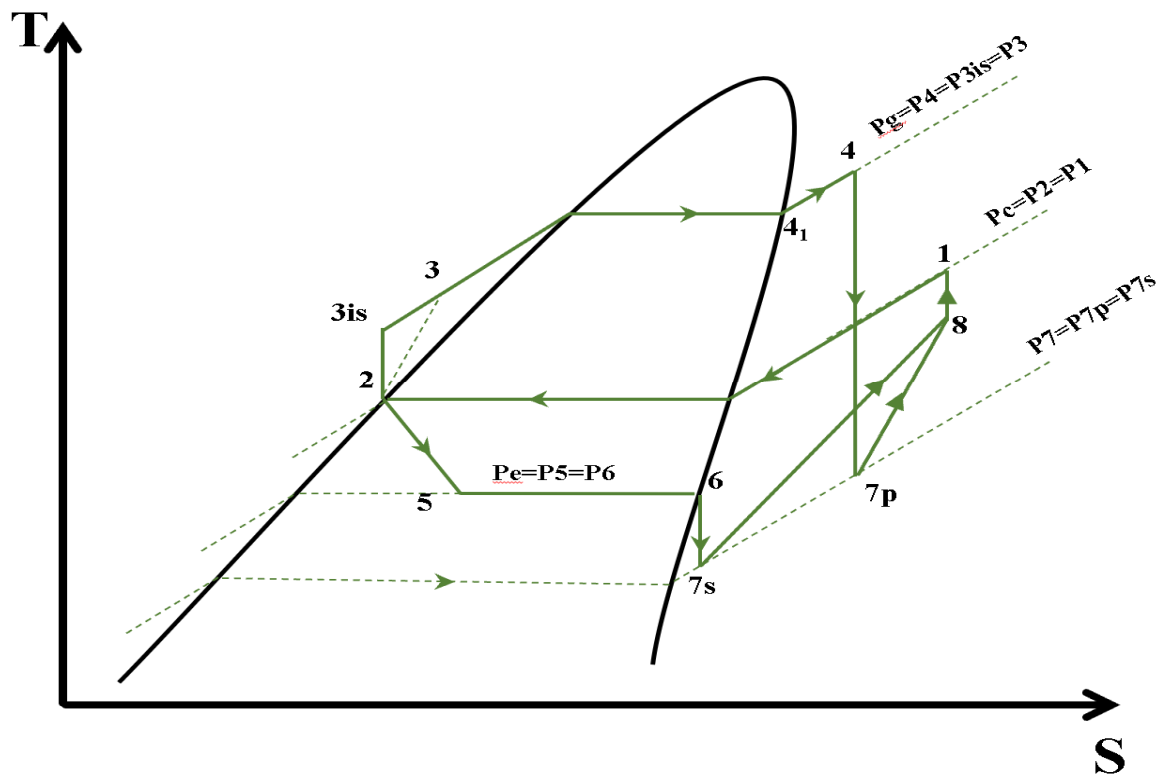


diagramme T-S de la figure (2.3):

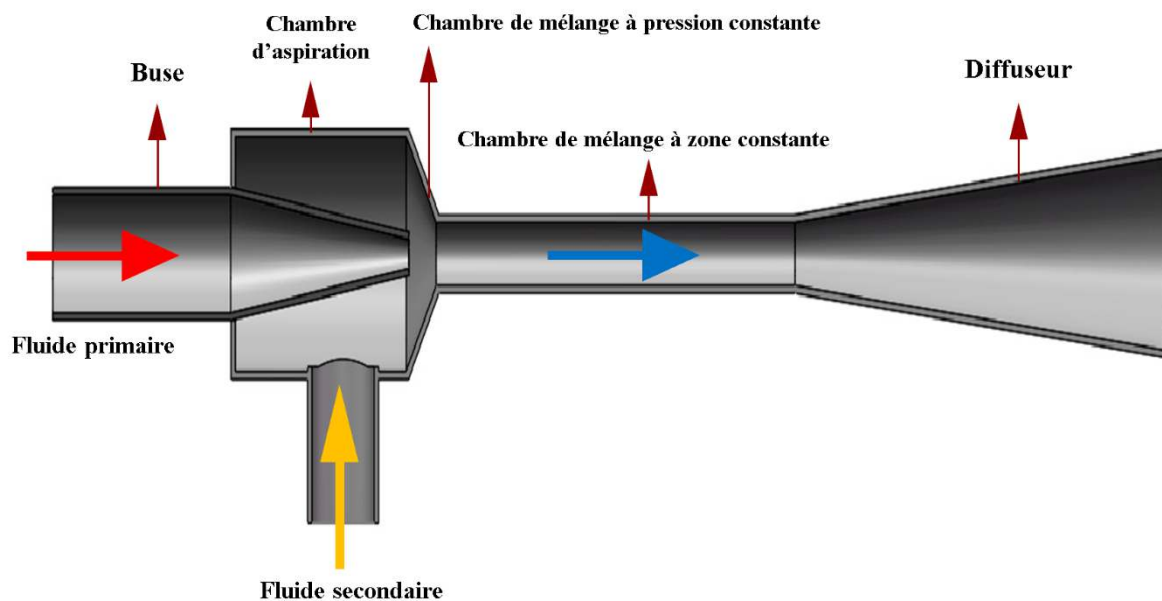
Figure (2.0-3) :Diagramme T-S correspondant au cycle.

### 2.2.3 Ejecteur :

Les éjecteurs, appelés également appareils à jet ou encore trompes, sont des appareils statiques destinés à aspirer, comprimer ou mélanger des gaz, des vapeurs, des liquides et parfois des solides grâce à la détente d'un fluide primaire moteur. La production du froid où l'éjecteur, couplé à une source de chaleur (qui peut être d'origine renouvelable comme les PEMFC), assure la compression d'un fluide frigorigène.

Un éjecteur, tel que schématisé sur la figure (2.4), comporte une tuyère motrice ou tuyère primaire et une tuyère d'aspiration appelée aussi tuyère secondaire ou tuyère de reprise. Cette dernière est constituée d'une chambre de réception assurant le mélange des deux fluides et d'un diffuseur [12].

D'autre part, l'éjecteur est un élément essentiel dans le domaine de la réfrigération, la climatisation, le dessalement, le raffinage du pétrole et les industries chimiques. En outre, les éjecteurs font partie intégrante des colonnes de distillation, des condenseurs et d'autres



processus d'échange de chaleur.

Figure (2.0-4) :Schéma d'un éjecteur.

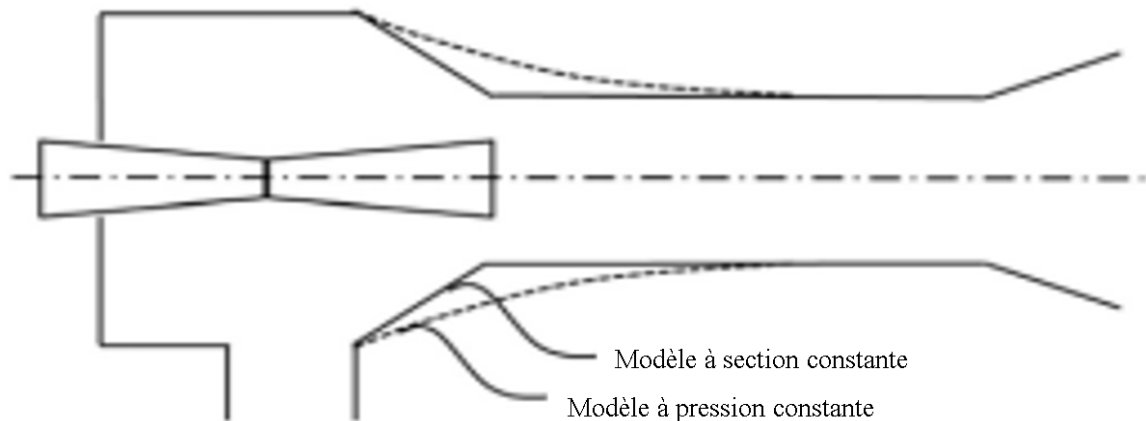
- **Classification des éjecteurs :**

La géométrie de la buse influe sur le fonctionnement de l'éjecteur. Selon le besoin désiré d'exploiter de l'éjecteur, il y a deux formes de la buse de la chambre d'aspiration [14]. Dans ce travail on s'intéresse à la buse convergente-divergente.

- **La buse convergente :** dans ce cas l'éjecteur fonctionne en régime subsonique et peut atteindre au maximum une condition sonore à la sortie de la chambre d'aspiration. Les éjecteurs subsoniques n'ont pas été conçus pour être utilisés avec de grands fluides compressifs, mais ils sont utilisés dans les applications qui fournissent une faible perte de pression.
  - Dans les centres de traitement du gaz, il peut être employé dans les équipements des surfaces pour les gaz d'échappement.
  - Dans les systèmes de piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).
  - Dans les centrales électriques à combustion en boucle chimique.
  - Dans les systèmes de réfrigération à éjecteur qui repose sur CO<sub>2</sub> transitique.
- **La buse convergente-divergente :** avec cette conception l'éjecteur fonctionne en régime supersonique. Les éjecteurs supersoniques sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de générer une grande différence de pression, où en régime supersonique le flux primaire peut entraîner une grande quantité de flux secondaire en raison de la pression plus basse à la sortie de la buse et la force de propulsion élevée. Les principales applications de ce type sont dans l'applications énergétiques tels que [14] :
  - Les systèmes de recirculation des piles à combustible, à savoir les piles à combustible à carbonate fondu et les piles à oxyde solide.
  - Les centrales électriques à éjecteur.
  - Les systèmes à cycle organique de Rankine avec un éjecteur.
  - Les systèmes de réfrigération à éjecteur.

La configuration de l'éjecteur est aussi classée en deux catégories en fonction de la position de la buse(Figure (2.5)), cela affecte le lieu de mélange pour le flux primaire et secondaire [13].

- **Ejecteur de mélange à zone constante (the constant-area mixing ejector CAM) :** la sortie de la buse est dans la section constante de l'éjecteur, où les fluides primaires et secondaires se mélangent dans cette zone.
- **Ejecteur de mélange à pression constante (the constant-pressure mixing ejector CPM) :** la sortie de la buse est dans la chambre d'aspiration avant la chambre fixe. Les



flux primaires et secondaires se mélangent dans la chambre d'aspiration à cette pression. La pression des flux de mélange reste constante le long de la chambre depuis la sortie de la buse jusqu'à l'entrée de la section à surface constante.

**Figure (2.0-5) :** La configuration de l'éjecteur selon la position de la buse [14].

Nous serons tenus de considérer un indice de performance bien important. Il définit le fonctionnement des éjecteurs et prend en compte à la fois les paramètres intrinsèques à l'éjecteur et celles de la boucle frigorifique :

- Le facteur d'entraînement  $U$  : C'est le plus courant des indices utilisés pour étudier les performances des éjecteurs, est déterminé comme le rapport du débit massique secondaire (fluide entraîné) par le débit massique primaire (fluide moteur). D'un point de vue pratique, ce facteur nous donne une idée sur le débit maximal aspiré pour des conditions de stagnation données à l'entrée de l'éjecteur. Pour se rapporter aux conditions de stagnation, il est à souligner que la valeur maximale du facteur d'entraînement dépend de la pression primaire, secondaire ainsi que celle imposée à la sortie.



**Tableau 2.1:** Classification des éjecteurs.

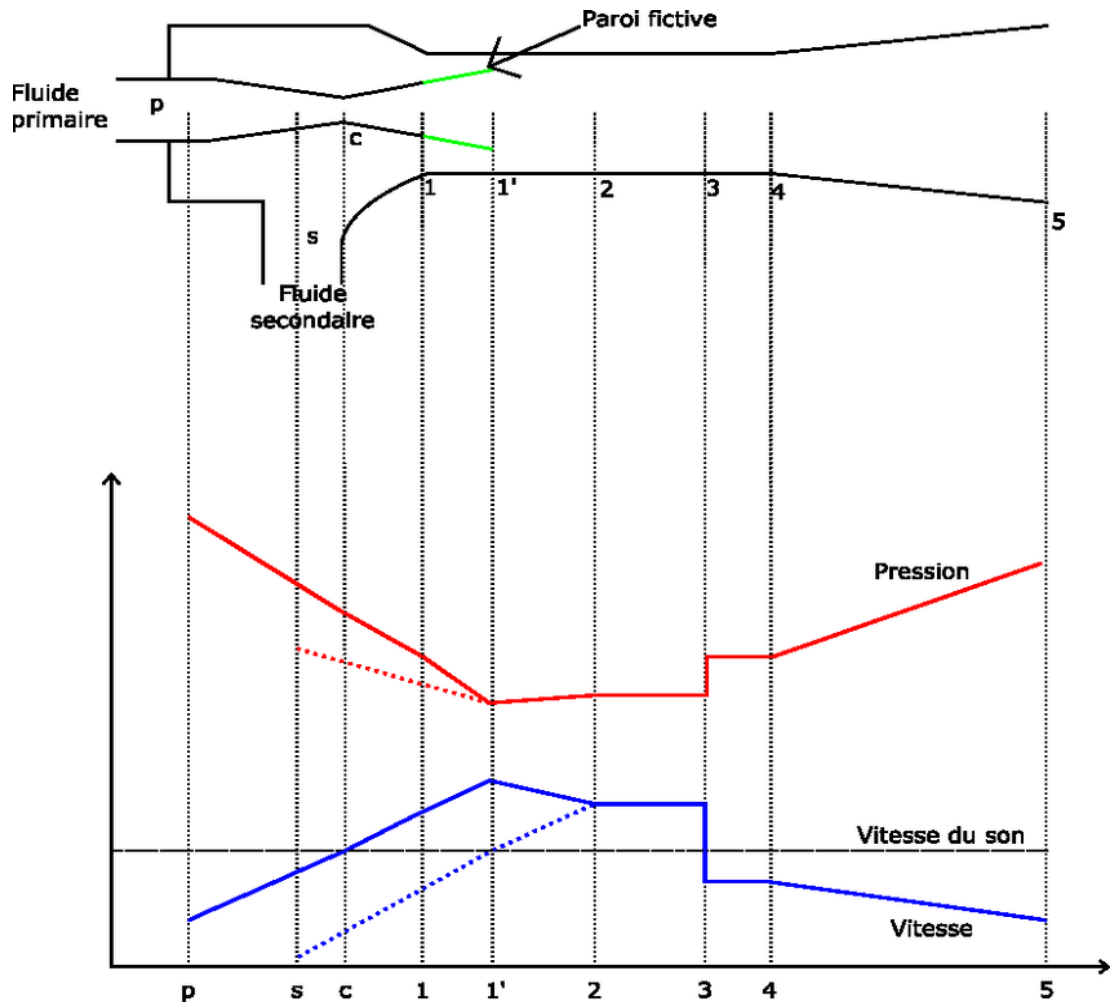
<b>Paramètres</b>	<b>Condition</b>			<b>Classification</b>	<b>Remarques</b>
La position de la buse	Ejecteur de mélange à zone constante			CAM	
	Ejecteur de mélange à pression constante			CPM	Meilleure performance par rapport à l'éjecteur CAM
La conception de la buse de la chambre d'aspiration	La buse convergente			Ejecteur subsonique	/
	La buse convergente-divergente			Ejecteur supersonique	/
Le nombre des phases	<b>Flux primaire</b>	<b>Flux secondaire</b>	<b>Le mélange à la sortie</b>		
	Vapeur	Vapeur	Vapeur	Ejecteur à vapeur	La possibilité d'un mélange diphasique. La possibilité de formations d'ondes de choc.
	Liquide	Liquide	Liquide	Ejecteur à liquide	Pas d'ondes de choc. Le flux monophasique uniquement.
	Vapeur	Liquide	Liquide	Ejecteur de condensation	Ecoulement diphasique avec condensation de flux primaire. Fortes ondes de choc.
	Liquide	Vapeur	Vapeur	Ejecteur diphasique	Flux diphasique. La possibilité de formation d'ondes de

					choc.
--	--	--	--	--	-------

- **Principe de fonctionnement de l'éjecteur :**

Dans l'éjecteur, Comme l'illustre la figure (2.6), le flux de vapeur primaire du générateur s'accélère à travers le bec de la buse de l'éjecteur, créant une faible pression à la sortie de la buse. Cette pression est supérieure par rapport la pression dans l'évaporateur, ce qui permet d'aspirer le fluide secondaire. Dans la zone de mélange (2), à la fin de la section convergente, les deux flux sont mélangés formant ainsi une onde de choc (3) accompagnée d'une augmentation de pression et une baisse de la vitesse vers le régime subsonique. Après l'onde de choc, la vitesse du flux combiné devient subsonique et se réduit davantage dans le diffuseur. Le passage à travers le diffuseur (4) permet d'augmenter la pression afin d'atteindre les conditions de condensation.

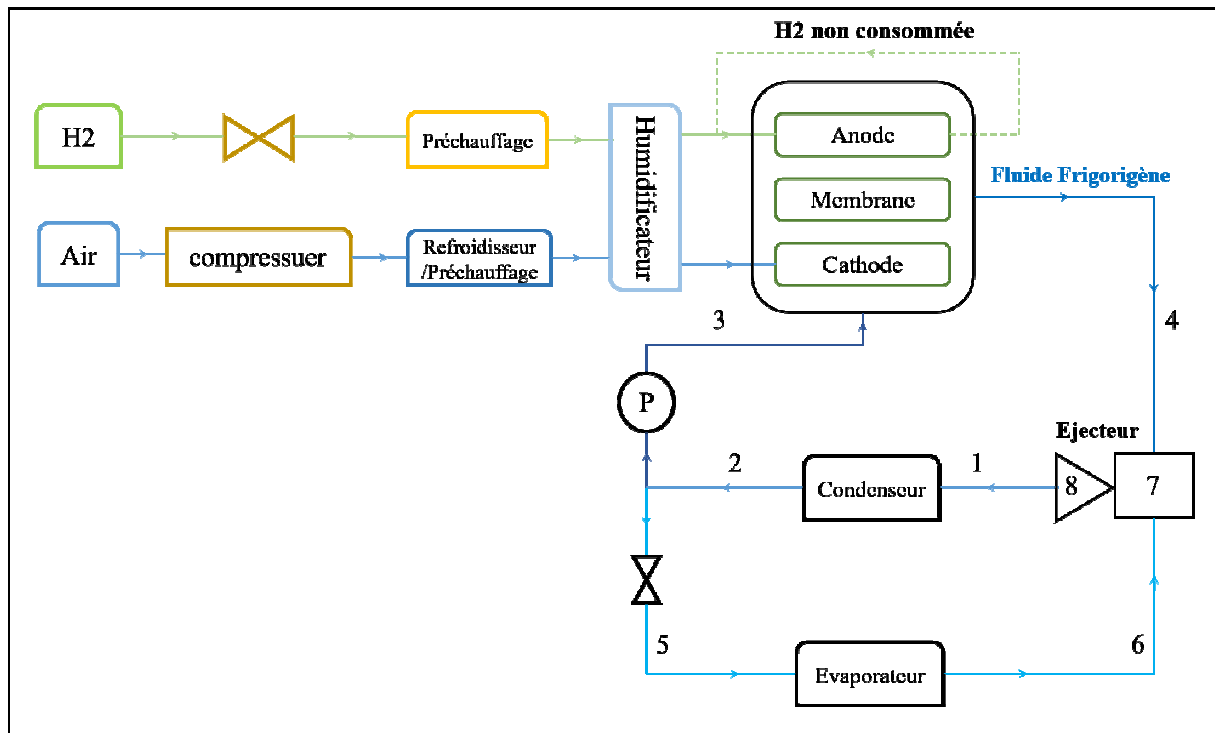
Après le condenseur, une partie du fluide de travail liquide est pompé vers le générateur et le reste se dérive vers l'évaporateur, atteignant la pression d'évaporation par un étranglement dans le dispositif d'expansion.



**Figure (2.0-6) :** Configuration géométrique et évolution de la pression et la vitesse le long de l'éjecteur[17].

### 2.3 Description du système :

Le système combiné PEMFC – machine frigorifique à éjecteur est présenté dans la figure (2.7). Il est composé d'un compresseur d'air, humidificateur, pile à combustible PEM, un éjecteur, un évaporateur, une pompe et un condenseur.



**Figure(2.7):**Schéma du système combiné composé de PEMFC et une machine frigorifique à éjecteur.

### 2.3.1 Principe de fonctionnement du système combiné:

L'hydrogène après l'humidification et le préchauffage se conduit vers l'anode, et l'air après la compression et l'humidification vers la cathode. La réaction se produit, l'électricité et la chaleur sont générées, L'excès d'hydrogène et d'oxygène est libéré de l'autre côté. L'eau produite par la réaction électrochimique est également éliminée de la pile à combustible.

D'autre part, un réfrigérant est utilisé pour refroidir la PEMFC. Il est transféré de la pile vers la machine pour la production du froid, puis réintroduit dans la pile à combustible. L'électricité générée par la pile est également injectée dans le réseau de distribution électrique.

La machine frigorifique équipée d'un éjecteur possède trois niveaux de pression, une haute pression dans la PEMFC, une basse pression dans l'évaporateur et une pression moyenne dans le condenseur. La vapeur de réfrigérant, après avoir quitté la PEMFC, entre dans la buse de l'éjecteur comme débit primaire et la vapeur de réfrigérant à basse pression entre dans l'éjecteur depuis l'évaporateur comme un débit secondaire et se combine. Le courant mixte entre ensuite dans l'éjecteur diffuseur et se dirige vers le condenseur.

## 2.4 Les fluides frigorigènes :

Le fluide frigorigène circulant assure un transfert de chaleur d'une source dont la température est en dessous de la température ambiante, vers le milieu environnant et ce en s'évaporant à basse température et en se condensant à une température plus élevée.

Il n'existe pas de fluides frigorigènes universels idéals. Il convient donc de différencier les domaines d'applications. Il est possible de trouver des solutions judicieuses, répondant à des critères écologiques et économique pour pratiquement toutes les situations [5].

On a choisi le R141b, le R1234-ze et R134a comme échantillon pour montrer quelques caractéristiques et propriétés de ces fluides qui sont obtenus de la norme ASHRAE, présentés dans les tableaux (2.2), (2.3) et (2.4).

**Tableau 2.2** : Nomenclature chimique des réfrigérants.

Types	Numéro d'ASHRAE	Nomenclature chimique UICPA	Formule chimique
HFO	R1234ze(E)	Trans-1,3,3,3-tetrafluoro-1-propene	CF <sub>3</sub> CH=CHF
	R141b	1,1-dichloro-1-fluoroethane	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F
HFC	R134a	1,1,1,2-tetrafluoroethane CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>

### 2.4.1 Types des fluides frigorigènes :

- **Les CFC (Chaines Carbonées Fluoro-chlorées) :**

Les chlorofluorocarbones (CFC) sont des produits chimiques organiques et synthétiques (c.-à-d. d'origine anthropique) composés de carbone, de chlore et de fluor. Ce sont des dérivés des hydrocarbures dont les atomes d'hydrogène sont tous remplacés par des atomes de chlore et de fluor.

Ce type de fluide, possédant pourtant de bonnes caractéristiques thermodynamiques, est désormais interdit car il est très nocif pour la couche d'ozone. Etant très stable et pourvu d'une excellente longévité dans l'atmosphère, ce type de fluide peut aisément atteindre la stratosphère. Il est alors décomposé par l'intermédiaire des rayons ultraviolets et libère ses atomes de chlore qui détruisent ensuite durablement les molécules d'ozone [5].

- **Les HCFC (Hydro chlorofluorocarbures) :**

Les hydro chlorofluorocarbures ou HCFC sont des gaz fluorés c'est à dire contenant du fluor. Fluide frigorigène (R-22), inodore, ininflammables, non corrosifs et non toxiques. Bien que l'action des HCFC sur l'ozone stratosphérique ne représente que 5% de l'action des CFC, elle n'est pas nulle.

Appelés "fluides de transition" ils ont pris le relais des CFC après leur interdiction. Ils sont beaucoup moins nocifs mais restent toutefois néfastes et destructeur de la couche d'ozone.

Ce type de fluide devra cesser d'être utilisé à partir de 2015, conformément au protocole de Montréal. Jusqu'à cette échéance, toute installation existante devant être rechargée en fluide ne pourra plus l'être qu'avec un substitut ou avec du fluide recyclé. Par ailleurs, plus aucune nouvelle installation utilisant ce type de fluide ne pourra être mise en marche.

- **Les HFC (Hydrofluorocarbures) :**

Ces fluides sont les principaux remplaçants des HCFC et les plus utilisés actuellement. Ils ne contiennent pas de chlore et n'ont donc aucun effet direct sur la couche d'ozone. Ils sont par ailleurs ininflammables et non toxiques. Cela dit, ce type de fluide participe quand même à l'effet de serre et il est probable que son usage tende à être légiféré dans les années à venir.

- **Les HC (hydrocarbures) :**

Les hydrocarbures, c'est-à-dire les composés organiques composés exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène, possèdent des propriétés qui en font d'excellents fluides frigorifiques. Outre ces bonnes qualités thermodynamiques, ils offrent l'avantage d'être assez propres pour l'environnement et d'avoir une faible toxicité. En revanche, ils sont inflammables, ce qui rend leur manipulation délicate. Pour utiliser des hydrocarbures comme fluides frigorifiques, il faut donc s'entourer d'un maximum de précautions.

Ces hydrocarbures sont le propane, le butane et l'isobutane. Les hydrocarbures tels que le R290 (propane) dédié au froid commercial et le R600a (isobutane) pour le froid domestique deviennent des fluides frigorigènes incontournables.

- **Les composés inorganiques (série 700) :**

Les composés inorganiques que l'on utilise pour la réfrigération sont l'eau, le dioxyde de carbone et l'ammoniac. Chacun d'entre eux est inoffensif pour l'environnement, mais présente certains inconvénients.

- L'eau est un fluide frigorifique qui peut être utilisé mais cela reste théorique, car il faut beaucoup trop d'énergie pour pouvoir l'utiliser. L'eau a aussi une importante masse volumique, ce qui pose des problèmes en phase d'évaporation.
- Le CO<sub>2</sub> est également très présent sur terre, mais il a de faibles capacités thermodynamiques. Le fonctionnement transcritique de ces installations et les pressions très élevées sont des freins au développement de cette solution.
- Enfin, l'ammoniac est certainement le meilleur fluide frigorifique inorganique, il a de très bonnes capacités thermodynamiques, mais il est toxique, corrosif et inflammable. Il est surtout employé dans les grandes installations industrielles.

On cite par la fin les HFO qui sont des fluides de synthèse avec de bonnes propriétés thermodynamiques, à faible GWP grâce à une durée de vie relativement courte dans l'atmosphère, environ 11 jours. Par contre lors de leur décomposition dans l'atmosphère ils se transforment en acide trifluoroacétique, acide non biodégradable, mais à l'heure actuelle aucune étude vraiment poussée n'a pu permettre d'en connaître les effets néfastes sur l'environnement. Les HFO ont un faible niveau toxique, par contre ils sont inflammables et en cas d'incendie ils dégagent un acide fluorhydrique relativement toxique.

Les HFO utilisés dans le domaine des systèmes frigorifique sont le R1234-yf, le R1234-ze et le R1233-zd.

#### 2.4.2 Choix du fluide frigorigène:

Lorsque l'on est amené à choisir un fluide frigorigène pour une application, on souhaite généralement qu'il conduise à de hautes performances énergétiques, qu'il soit adapté aux conditions de fonctionnement du cycle, qu'il soit viable économiquement et satisfasse les réglementations en vigueur. Les critères de choix d'un fluide sont :

- **Critères de performance :**

Les valeurs de la température et la pression critiques sont très importantes. Ces données déterminent la limite de la haute pression du cycle. Près de la pression critique, une variation très faible de la température peut entraîner un changement de pression important, ce qui peut influencer le comportement du système.

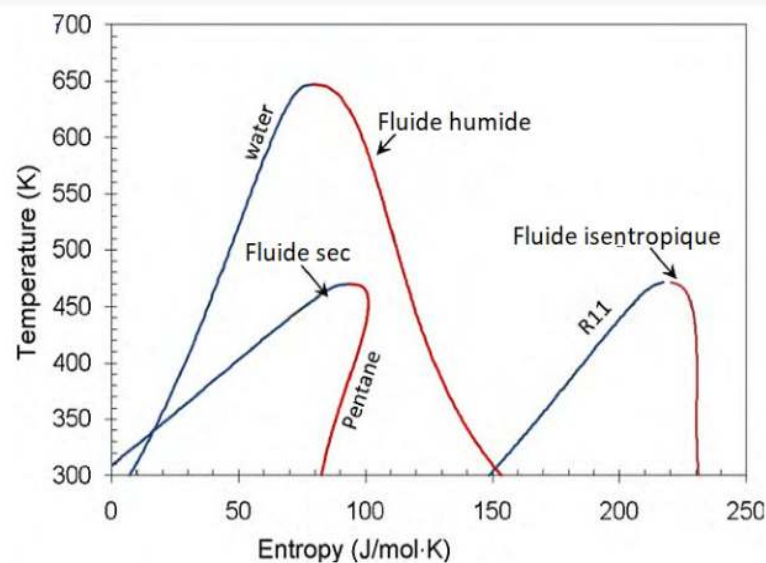
Réfrigérant	Masse molaire (kg/K.mol)	Température critique (K)	Pression critique (KPa)
-------------	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------

R1234ze(E)	114.04	109.37	3636.3
R141b	117.0	204.4	4212.0
R134a	102.0	101.06	4059.3

**Tableau 2.3** : Propriétés thermodynamiques limites des réfrigérants.

- **Pente de détente du fluide de travail** : On peut distinguer trois types de fluides : les fluides secs, les fluides isentropiques et les fluides humides. Cette distinction se fait par la valeur de la pente  $\delta$  de la détente dans le diagramme entropique, définie par  $\delta=dS/dT$  sur la courbe de saturation vapeur.
  - Si  $\delta>0$ , le fluide est dit « sec » ;
  - Si  $\delta=0$ , le fluide est dit « isentropique » ;
  - Si  $\delta<0$ , le fluide est dit « humide ».

Concrètement, la courbe de saturation vapeur des fluides « secs » possède une pente positive, celle des fluides«isentropiques» une pente infinie et les fluides « humides » ont une pente négative. Cela se traduit par les trois formes des courbes de saturation représentées dans



la figure ci-dessous.



- **Critères technico-économiques:**

Certaines propriétés thermo-physiques du fluide ont une incidence directe sur les coûts des équipements. Nous en citons ici quelques-uns.

- **Volume spécifique et chaleur latente :** Un faible volume massique et une chaleur latente importante permettent :
  - D'absorber plus d'énergie lors de l'évaporation.
  - De réduire le débit nécessaire, donc de diminuer la taille de l'installation.
  - De réduire le volume de vapeur à la sortie d'une turbine ORC, donc de diminuer sa taille.
- **Propriétés de transport de chaleur:** Les propriétés de transport, à savoir la conductivité et la viscosité, conditionnent la capacité de transfert convectif du fluide considéré. Le coefficient d'échange convectif du fluide est, notamment, proportionnel à la conductivité thermique. Ces deux paramètres interviennent dans le dimensionnement des échangeurs de chaleur.
- **Vitesse du son :** La vitesse du son du fluide limite le débit de fluide circulant dans un corps de turbine. Ce paramètre influence directement la taille, et donc le coût.
- Le prix et la disponibilité commerciale du fluide sont bien évidemment des éléments essentiels du choix.
- **Critères de limite de fonctionnement :**

Le maintien en condition opérationnelle de la machine impose des limites à certaines caractéristiques physiques des fluides. Ces critères de limite de fonctionnement sont la température de fusion et les pressions de condensation et d'évaporation.

- **Température de fusion :** Dans les machines dont certains composants sont situés à l'extérieur, la température du fluide peut descendre assez bas en hiver. Or le fluide ne doit en aucun cas se solidifier. Une température de fusion très basse est fortement recommandée dans ce cas.

- **Pression de condensation** :Idéalement, le fluide doit se condenser ou s'évaporer à une pression supérieure à 1 bar afin d'éviter toute entrée d'air dans le système.
- **Pression d'évaporation** :La pression d'évaporation doit si possible rester modérée, faute de quoi les risques de fuite sont augmentés ainsi que les risques d'explosion.
- **Stabilité, compatibilité avec matériaux et lubrifiants** :Enfin, la stabilité du fluide et sa compatibilité avec les matériaux et les lubrifiants sont des éléments fondamentaux pour garantir le bon fonctionnement de la machine.

- **Critères d'environnement et de sureté :**

Les fluides de travail doivent respecter les normes environnementales et la sécurité des opérateurs. Les critères liés à l'environnement et à la sureté comprennent les points suivants:

- **Indices d'impact** : Pour établir l'impact des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone et l'effet de serre, trois indices principaux ont été définis :
  - **Potentiel de destruction de la couche d'ozone (ODP)** : Le ODP est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'appauvrissement de la couche d'ozone. On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence, à savoir soit R11 ou le R12 qui ont un ODP = 1.
  - **Potentiel de participation au réchauffement climatique (GWP)** : Le GWP est un indice qui caractérise la participation de la molécule à l'effet de serre. On calcule la valeur de cet indice par rapport à une molécule de référence, à savoir le CO<sub>2</sub>, et pour des durées bien déterminées (20, 100,500ans). Le CO<sub>2</sub> à un GWP = 1.
  - **Impact de réchauffement total équivalent (TEWI)** : Le TEWI est un concept qui caractérise l'impact global d'une installation sur le réchauffement planétaire durant sa vie opérationnelle. Cet indice comprend l'effet direct du aux émissions par fuites dans les installations et l'effet indirect provenant des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation d'énergie requise pour faire fonctionner l'installation. Le TEWI s'exprime en Kg de CO<sub>2</sub>.
- **Indices de sécurité** : Cette classification est présentée par deux caractères alphanumériques (A2...), la lettre majuscule correspond à la toxicité et le chiffre à l'inflammabilité. Le classement suivant la toxicité On distingue 2 groupes :

- Le groupe A pour lequel il n'y a pas de preuve de la toxicité des fluides frigorigènes pour des concentrations inférieures ou égales à 400 ppm.
- Le groupe B pour lequel il y a des preuves de toxicité pour des concentrations inférieures 400 ppm.

Le classement suivant l'inflammabilité On distingue 3 groupes :

- Groupe 1 : le fluide frigorigène ne permet pas une propagation de la flamme dans de l'air à 21°C et 101 kPa.
- Groupe 2 : le fluide frigorigène a une limite inférieure d'inflammabilité supérieure à 0,10 kg/m<sup>3</sup> à 21°C et 101 kPa et une chaleur de combustion inférieure à 19 kJ/kg.
- Groupe 3 : le fluide frigorigène est hautement inflammable avec une limite inférieure d'inflammabilité inférieure ou égale à 0,10 kg/m<sup>3</sup> à 21°C et 101 kPa ou une chaleur de combustion supérieure ou égale à 19 kJ/kg.

**Tableau 2.4** : Données environnementales de sécurité.

Fluides	GWP 100 Ans	ODP	Classification de sécurité	Type de fluide
R1234ze(E)	<1	0.00	A2L	Isentropique
R141b	<1	0.00	/	Sec
R134a	1430	0.00	A1	Humide

## 2.5 Conclusion :

Le chapitre présenté à pour but d'illustrer le principe de fonctionnement du système combiné PEMFC-MF à éjecteur, le rôle et le comportement de chaque composant dans le système. De plus, nous avons pris en considération l'impact environnementale du fluide de travail en choisissant des réfrigérants moins toxique avec de bonnes propriétés thermodynamiques.

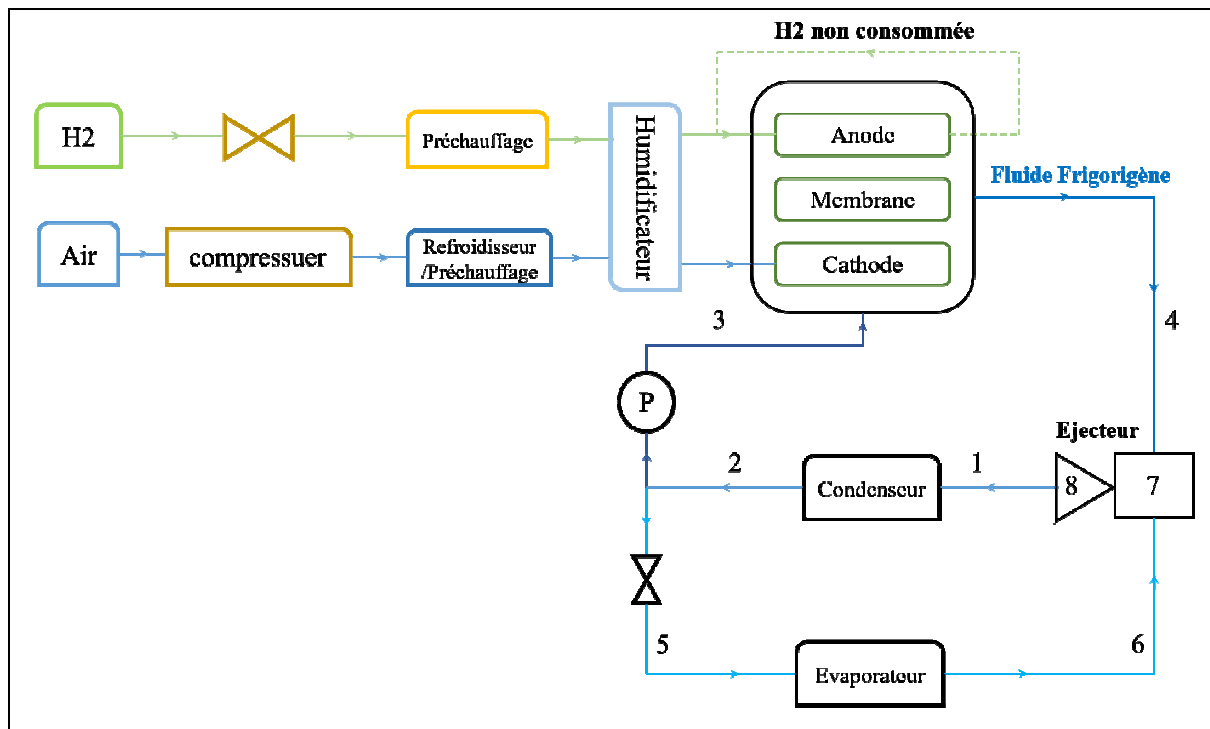
Le chapitre suivant est consacré à la modélisation thermodynamique du système, permettant de mieux comprendre son comportement et ses performances.

### Chapitre 3:

## MODELISATION ET PERFORMANCE DU SYSTEME

### 3.1 Introductions :

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le système combiné PEMFC-Machine frigorifique à éjecteur, en expliquant comment il fonctionne. Ensuite, nous décrivons les hypothèses simplificatrices que nous avons utilisées pour modéliser le système combiné. Ces hypothèses simplifient les calculs tout en conservant les principes fondamentaux du système réel. Enfin, nous présentons notre modèle du système PEMFC-Machine frigorifique à éjecteur, en décrivant les équations et les principaux paramètres que nous avons pris en compte. Ce modèle nous permettra d'évaluer les performances du système dans des conditions



d'opération spécifiques et d'analyser l'impact des différents paramètres sur ces performances.

### 3.2 Modélisation mathématique du système :

Les hypothèses suivantes sont considérées dans ce travail:

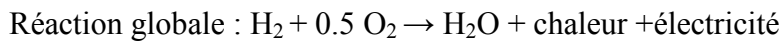
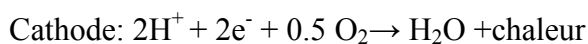
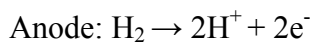
1. Les conditions de fonctionnement sont en régime permanent.
2. La pression dans les canaux de la pile à combustible est constante.
3. La température et la pression de fonctionnement de la PEMFC sont 80 °C et 300 kPa.
4. Les réactions chimiques dans la PEMFC atteignent l'état d'équilibre.
5. La distribution de la température est uniforme dans la PEMFC.
6. Les pertes de charges dans la pile sont négligeables.

**Figure (3.0-1):** Schéma du système combiné.

7. La chaleur produite est récupérée par le réfrigérant.
8. L'air est un mélange de 79% d'Azote et 21% d'Oxygène.
9. L'oxydant est l'air humidifié et l'Hydrogène est le combustible.

#### 3.2.1 Modèle électrochimique de la PEMFC:

Les réactions qui se produisent dans la PEMFC sont comme ce suit :



La consommation de l'hydrogène est déterminée par le calcul du débit molaire [8] :

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{cons}} = N_{\text{cell}} \frac{iA}{2F} \quad (3.1)$$

Aussi, les autres débits molaires sont décrits par [8] :

$$\dot{n}_{\text{O}_2, \text{cons}} = N_{\text{cell}} \frac{iA}{4F} \quad (3.2)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}, \text{gen}} = N_{\text{cell}} \frac{iA}{4F} \quad (3.3)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{in}} = \lambda_{\text{H}_2} N_{\text{cell}} \frac{iA}{2F} \quad (3.4)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \lambda_{O_2} N_{cell} \frac{iA}{4F} \quad (3.5)$$

$$\dot{n}_{H_2,out} = \dot{n}_{H_2,in} - \dot{n}_{H_2,cons} \quad (3.6)$$

Pour déterminer la puissance de la pile à combustible, la tension à vide dite tension de Nernst est calculée par l'équation (3.7) :

$$E_{nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T_{fc} (\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})) \quad (3.7)$$

$E_{nernst}$ ,  $T_{fc}$  est la température de fonctionnement de la PEMFC,  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  sont les pressions effectives partielles de l'hydrogène et l'oxygène, respectivement.  $P_{H_2O}^{sat}$  est la pression de saturation de l'eau.

Les pressions partielles des réactifs sont calculées selon les équations suivantes [1] :

$$P_{H_2} = (0.5 P_{H_2O}^{sat}) \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{1.653 i}{T_{fc} 1.334}\right) \times x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (3.8)$$

$$P_{O_2} = P \left[ 1 - x_{H_2O}^{sat} - x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{0.291 i}{T_{fc} 0.832}\right) \right] \quad (3.9)$$

$$\log(p_{H_2O}^{sat}) = -201794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5} t^2 + 1.4454 \times 10^{-7} t^3 \quad (3.10)$$

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

$$t = T_{fc} - 273.15 \quad (3.11)$$

Les équations (3.12) et (3.15)  $x_{N_2}^{channel}$  et  $x_{H_2O}^{sat}$  sont les fractions molaires de l'eau et d'Azote, respectivement [1] :

$$x_{N_2}^{channel} = \frac{(x_{N_2,in} - x_{N_2,out})}{\ln\left(\frac{x_{N_2,in}}{x_{N_2,out}}\right)} \quad (3.12)$$

$$x_{N_2,in} = 0.79 (1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (3.13)$$

$$x_{N_2,out} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air} - 1}{\lambda_{air}}\right) (0.21)} \quad (3.14)$$

$$x_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P} \quad (3.15)$$

$x_{N_2,in}$  et  $x_{N_2,out}$  mentionnés dans (3.13) et (3.14) sont les fractions molaires de l'Azote à l'entrée et à la sortie,  $\lambda_{air}$  est le coefficient stœchiométrique de l'air.

Due aux pertes irréversibles de la PEMFC, la tension réelle est inférieure à  $E_{nernst}$ . Ces pertes sont causées par les chutes d'activation, les chutes ohmiques et les chutes de concentration. La tension réelle de la pile à combustible est calculée par (3.16), [8]:

$$V_{fc} = E_{nernst} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (3.16)$$

Pour calculer la surtension d'activation,  $C_{H_2,conc}$  est la concentration d'hydrogène et  $C_{O_2,conc}$  est la concentration de l'oxygène.  $V_{act}$  est présentée comme ceci [3] :

$$V_{act} = -\left[-0.948 + \varepsilon T_{fc} + 0.000076 T_{fc} (\ln(C_{O_2,conc})) - 0.000193 T_{fc} (\ln(I))\right] \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = 0.0028 + 0.0002 \ln(A_{cell}) + 0.000043 \ln(C_{H_2,conc}) \quad (3.18)$$

$$C_{O_2,conc} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp\left(\frac{498}{T_{fc}}\right) \quad (3.19)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} P_{H_2} \exp\left(\frac{-77}{T_{fc}}\right) \quad (3.20)$$

La surtension d'activation est une perte irréversible de la pile à combustible PEM. Il existe deux surtensions d'activation dans la pile à combustible PEM, la surtension d'anode est négligeable mais la surtension d'activation de cathode est importante et est due à la cinétique de réaction de transfert de charge à travers l'interface électrode-électrolyte.

$V_{ohm}$  représente les chutes ohmiques, qui est causée par la chute de tension à travers la résistance équivalente de la membrane  $r_{mem}$  et les résistances de contact à la fois entre la membrane et les électrodes, ainsi qu'entre les électrodes et les plaques bipolaires [18]. La loi générale de cette surtension est connue par la loi d'Ohm, définie par:

$$V_{ohm} = IR_{int} \quad (3.21)$$

Dans la loi d'Ohm,  $R_{int}$  est la résistance globale interne et cette résistance est fonction du courant et de la température. Il existe une équation pour  $R_{int}$  qui s'écrit comme suit [3] :

$$R_{int} = \frac{r_{mem} L}{A_{cell}} \quad (3.22)$$

La résistance de la membrane qui est faite par le Nafion  $r_{mem}$ , son expression expérimentale s'exprime comme [3]:

$$r_{mem} = \frac{181.16 \left[ 1 + 0.03 i + 0.062 \left( \frac{T_{fc}}{303} \right)^2 i^{2.5} \right]}{11.866 - 3i \exp\left( 4.18 - \left( 1 - \frac{303}{T_{fc}} \right) \right)} \quad (3.23)$$

Finalement, le travail de la PEMFC est obtenu par l'équation (3.24) [3] :

$$W_{fc} = N_{cell} \cdot I \cdot V_{fc} \quad (3.24)$$

$N_{cell}$ ,  $I$  et  $V_{fc}$  sont le nombre de cellules dans la pile, la surtension de la pile et le courant de fonctionnement de la PEMFC, respectivement.

En supposant que l'air est un gaz parfait, la compression isentropique dans le compresseur d'air est donnée par :

$$\frac{T_{out,s}}{T_{amb}} = \pi^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \quad (3.25)$$

$\pi$ : est le rapport de pression.

$\gamma$ : désigne l'exposant isentropique.

$T_{out,s}$  ,  $T_{amb}$ : sont respectivement la température de sortie du processus isentropique et la température ambiante.

Le rendement isentropique est :

$$\eta_{comp} = \frac{T_{out,s} - T_{amb}}{T_{out,comp} - T_{amb}} \quad (3.26)$$

$T_{out,comp}$  : est la température de l'air à la sortie du compresseur d'air.

La puissance réelle de compression est :

$$\dot{W}_{comp} = \frac{\dot{m}_{air} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) R \times T_{amb} \left(\pi^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} - 1\right)}{\eta_{comp}} \quad (3.27)$$

$\dot{m}_{air}$ : Le débit massique d'air comprimé.

La puissance électrique nette de la pile à combustible est calculé par :

$$W_{fcnet} = W_{fc} - W_{comp} \quad (3.28)$$

### 3.2.2 Modèle thermique de la PEMFC:

L'énergie dans la PEMFC a deux formes, le premier c'est le travail et le deuxième est la chaleur dégagée par ce système. Une grande quantité d'énergie gaspillée sous forme de chaleur représente près de la moitié de l'apport d'énergie dans les conditions nominales. Après avoir quitté la PEMFC, le réfrigérant possède de l'énergie qui pourrait être utile pour la production du froid [8].

En utilisant le premier principe de la thermodynamique, on obtient  $\dot{Q}_{net}$ [3] :

$$\dot{Q}_{net} = \dot{W}_{fc} - \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_{s,l} \quad (3.29)$$

$\dot{Q}_{net}$  est la chaleur nette générée et échangée avec le réfrigérant,  $\dot{Q}_{ch}$  désigne le taux de chaleur générée par la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène [3] .



$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{O_2,cons} \times HHV \quad (3.30)$$

$\dot{Q}_{s,l}$  représente la chaleur latente et spécifique,  $\dot{W}_{fc}$  est le travail de la PEMFC sous forme d'une énergie électrique [2].  $\dot{Q}_{s,l}$  s'exprime par [3]:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,l} = & C_{H_2}(\dot{n}_{H_2,out}T_{fc} - \dot{n}_{H_2,in}T_{amb}) + C_{O_2}(\dot{n}_{O_2,out}T_{fc} - \dot{n}_{O_2,in}T_{out,comp}) + C_{N_2}(\dot{n}_{N_2,out}T_{fc} - \\ & \dot{n}_{N_2,in}T_{out,comp}) + \dot{n}_{HO_2,gen}C_{H_2O}(T_{fc} - T_{amb}) + \dot{n}_{HO_2,gen}H_v \end{aligned} \quad (3.31)$$

### 3.2.3 Modélisation de la machine frigorifique à éjecteur :

Pour simplifier les analyses et l'étude paramétrique de ce cycle, illustré par la figure (3.1), nous prenons en considération les hypothèses suivantes :

- Les transformations dans la PEMFC, l'évaporateur et le condenseur sont isobares ;

$$P_4 = P_3$$

$$P_2 = P_1$$

$$P_5 = P_6$$

- Les énergies cinétiques et potentielles sont négligeables dans toutes les composantes du système sauf à l'éjecteur.
- Nous considérons l'écoulement unidimensionnel dans l'éjecteur.
- Les fluides primaire et secondaire rentrent dans l'éjecteur sous forme de vapeur.
- La détente des fluides primaire et secondaire est isentropique.

$$S_4 = S_{7p}$$

$$S_6 = S_{7s}$$

- La pression à la sortie de la tuyère primaire est égale à celle du fluide secondaire à la même section.

$$P_{7p} = P_{7s}$$

Avec :  $P_{7p} = P_{py}$

Et :  $P_{7s} = P_{sy}$

- La détente dans la valve est isenthalpique.

$$h_2 = h_5$$

- Le mélange des fluides primaire et secondaire se produit à section constante.

$$A_8 = A_{7p} + A_{7s}$$

- La décélération au diffuseur est isentropique.

$$S_1 = S_8$$

La puissance du générateur  $Q_g$  est reliée au débit massique du fluide primaire à partir de l'équation [5] :

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_p (h_4 - h_3) \quad (3.32)$$

La puissance frigorifique  $Q_E$  est reliée au débit massique du fluide secondaire à partir de l'équation [5] :

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_s (h_6 - h_5) \quad (3.33)$$

On suppose dans ce travail que  $\dot{Q}_E = 10$  KW.

$Q_C$  représente la puissance du condenseur, elle est exprimée par [5] :

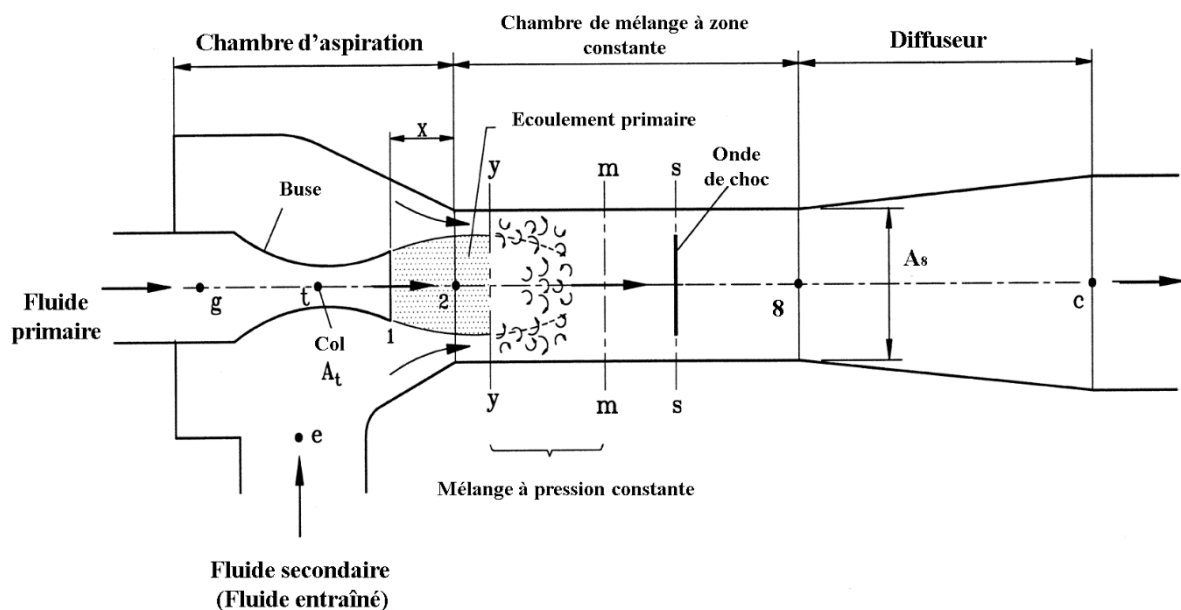
$$\dot{Q}_C = (\dot{m}_s + \dot{m}_p) (h_1 - h_2) \quad (3.34)$$

La puissance fournie par la pompe est:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_p \times \eta_{pompe} \times (h_4 - h_3) \quad (3.35)$$

Etant donné que l'éjecteur admet une section d'entrée du fluide primaire à haute pression, une section d'entrée du fluide secondaire à basse pression, et une section constante de mélange à pression intermédiaire, sa modélisation repose donc essentiellement sur ces trois parties, et sur le processus de diffusion à sa sortie.

La figure suivante est une représentation schématique d'un éjecteur à section de mélange



constante, c'est sur ce type d'éjecteur que portera notre travail.

**Figure (3.2):** Représentation schématique de l'éjecteur à étudier.

Le débit massique du fluide primaire, pour la pression du générateur  $P_g$ , également appelée  $P_4$ , et la température  $T_g$  de la pile à combustible, est décrit par la dynamique des gaz de la manière suivante :

$$\dot{m}_p = \frac{P_g A_t}{\sqrt{T_g}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \sqrt{\eta_p} \quad (3.36)$$

En appliquant le principe de conservation de masse et de l'énergie, la relation des gaz dynamique pour un écoulement isentropique entre la gorge de la tuyère et sa sortie s'exprime comme suit :

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t}\right)^2 = \frac{1}{M_{p1}^2} \left[ \frac{2\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p1}^2\right)}{\gamma+1} \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad (3.37)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{py}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.38)$$

Le nombre de mach  $M_{py}$  du flux primaire à la section  $y-y$  est obtenu comme suit :

$$\frac{P_{py}}{P_{p1}} = \frac{\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p1}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{py}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}} \quad (3.39)$$

La section  $A_{py}$  peut être calculée avec la formule suivante :

$$\frac{A_{py}}{A_{p1}} = \varphi_{py} \frac{M_{p1}}{M_{py}} \left[ \frac{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{py}^2\right)}{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p1}^2\right)} \right]^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \quad (3.40)$$

Où  $\varphi_{py}$  est un coefficient de rendement isentropique, tenant compte des pertes du flux primaire entre la section 1-1 et  $y-y$ .

A partir de l'équation 3.35, le flux secondaire atteint la condition d'étranglement à la section  $y-y$ , avec une pression d'évaporation  $P_e$  donnée :

$$\frac{P_e}{P_{sy}} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{sy}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.41)$$

Le débit massique du fluide secondaire avec les conditions d'étouffement s'écrit comme suit:

$$\dot{m}_s = \frac{P_e A_{sy}}{\sqrt{T_e}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \sqrt{\eta_s} \quad (3.42)$$

Le nombre de Mach et la température des deux flux au niveau de la section  $y-y$  sont comme suit :

$$\frac{T_g}{T_{py}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{py}^2 \quad (3.43)$$

$$\frac{T_e}{T_{sy}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{sy}^2 \quad (3.44)$$

La géométrie de cette section transversale est  $A_8$  qui est la section du flux primaire  $A_{py}$  et la section du flux entraîné  $A_{sy}$  ce qui donne :

$$A_{py} + A_{sy} = A_8 \quad (3.45)$$

Les deux flux se mélangent juste après la section  $y-y$ , un choc prend place avec une forte augmentation de la pression à la section  $s-s$ . L'équation de mouvement à l'équilibre peut être formulée comme suit :

$$\Phi_m [\dot{m}_p V_{py} + \dot{m}_s V_{sy}] = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) V_m \quad (3.46)$$

Où  $V_m$  est la vitesse maximale du flux et  $\Phi_m$  est un coefficient comptant la perte par friction.

Comme pour l'équation (9), l'équation d'énergie à l'équilibre est formulée comme suit :

$$\dot{m}_p \left( C_p T_{py} + \frac{V_{py}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left( C_p T_{sy} + \frac{V_{sy}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left( C_p T_m + \frac{V_m^2}{2} \right) \quad (3.47)$$

Dans cette hypothèse, on néglige le coefficient de perte par frottement ; D'où :  $V_m$  est la vitesse du flux mélangé,  $V_{py}$  et  $V_{sy}$  sont respectivement les vitesses du flux primaire et secondaire à la section  $y-y$  et peuvent être calculées comme suit :

$$V_{py} = M_{py} a_{py}, \text{ avec : } a_{py} = \sqrt{\gamma R T_{py}} \quad (3.48)$$

$$V_{sy} = M_{sy} a_{sy}, \text{ avec : } a_{sy} = \sqrt{\gamma R T_{sy}}$$

Le nombre de Mach du mélange peut être calculé à partir des équations suivantes :

$$M_m = \frac{V_m}{a_m}, \text{ avec : } a_m = \sqrt{\gamma R T_m} \quad (3.49)$$

Le mélange à travers la section  $m-m$  et 3-3 : un choc normal existe à la section  $s-s$ , supposant que le flux mélangé après le choc suit un processus isentropique, le mélange entre la section  $m-m$  et 3-3, à l'intérieur de la région à section constante possède une pression uniforme  $P_8$  et par conséquent la relation des gaz dynamique s'écrit :

$$\frac{P_8}{P_m} = 1 + \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} (M_m^2 - 1) \quad (3.50)$$

$$M_8^2 = \frac{\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_m^2\right)}{\gamma M_{p1}^{2 - ((\gamma-1)/2)}} \quad (3.51)$$

Le flux à travers le diffuseur : la récupération du flux mélangé se termine qu'on il passe à travers le diffuseur subsonique, avec un processus isentropique.

$$P_c = P_8 \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_8^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.52)$$

On définit le facteur d'entraînement  $U$  par le rapport de débit secondaire sur le débit primaire :

$$U = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (3.53)$$

### 3.2.4 Critères de performance :

La machine frigorifique proposée dans ce travail permet de produire un effet frigorifique de 10 KW. De ce fait il est nécessaire d'évaluer la quantité de chaleur utile réelle nécessaire  $\dot{Q}_g$ .

L'efficacité de l'échangeur de chaleur (PEMFC) est donc :

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_p (h_4 - h_3)}{\dot{Q}_{net}} \quad (3.54)$$

D'où :

$$\dot{Q}_g = \varepsilon * \dot{Q}_{net} \quad (3.55)$$

Le coefficient de performance est donné par la relation :

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_g + \dot{W}_P} \quad (3.56)$$

Le rendement électrique global de la PEMFC est calculé par :

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{fc} - \dot{W}_{comp}}{\dot{n}_{H_2, cons} \cdot HHV} \quad (3.57)$$

Par la fin, l'efficacité du système combiné PEMFC machine frigorifique à éjecteur est calculée à partir de l'équation (3.57) :

$$\eta_{CCP} = \frac{\dot{W}_{fc} + \dot{Q}_E - \dot{W}_P - \dot{W}_{comp}}{\dot{n}_{H_2, in} \times HHV} \quad (3.58)$$

### **3.3 Organigramme de calcul :**

Le premier organigramme représente les étapes de calculs utilisant le logiciel MATLAB pour évaluer les performances de la pile à combustible en fonction de la densité de courant.

Le deuxième organigramme représente les étapes de calculs utilisant le logiciel EES pour évaluer les performances de l'éjecteur.

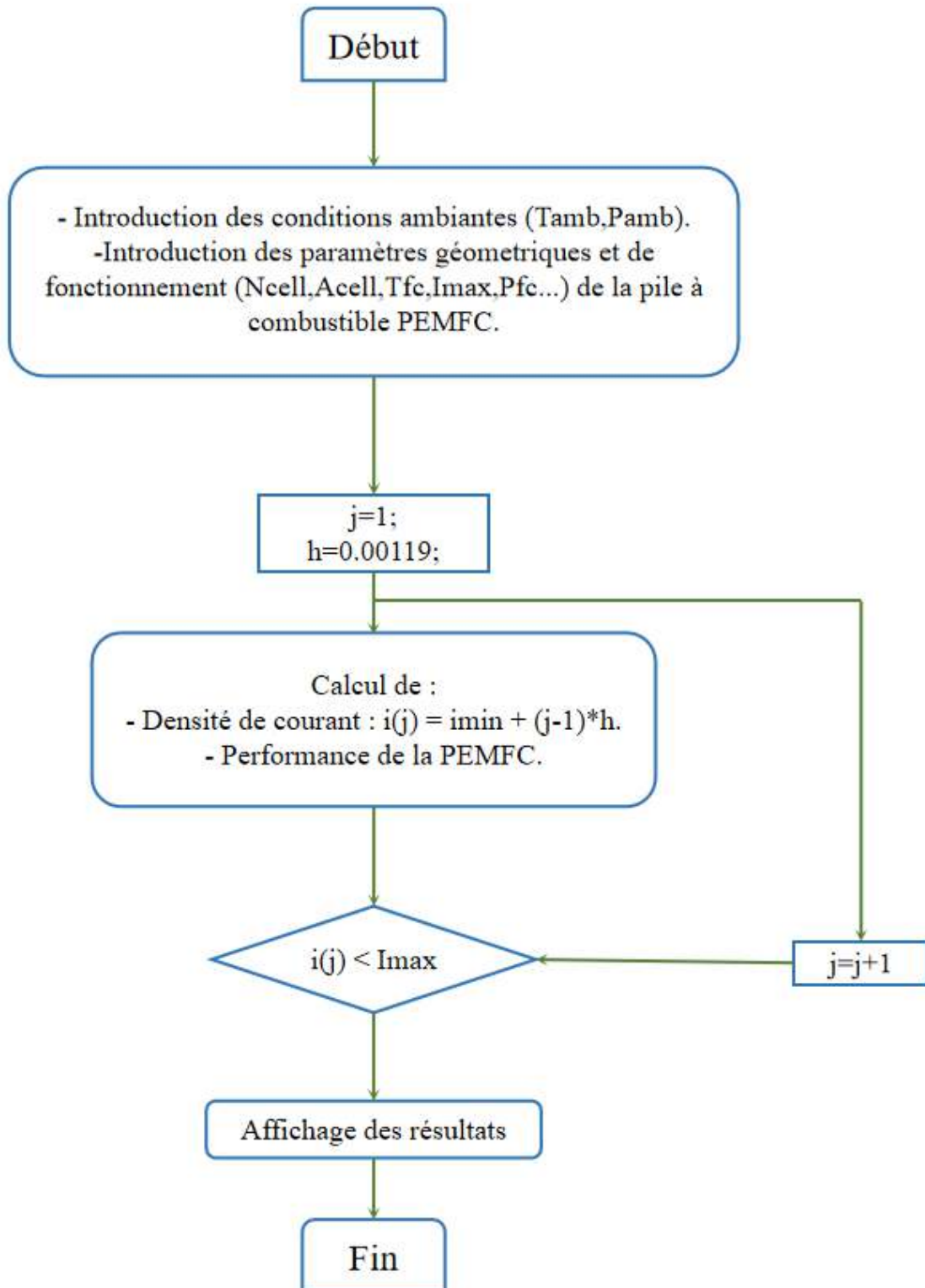
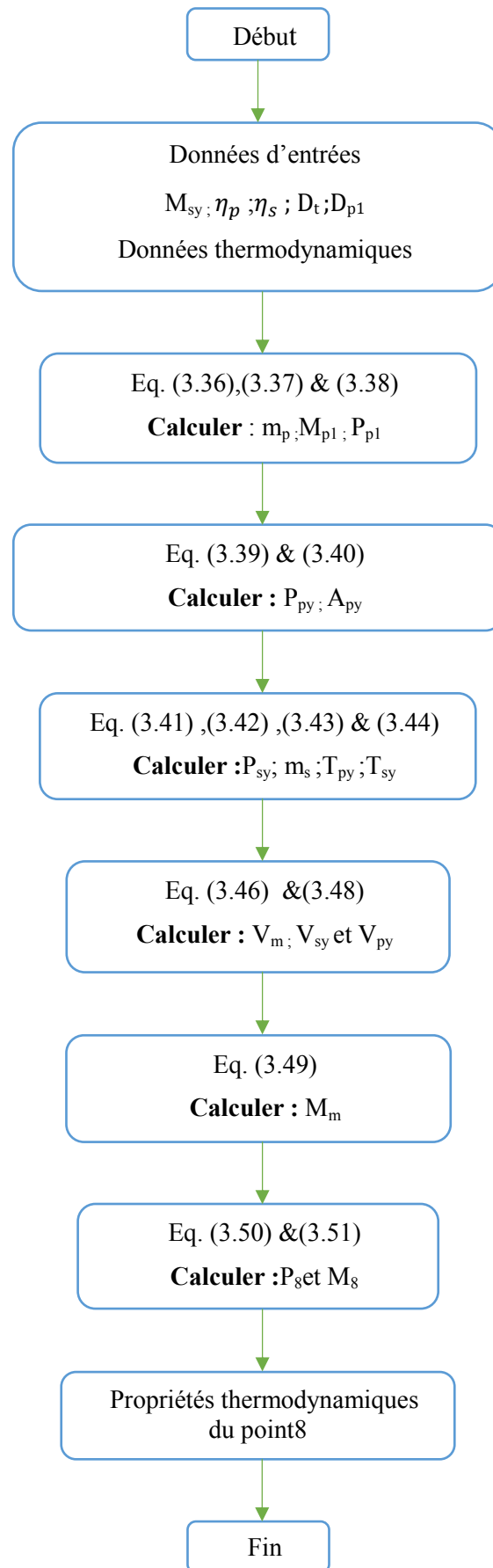


Figure (3.3): Organigramme de calcul des performances de la PEMFC







Figure(3.4): Organigramme de calcul des performances de l'éjecteur

### **3.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons adopté un modèle mathématique dans le but d'étudier le système combiné qui a été proposé en utilisant un modèle électrochimique et thermodynamique. En mettant en œuvre ce modèle, nous avons été en mesure d'effectuer une analyse des performances du système, en évaluant avec précision son rendement thermique, le coefficient de performance de la machine frigorifique, le facteur d'entraînement de l'éjecteur ainsi que le rendement électrique de la pile à combustible PEM.

## Chapitre 4

### RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation du comportement du système combiné. Nous présentons tout d'abord le comportement de la PEMFC à différentes densités de courants. Ensuite, nous avons mené une analyse des performances du système combiné PEMFC-machine frigorifique à éjecteur pour mettre en évidence l'effet de la variation des conditions opératoires pour une densité de courant de fonctionnement de  $0.6 \text{ A/cm}^2$ .

#### 4.2 Conditions de simulation :

Pour la simulation, nous avons utilisé dans un premier temps les logiciels : MATLAB et REFPROP, puis le EES pour vérifier les résultats, le but de cette simulation est d'évaluer les performances du système en faisant varier les principaux paramètres de fonctionnement. Les critères de performances sont présentés en termes de coefficient de performance de la machine frigorifique ainsi que l'efficacité globale du système PEMFC-MF (PEMFC/ Machine frigorifique). Le fluide de travail considéré dans cette étude est le R141b.

Les données nécessaires à la simulation du système sont présentées dans le tableau 4.1 :

**Tableau 4.1:** Paramètres de simulation.

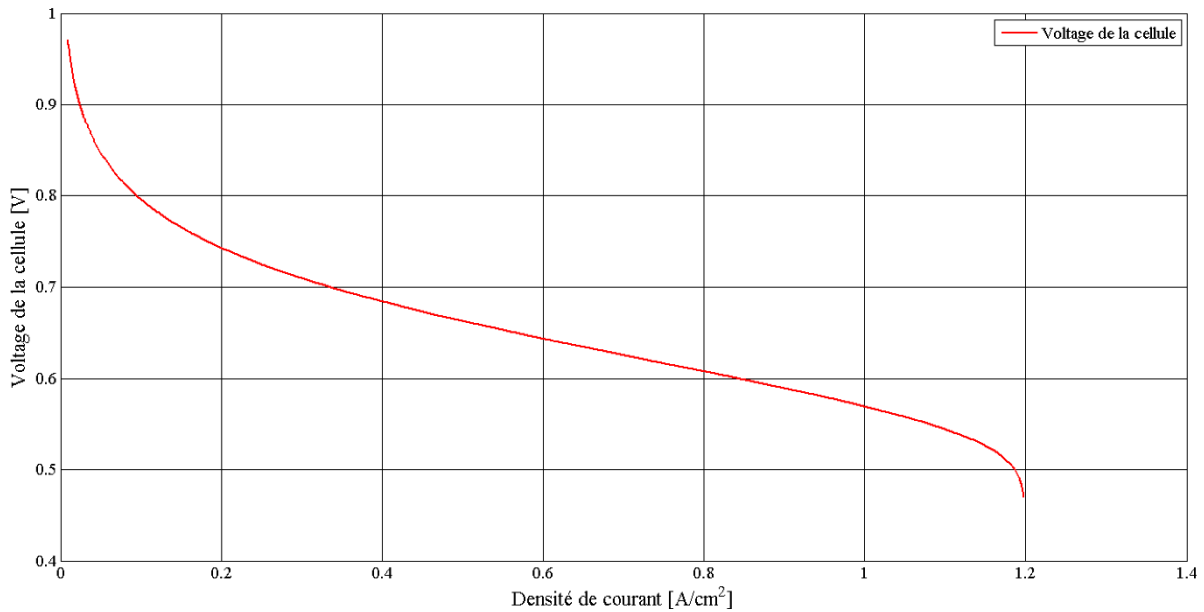
Paramètre	Valeur	Symbole
Température de fonctionnement de PEMFC	353 K	$T_{fc}$
Pression de fonctionnement de PEMFC	3 atm	$P_{fc}$
Température ambiante	290 K	$T_{amb}$
Pression ambiante	1 atm	$P_{amb}$
Coefficient stœchiométrique de l'hydrogène	1.2	$\lambda_{H_2}$
Coefficient stœchiométrique de l'air	2	$\lambda_{H_2O}$
Nombre d'électrons	2	$n_e$
Constante de Faraday	96 485 C/mol	F
Constante universelle des gaz parfaits	8.314 J/mol.K	R
Nombre des cellules dans la pile	420	$N_{cell}$
Surface active	$232 \text{ cm}^2$	$A_{cell}$
Epaisseur de la membrane	0.00245 cm	L

Densité de courant maximale	1.2 A/cm <sup>2</sup>	$i_L$
Densité de courant de fonctionnement de la pile	0.6 A/cm <sup>2</sup>	$i$
Chaleur spécifique de l'hydrogène	28.86 KJ/Kg.K	$C_{H_2}$
Chaleur spécifique de l'oxygène	29.72 KJ/Kg.K	$C_{O_2}$
Chaleur spécifique de l'Azote	28.39 KJ/Kg.K	$C_{N_2}$
Chaleur spécifique de l'eau	75.95 KJ/Kg.K	$C_{H_2O}$
Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène	$285.55 \times 10^3$ J/mol	HHV
Chaleur de vaporisation de l'eau	40 644 J/mol	$H_v$
Rendement isentropique du compresseur	85%	$\eta_{comp}$
Température à la sortie du générateur	$T_{FC-5}$	$T_g$
Température de condensation	303 K	$T_C$
Température d'évaporation	280 K	$T_e$
Puissance frigorifique	10 kW	$Q_e$
Diamètre de la gorge de la tuyère	$9.7 \times 10^{-3}$ m	$D_t$
Diamètre de la sortie de la tuyère	$10 \times 10^{-3}$ m	$D_{pl}$
Nombre de Mach du fluide secondaire à la section y-y	1	$M_{sy}$
Rendement isentropique de la pompe	90%	$\eta_{pompe}$
Rendement isentropique du fluide primaire	100%	$\eta_p$
Rendement isentropique du fluide secondaire	100%	$\eta_s$

### 4.3 Résultats de simulation :

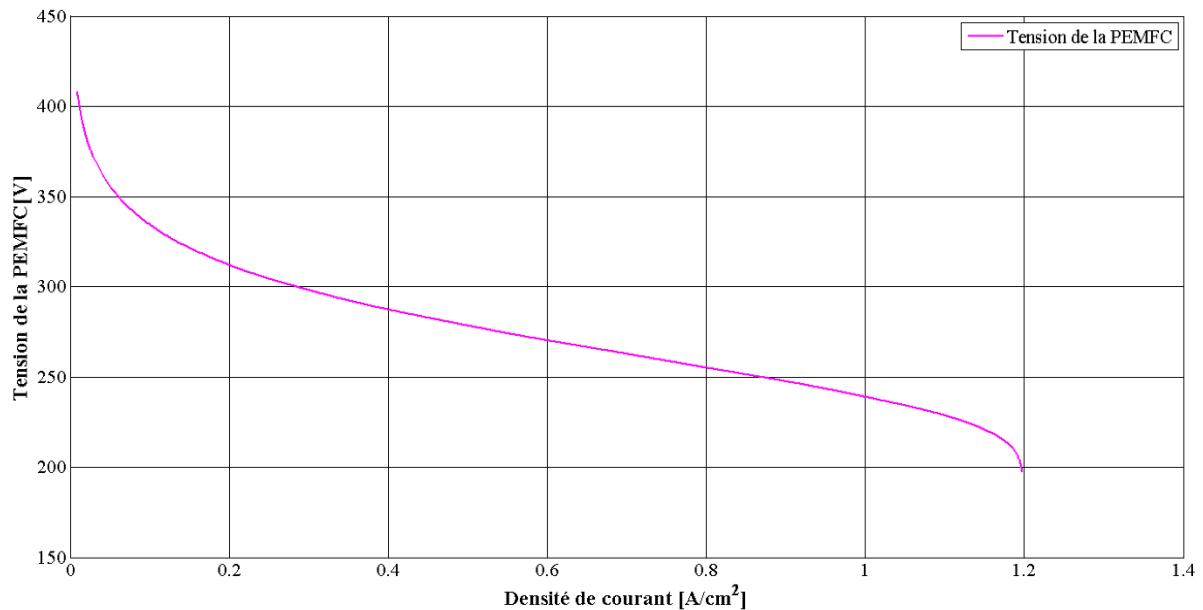
#### 4.3.1 effet de la variation de la densité de courant :

La figure (4.1) illustre la variation de la tension d'une cellule PEMFC en fonction de la densité de courant. La courbe représente une régression progressive du voltage au début à cause des surtensions d'activations, suivie par une décroissance linéaire causée par les surtensions ohmiques, les surtensions de concentration provoquent une chute à des densités de courant plus élevées.



**Figure (4.1) :** Courbe caractéristique d'une cellule en fonction de la densité de courant.

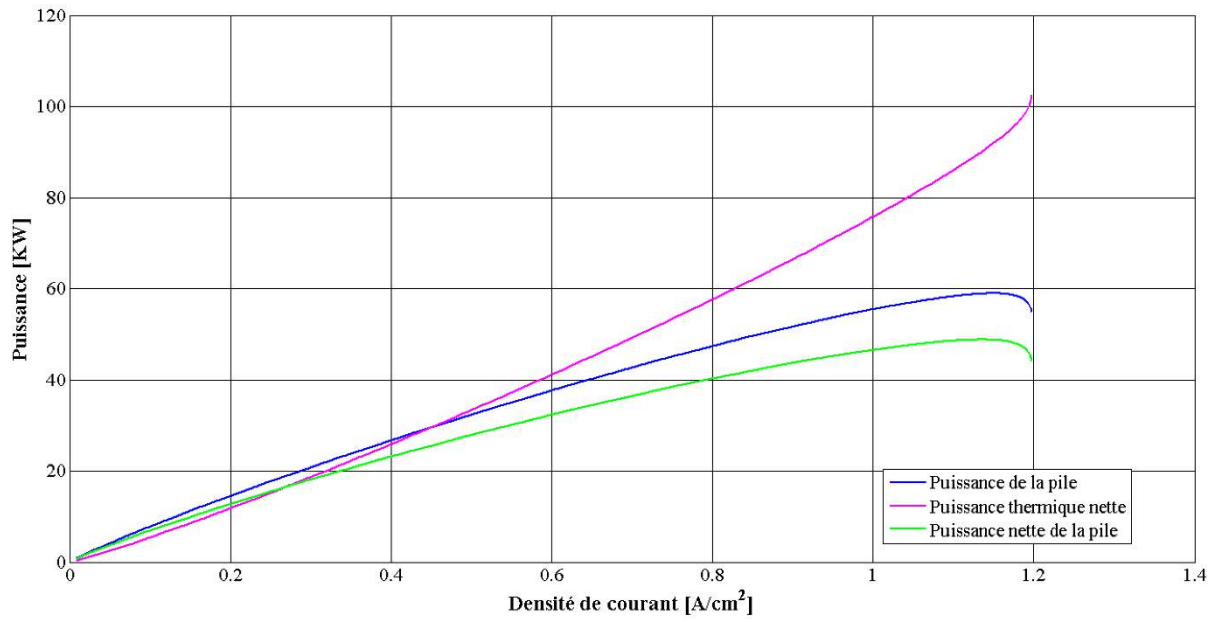
La figure (4.2) montre la variation de la tension de la pile qui représente la tension de l'ensemble des 420 cellules en fonction de la densité de courant. La tension à vide est de 407.8 Volt. La variation de la tension en fonction de la densité de courant de la pile est similaire à celle de la cellule.



**Figure (4.2):** Variation de la tension de la pile à combustible en fonction de la densité du courant.

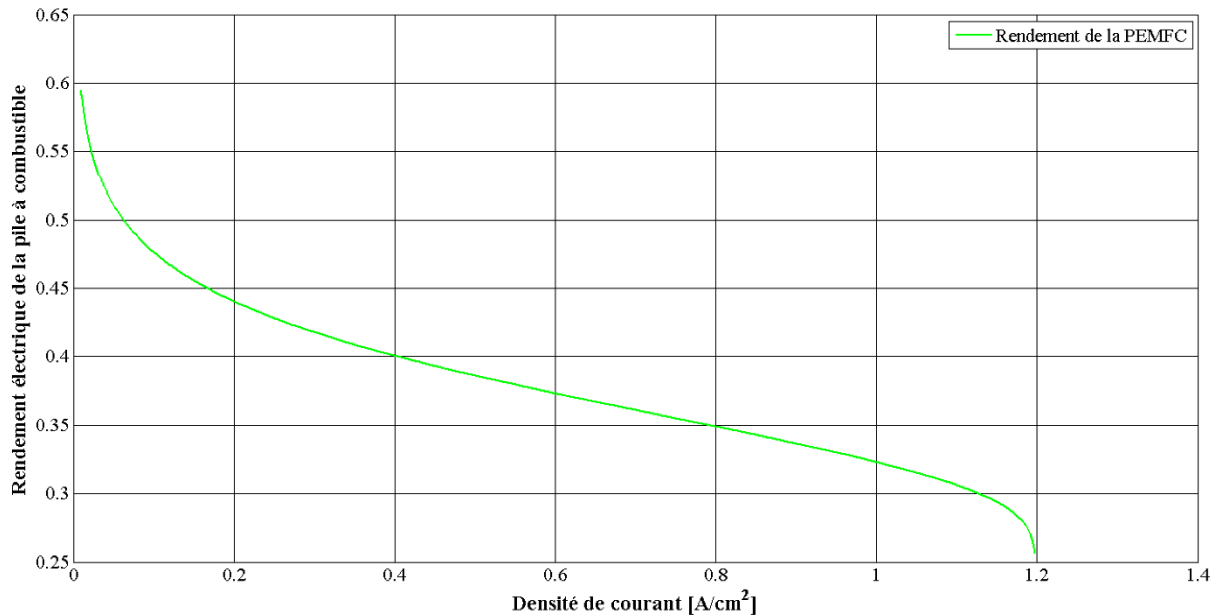
La figure (4.3) illustre la variation de la puissance électrique de la PEMFC, la puissance électrique nette ainsi que la quantité de chaleur nette résiduelle dégagée par la pile en fonction de la densité de courant. Les puissances électriques et électrique nette augmentent jusqu'à atteindre respectivement des valeurs maximales de 58.9 KW et 48.76KW pour une densité de courant de 1.145 A.cm<sup>-2</sup> puis commencent à diminuer à cause des surtensions de concentration. La puissance thermique nette présente une augmentation continue jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 102.4 KW. Cette augmentation est due au fait des réactions chimiques exothermiques.

On constate que la puissance électrique nette développée par la PEMFC à une densité de courant de fonctionnement de 0.6 A/cm<sup>2</sup> est de 32.3 KW, alors que la puissance thermique nette qui représente la chaleur résiduelle dégagée est de 41.14 KW. Une partie de cette dernière sera récupérée pour faire fonctionner une machine frigorifique à éjecteur développant une puissance (effet frigorifique) de 10 KW.



**Figure (4.3) :** Evolution de la puissance de la pile, puissance thermique nette, et la puissance électrique nette de la pile en fonction de la densité du courant.

La figure (4.4) illustre la variation du rendement électrique de la pile à combustible en fonction de la densité de courant. Nous constatons que le rendement présente une diminution lorsque la densité du courant augmente. A des densités de courant faibles la pile fonctionne généralement dans des conditions de charge légère. Cela permet une meilleure utilisation des réactifs chimiques et réduit les pertes d'énergie.



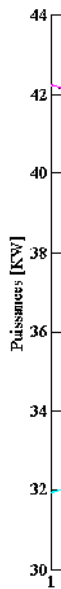
**Figure (4.4):** Variation du rendement électrique de la pile à combustible en fonction de la densité de courant.



#### 4.3.2 Effet de variation de la pression de fonctionnement de la pile à combustible :

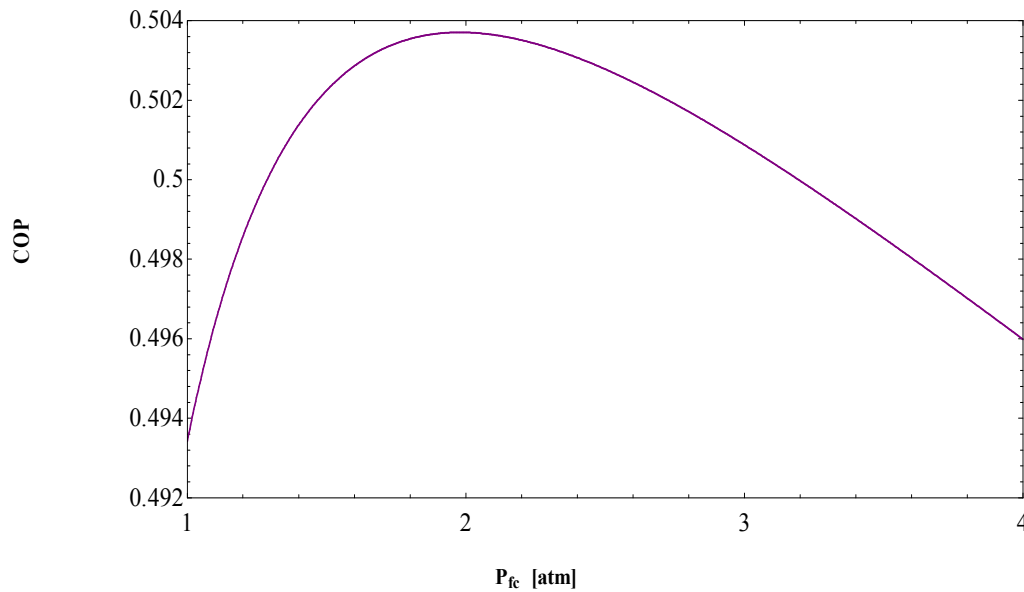
Ci-après, les résultats obtenus en faisant varier la pression de fonctionnement sur une plage de 1 à 4 atmosphères, Les autres paramètres sont maintenus constants.

La figure (4.5) indique un comportement inverse entre la production thermique nette et la production électrique nette du système PEMFC. On peut observer que lorsque la pression augmente, la puissance électrique nette augmente d'abord puis diminue après avoir atteint une valeur maximale de 32.79KW. Ceci est dû au fait que le compresseur d'air consomme plus d'énergie à des pressions de fonctionnement plus élevées. En revanche, la puissance thermique nette diminue dans un premier temps puis augmente après avoir présenté une valeur minimale correspondant à une pression au-dessus de laquelle la température de l'air en sortie du compresseur est supérieure à la température de fonctionnement de la PEMFC. En conséquence, une diminution de la chaleur sensible est obtenue, induisant une amélioration nette de la puissance thermique.



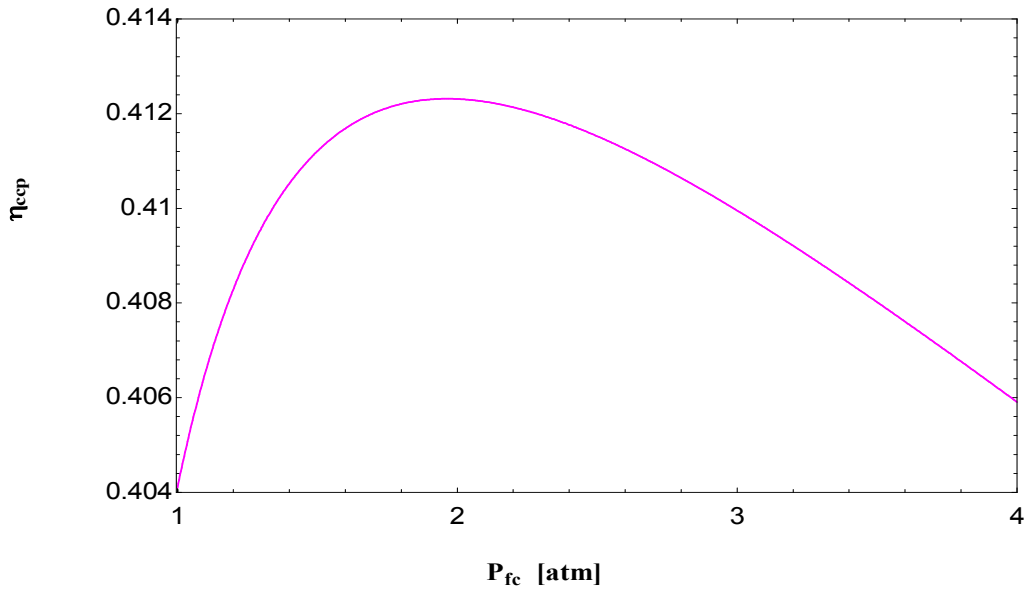
**Figure (4.5):** Evolution de la puissance électrique nette et la puissance thermique nette de la pile en fonction de sa pression de fonctionnement.

La figure (4.6) montre la variation du coefficient de performance en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC. Lorsque la pression augmente, le COP augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.5037 correspondant à une pression de fonctionnement de 1.96 atm puis il diminue. La diminution du COP est causée par l'augmentation de la puissance thermique produite par la pile, qui est une conséquence de la diminution de la puissance électrique consommée par le compresseur d'air.



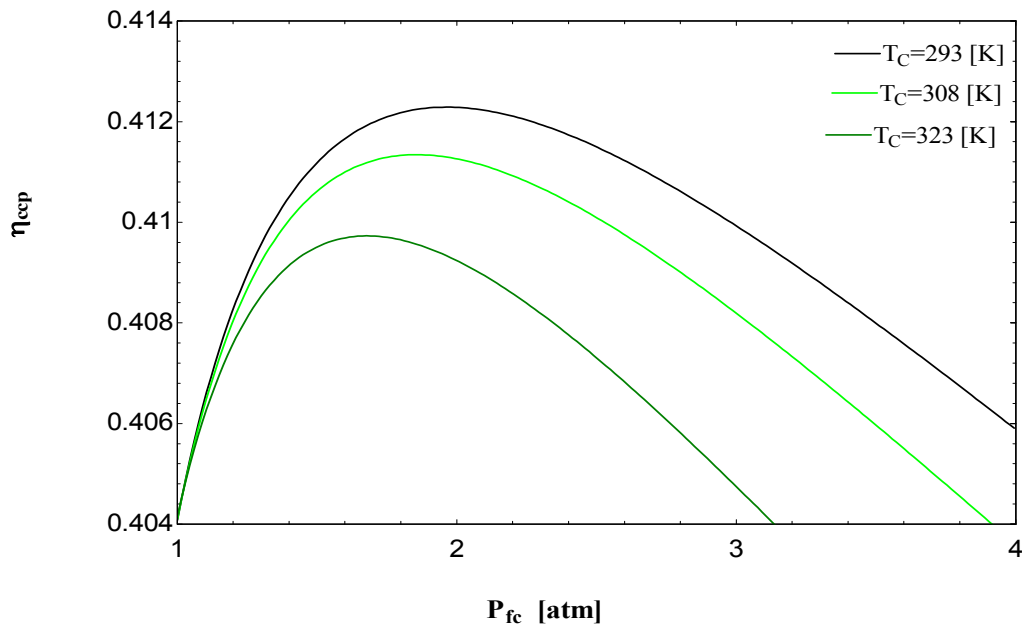
**Figure (4.6):** Evolution du coefficient de performance en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC.

La figure (4.7) présente la variation de l'efficacité globale du système PEMFC- MF en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC. Lorsque la pression augmente, l'efficacité augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de 41.23% pour une pression de 1.96 atm, ensuite elle subit une diminution. Cette dernière est une conséquence de l'augmentation de la puissance électrique consommée par le compresseur d'air.



**Figure (4.7) :**Evolution de l'efficacité du système combiné en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC.

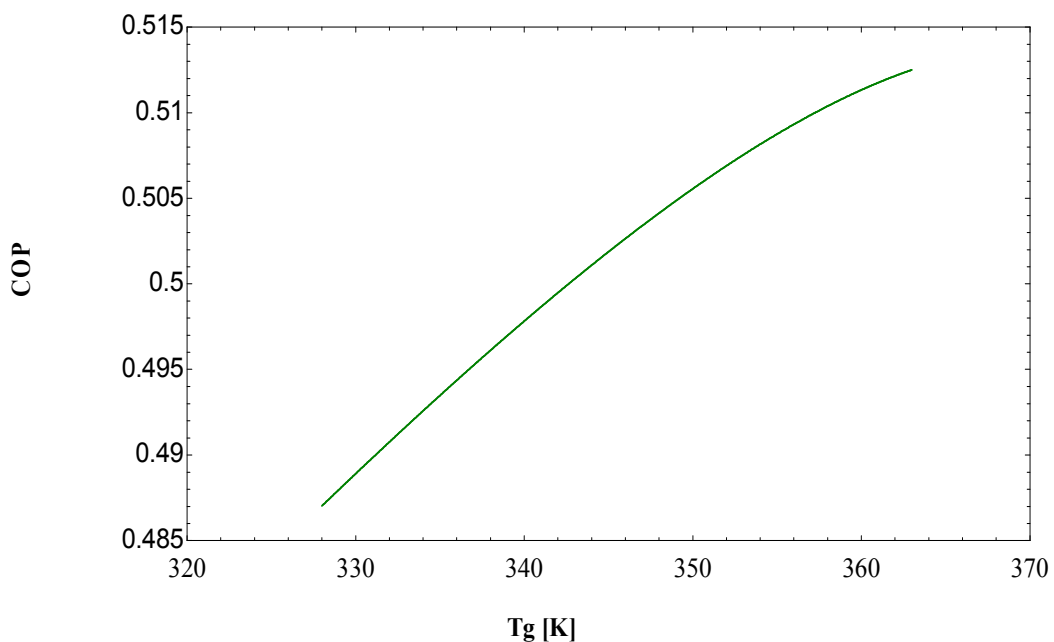
La figure (4.8) présente l'évolution de l'efficacité globale du système en fonction de la pression de fonctionnement de la PEMFC pour différentes température du condenseur. On constate que lorsque la température de la source intermédiaire  $T_c$  augmente tout en fixant la température du générateur et de l'évaporateur que l'efficacité diminue, de façon similaire au cycle frigorifique à compression mécanique. Le résultat montre que l'élévation de la température de du condenseur provoque une baisse de l'efficacité globale.



**Figure (4.8) :** L'influence de la température du condenseur sur l'efficacité du système combiné.

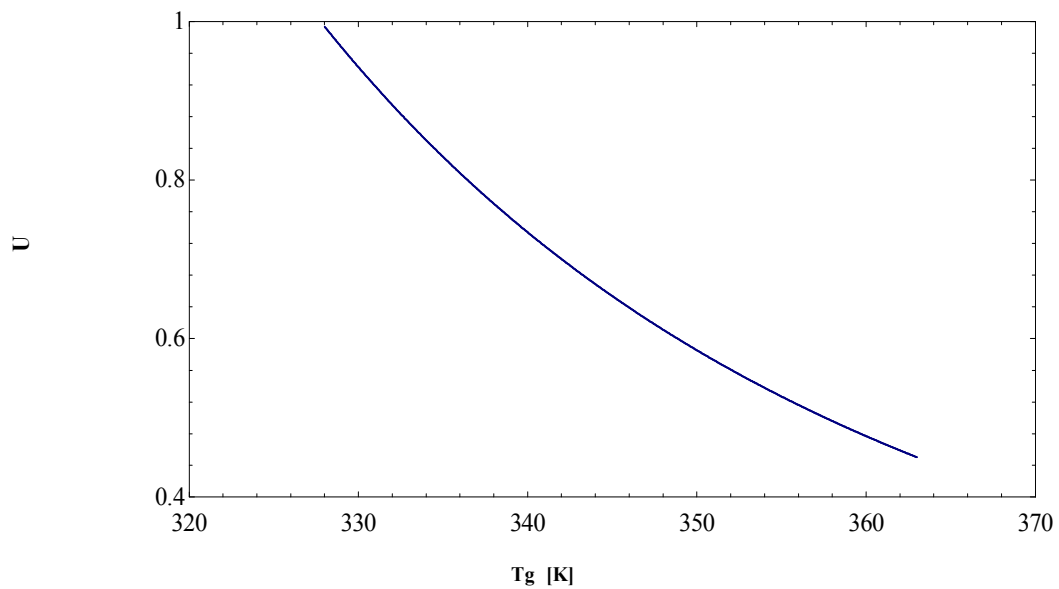
#### 4.3.3 Effet de variation de la température de générateur :

La figure (4.9) indique la variation du coefficient de performance de la machine frigorifique en fonction de la température du générateur. On constate que le COP augmente lorsque la température du générateur augmente. Cela s'explique par l'augmentation de la puissance thermique produite par la pile.



**Figure (4.9) :** Evolution du COP en fonction de la température du générateur.

La figure (4.10) illustre l'évolution du facteur entraînement de l'éjecteur en fonction de la température du générateur. Sachant que le réfrigérant se chauffe en passant par la PEMFC, l'augmentation de la température du générateur entraîne une diminution du coefficient entraînement représentant le rapport entre le débit du fluide secondaire et le débit du fluide primaire.



**Figure (4.10)** : Evolution du coefficient d'entraînement en fonction de la température du générateur.

La figure suivante (4.11) présente la variation de l'efficacité du système combiné en fonction de la température du générateur. On constate que l'efficacité du système varie légèrement avec l'augmentant de la température du générateur. Cette variation se caractérise par une croissance suivie d'une décroissance après atteindre une valeur maximale de 40.99% pour une

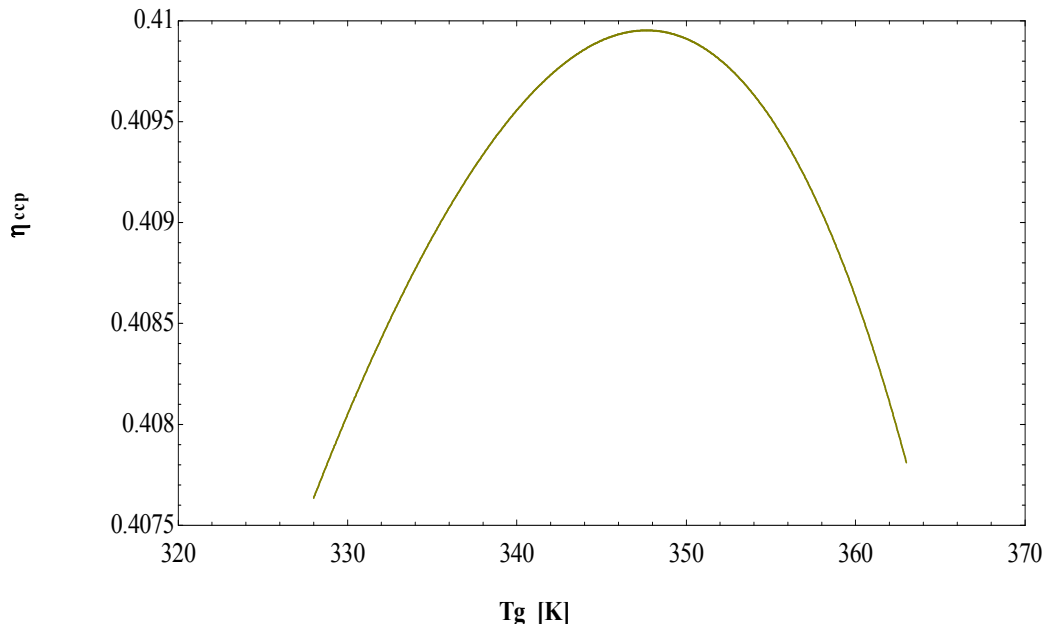


Figure (4.11): Variation de l'efficacité du système combiné.

température de 352.67 K.

La figure (4.12) présente l'influence de la température du condenseur sur le coefficient de performance de la machine frigorifique. Il est à noter que lorsque la température du

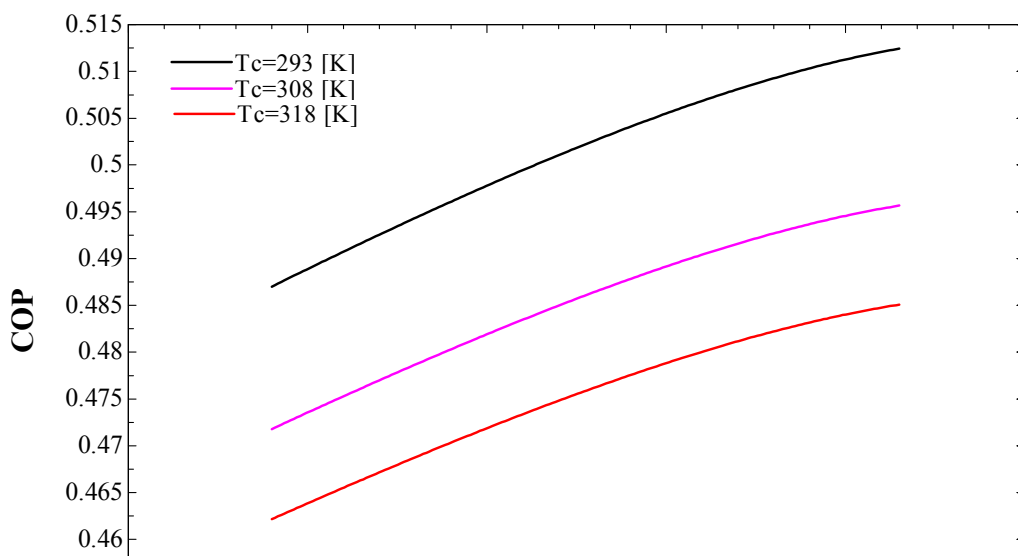
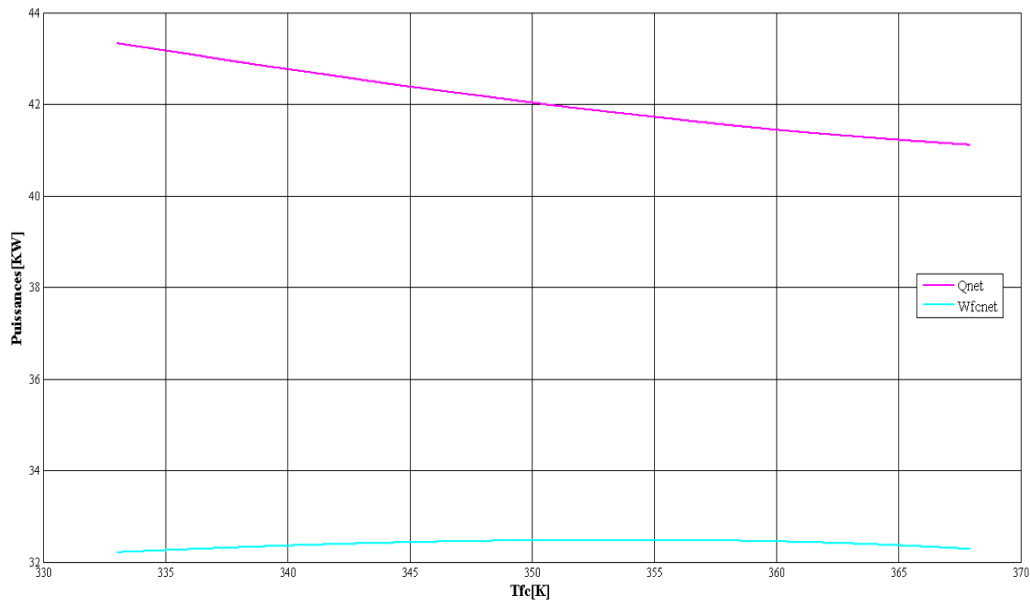


Figure (4.12): L'influence de la température du condenseur sur le coefficient de performance

condenseur augmente, le coefficient de performance de la machine frigorifique diminue.

La variation de la puissance électrique nette et la puissance thermique nette en fonction de la température de fonctionnement de la PEMFC sont montrées par la figure **(4.13)**. L'effet sur la puissance électrique nette est moindre à mesure que la température de fonctionnement augmente, tandis que la puissance thermique subit une diminution significative. Ceci est principalement dû à l'augmentation de la chaleur sensible nécessaire pour élever la température des gaz à l'entrée de la pile par rapport à la température ambiante.



**Figure (4.13):** Variation de la puissance électrique nette et la puissance thermique nette en fonction de la température de fonctionnement de la PEMFC.

#### 4.4 Resultat de l'étude thermodynamique du cycle frigorifique:

Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel EES. Il permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles, des équations à variables complexes. EES permet d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité.

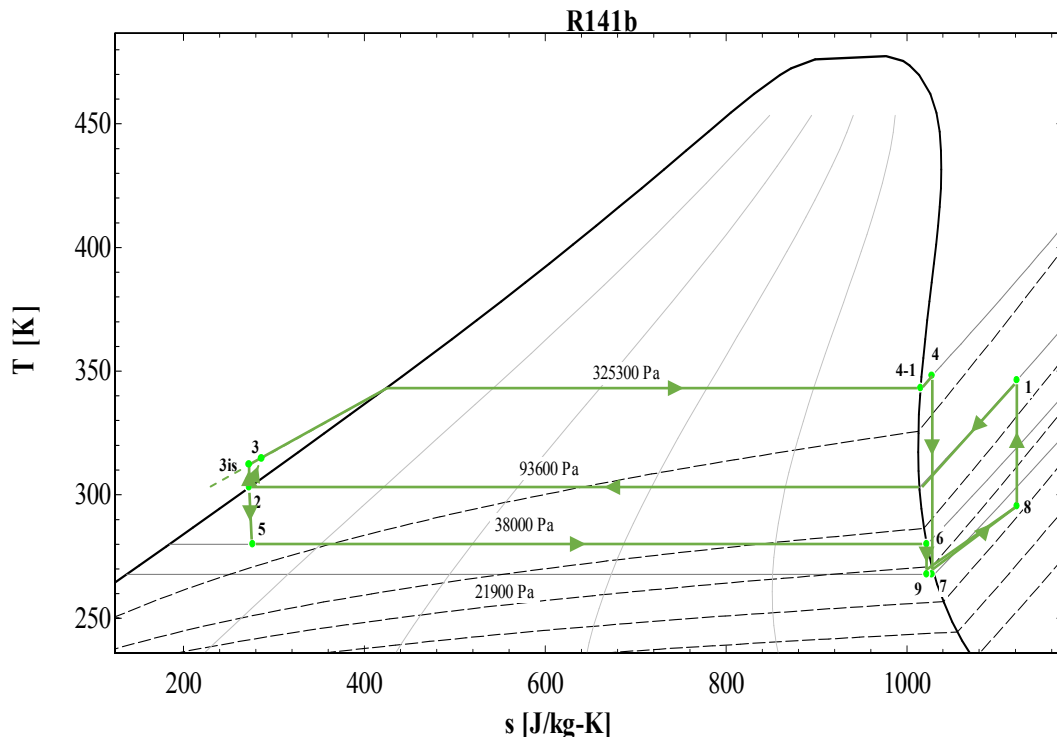
Les résultats du cycle frigorifique obtenus pour le R141b comme fluide de travail sont résumés dans le suivant :



**Tableau 4.2** : Propriétés thermodynamiques du cycle étudié

N°	Placement du point	Pression[Pa]	Température[k]	Enthalpie [J/Kg]	Entropie [J/Kg K]	Titre massique
<b>2</b>	Entrée pompe	93651	303	73102	272.7	0
<b>3is</b>		325375	303	73311	272.7	
<b>3</b>	Entrée PEMFC	325375	303.2	73334	273.5	
<b>4</b>	Sortie PEMFC	325375	348.2	329387	1028	
<b>5</b>	Entrée évaporateur	38013	280	73102	276.5	
<b>6</b>	Sortie évaporateur	38013	280	281843	1022	1
<b>7p</b>	Flux primaire	21960	267.8	272920	1028	
<b>7s</b>	Flux secondaire	21960	267.8	271364	1022	
<b>8</b>	Entrée diffuseur	70600	295.3	282354	1122	
<b>1</b>	Entrée condenseur	93651	346.3	332646	1122	

La figure (4.15) présente le diagramme « Température-Entropie » qui correspond à notre cycle :



**Figure (4.14):** Diagramme T-S du cycle de réfrigération à éjecteur pour le fluide frigorigène R141b

Le diagramme montre les trois étages de pressions de notre système, la haute pression qui correspond à la pression du générateur, la basse pression est celle de l'évaporateur et la pression intermédiaire c'est la pression du condenseur.

Le phénomène ayant lieu au niveau de l'éjecteur est clairement montré dans le diagramme T-S. Le fluide primaire aspire le fluide secondaire vers la zone de mélange grâce à la différence de pression, leurs pressions s'égalisent, comme c'est montré, dans le point 7 (représente le point où les pressions des deux fluides s'égalisent) puis augmente en passant par le diffuseur jusqu'à atteindre la pression de condensation.

**Remarque :**

Rappelons que la puissance frigorifique développée par la machine frigorifique à éjecteur est de 10KW, le volume du local à climatiser se calcule de la manière suivante:

$$v = \frac{Q_e[BTU]-1000 [BTU] \times N_{vitre}}{100} \tag{4.1}$$

$v$ : volume du local [ $m^3$ ].

$N_{vitre}$  : Nombre des parois vitrés (5 vitres).

D'où le volume du local à climatiser est de: 291.21 $m^3$

Ce volume représente un appartement de type F4, sachant que chaque chambre ayant approximativement une surface de 24 m<sup>2</sup> et une hauteur de 3m.

#### 4.4.1 diagramme de Sankey:

. La figure (4.26) présente le diagramme Sankey de la pile à combustible. Les résultats du calcul sont présentés sous forme de pourcentages. Il est à noter qu'une partie considérable de l'énergie chimique introduite est convertit en chaleur suite à la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène. Une partie de cette chaleur est récupérée pour faire fonctionner la machine frigorifique. La deuxième proportion représente le taux de la puissance électrique générée par la pile. La chaleur latente et sensible, représente la quantité de chaleur nécessaire aux préchauffage et l'humidification des réactifs (air, hydrogène).

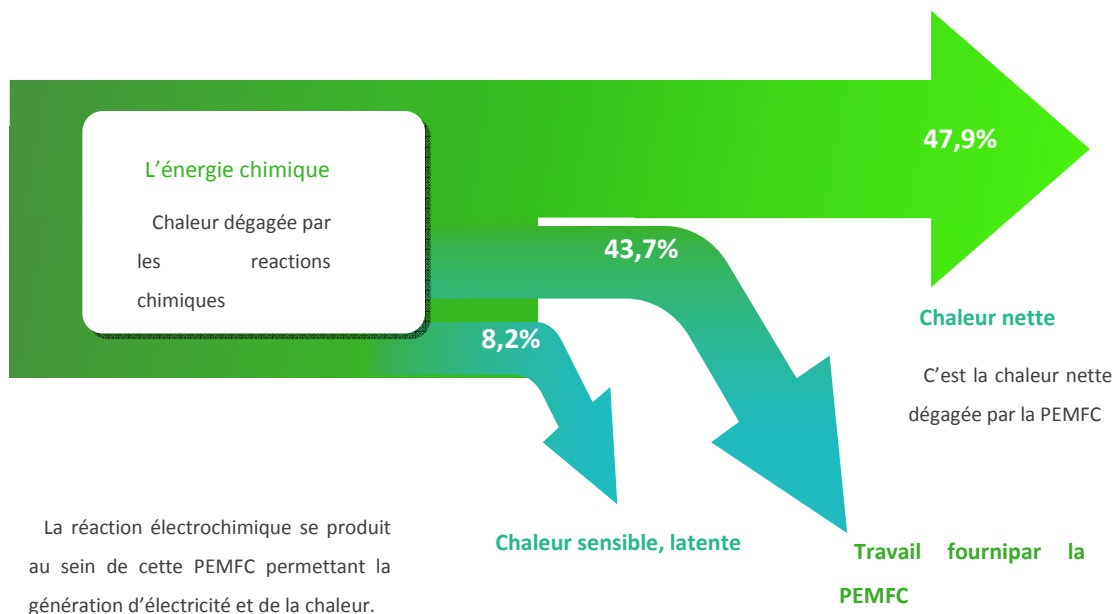


Figure (4.15) : Diagramme de Sankey de la PEMFC

#### 4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, l'analyse des résultats de simulation du système combiné PEMFC-MF est présenté. Le système proposé présente une solution pratique pour la production d'électricité et la récupération de la chaleur résiduelle, de plus la réduction de l'énergie électrique consommée par ce système. Nous avons constaté que les conditions de fonctionnements ont des effets importants sur le comportement thermique et électrique.

## **CONCLUSION GENERALE :**

L'objectif principal de notre travail est d'analyser les performances d'un système combiné PEMFC-machine frigorifique à éjecteur dont cette machine utilise la chaleur résiduelle dégagée par la pile pour la production du froid. Pour cela, un modèle mathématique a été adopté afin de simuler le comportement du système combiné.

Dans la première partie, nous avons analysé les performances de la pile à combustible en fonction de différentes densités de courant. Les résultats montrent que la pile produit des quantités d'énergie significatives.

Dans la deuxième partie, nous avons exploré le fonctionnement de la machine frigorifique à éjecteur combiné avec la PEMFC comme générateur de chaleur. Les résultats obtenus ont montré des performances satisfaisantes en termes des puissances, d'efficacité et du coefficient de performance.

Notre étude a confirmé que le système combiné PEMFC-MF à éjecteur est une solution prometteuse pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la production de l'énergie propre. Il est important de souligner que notre travail n'a pas abordé tous les aspects potentiels du système combiné PEMFC-MF à éjecteur et qu'il existe encore des opportunités de recherche et de développement pour améliorer les performances, la durabilité et l'efficacité du système.

Cependant nous espérons que nos résultats encourageront d'autres étudiants à explorer d'avantage cette technologie prometteuse et à contribuer à son avancement.

## References

- [1] Cao, Y., Dhahad, H. A., Mansir, I. B., ABo-Khalil, A. G., Alamri, S., Rajhi, A. A., ... & Qasim, F. (2022). Development of a combined system based on a PEMFC and a solar collector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 87-26700. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.195>.
- [2] Ellamla, H. R., Staffell, I., Bujlo, P., Pollet, B. G., & Pasupathi, S. (2015). Current status of fuel cell based combined heat and power systems. *Energy Conversion and Management*, 92, 1-12.
- [3] Chahartaghi, M., & Kharkeshi, B. A. (2018). Performance analysis of a combined cooling, heating and power system based on a proton exchange membrane fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 161, 103-114.
- [4] Selvaraju, A. & Mani, A. (2006). Experimental investigation on R134a vapour ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 29, 103-114.
- [5] Sylvain Quoilin (2011). Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 52, 135-146.
- [6] Keenan, J. H., and Neumann, E. P. (2021). A Simple Air Ejector. *Journal of Applied Mechanics*, 9(2), A75–A81. <https://doi.org/10.1115/1.4038866>.
- [7] Lucas, C. and Koeler, J. (2012). Experimental investigation of the COP improvement of a refrigeration cycle by use of an ejector. *International Journal of Refrigeration*, 35, 103-114.
- [8] Zhao, P., Wang, J., Gao, L. and Dai, Y. (2012). Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle and a proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 3391-3400. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.081>.
- [9] Amphlett, J. C., Baumert, R., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R. and Harris, T. J. (1995) Performance modeling of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 10, 8. [10.1016/1.2043866](https://doi.org/10.1016/1.2043866).
- [10] Li, C., Liu, Y., Xu, B., & Ma, Z. (2019). Finite time thermodynamic optimization of an irreversible proton exchange membrane fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 181, 109-118.
- [11] Takleh, H. R., & Zare, V. (2019). Performance improvement of ejector expansion refrigeration cycle employing a proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Refrigeration*, 42, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.02.031>
- [12] DÉSEVAUX, P. (2024). Principes de fonctionnement et caractéristiques géométriques des éjecteurs. *Techniques de l'Ingénieur*, 31, 1-12.
- [13] Besagni, G., Mereu, R., & Inzoli, F. (2016). Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 103-114.
- [14] Ghodbane, M. (2017). Etude et optimisation des performances d'une machine de climatisation à éjecteur reliée à une pile à combustible. *Thèse de doctorat*, Université de Lyon.
- [15] Jullian, G. (2019). Diagnostic robuste de pile à combustible PEM par modélisation physique et mesure de l'impédance. *Thèse de doctorat*, Université de Lyon.
- [16] Besagni, G., Mereu, R., & Inzoli, F. (2016). Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 103-114.
- [17] Nattes, P. H. (2018). *Optimisation d'un cycle au CO2 dans le domaine du transport frigorifique* (Doctoral thesis). Université de Lyon.
- [18] Alireza Askarzadeh and Alireza Rezazadeh « Optimization of PEMFC model parameters with a modified genetic algorithm ». *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 103-114.