

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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



**Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie Mécanique**

Option : Installations Energétiques et Turbomachines

Titre

*Etude d'un système hybride utilisant le cycle
organique de Rankine pour la récupération
de la chaleur perdue dans une pile PEMFC*

Réalisé par :

MAPENGO Clement Ruvimbo

MIRI Noureddine

Proposé et encadré par :

Promoteur : Dr. ABDI Hamid

Co-promoteur : Dr. KETFI Omar

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Il nous est très agréable d'exprimer notre profonde gratitude et nos plus vifs remerciements respectueux à notre promoteur **Dr. ABDI Hamid** et à notre co-promoteur **Dr. KETFI Omar**. Nous les remercions de nous avoir encadrés et conseillés pendant la réalisation de ce travail. Leur soutien a été indispensable dans la réalisation de ce travail, dans l'acquisition de certaines des sources utilisées dans cette recherche et des logiciels nécessaires aux simulations.

Nous adressons nos remerciements à tous les enseignants qui ont donné les bases de la science tout au long de notre cursus. De plus, nous tenons à remercier les autres étudiants, en particulier nos collègues de la spécialité de l'Installation Energétiques et Turbomachines pour leur soutien moral et intellectuel pendant notre temps ensemble.

Pour finir, nous remercions nos parents, et nos proches pour leur soutien moral.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma chère mère et à mon cher père, en témoignage de leur gratitude de leurs dévouements, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux. Ils ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes amis et à tous mes camarades de la classe de la promotion de Génie Mécanique (2021-2022).

Enfin à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Noureddine

Dédicace

A ma très chère mère Mme G. Mapengo (Mutongi) et mon père Mr L. Mapengo pour leurs sacrifices, leur motivation, leurs mots d'encouragements et leurs prières dans ma vie et durant mes études.

Mes très chers frères et sœurs et tous les autres membres de ma famille surtout ma sœur Dr. C.R. Mapengo, pour leurs supports éternels.

Enfin à tous mes amis (à mentionner Fortune et Peter), mes collègues et compatriotes en Algérie et toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Je dédie ce travail.

Clement

ملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة نظام هجين باستخدام دورة رانكين العضوية (ORC) لاستعادة الحرارة الضائعة من خلية وقود ذات غشاء تبادل البروتونات (PEMFC). تتم مقارنة أداء النظام وتحليله باستخدام خمسة سوائل عضوية وهي: RE347mcc و R245fa و R245ca و R236fa و R123 في ظل ظروف تشغيل ثابتة.

تم استعمال نموذج رياضي لتحديد أداء نظام دورة ORC - PEMFC. بالإضافة إلى تعبيرات الكفاءة الكهربائية لخلية الوقود والنظام الهجين. كما يتم إجراء تحليل العوامل المؤثرة، بهدف فهم سلوك خلية الوقود ودورة رانكين العضوية باستخدام R123 و RE347mcc كسوائل تشغيل. مع دراسة المعاملات الرئيسية التي تؤثر على أداء النظام، مثل كثافة التيار ومعدل تدفق الوقود ودرجة الحرارة وضغط التشغيل للخلية PEM.

دراسة أداء النظام الهجين في ظل ظروف التشغيل أظهرت أن الكفاءة الكهربائية للنظام المدمج يمكن تحسينها بنحو 4% مقارنة بتشغيل النظام دون استعادة الحرارة الضائعة. يتمتع نظام ORC الذي يستخدم R123 بأداء متفوق على جميع السوائل العضوية الأخرى التي تمت دراستها.

الكلمات المفتاحية: المردود الكهربائي، سائل العمل، ORC، PEMFC، نظام هجين.

Résumé

Cette recherche vise à étudier un système hybride utilisant le cycle organique de Rankine (ORC) pour la récupération de la chaleur perdue d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Les performances du système sont comparées et analysées à l'aide de cinq fluides organiques, à savoir le RE347mcc, R245fa, R245ca, R236fa et R123 dans des conditions de fonctionnement en régime permanent.

Un modèle mathématique du système PEMFC – cycle ORC est décrit pour déterminer les performances de celui-ci. Les expressions pour le rendement électrique de la pile à combustible et du système hybride sont établies. De plus, une analyse paramétrique est effectuée dans le but de comprendre le comportement de la pile à combustible et du cycle organique de Rankine avec le R123 et le RE347mcc comme fluides de travail. Les paramètres clés affectants les performances du système, tels que la densité du courant, le débit du combustible, la température et la pression de fonctionnement de la pile PEM sont étudiés.

Les performances du système hybride dans les conditions opératoires sont présentées. Les résultats montrent que le rendement électrique du système combiné peut être amélioré d'environ 4 % par rapport au fonctionnement sans récupération. D'autre part le système ORC utilisant le R123 présente des performances meilleures comparativement aux autres fluides organiques.

Mots clés : ORC, PEMFC, Système hybride, Fluide de travail, Rendement électrique

Abstract

This research aims to study a hybrid system using the organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery from a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). System performance using five organic fluids, namely RE347mcc, R245fa, R245ca, R236fa, and R123, is compared and analyzed under steady-state operating conditions.

A mathematical model for the PEMFC and ORC system is described and expressions for the electrical efficiency of the fuel cell and the hybrid system are established. In addition, a parametric analysis is carried out with the aim of understanding the behaviour of the fuel cell and the organic Rankine cycle with R123 and RE347mcc as working fluids. Key parameters affecting system performance, such as current density, fuel flow rate, temperature and operating pressure of the PEM stack are investigated.

The performance of the hybrid system under operating conditions is presented. The results show that the electrical efficiency of the combined system can be improved by about 4% compared to the fuel cell without heat recovery. The ORC system using R123 has better performance to all other organic fluids used in this study.

Keywords: ORC, PEMFC, Hybrid system, Working fluid, Electrical efficiency

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 : Etat de l'art | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Etat des recherches | 4 |
| 1.3 But du travail | 6 |
| Chapitre 2 : Généralités et principe de fonctionnement du système (PEMFC–ORC) | 7 |
| 2.1 Introduction | 7 |
| 2.2 Types de piles à combustible | 7 |
| 2.3 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons | 8 |
| 2.4 Description du système hybride PEMFC – Turbine | 9 |
| 2.4.1 Rôle des composants | 10 |
| 2.4.2 Principe de fonctionnement du système hybride (PEMFC – ORC) | 10 |
| 2.5 Choix d'un fluide de travail | 12 |
| 2.5.1 Propriétés thermodynamiques et physiques | 12 |
| 2.5.2 Propriétés de transfert de chaleur | 14 |
| 2.5.3 Sécurité et les préoccupations environnementales | 14 |
| 2.6 Données environnementales et la classification de sécurité | 15 |
| 2.7 Propriétés des fluides examinés | 16 |
| 2.8 Conclusion | 18 |
| Chapitre 3 : Modélisation et performance du système | 19 |
| 3.1 Introduction | 19 |
| 3.2 Description du système | 19 |
| 3.3 Modélisation mathématique du système PEMFC – ORC | 20 |
| 3.3.1 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEM | 20 |
| 3.3.2 Modèle thermique de la pile à combustible PEM | 25 |
| 3.4 Modèle mathématique du cycle organique de Rankine | 27 |
| 3.5 Critère de performance | 28 |
| 3.6 Organigramme de calcul | 29 |
| 3.7 Conclusion | 30 |
| Chapitre 4 : Résultats et interprétations | 31 |
| 4.1 Introduction | 31 |

| | | |
|------|---|-----------|
| 4.2 | Conditions de simulation | 31 |
| 4.3 | Résultats de simulation pour la pile PEM | 33 |
| 4.4 | Résultats de simulation pour le cycle ORC | 34 |
| 4.5 | Analyse paramétrique | 36 |
| 4.6 | Effet de variation de la densité du courant | 36 |
| 4.7 | Relation entre le rendement électrique globale et la puissance de sortie nette du système hybride | 40 |
| 4.8 | Effet de la variation du débit de combustible | 41 |
| 4.9 | Effet de la variation de la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM | 44 |
| 4.10 | Effet de la variation de la température de fonctionnement de la pile à combustible PEM | 48 |
| 4.11 | Conclusion | 55 |
| | Conclusion générale | 56 |
| | Bibliographie | 57 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 2-1 : Classification des piles à combustibles . | 8 |
| Tableau 2-2 : Classification de sécurité . | 15 |
| Tableau 2-3 : Nomenclature chimique. | 16 |
| Tableau 2-4 : Données physiques des fluides de travail. | 16 |
| Tableau 2-5 : Données environnementales et de sécurité. | 17 |
| Tableau 4-1 : Conditions du cas de base de simulation du le système hybride. | 31 |
| Tableau 4-2 : Résultats de simulation de la pile à combustible PEM dans des conditions du cas de base. | 33 |
| Tableau 4-3 : Propriétés thermodynamiques des fluides organiques dans des conditions du cas de base. | 34 |
| Tableau 4-4 : Résultats de simulation du cycle organique de Rankine dans les conditions du cas de base. | 35 |
| Tableau 4-5 : Comparaisons des performances entre le système hybride et la pile à combustible PEM dans des conditions du cas de base. | 36 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 2-1 : Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons. | 9 |
| Figure 2-2 : Diagramme schématique du système hybride d'un PEMFC et l'ORC. | 9 |
| Figure 2-3 : Diagramme T-s d'un cycle organique de Rankine. | 11 |
| Figure 2-4 : Fluides de travail secs, humides et isentropiques. | 13 |
| Figure 3-1 : Configuration du système PEMFC – ORC. | 19 |
| Figure 3-2 : Organigramme de calcul. | 29 |
| Figure 4-1 : Courbes de polarisation et de puissance d'une cellule en fonction de la densité du courant. | 37 |
| Figure 4-2 : Courbes de polarisation et de puissance de la pile à combustible PEM en fonction de la densité du courant. | 37 |
| Figure 4-3 : Variation de la puissance thermique nette de la pile à combustible PEM en fonction de la densité du courant. | 38 |
| Figure 4-4 : Variation du rendement électrique du ORC en fonction de la densité du courant. | 39 |
| Figure 4-5 : Variation du rendement électrique global en fonction de la puissance nette du système. | 40 |
| Figure 4-6 : Effet du débit sur la puissance à la sortie des composants du système. | 41 |
| Figure 4-7 : Effet du débit sur la puissance nette à la sortie du système hybride. | 42 |
| Figure 4-8 : Effet du débit sur la performance du système. | 43 |
| Figure 4-9 : Variation de la puissance nette à la sortie du système pile PEM en fonction de la pression de fonctionnement. | 44 |
| Figure 4-10 : Variation de la puissance nette à la sortie de l'ORC en fonction de la pression de fonctionnement. | 45 |
| Figure 4-11 : Variation de la puissance électrique nette du système hybride en fonction de la pression de fonctionnement. | 46 |
| Figure 4-12 : Variation du rendement électrique en fonction de la pression de fonctionnement. | 47 |

- Figure 4-13 :** Variation de la puissance nette de sortie du système pile PEM en fonction de la température de fonctionnement. 48
- Figure 4-14 :** Variation de la puissance nette de sortie de l'ORC en fonction de la température de fonctionnement. 49
- Figure 4-15 :** Variation du rendement électrique en fonction de la température de fonctionnement. 50
- Figure 4-16 :** Variation du rendement thermique en fonction de la température de fonctionnement. 51
- Figure 4-17 :** Variation de la tension d'une cellule en fonction de la température de fonctionnement. 52
- Figure 4-18 :** Variation de la puissance électrique nette à la sortie de la pile à combustible PEM en fonction du rendement électrique. 53
- Figure 4-19 :** Variation du rendement électrique de la pile en fonction de la concentration du carburant H_2 . 54

Nomenclature

| | | Lettres grecques | |
|-----------------|--|----------------------|--|
| A_{cell} | surface active, cm^2 | | |
| C_i | capacité thermique spécifique de l'espèce i , $J mol^{-1}K^{-1}$ | | |
| $C_{H_2,conc}$ | concentration d'hydrogène, $mol cm^{-3}$ | ζ | teneur en eau de la membrane |
| $C_{O_2,conc}$ | concentration d'oxygène, $mol cm^{-3}$ | η | rendement |
| E_{Nernst} | tension de Nernst, V | κ | exposant isentropique |
| F | constante de Faraday, $C cm^{-1}$ | λ | coefficient stœchiométrique |
| h | enthalpie, $kJ kg^{-1}$ | ξ_i | coefficients empiriques de surtension d'activation |
| H_V | chaleur latente de vaporisation de l'eau, $J mol^{-1}$ | π | rapport de pression |
| i | densité du courant, $A cm^{-2}$ | Indices et exposants | |
| i_L | densité du courant maximale, $A cm^{-2}$ | 1,2,3,4 | points d'état |
| I | courant électrique, A | act | activation |
| L | épaisseur de la membrane, cm | air | air |
| HHV | pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, $kJ mol^{-1}$ | amb | ambient |
| \dot{m} | débit massique, $kg s^{-1}$ | c | condenseur |
| \dot{n} | débit molaire, $mol s^{-1}$ | comp | compresseur |
| n_e | nombre d'électrons | conc | concentration |
| N_{cell} | nombre de cellules dans la pile | Cons | réactifs consommés dans la réaction chimique |
| P | pression, kPa | gene | produits générés lors d'une réaction chimique |
| \dot{Q}_{in} | énergie calorifique | H_2 | hydrogène |
| \dot{Q}_{ch} | puissance électrochimique, kW | H_2O | eau |
| \dot{Q}_{net} | puissance thermique nette, kW | in | entrée |
| $\dot{Q}_{s,l}$ | chaleur sensible et latente, kW | N_2 | azote |
| r_{mem} | résistivité de membrane, Ωcm | ohm | ohmique |

| | | | |
|-----------|---|-------|--------------------------|
| R | Constante du gaz universel, $J mol^{-1}K^{-1}$ | out | sortie |
| R_{int} | résistance interne, Ω | O_2 | oxygène |
| s | entropie, $kJ kg^{-1}K^{-1}$ | PàC | Pile à combustible |
| T | température, K | pump | pompe |
| V | tension, V | s | processus isentropique |
| \dot{W} | puissance, kW | sat | conditions de saturation |
| x | fraction molaire | turb | turbine |
| | | thm | thermique |

Abréviations

| | |
|--------|--|
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| FCV | Fuel Cell Vehicle |
| GWP | Global Warming Potential (potentiel de l'effet de serre) |
| HCFC | Hydro chlorofluorocarbone |
| HFC | Hydrofluorocarbure |
| HFE | Hydrofluoroéther |
| IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| ODP | Ozone Depletion potential (le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone) |
| ORC | Organic Rankine Cycle (cycle organique de Rankine) |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell (pile à combustible à membrane échangeuse de protons) |

Introduction générale

Toutes nos activités et procédés de production quotidiens impliquent de l'énergie sous une forme ou une autre. Ces dernières décennies, la croissance de la population mondiale a nécessité l'amélioration des conditions de vie aussi bien que la croissance économique globale a eu pour conséquence une augmentation continue et jamais atteinte de la demande en énergie.

La réponse à cette demande croissante doit être abordée avec beaucoup de prudence. Le danger que représentent les émissions par les différents secteurs industriels utilisant les énergies fossiles, sont bien connues. L'impact de ces émissions intervient à plusieurs niveaux dont les plus importants sont d'abord climatique comme la dégradation de l'ozone, environnemental et de santé humaine. Le développement des systèmes de conversion d'énergie à haut rendement est un enjeu majeur vers la réduction des émissions anthropiques de gaz à effet de serre et l'augmentation de l'accessibilité à l'énergie.

La production de l'énergie est l'une des sources majeures des émissions de CO₂. Au 21^{ème} siècle, avec l'inquiétude mondiale croissante concernant l'épuisement des combustibles fossiles et la protection de l'environnement, les énergies propres renouvelables alternatives sont en demande urgente. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est l'une des solutions les plus prometteuses pour son efficacité intrinsèquement plus élevée et beaucoup moins des problèmes liés aux émissions que des nombreux autres dispositifs de conversion d'énergie.

De plus, la bonne gestion thermique de l'application haute puissance est également considérée comme le problème le plus critique à résoudre. Normalement, la PEMFC fournit une quantité presque similaire de chaleur résiduelle à l'énergie électrique. La température de fonctionnement est d'environ 60 à 100 °C, ce qui est bien inférieur à la température d'un moteur à combustion. Cette faible tolérance aux variations de température et la grande quantité de chaleur perdue indiquent qu'un système de refroidissement avec un coefficient de transfert de chaleur élevé et une capacité d'équilibre de température est d'une grande importance, et il existe un bon potentiel de récupération de la chaleur perdue.

Ce travail présente l'étude paramétrique et analytique d'un système hybride utilisant le cycle organique de Rankine pour valoriser la chaleur résiduelle d'une pile à combustible PEM. La modélisation et la simulation d'un tel système sont décrites et le choix de fluide de travail est critiqué pour l'amélioration des performances du système hybride pile à combustible – cycle ORC.

Notre document est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les travaux de recherches menés par différents scientifiques sur les systèmes énergétiques hybrides comprenant des piles à combustible et des systèmes refroidissements.
- Le chapitre deux a pour but de présenter les généralités sur des piles à combustible, en particulier la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Ensuite, le principe de fonctionnement du système hybride proposé est décrit.
- La modélisation mathématique du système hybride (PEMFC – cycle ORC) est présentée dans le chapitre trois.
- Les résultats de simulation issus du programme de calcul développé sont discutés dans le quatrième chapitre.

Notre travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre 1 :

Etat de l'art

1.1 Introduction

Les effets du changement climatique et de la dépendance aux combustibles fossiles sont devenus plus apparents, obligeant le monde à adopter une attitude positive en vue de réduire son empreinte carbone. Cela a été fait grâce à un investissement accru dans les technologies durables telles que les piles à combustible pour produire de l'électricité [1]. Une pile à combustible convertit l'énergie chimique d'un gaz en énergie électrique selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Aujourd'hui, de nombreux types de piles existent démontrant l'intérêt de la communauté scientifique pour celles-ci. Les larges gammes de puissance possibles permettent leur application dans des nombreux domaines : la production d'énergie électrique et de la chaleur, l'alimentation des systèmes portatifs (téléphones, ordinateurs, etc.) et le transport (voitures, motocyclettes, etc.) [2].

Parmi les piles à combustible existantes, la PEMFC a pris le devant de la scène en raison de ses applications diverses et de ses avantages tels que le fonctionnement à basse température. D'autres avantages incluent un démarrage rapide, court temps de réponse et une densité énergétique assez élevée [3,4]. Pour ces raisons, l'industrie aérospatiale de la NASA, s'est également intéressée à l'utilisation de la pile à combustible PEM pour ses opérations [5]. La tension maximale d'une pile à combustible est d'environ 1,17 V. Par définition un assemblage des piles à combustible s'effectue en série, permettant l'augmentation de la tension alors que, l'intensité du courant reste la même que celle d'une pile unitaire.

Généralement, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons produit en approximation une quantité de chaleur résiduelle équivalente à la puissance électrique qu'elle fournisse dans des conditions de fonctionnement en régime permanent [3]. Afin de maintenir la température de la pile homogène, la PEMFC nécessite un système de refroidissement pour évacuer cette chaleur résiduelle dans la pile [6]. En fait, le défi actuel de l'utilisation de la chaleur dégagé par la pile est un problème technique qui donne à l'ingénieur l'opportunité de rechercher des solutions donnant naissance à des système

énergétiques hybrides plus efficace que le rendement énergétique du système de référence. Dans le travail qui suit, nous présentons les travaux de recherches effectués sur les systèmes hybrides PEMFC.

1.2 Etat des recherches

L'adoption et la commercialisation de la technologie PEMFC dans la production d'électricité à grande échelle dépendent de l'efficacité et de la durabilité de la pile à combustible. Améliorer les composants de la pile à combustible pour résister aux conditions opératoires difficiles est d'une grande importance. Les efforts pour réduire la dégradation du catalyseur et de la membrane échangeuse de proton, pour éviter la corrosion et la défaillance mécanique des plaques bipolaires et le système ensemble ont été étudiés en détail par des chercheurs [7 – 16]. L'étude qui suit consiste à citer les travaux de recherche réalisés dans les systèmes hybrides PEMFC.

Zakaria, Mustaffa et al. 2014 : Ont modélisé le système de récupération d'énergie d'un véhicule à pile à combustible (FCV), qui utilise la chaleur résiduelle de la pile à combustible pour augmenter la température d'entrée de l'hydrogène afin d'améliorer l'efficacité de conversion grâce à des taux de réaction cinétiques plus élevés. Le résultat est cartographié sur le cycle de conduite et montre que les puissances thermiques sont respectivement de 485 et 410 W en cycle de conduite agressif et passif [17].

Massardo and Lubelli 2000 : Cet article étudie les performances d'un cycle combiné de pile à combustible à oxyde solide (SOFC) et de turbine à gaz (TG). Les auteurs ont développé un modèle mathématique qui simule le fonctionnement en régime permanent de la pile à combustible. Le modèle, testé avec des données disponibles dans la littérature, a été utilisé pour une analyse paramétrique complète prenant en compte l'influence de la pression de fonctionnement de la cellule, des températures de la cellule et du flux, des débits et de la composition du combustible-oxydant. L'analyse thermodynamique d'un certain nombre de cycles combinés SOFC-GT est présentée et discutée, en tenant compte de l'influence de plusieurs contraintes technologiques. Les résultats ont montré qu'une pression opératoire élevée entraînait une augmentation de la tension de la cellule. Les rendements du système proposé sont considérablement plus élevés (65-70 % des cellules atmosphériques ; 74-76 % des cellules pressurisées) que le rendement de 58 % atteint par des simples centrales électriques [18].

Un travail similaire a été effectué par **Yu, S., et al. 2010** en utilisant une pile à combustible PEM. Dans cet article, une PEMFC a été utilisée comme générateur électrique résidentiel. Un modèle dynamique comprenant une turbosoufflante, un humidificateur à membrane, deux circuits de refroidissement et un empilement des piles à combustible a été proposé. Il a été constaté qu'à faible densité du courant, la consommation d'énergie de la turbosoufflante est élevée [19]. Des études correspondantes ont été menées au cours des dernières années [20, 21].

Briguglio, N., et al. 2011 : Ont proposé un système hybride de production combinée de chaleur et d'électricité pour le chauffage résidentiel. La PEMFC de 5kW mis en configuration de cogénération pour récupérer la chaleur de la pile à combustible par un échangeur de chaleur connecté à la sortie cathodique a été utilisé. Le rendement global du système atteint 85% lorsque l'échangeur travaille à la puissance nominale [20].

Belatel, M., et al. 2011 ont étudié un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec pile à combustible pour la production de l'électricité verte. Ils ont proposé une solution pour résoudre le problème d'intermittence de l'énergie type photovoltaïque-éolien par un couplage avec une pile à combustible à membrane échangeuse de protons [22].

Zhang, X., et al. 2011 : Ce travail présente un système d'alimentation hybride composé d'une pile à combustible PEM et un cycle de réfrigération pour valoriser la chaleur résiduelle d'une PEMFC dans la réfrigération. Les résultats de la simulation montrent que la puissance à la sortie du système hybride est maximale lorsqu'une densité du courant élevée est utilisée [23].

Loreti, G., et al. 2021 : Ont étudié les performances d'un cycle combiné de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et de turbine à gaz (TG). Leurs recherches ont montré que les processeurs de combustible basés sur le reformage à la vapeur pourraient ne pas être le choix optimal pour une centrale à pile à combustible PEM fonctionnant à haute température. Grâce à une modélisation en régime permanent, ils ont déterminé les conditions de fonctionnement et les performances optimales de la centrale

électrique proposée. Ils ont constaté que le système hybride atteint un rendement électrique proche de 50 % et un rendement global supérieur à 85 %. D'autre part, un système de pointe basé sur le reformage à la vapeur a un rendement électrique inférieur à 45%. Cependant, ces résultats sont propres aux piles à combustible PEM qui fonctionnent à haute température et ne se généralisent pas aux piles à combustible PEM à basse température [24].

Il a été constaté que l'une des caractéristiques d'une PEMFC est l'opération à basse température (60°C – 100°C). D'autre part, le cycle organique de Rankine (ORC) a des performances supérieures dans la récupération de la chaleur perdue à basse température [25]. C'est une technologie performante et fiable pour convertir les basses et moyennes températures des sources de chaleur en électricité [26].

Zhao, P., et al. 2012 : Dans cette étude, un système d'alimentation hybride d'une PEMFC utilisant le cycle organique de Rankine pour récupérer la chaleur résiduelle de la PEMFC était proposé. Les auteurs ont étudié analytiquement les effets des paramètres différents sur les performances du système tels que la densité du courant, la température et la pression de fonctionnement de la PEMFC. Les résultats ont montré que le rendement électrique du système combiné peut être augmenté jusqu'à 5% par rapport à celui de la pile à combustible PEM sans l'ORC [27].

1.3 But du travail

Dans ce travail, un système d'alimentation hybride composé d'une pile à combustible échangeuse de protons et le cycle organique de Rankine est étudié pour améliorer le rendement électrique en récupérant la chaleur résiduelle de la PEMFC. Un modèle mathématique est développé afin de faire une simulation du système dans le régime permanent. Ensuite, une analyse paramétrique est effectuée pour étudier les effets des paramètres clés sur la performance de ce système. De plus, les performances du système sous différents fluides organiques seront comparées et présentées.

Chapitre 2 :

Généralités et principe de fonctionnement du système (PEMFC–ORC)

2.1 Introduction

Le cycle organique de Rankine fonctionne selon les mêmes principes que le cycle traditionnel de Rankine de vapeur trouvé dans la plupart des centrales thermiques. La différence principale entre ces deux cycles est le fluide de travail utilisé, où l'ORC utilise un fluide organique au lieu de l'eau qui est utilisé dans le cycle traditionnel.

Les fluides organiques ont une basse température d'ébullition ce qui les rendent davantage adaptés pour la récupération de chaleur d'une source chaude à basse température comme la pile PEM dans notre système. Dans un cycle organique de Rankine, une source de chaleur à basse température fournit le potentiel nécessaire pour faire fonctionner le moteur thermique. Néanmoins, dans l'utilisation des fluides organiques il y a toujours une préoccupation, quant au choix du fluide le plus avantageux pour le domaine dans lequel la technologie ORC est appliquée.

L'ORC offre des résultats prometteurs pour la combinaison avec la pile à combustible PEM pour produire de l'électricité. Ce chapitre se concentrera sur les généralités des piles à combustibles, en particulier la PEMFC. Nous allons présenter le principe de fonctionnement du système hybride et aborder le choix d'un fluide de travail pour l'ORC. Les propriétés des fluides organiques examinés seront présentées à la fin du chapitre.

2.2 Types de piles à combustible

Il existe deux principales catégories des piles à combustible selon le classement par température de fonctionnement : les piles à combustible à basse température ($T < 150^{\circ}\text{C}$) et les piles à combustible à haute température ($T > 150^{\circ}\text{C}$). Généralement, l'hydrogène est le combustible le plus utilisé [2]. Ces différents types des piles à combustible sont regroupés dans le tableau (2.1) ci-dessous :

Tableau 2-1 : Classification des piles à combustibles [2].

| Abréviation | AFC | PEMFC | DMFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|-------------------------------|--|--|----------------------------|-------------------------------|--|---|
| Caractéristique | | | | | | |
| Nom en anglais | Alkaline Fuel Cell | Proton Exchange Membrane FC | Direct Methanol Fuel Cell | Phosphoric Acid Fuel Cell | Molten Carbonate Fuel Cell | Solid Oxide Fuel Cell |
| Electrolyte | Solution KOH (liquide) | Membrane polymère (solide) | Membrane polymère (solide) | Acide phosphorique (liquide) | Li ₃ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice de LiAlO ₂ (liquide) | ZrO ₂ et Y ₂ O ₃ (solide) |
| Catalyseur | Pt | Pt | Pt | Pt | carbonates de lithium et de potassium | Ni |
| Ion mobile dans l'électrolyte | OH ⁻ | H ⁺ | H ⁺ | H ⁺ | CO ₃ ²⁻ | O ²⁻ |
| Température | 60-80 °C | 60-100 °C | 60-100 °C | 180-220 °C | 600-660 °C | 700-1000 °C |
| | Piles à combustible à faible température | | | | Piles à combustible à forte température | |
| Combustible | H ₂ pur | H ₂ pur ou reformé | Méthanol | H ₂ pur ou reformé | H ₂ pur ou reformé | H ₂ et CO pur ou reformé |
| Oxydant | O ₂ pur | Air | Air | Air | Air | Air |
| Domaines d'application | Spatial, transport (sous-marins) | Electronique portable, transport, cogénération | Electronique portable | Transport, cogénération | Cogénération, production centralisée d'électricité | Cogénération, production centralisée d'électricité, transport (APU) |
| Rendement électrique | 55-60 % | 32-40 % | 15-25 % | 40-45 % | 50 % 55 % avec réutilisation de la chaleur | 45-50 % 60 % avec réutilisation de la chaleur |

La PEMFC a été choisie pour ses propriétés telles que le fonctionnement à basse température et l'adaptabilité d'utilisation avec des systèmes de récupération de chaleur. Dans ce qui suit, nous présentons plus de détails sur la pile à combustible PEM.

2.3 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

La réaction principale dans la PEMFC est celle de l'oxygène avec l'hydrogène produisant avec l'électricité de la chaleur et de l'eau. Nous utilisons l'hydrogène comme combustible et l'oxygène de l'air comme oxydant. Les molécules d'hydrogènes sont introduites à l'anode, ses protons traversent la membrane (électrolyte) jusqu'à la cathode, alors que les électrons y sont conduits à travers le circuit électrique. Dans la cathode l'oxygène, les protons et les électrons se combinent pour former de l'eau. Sa schématique de base est donnée dans la figure (2.1).

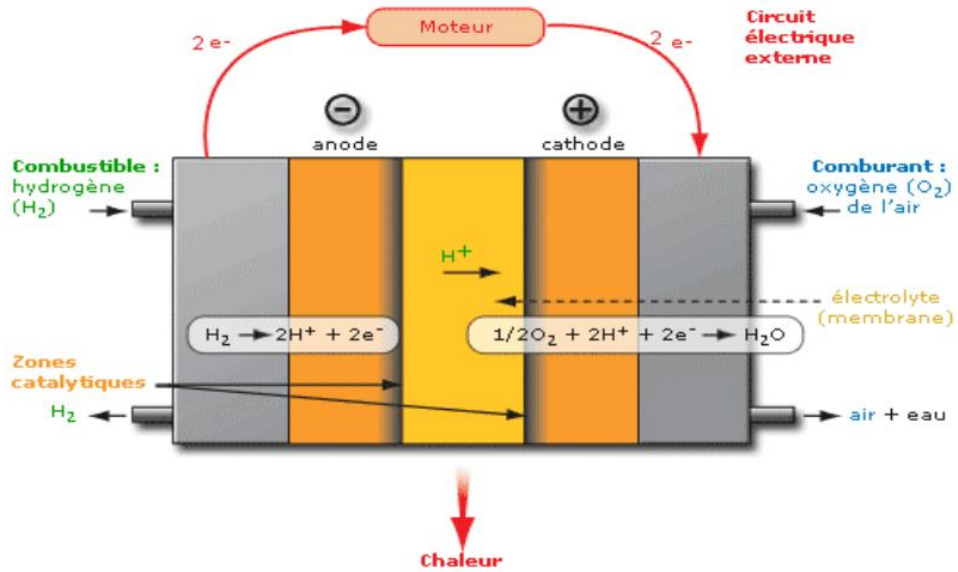


Figure 2-1 : Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons [3].

La réaction globale de synthèse de l'eau :



2.4 Description du système hybride PEMFC – Turbine

La figure (2.2) présente la configuration du système hybride et ses composants principaux.

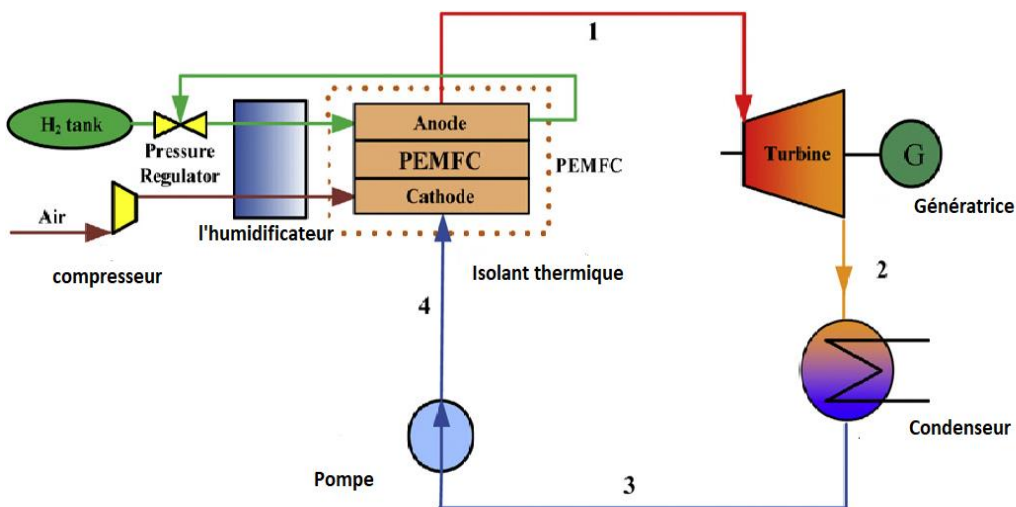


Figure 2-2 : Diagramme schématique du système hybride d'un PEMFC et l'ORC [27].

Ce système est composé d'un compresseur d'air, un réservoir d'hydrogène, un régulateur de pression, l'humidificateur d'air, une pile à combustible PEM, une turbine à fluide de travail organique, un condenseur, une pompe et d'autres composants supplémentaires. La partie PEMFC est isolée pour réduire les pertes thermiques à l'environnement.

2.4.1 Rôle des composants

Le rôle de chaque composant est décrit ci-dessous :

1. **Compresseur** : pour la compression d'air vers l'humidificateur.
2. **Réservoir** : pour le stockage d'hydrogène à haute pression.
3. **Humidificateur** : pour humidifier l'air et l'hydrogène afin de les injecter dans la PEMFC.
4. **Régulateur de pression** : pour réduire la pression d'hydrogène du réservoir à la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM.
5. **PEMFC** : pour convertir l'énergie chimique des gaz humidifiés en énergie électrique.
6. **Turbine** : pour convertir l'énergie thermique du fluide organique chauffé en énergie mécanique.
7. **Condenseur** : pour refroidir et liquéfier la vapeur à basse pression avant qu'elle n'entre dans la pompe.
8. **Pompe** : amène le fluide organique de la pression de condensation à la pression maximale du cycle organique de Rankine.
9. **Evaporateur** : le fluide organique issu de la pompe est chauffé et vaporisé par la chaleur résiduelle de la pile à combustible PEM.
10. **Génératrice** : pour convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

2.4.2 Principe de fonctionnement du système hybride (PEMFC – ORC)

D'après la figure (2.2), l'air est comprimé par le compresseur jusqu'à la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM. Il est ensuite humidifié et injecté au côté cathodique de la pile. Puisque l'hydrogène est stocké dans un réservoir à haute pression, le système PEMFC doit avoir un régulateur pour réduire la pression à une valeur nominale. L'hydrogène sortant du régulateur de pression est injecté au côté anodique de la pile. Le courant électrique est produit par la réaction électrochimique dans la pile, tandis qu'une partie de l'énergie est transformée en chaleur résiduelle (voir la figure (2.2)).

L'hydrogène non consommé est recyclé vers l'entrée de l'anode. La plage de température de fonctionnement de la PEMFC dans le système proposé est de 60 – 100°C alors que la pression de fonctionnement est de 1 – 4 atm.

D'autre part, l'ORC est composé de quatre unités principales ; l'évaporateur, la turbine, le condenseur et la pompe. Le fluide organique absorbe la chaleur résiduelle de la PEMFC à pression constante pour atteindre l'état de vapeur saturée (figure 2.3). Cette dernière est détendue à travers la turbine pour produire de l'électricité. Le fluide reste à l'état vapeur à la pression de condensation. Il est ensuite refroidi par le condenseur avant d'être recyclé par la pompe. Le diagramme T – s du cycle organique de Rankine est présenté dans la figure (2.3).

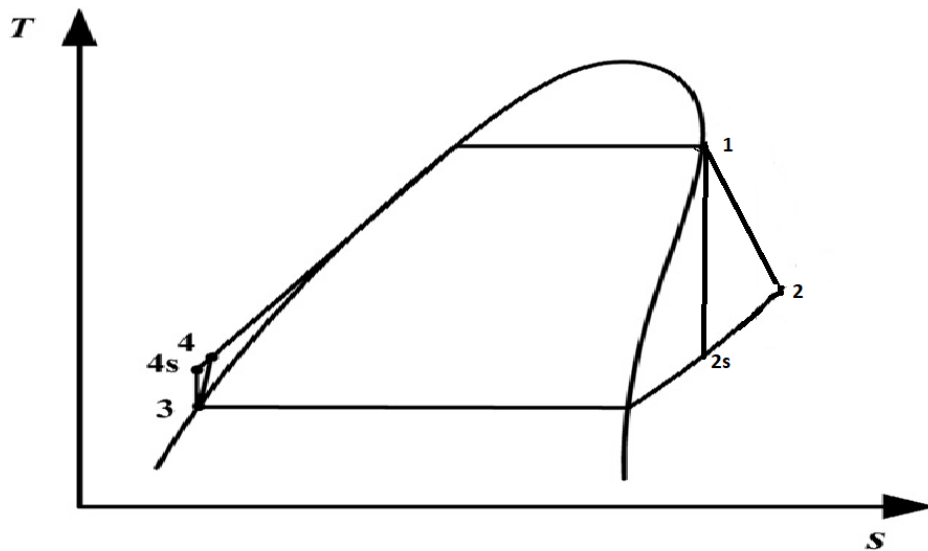


Figure 2-3 : Diagramme T-s d'un cycle organique de Rankine.

On constate que la courbe de vapeur saturée a une pente positive (dT/ds) ce qui signifie que la surchauffe n'est pas nécessaire pour éviter la condensation dans la turbine. Le critère de choix d'un fluide de travail est présenté dans ce qui suit.

2.5 Choix d'un fluide de travail

Le choix d'un fluide de travail est pertinent pour la performance du système ORC parce qu'il affecte l'efficacité du système, la puissance nette du système, la taille des composants du système, la sécurité et les préoccupations environnementales. Le bon choix d'un fluide organique est justifié par plusieurs facteurs parmi eux nous citons :

- Les conditions de travail et la source chaude par exemple, les sources à basse température de 60°C (la pile à combustible PEM et géothermique) et les sources à haute température 500°C (la biomasse).
- Les lois interdisant l'utilisation de certains fluides organiques.
- Les propriétés physiques et thermodynamiques d'un fluide.

Dans ce qui suit une étude détaillée de quelques facteurs qui influencent le choix d'un fluide de travail est présentée.

2.5.1 Propriétés thermodynamiques et physiques

La relation entre quelques propriétés des fluides de travail et les critères de performance de l'ORC d'un point de vue théorique et analytique est la suivante :

La courbe de la vapeur de saturation positive – En ce qui concerne la courbe de vapeur saturante, il existe trois types de fluides de travail : les fluides secs, humides et isentropiques. Une courbe de vapeur saturante négative (fluide "humide") conduit à des gouttelettes à la fin de la détente ce qui endommage les aubes de la turbine. Pour éviter la formation des gouttelettes, la surchauffe est nécessaire, mais elle nécessite un évaporateur plus grand et plus coûteux. L'utilisation des fluides secs ou isentropiques permet d'éliminer les problèmes liés à la formation des gouttelettes parce qu'ils ont une courbe de vapeur saturée à pente positive [28]. La figure (2.4) présente les différents types des fluides organiques.

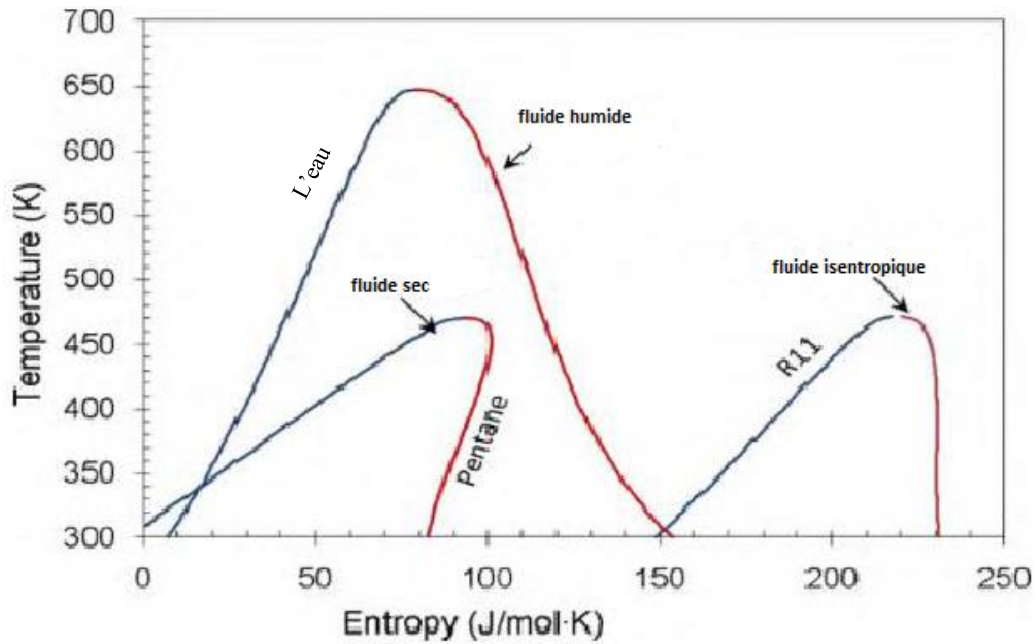


Figure 2-4 : Fluides de travail secs, humides et isentropiques.

La densité de la vapeur – Plus la densité est élevée, plus le volume spécifique et le débit volumétrique sont faibles. Un faible débit volumétrique est souhaitable pour obtenir des composants plus petits et des machines plus compactes. Les fluides de faible densité ont un volume spécifique élevé et nécessitent des composants plus grands (échangeurs de chaleur et détendeurs). Une taille de composante plus importante entraîne des unités plus coûteuses et des systèmes plus coûteux. En outre, un volume spécifique élevé augmente la chute de pression dans les échangeurs de chaleur et nécessite un travail de pompe plus important [28].

Pression positive de la jauge de condensation – La pression de condensation doit être supérieure à la pression atmosphérique pour éviter les problèmes de fuite et l'infiltration d'air dans le cycle [28].

Chaleur spécifique – Une capacité thermique (C_p) élevée du fluide de travail permet de mieux récupérer l'énergie de la source de chaleur et de diminuer le débit massique du fluide de travail [28].

La conductivité – une conductivité élevée est nécessaire pour obtenir un coefficient de transfert de chaleur élevé dans les échangeurs de chaleur [28].

Température de stabilité élevée – contrairement à l'eau, les fluides organiques subissent des détériorations chimiques et se décomposent à des températures élevées. La

température maximale de la source de chaleur est donc limitée par la stabilité chimique du fluide de travail [28].

La viscosité – une faible viscosité à la fois dans les phases liquide et vapeur est nécessaire pour maintenir de faibles pertes par frottement dans les échangeurs de chaleur et les tuyaux [28].

Le point de congélation du fluide – ça doit être à la température la plus basse du cycle [28].

2.5.2 Propriétés de transfert de chaleur

Les propriétés de transfert de chaleur sont d'une importance capitale et constituent un paramètre très important pour le dimensionnement des échangeurs de chaleur. Une valeur de chaleur spécifique (C_p) élevée permet au fluide de travail d'absorber efficacement l'énergie thermique de la source de chaleur. Un C_p élevé permet une meilleure approche du profil de température dans les échangeurs de chaleur et améliore les rendements. Plusieurs facteurs affectent le processus de transfert de chaleur. Certains facteurs sont liés à l'architecture du cycle, notamment la conception de la tuyauterie, les débits (nombre de Reynolds) et le choix des matériaux. D'autres facteurs sont liés aux propriétés du fluide de travail et affectent la capacité globale de transfert de chaleur. La conductivité thermique (k), la chaleur spécifique (C_p) et la viscosité (μ) du fluide de travail sont trois propriétés clés utilisées pour calculer les nombres de Prandtl ($Pr = \mu * C_p / k$) qui sont largement utilisés dans la conception des échangeurs de chaleur. Il est donc souhaitable d'avoir un fluide de travail dont la viscosité est aussi faible que possible, et dont la chaleur spécifique et la conductivité thermique sont aussi élevées que possible comme déjà discuté [29].

2.5.3 Sécurité et les préoccupations environnementales

Les critères environnementaux et de sécurité sont d'une importance capitale dans le choix des fluides de travail, mais de nombreux fluides de travail ont été éliminés progressivement ou sont en passe de l'être. Les fluides de travail éliminés progressivement ont une potentielle d'appauvrissement de la couche d'ozone (en anglais ODP) élevée et un potentiel de réchauffement planétaire élevée (en anglais GWP). Selon le règlement CE 2037/2000, de nombreux fluides de travail comme les CFC et HCF sont déjà éliminés progressivement. Ces réfrigérants sont interdits en raison de leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) et de leur potentiel de réchauffement

global (GWP). Quelques exemples des réfrigérants déjà éliminés sont : R-11, R-12, R-113, R-114 tandis que d'autres seront éliminés en 2030 (comme R21, R22, R123, R124, R141 et R142b) [28,30].

2.6 Données environnementales et la classification de sécurité

Les données environnementales comprennent le potentiel de réchauffement global GWP et le potentiel de dépilation de l'ozone ODP. Dans ce travail de recherche, les données environnementales sont principalement basées sur les données physiques de sécurité et environnementales fournies par James M. Calm [31].

Selon la norme 34 de l'ASHRAE (ASHRAE, 2010a et 2010b), les lettres A font référence à une toxicité faible tandis que la lettre B signifie une toxicité plus élevée. Les chiffres 1, 2 et 3 font référence à la propagation de la flamme, le chiffre 1 signifie qu'il n'y a pas de propagation de la flamme, le chiffre 2 signifie que l'inflammabilité est plus faible et le chiffre 3 signifie que l'inflammabilité est plus élevée. Le raccourci "wwf" indique le pire cas de fraction d'inflammabilité ou le pire cas de formulation, et il signifie que le fluide de travail est inflammable en phase vapeur ou liquide. Dans certains cas, le groupe 2 est désigné par la lettre L (comme A2L et B2L) et la lettre L signifie qu'il est plus difficile à enflammer. La classification de sécurité est résumée dans le tableau (2.2) ci-dessous :

Tableau 2-2 : Classification de sécurité [28].

| | Toxicité inférieure | Toxicité plus élevée |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Inflammabilité plus élevée | A3 | B3 |
| Inflammabilité inférieure | A2 | B2 |
| Pas de propagation de flamme | A1 | B1 |

2.7 Propriétés des fluides examinés

Ce travail présente l'étude paramétrique et analytique du système hybride sous cinq fluides de travail (R123, R245ca, R245fa, R236fa et RE347mcc) dont les propriétés et la nomenclature sont données dans les tableaux (2.3 – 2.5). Les données présentées dans les tableaux (2.3) et (2.4) sont fournies par le logiciel de NIST REFPROP version 9.1 [37].

Tableau 2-3 : Nomenclature chimique [37].

| Type | Numéro d'ASHRAE | Nom chimique UICPA | Formule chimique |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| HCFC | R-123 | 2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroéthane | CHCl ₂ CF ₃ |
| HFC | R-245ca | 1,1,2,2,3-Pentafluoropropane | CHF ₂ CF ₂ CH ₂ F |
| HFC | R-245fa | 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane | CF ₃ CH ₂ CHF ₂ |
| HFC | R-236fa | 1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane | CF ₃ CH ₂ CF ₃ |
| HFE | RE347mcc / (HFE-7000) | Méthyl-heptafluoropropyl-éther | CF ₃ CF ₂ CF ₂ OCH ₃ |

Le tableau (2.4) montre les propriétés physiques des fluides de travail. Ces propriétés sont classées selon la température critique.

Tableau 2-4 : Données physiques des fluides de travail [37].

| | Fluide | Masse Molaire (kg/kmol) | T _{cr} (K) | P _{cr} (kPa) | Type |
|----------|----------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------|
| 1 | R-123 | 152.93 | 456.83 | 3661.8 | Sec |
| 2 | R-245ca | 134.05 | 447.57 | 3940.7 | Sec |
| 3 | RE347mcc | 200.05 | 437.70 | 2476.2 | Sec |
| 4 | R-245fa | 134.05 | 427.16 | 3651.0 | Sec |
| 5 | R-236fa | 152.04 | 398.07 | 3200.0 | Sec |

Les données environnementales et de sécurité sont regroupées dans le tableau (2.5) [31]. La classification de sécurité utilisée est selon la norme 34 de l'ASHRAE (voir le tableau 2.2).

Tableau 2-5 : Données environnementales et de sécurité [31].

| | Fluide | GWP 100 Ans | ODP | Classification de sécurité | Corrosivité |
|----------|---------------|------------------------|------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1 | R-123 | 77 | 0.01 | B1 | Non |
| 2 | R-245ca | 726 | 0.0 | – | Non |
| 3 | RE347mcc | 553 | 0.0 | A1 | Non |
| 4 | R-245fa | 1050 | 0.0 | B1 | Non |
| 5 | R-236fa | 9820 | 0.0 | A1 | Non |

Avec :

GWP : le potentiel de réchauffement planétaire.

ODP : le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone.

2.8 Conclusion

La pile à combustible PEM est un système permettant de convertir l'énergie chimique en électricité et en chaleur. Elle fonctionne à basse température (60 – 100°C). Pour cela, les critères de sélection d'un fluide organique pour la récupération de chaleur perdue doivent être pris en considération tels que la température critique, la pression critique, les problèmes de sécurité et l'impact environnemental. Généralement, une température critique élevée a un effet positif sur les performances d'un cycle ORC.

Dans ce chapitre, il a été constaté qu'il existe trois types de fluides organiques : sec, humide et isentropique. Les fluides organiques secs sont sélectionnés pour le système hybride proposé parce qu'ils ne se condensent pas lors de la détente. C'est parce que seuls les fluides secs ont une courbe de vapeur de saturation positive. Par contre, les autres fluides nécessitent une surchauffe afin d'éviter la formation de gouttelettes en fin de détente. Il est aussi sage de penser à utiliser des fluides qui ont des faibles valeurs de GWP et ODP, afin de protéger notre planète. Un bon accouplement de la pile à combustible PEM et un bon choix de fluide de travail du cycle ORC entraîne une amélioration des performances du système hybride.

Chapitre 3 : Modélisation et performance du système

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation d'un système hybride composé d'une pile à combustible PEM et un cycle ORC permettant de récupérer la chaleur résiduelle de la PEMFC. Le but de ce travail est d'étudier l'effet des paramètres clés sur les performances de la pile à combustible, le cycle ORC et du système combiné dans des conditions opératoires.

Le chapitre commence par une description du système PEMFC – ORC. Ensuite, nous présentons les hypothèses simplificatrices adoptées dans ce travail ainsi que la modélisation du système hybride.

3.2 Description du système

La figure (3.1) montre le système hybride proposé. Il est composé d'une PEMFC, d'un échangeur de chaleur, d'une turbine et des accessoires (humidificateurs, une pompe et un compresseur d'air...etc.)

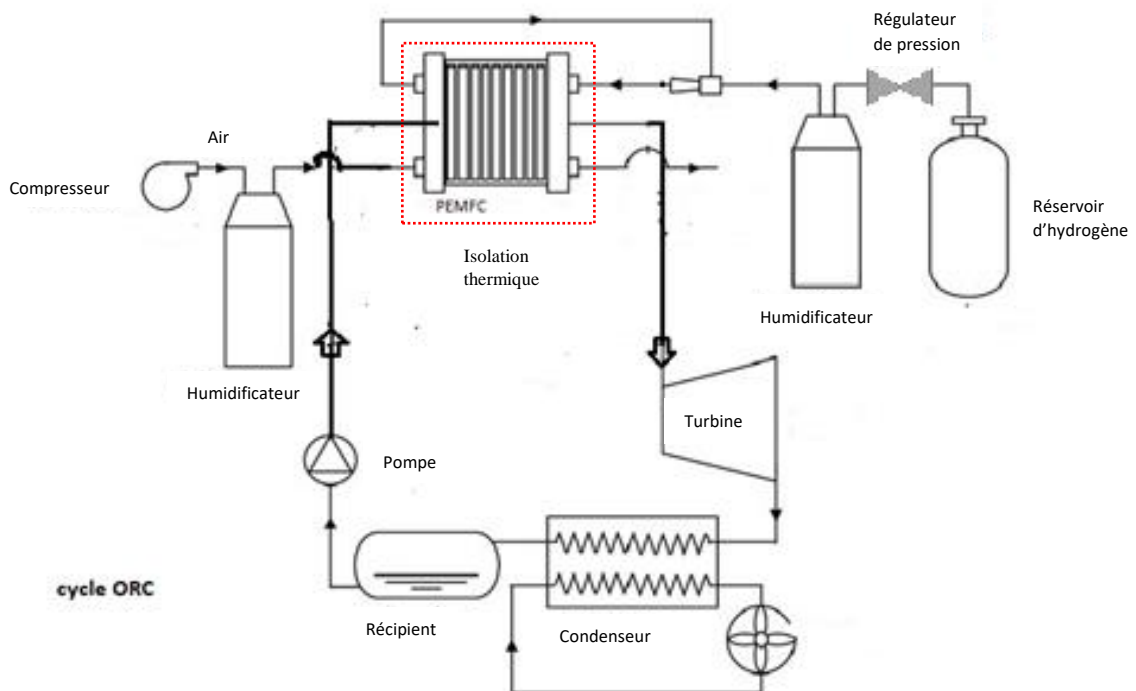


Figure 3-1 : Configuration du système PEMFC – ORC.

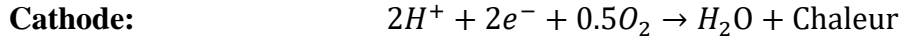
3.3 Modélisation mathématique du système PEMFC – ORC

L'établissement du modèle mathématique simplifié qui permet de simuler le comportement du système hybride (PEMFC-ORC) nécessite donc des hypothèses simplificatrices mais ils doivent être raisonnables. Ci-dessous, nous présentons les hypothèses simplificatrices adoptées dans notre modélisation [27,32].

1. Régime permanent.
2. La composition de l'air est de 79% N₂ et de 21% O₂.
3. La réaction chimique atteint l'état d'équilibre.
4. Pressions constantes dans les canaux d'écoulement des gaz.
5. Le carburant et le comburant sont complètement humidifiés.
6. La température de fonctionnement de la PEMFC est de 85°C alors que la pression de fonctionnement est de 3 atm.
7. La température à la sortie de la pile correspond à celle du fonctionnement.
8. Les déperditions thermiques vers l'environnement sont négligeables en raison de la couche d'isolation. Les fluides organiques sont choisis pour le refroidissement de la pile afin de récupérer sa chaleur résiduelle.
9. La température à l'entrée de la turbine est de 353.15 K.
10. Il y a une déperdition thermique de 5% de la chaleur résiduelle.
11. Les pertes de charge dans les conduites et dans les échangeurs de chaleur sont négligeables.
12. Le fluide à la sortie du condenseur est à l'état liquide saturé.
13. Les pertes thermiques de la pompe et de la turbine vers l'environnement sont négligées.

3.3.1 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEM

Dans les piles à combustible à membranes échangeuses de protons, seul le dihydrogène en anode et le dioxygène en cathode participent à la réaction électrochimique. Les mécanismes de réaction qui se sont produits à l'intérieur de l'anode et de la cathode de la pile à combustible PEM peuvent être illustrés comme suit [27] :



Cette réaction génère une tension de Nernst [33] selon l'équation suivante:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T_{PàC} - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \quad (3.1)$$

$$\times T_{PàC}(\ln(P_{H_2}) + 1/2 \ln(P_{O_2}))$$

avec :

$T_{PàC}$: la température de la cellule (K)

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

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

$P_{H_2O}^{sat}$ est la pression de saturation de la vapeur d'eau, elle peut être exprimée par l'équation

(3.2) :

$$\log_{10}(P_{H_2O}^{sat}) = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \quad (3.2)$$

$$\times 10^{-7}t^3$$

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

$$t = T_{PàC} - 273.15 \quad (3.3)$$

Les pressions partielles effectives d'hydrogène P_{H_2} à l'anode et d'oxygène P_{O_2} à la cathode sont données respectivement par les équations (3.4) et (3.5) [38] :

$$P_{H_2} = 0.5 \times P_{H_2O}^{sat} \left[\frac{1}{\exp(1.653i/T_{PàC}^{1.334}) \cdot x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

$$P_{O_2} = P \left[1 - x_{H_2O}^{sat} - x_{N_2}^{channel} \exp \left(\frac{0.291i}{T_{P\grave{a}C}^{0.832}} \right) \right] \quad (3.5)$$

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

Le terme i désigne la densité du courant.

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

$$x_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P} \quad (3.6)$$

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

$$x_{N_2}^{channel} = \frac{(x_{N_2,in} - x_{N_2,out})}{\ln(x_{N_2,in}/x_{N_2,out})} \quad (3.7)$$

où :

$$x_{N_2,in} = 0.79(1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (3.8)$$

$$x_{N_2,out} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + ((\lambda_{air} - 1)/\lambda_{air}) \left(\frac{0.21}{0.79} \right)} \quad (3.9)$$

où $x_{N_2,in}$, $x_{N_2,out}$ sont respectivement les fractions molaires d'azote à l'entrée et à la sortie.

λ_{air} est le coefficient stœchiométrique de l'air.

En général, la tension réelle de la pile à combustible est inférieure à la tension réversible de Nernst en raison des pertes irréversibles, telles que la surtension d'activation, la surtension ohmique et la surtension de concentration. Par conséquent, la tension de sortie de la pile à combustible PEM est donnée par l'équation (3.10) :

$$V_{P\grave{a}C} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3.10)$$

$V_{PàC}$: Tension réelle d'une cellule unitaire (Volt)

E_{Nernst} : Potentiel thermodynamique idéal (Volt).

V_{act} : Polarisation (surtension) d'activation de l'anode et de la cathode (Volt).

V_{ohm} : Polarisation (surtension) ohmique de l'anode et de la cathode (Volt).

V_{conc} : Polarisation (surtension) de concentration de l'anode et de la cathode (Volt).

La surtension d'activation résulte de la cinétique de la réaction de transfert de charge à travers l'interface électrode-électrolyte [34]. En d'autres termes c'est l'énergie nécessaire pour activer les réactions chimiques. Elle peut être exprimé par [35]:

$$V_{act} = -[-0.948 + \xi T_{PàC} + 0.000076 T_{PàC} (\ln(C_{O_2,conc})) - 0.000193 T_{PàC} (\ln(I))] \quad (3.11)$$

I : est le courant de fonctionnement de la pile.

ξ peut être représenté par :

$$\xi = 0.00286 + 0.0002 \ln(A_{cell}) + 0.000043 \ln(C_{H_2,conc}) \quad (3.12)$$

et $C_{O_2,conc}$, $C_{H_2,conc}$ sont les concentrations d'oxygène et d'hydrogène dans l'interface de la surface des électrodes (mol/cm³). Elles sont données en fonction de la pression par la loi d'Henry [35] :

$$C_{O_2,conc} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp\left(\frac{498}{T_{PàC}}\right) \quad (3.13)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} P_{H_2} \exp\left(\frac{-77}{T_{PàC}}\right) \quad (3.14)$$

La surtension ohmique est due aux résistances qui rencontre les électrons dans les électrodes et à la résistance protonique à travers la membrane. Elle est exprimée par la loi d'Ohm :

$$V_{ohm} = IR_{int} \quad (3.15)$$

R_{int} désigne la résistance interne totale et elle est calculée par l'équation (3.16) :

$$R_{int} = \frac{r_{mem}L}{A_{cell}} \quad (3.16)$$

L : est l'épaisseur de la membrane (cm).

r_{mem} : est la résistance spécifique de la membrane ($\Omega.cm$). Elle est obtenue par la relation (3.17) :

$$r_{mem} = \frac{181.6 \left[1 + 0.03i + 0.62 \left(\frac{T_{PàC}}{303} \right)^2 i^{2.5} \right]}{[\zeta - 0.634 - 3i] \exp[4.18((T_{PàC} - 303)/T_{PàC})]} \quad (3.17)$$

ζ : est la teneur en eau de la membrane.

La surtension de concentration provient de la variation de concentration entre les réactifs ou produits à la surface de l'électrode et la solution brute, due à la limitation de la diffusion des protons à travers la membrane. Cette limitation est causée par l'augmentation de la concentration des protons au niveau de la cathode lors d'une forte densité du courant et par le noyage de l'électrolyte. Elle est donnée par :

$$V_{conc} = \frac{RT_{PàC}}{n_e F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (3.18)$$

i_L : est la densité du courant maximale.

La puissance à la sortie de la pile à combustible PEM est calculée comme suit :

$$\dot{W}_{PàC} = N_{cell} V_{PàC} I \quad (3.19)$$

N_{cell} : est le nombre de cellules dans la pile.

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

$$\frac{T_{out,s}}{T_{amb}} = \pi^{((k-1)/k)} \quad (3.20)$$

π : est le rapport de pression.

k : 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 :

$$\eta_{comp} = \frac{T_{out,s} - T_{amb}}{T_{out,comp} - T_{amb}} \quad (3.21)$$

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

La puissance réelle de compression est :

$$\dot{W}_{comp} = \frac{\dot{m}_{air}(k/(k-1))RT_{amb}(\pi^{((k-1)/k)} - 1)}{\eta_{comp}} \quad (3.22)$$

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

3.3.2 Modèle thermique de la pile à combustible PEM

Dans une pile à combustible en marche, la source d'énergie est la réaction électrochimique. Cependant, une grande partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur (près de 50 % aux conditions nominales). Cette énergie excédentaire doit être retirée de la pile à combustible pour éviter sa surchauffe. L'énergie calorifique nette est calculée par le bilan énergétique thermodynamique suivant [27] :

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - \dot{W}_{PàC} - \dot{Q}_{s,l} \quad (3.23)$$

\dot{Q}_{net} : la puissance thermique nette.

\dot{Q}_{ch} : la puissance chimique.

$\dot{Q}_{s,l}$: la chaleur sensible et latente.

La puissance théorique fournie à la pile à combustible est déterminée directement par la quantité d'hydrogène consommée. Dans une pile à combustible, le taux de consommation d'hydrogène, le taux de consommation d'oxygène et le taux de génération d'eau sont calculés en utilisant le courant généré par la pile et le nombre de cellules à l'aide des équations suivantes :

$$\dot{n}_{H_2,cons} = N_{cell} \frac{I}{2F} \quad (3.24)$$

$$\dot{n}_{O_2,cons} = N_{cell} \frac{I}{4F} \quad (3.25)$$

$$\dot{n}_{H_2O,gener} = N_{cell} \frac{I}{2F} \quad (3.26)$$

Cependant, les débits des réactifs à l'entrée de la pile à combustible doivent être égaux ou supérieur aux taux de consommation afin d'éviter la dégradation de la membrane et la défaillance dans la pile à combustible [36]. Les coefficients stœchiométriques sont utilisés pour résoudre ce problème et les débits molaires des réactifs sont déterminés par :

$$\dot{n}_{H_2} = \lambda_{H_2} \dot{n}_{H_2,cons} = \lambda_{H_2} N_{cell} \frac{I}{2F} \quad (3.27)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \lambda_{O_2} \dot{n}_{O_2,cons} = \lambda_{O_2} N_{cell} \frac{I}{4F} \quad (3.28)$$

La puissance théorique nécessaire à la réalisation de la réaction électrochimique est donnée par :

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2,cons} \cdot HHV \quad (3.29)$$

HHV désigne le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène.

La chaleur sensible et latente peut être estimée par :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,l} = & C_{H_2} (\dot{n}_{H_2,out} T_{PàC} - \dot{n}_{H_2,in} T_{amb}) \\ & + C_{O_2} (\dot{n}_{O_2,out} T_{PàC} - \dot{n}_{O_2,in} T_{out,comp}) \\ & + C_{N_2} (\dot{n}_{N_2,out} T_{PàC} - \dot{n}_{N_2,in} T_{out,comp}) \\ & + \dot{n}_{H_2O,generate} (T_{PàC} - T_{amb}) C_{H_2O} \\ & + \dot{n}_{H_2O,generate} H_v \end{aligned} \quad (3.30)$$

C_{H_2} ; C_{O_2} ; C_{N_2} ; C_{H_2O} sont respectivement la capacité thermique spécifique d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de l'eau.

H_v : représente la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

3.4 Modèle mathématique du cycle organique de Rankine

Pour éviter la surchauffe de la pile sa chaleur résiduelle est absorbée par le fluide de travail organique.

La chaleur transportée par le fluide de refroidissement (fluide organique) représente 95% de celle générée par la pile à combustible. Elle peut être exprimé par :

$$\dot{Q}_{in} = 0.95\dot{Q}_{net} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3.31)$$

\dot{Q}_{in} : chaleur transportée par le fluide organique.

\dot{m} est le débit du fluide de travail calculé avec la relation suivante :

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{in}}{(h_1 - h_4)} \quad (3.32)$$

La puissance à la sortie de la turbine est donnée par l'équation (3.33) :

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (3.33)$$

Dans le condenseur, l'éjection de chaleur est exprimée par :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3.34)$$

La puissance de la pompe est calculée comme suit :

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (3.35)$$

h : est l'enthalpie.

3.5 Critère de performance

Les performances du système d'alimentation hybride proposé peuvent être évaluées par le rendement thermique du système ORC, le rendement électrique de la pile à combustible PEM et le rendement électrique globale du système hybride.

Le rendement thermique de l'ORC est défini comme le rapport de la puissance nette de sortie à l'apport de chaleur sur la base de la première loi de la thermodynamique, il est exprimé par :

$$\eta_{thm} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.36)$$

Le rendement électrique de la pile à combustible PEM est calculé comme suit :

$$\eta_{PàC} = \frac{\dot{W}_{PàC} - \dot{W}_{comp}}{\dot{n}_{H_2,in} \cdot HHV} \quad (3.37)$$

Le rendement électrique global est calculé par :

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{PàC} - \dot{W}_{comp} + \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump}}{\dot{n}_{H_2,in} \cdot HHV} \quad (3.38)$$

La figure (3.2) illustre les étapes de calcul permettons de déterminer les performances des composants du système hybride.

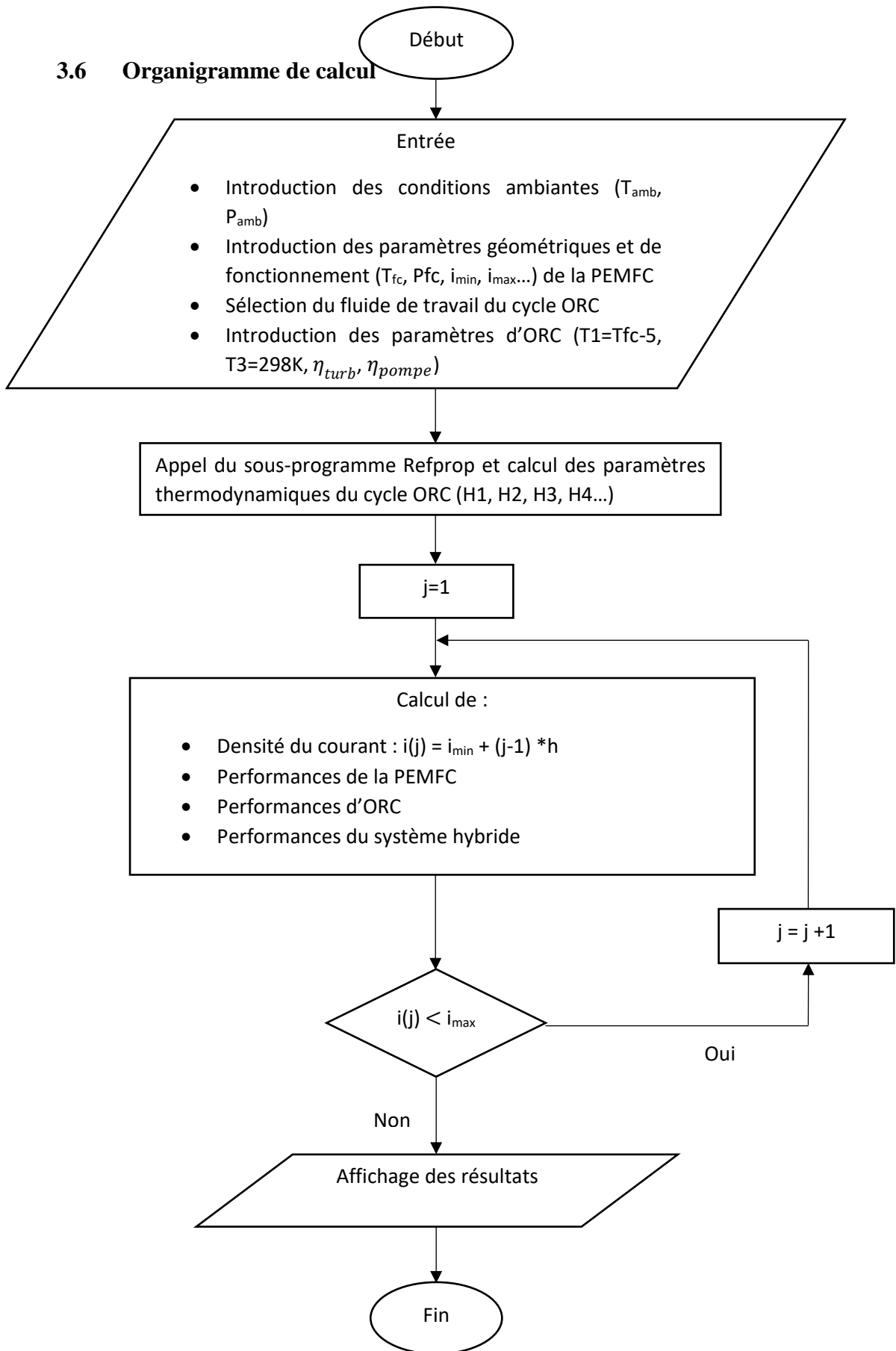


Figure 3-2 : Organigramme de calcul.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté et présenté le modèle mathématique utilisé pour étudier le système hybride proposé. Un modèle électrochimique a été utilisé pour calculer les données essentielles de la pile à combustible. D'autre part, des bilans énergétiques ont été considérés pour le système ORC ainsi que le système hybride.

Le modèle nous a aidé à analyser les performances du système en calculant son rendement électrique globale, le rendement thermique de l'ORC et le rendement électrique de la pile à combustible PEM.

Chapitre 4 :

Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Toutes technologies existantes ont besoin d'une évaluation des performances par une approche théorique pour les améliorer. Cependant une analyse rigoureuse de tous nouveaux systèmes est nécessaire avant leurs adoptions pour comprendre le comportement dans des conditions opératoires.

Ce chapitre commence par une description des conditions utilisées pour simuler le modèle mathématique présenté dans le chapitre précédent. Une fois que ces conditions décrites, nous présentons le comportement de la PEMFC et du cycle ORC. Les performances du système hybride sont également présentées. La dernière partie du chapitre est consacrée à l'analyse paramétrique du système hybride.

4.2 Conditions de simulation

Dans cette étude, cinq fluides organiques à savoir le RE347mcc, R245fa, R245ca, R236fa et le R123 sont choisis. Les conditions de simulation du système utilisées sont décrites dans le tableau (4.1).

Tableau 4-1 : Conditions du cas de base de simulation du le système hybride.

| Symbole | Paramètre | Valeur |
|------------|-------------------------------------|---|
| n_e | Nombre d'électrons | 2 |
| F | Constante de Faraday | 96,485 C mol ⁻¹ |
| R | Constante universel des gaz parfait | 8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹ |
| T_{amb} | Température ambiante | 293.15 K |
| P_{amb} | Pression ambiante | 1 atm |
| N_{cell} | Nombre de cellules dans la pile | 13,000 |
| A_{cell} | Surface active | 232 cm ² |
| i_L | Densité du courant maximale | 1.5 A cm ⁻² |
| L | Épaisseur de la membrane | 0.00254 cm |

Suite du tableau (4.1)

| | | |
|-----------------------------------|--|---------------------------|
| P | Pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM | 3 atm |
| T_k | Température de fonctionnement de la pile à combustible PEM | 358.15 K |
| i | Densité du courant de fonctionnement de la pile | 0.6 A cm^{-2} |
| λ_{air} | Débit d'air stœchiométrique | 2 |
| λ_{H_2} | Débit de l'hydrogène stœchiométrique | 1.2 |
| C_{H_2} | Capacité calorifique spécifique de l'hydrogène | 28.86 J $mol^{-1} K^{-1}$ |
| C_{O_2} | Capacité calorifique spécifique de l'oxygène | 29.72 J $mol^{-1} K^{-1}$ |
| C_{N_2} | Capacité calorifique spécifique de l'azote | 28.39 J $mol^{-1} K^{-1}$ |
| C_{H_2O} | Capacité calorifique spécifique de l'eau | 75.95 J mol^{-1} |
| H_V | Chaleur de vaporisation de l'eau | 40,644 J mol^{-1} |
| HHV | Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène | 285.55 kJ mol^{-1} |
| η_{turb} | Rendement isentropique de la turbine : ORC | 85% |
| η_{pump} | Rendement isentropique de la pompe : ORC | 70% |
| η_{comp} | Rendement isentropique du compresseur d'air : PEMFC | 85% |

4.3 Résultats de simulation pour la pile PEM

La pile à combustible fonctionnant dans les conditions du cas de base ci-dessus est simulée afin de comprendre son comportement pendant le fonctionnement.

Tableau 4-2 : Résultats de simulation de la pile à combustible PEM dans des conditions du cas de base.

| Terme | Valeur |
|--|---------------|
| Puissance électrique nette de la pile à combustible PEM | 1009.83 kW |
| Puissance de consommation du compresseur d'air | 165.25 kW |
| Puissance thermique nette de la pile à combustible PEM | 1280.59 kW |
| Tension de fonctionnement de la cellule | 0.649 V |
| Rendement électrique de la pile à combustible | 31.43 % |
| Débit molaire de consommation de l'hydrogène | 9.38 mol/s |
| Débit molaire de consommation de l'air dans la pile | 22.33 mol/s |

4.4 Résultats de simulation pour le cycle ORC

Chaque fluide a ses propres propriétés thermodynamiques qui sont calculées à l'aide du logiciel REFPROP [37] développé par le NIST. Ces propriétés sont regroupées dans le tableau (4.3) pour chaque point du cycle organique de Rankine. Nous supposons une déperdition thermique de 5K entre la source chaude et le fluide de refroidissement au point 1. La température de sortie du condenseur (le point 3) est de 298K.

Tableau 4-3 : Propriétés thermodynamiques des fluides organiques dans des conditions du cas de base [37].

| Fluide de travail | Etat | T (K) | P (kPa) | \dot{m} (kg/s) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) |
|-------------------|------|--------|---------|------------------|-----------|------------|
| RE347mcc | 1 | 353.15 | 416.33 | 6.6706 | 412.77 | 1.6389 |
| | 2 | 325.67 | 71.18 | 6.6706 | 393.39 | 1.6495 |
| | 3 | 298.00 | 71.18 | 6.6706 | 230.05 | 1.1051 |
| | 4 | 298.08 | 416.33 | 6.6706 | 230.25 | 1.1050 |
| R245fa | 1 | 353.15 | 789.31 | 5.3171 | 461.75 | 1.7797 |
| | 2 | 311.72 | 147.43 | 5.3171 | 435.72 | 1.7945 |
| | 3 | 298.00 | 147.43 | 5.3171 | 232.26 | 1.1128 |
| | 4 | 298.38 | 789.31 | 5.3171 | 232.94 | 1.1134 |
| R245ca | 1 | 353.15 | 571.22 | 4.8989 | 482.68 | 1.8412 |
| | 2 | 315.43 | 99.72 | 4.8989 | 454.44 | 1.8571 |
| | 3 | 298.00 | 99.72 | 4.8989 | 233.86 | 1.1185 |
| | 4 | 298.24 | 571.22 | 4.8989 | 234.35 | 1.1190 |
| R236fa | 1 | 353.15 | 1247.00 | 6.8485 | 408.89 | 1.6265 |
| | 2 | 313.32 | 270.58 | 6.8485 | 389.17 | 1.6377 |
| | 3 | 298.00 | 270.58 | 6.8485 | 230.23 | 1.1055 |
| | 4 | 298.69 | 1247.00 | 6.8485 | 231.25 | 1.1065 |
| R123 | 1 | 353.15 | 489.09 | 5.9777 | 428.89 | 1.6781 |
| | 2 | 310.61 | 90.85 | 5.9777 | 405.25 | 1.6917 |
| | 3 | 298.00 | 90.85 | 5.9777 | 224.99 | 1.0874 |
| | 4 | 298.25 | 489.09 | 5.9777 | 225.37 | 1.0878 |

Le tableau (4.4) montre les résultats de simulation du cycle ORC des cinq fluides organiques. On constate que le R236fa consomme beaucoup plus d'énergie lors du pompage que les autres fluides sélectionnés.

Tableau 4-4 : Résultats de simulation du cycle organique de Rankine dans les conditions du cas de base.

| Terme | RE347mcc | R245fa | R245ca | R236fa | R123 |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Puissance de la turbine (kW) | 129.32 | 138.40 | 138.35 | 135.07 | 141.30 |
| Puissance de la pompe (kW) | 2.34 | 3.64 | 2.38 | 7.01 | 2.32 |
| Puissance électrique nette du système (kW) | 1136.80 | 1144.59 | 1145.80 | 1137.89 | 1148.81 |
| Rendement thermique ORC (%) | 10.44 | 11.08 | 11.18 | 10.53 | 11.42 |
| Rendement électrique global (%) | 35.38 | 35.62 | 35.66 | 35.41 | 35.75 |

Le tableau (4.5) montre les changements provoqués par l'utilisation des différents fluides organiques dans le système hybride.

Nous constatons que le rendement du système électrique hybride au point de fonctionnement ($i = 0.6 A/cm^2$, conditions du cas de base) est améliorée d'environ 4% après l'incorporation de l'ORC. Le R123 apporte la plus grande amélioration tandis que le RE347mcc a la plus faible.

Tableau 4-5 : Comparaisons de performances entre le système hybride et la pile à combustible PEM dans des conditions du cas de base.

| Fluide de travail | RE347mcc | R245fa | R245ca | R236fa | R123 |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|-------|
| η_{fc} (%) | 31.43 | 31.43 | 31.43 | 31.43 | 31.43 |
| η_{elec} (%) | 35.38 | 35.62 | 35.66 | 35.41 | 35.75 |
| Amélioration (%) | 3.95 | 4.19 | 4.23 | 3.98 | 4.32 |

4.5 Analyse paramétrique

Plusieurs paramètres clefs peuvent affecter les performances du système proposé, tels que la densité du courant, le débit du combustible, la température et la pression de fonctionnement de la pile à combustible. Pour étudier ces effets, l'analyse paramétrique consiste à modifier un paramètre tout en gardant les autres constants.

4.6 Effet de variation de la densité du courant

Les figures 4.1 et 4.2 montrent les variations de la tension et de la puissance d'une cellule unitaire et celles de l'ensemble des cellules (pile) en fonction de la densité du courant délivré. Il s'ensuit qu'avec une augmentation de la densité du courant, la tension de la cellule diminue d'abord rapidement en raison des pertes irréversibles par la polarisation d'activation. Ensuite, elle décroît progressivement suivant une régression linéaire sur un intervalle due à la polarisation ohmique. Enfin, la courbe de tension subit une autre descente abrupte en raison des pertes de surtension de concentration. D'autre part, la puissance à la sortie de la pile augmente au début puis diminue après avoir atteint la valeur maximale de 2090.2 kW pour la pile.

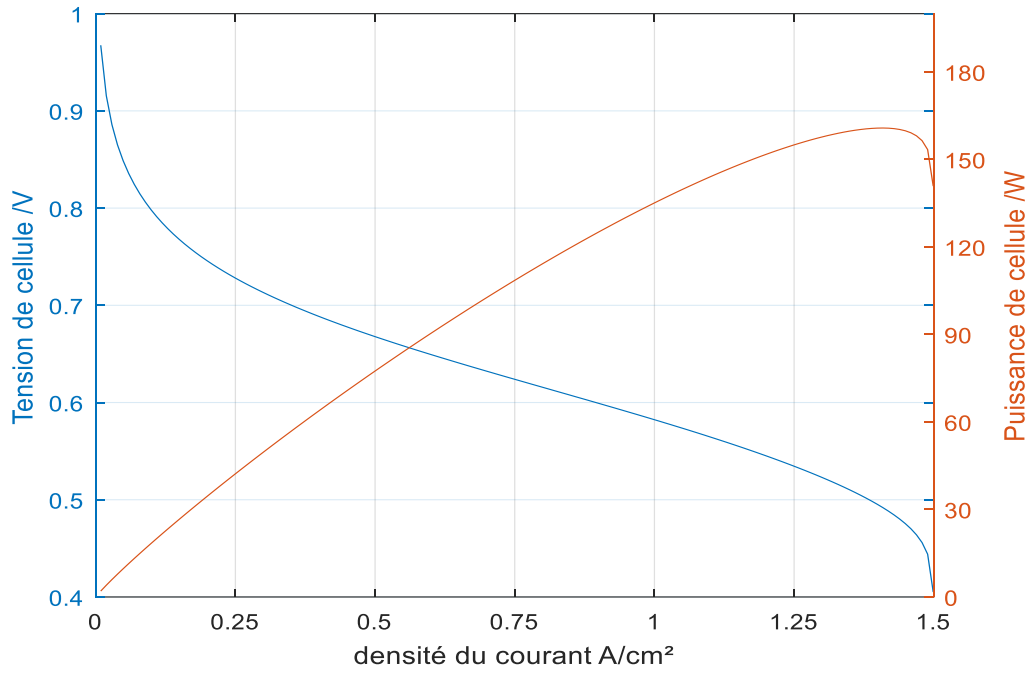


Figure 4-1 : Courbes de polarisation et de puissance d'une cellule en fonction de la densité du courant.

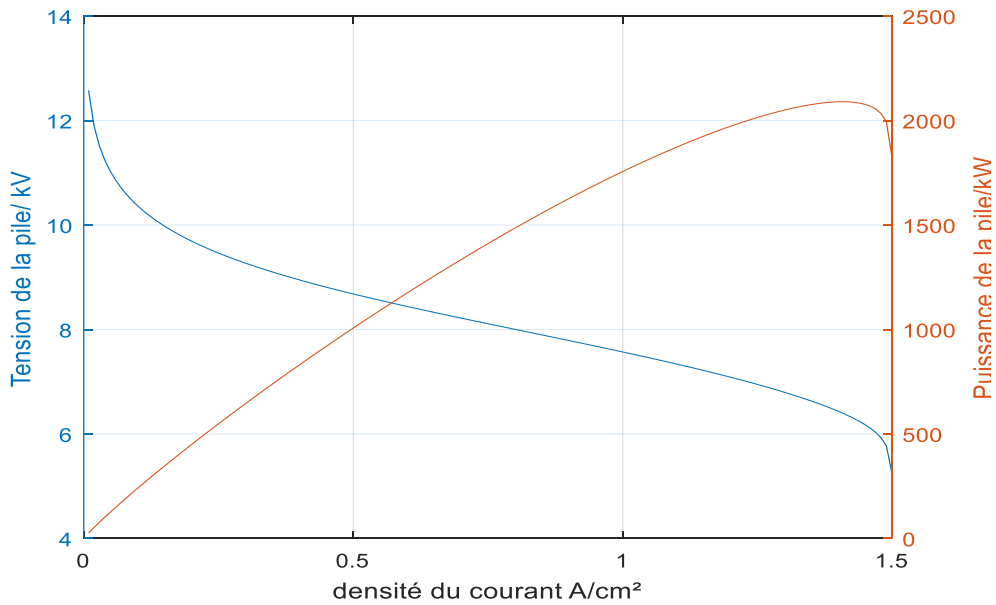


Figure 4-2 : Courbes de polarisation et de puissance de la pile à combustible PEM en fonction de la densité du courant.

La figure 4.3 représente la puissance thermique nette de la pile qui évolue en fonction de la densité du courant. On constate que cette puissance augmente avec l'augmentation de la densité. Ceci est dû à la chaleur dégagée suite à la réaction électrochimique.

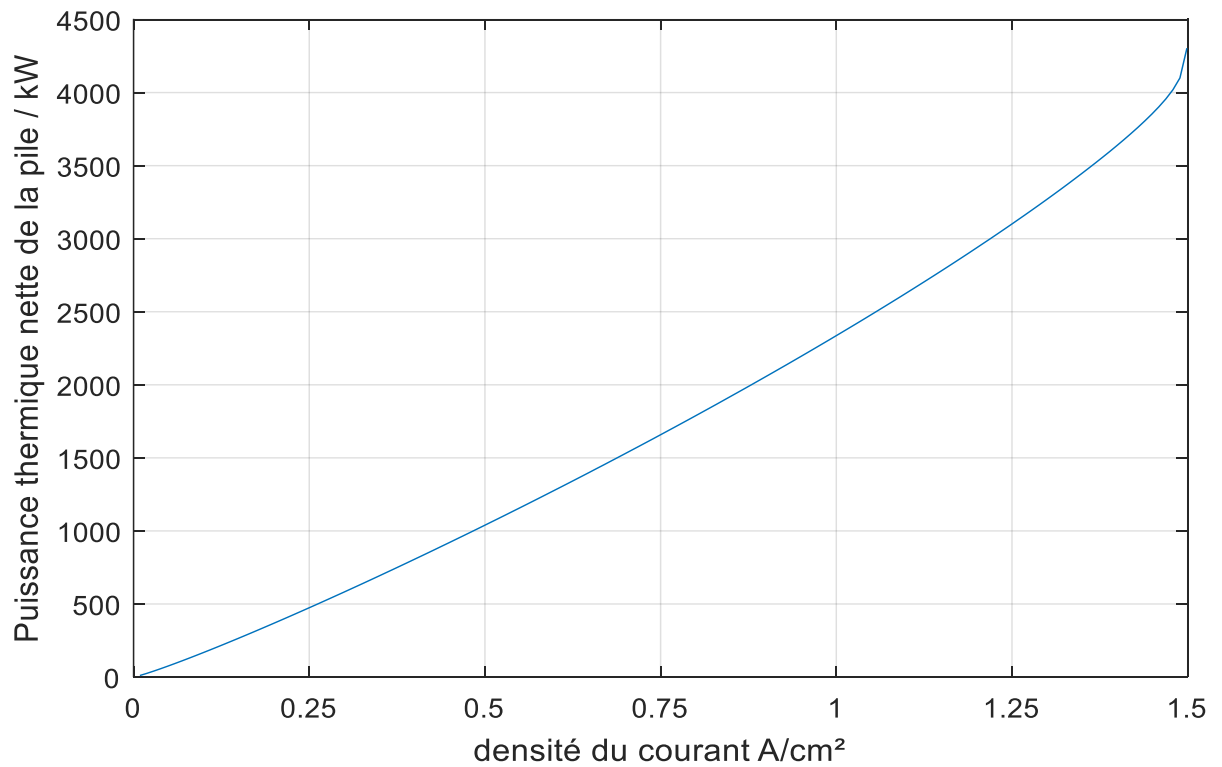


Figure 4-3 : Variation de la puissance thermique nette de la pile à combustible PEM en fonction de la densité du courant.

Le rendement électrique du système ORC en fonction de la densité du courant pour deux fluides organiques R123 et RE347mcc est montré dans la figure (4.4). Le R123 possède un meilleur rendement que le RE347mcc. Les deux fluides présentent le même comportement.

Sachant que l'augmentation de la densité du courant électrique entraîne une augmentation de la chaleur résiduelle de la pile à combustible, et comme le fluide organique est utilisé pour transporter cette chaleur, ceci provoque une amélioration de la puissance nette de la turbine d'où une augmentation du rendement du système ORC lorsque la densité du courant augmente.

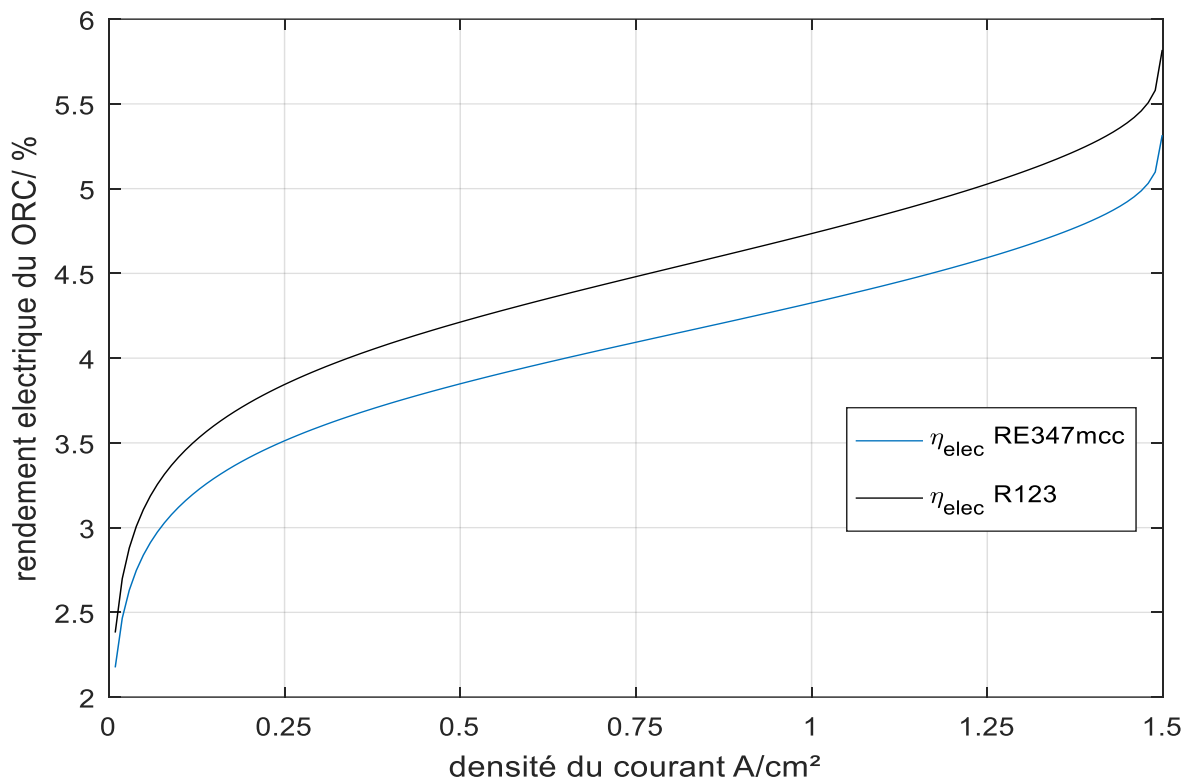


Figure 4-4 : Variation du rendement électrique du ORC en fonction de la densité du courant.

4.7 Relation entre le rendement électrique globale et la puissance nette à la sortie du système hybride

À partir de la figure (4.5), le rendement électrique global diminue avec une augmentation de la puissance nette de sortie jusqu'à arriver à la puissance nette maximale.

On constate un même comportement pour les deux fluides de travail. Le R123 permet d'avoir des performances importantes comparativement à celle de RE347mcc. La puissance maximale atteinte lorsqu'on utilise le R123 est de 2102.2 kW, alors qu'elle est de 2067.3 kW lorsque le RE347mcc est utilisé comme fluide travail.

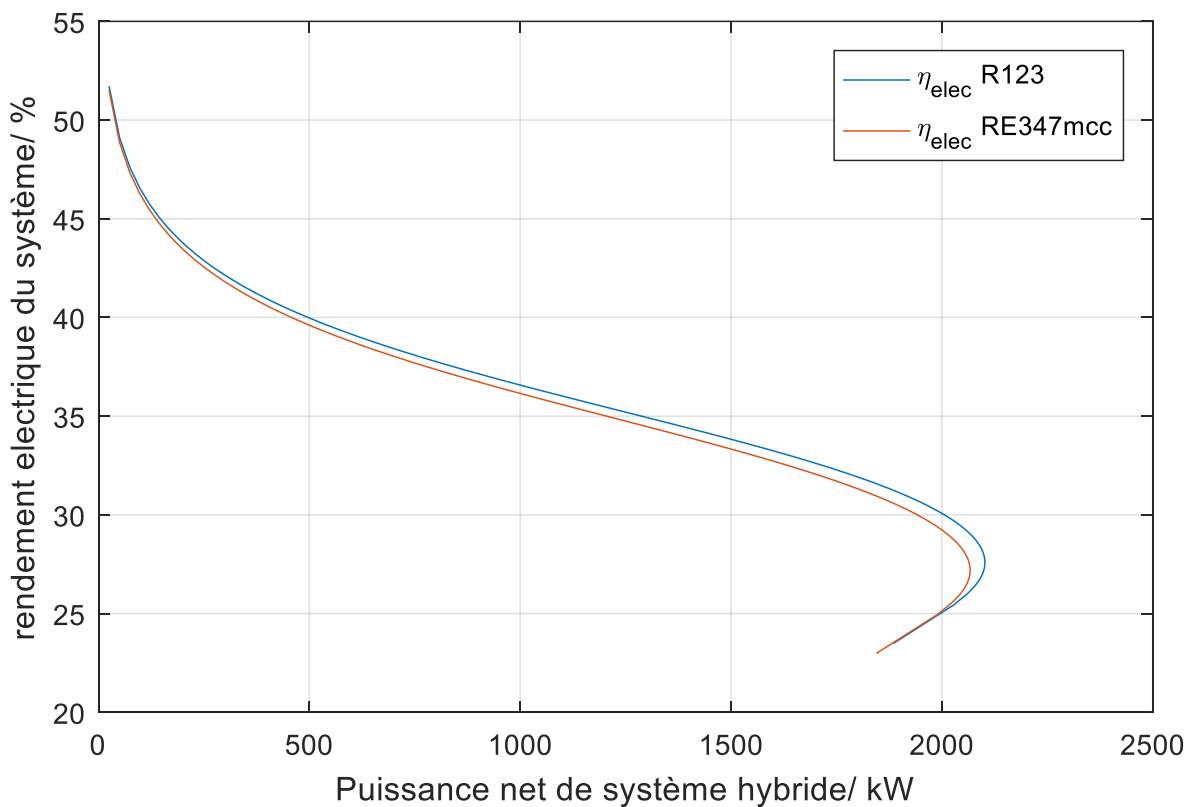


Figure 4-5 : Variation du rendement électrique global en fonction de la puissance nette du système.

4.8 Effet de la variation du débit de combustible

La figure (4.6) présente l'effet du débit sur la puissance nette à la sortie de la pile à combustible PEM et la puissance nette à la sortie du système ORC avec différents fluides de travail. Nous notons que la puissance nette à la sortie de la PEMFC augmente à mesure que le débit augmente jusqu'à atteindre la valeur maximale de 1707.6 KW où elle commence à diminuer à cause des surtensions de concentration. La puissance nette requise doit augmenter si la charge externe augmente. Cela implique qu'un débit plus élevé est nécessaire pour que plus d'électrons soient transférés, produisant ainsi un courant électrique plus important.

Il est également clair que la puissance nette à la sortie du système ORC augmente parallèlement à une augmentation du débit de carburant avec les deux fluides de travail. En effet, la pile à combustible génère plus d'électricité, et à son tour, la quantité de chaleur résiduelle produite augmente avec l'augmentation du débit. Pour le même débit, le R123 a une puissance nette à la sortie du système ORC plus élevée que le RE347mcc.

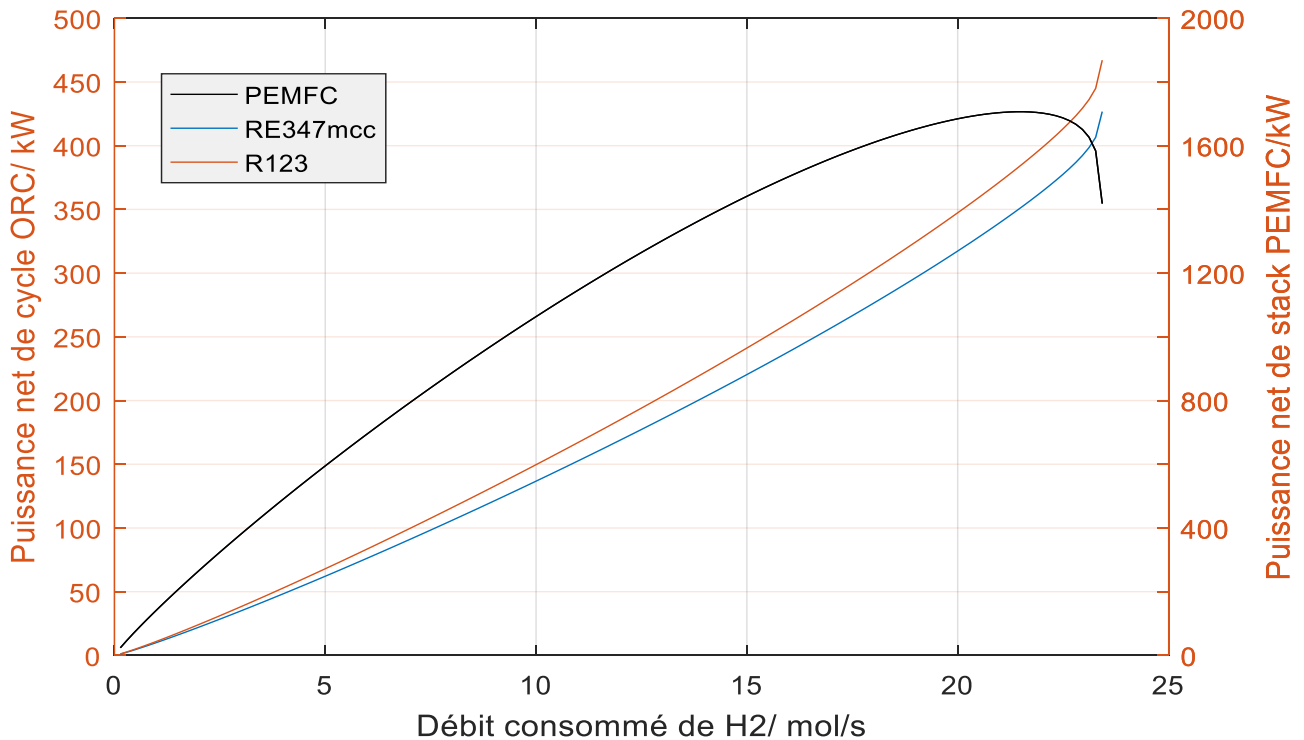


Figure 4-6 : Effet du débit sur la puissance à la sortie des composants du système.

La variation de la puissance nette à la sortie du système hybride en fonction de la variation du débit est montrée dans la figure (4.7). On peut constater que la puissance à la sortie augmente pour les deux fluides lorsque le débit augmente. On constate un faible écart entre les deux courbes pour des faibles débits. L'écart devient plus significatif pour des débits supérieurs à 13 mol/s. La puissance maximale à la sortie atteinte par le système hybride est supérieure à celle générée par la pile à combustible PEM, en raison de la contribution du système ORC à la récupération de la chaleur perdue. Nous remarquons qu'avec un débit de 22.49 mol/s, l'utilisation du RE347mcc permet de produire 2065 KW tandis que l'utilisation du R123 permet de produire 2100 KW.

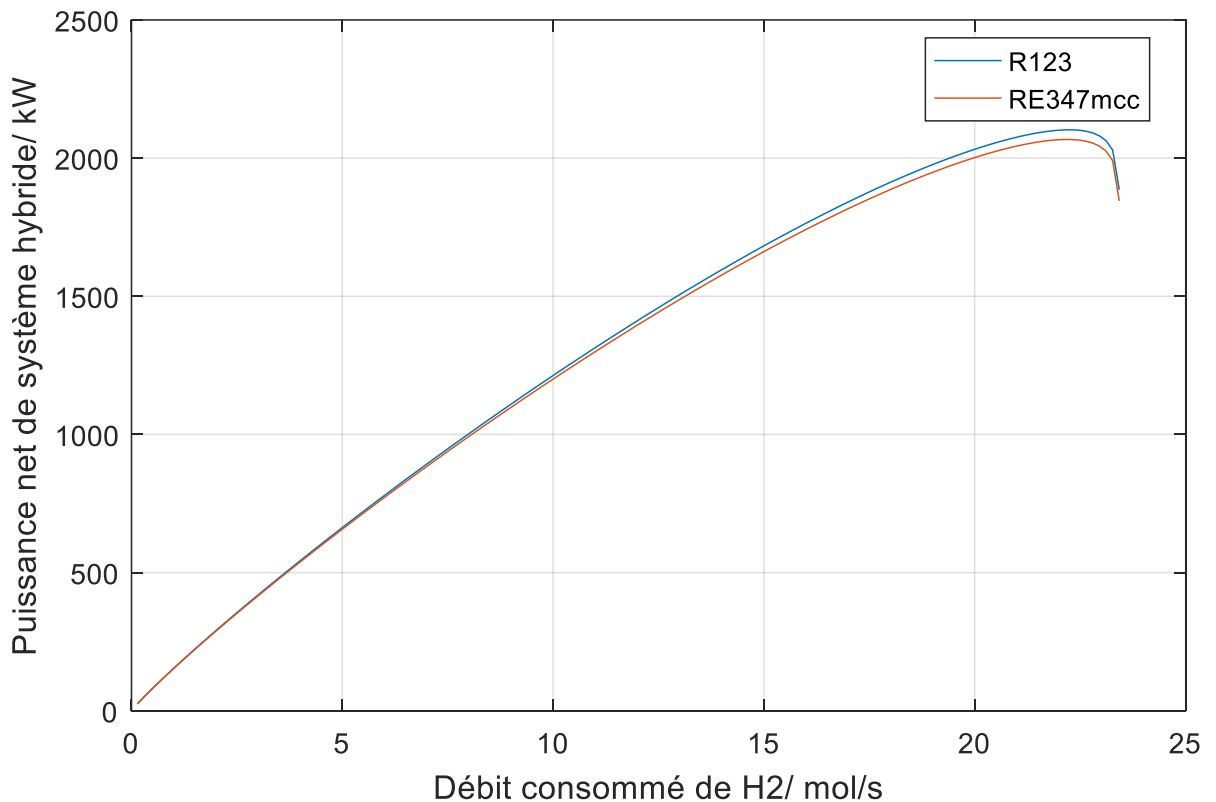


Figure 4-7 : Effet du débit sur la puissance nette à la sortie du système hybride.

L'effet de la variation du débit de combustible sur les performances du système hybride est présenté dans la figure (4.8). Le rendement électrique globale ainsi que celui de la pile à combustible PEM diminuent avec l'augmentation du débit de combustible. De plus, l'écart entre les courbes des rendements électriques des deux fluides de travail sélectionnés présentent une légère différence. La diminution du rendement électrique est causée par l'augmentation de la puissance consommée par le compresseur, car une augmentation du débit du carburant nécessite une augmentation similaire pour le débit du comburant ce qui implique une puissance de compression plus élevée.

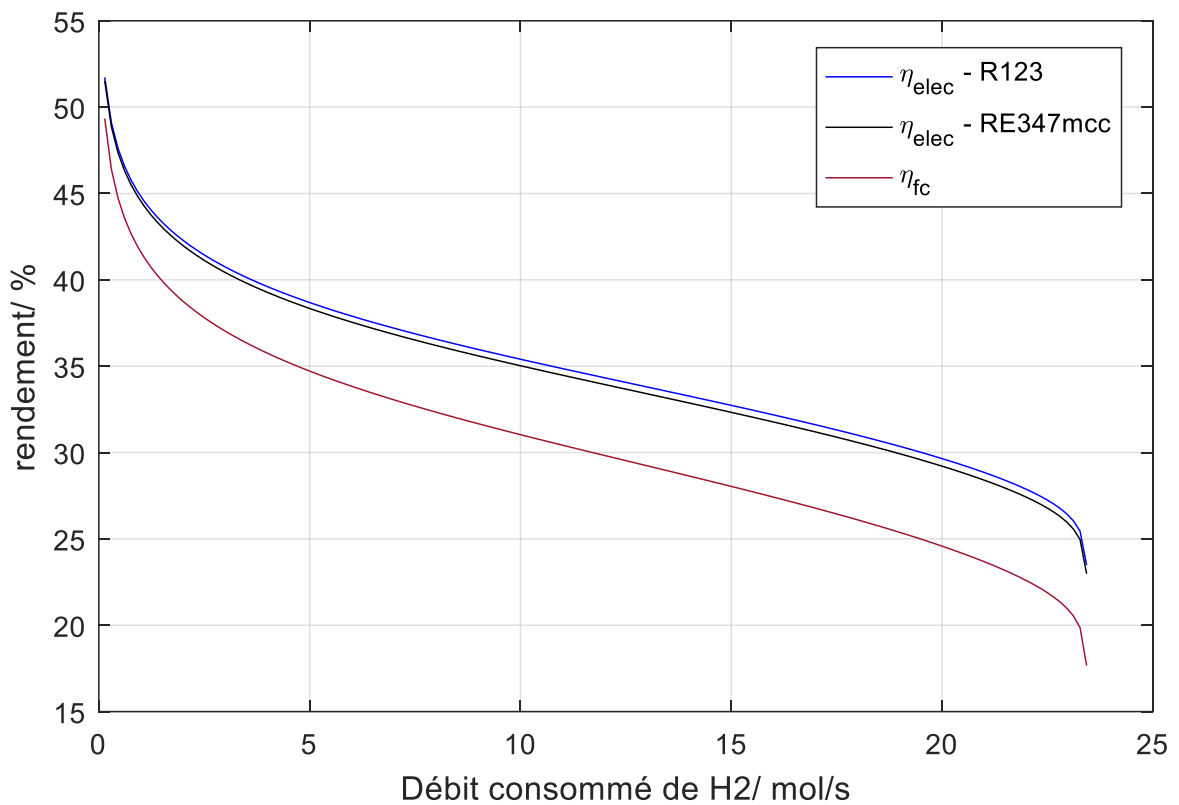


Figure 4-8 : Effet du débit sur la performance du système.

4.9 Effet de la variation de la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM

La figure (4.9) montre un comportement inverse entre la puissance thermique et la puissance électrique à la sortie de la pile à combustible. On peut constater qu'avec l'augmentation de la pression, la puissance nette de la pile augmente au début, ensuite elle subit une diminution après avoir passée par une valeur maximale. Il est à signaler que l'augmentation de la pression de fonctionnement entraîne une amélioration de la diffusivité des gaz réactifs ce qui explique l'amélioration de la puissance électrique de la pile à combustible au début. Pour une pression de fonctionnement plus élevée, le compresseur d'air doit consommer beaucoup plus d'énergie ce qui cause la décroissance de la puissance électrique. En revanche, la puissance nette du système ORC décroît au début ensuite elle augmente pour des pressions plus élevées. Il est connu que l'augmentation de la pression de fonctionnement provoque une augmentation de la température à la sortie du compresseur conduisant à une diminution de la chaleur sensible, d'où une puissance thermique nette plus élevée.

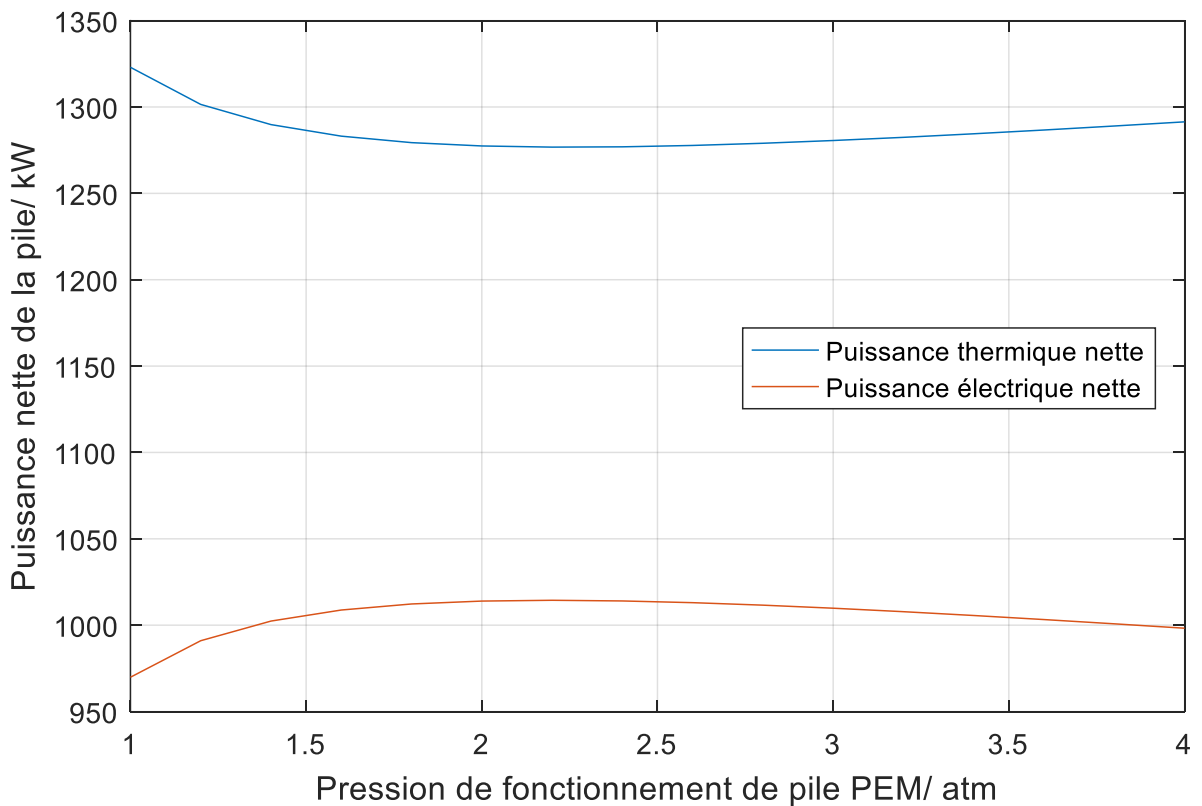


Figure 4-9 : Variation de la puissance nette à la sortie du système pile PEM en fonction de la pression de fonctionnement.

La figure (4.10) indique que la puissance électrique nette à la sortie du système ORC diminue d'abord, puis augmente avec l'augmentation de la pression de fonctionnement. Il est connu qu'avec l'augmentation de la pression de fonctionnement, la cellule peut fonctionner à une tension plus élevée et conduire à une augmentation de quantité de chaleur produite par la pile. Cette chaleur est récupérée pour la génération de l'électricité par le système ORC.

On remarque que l'ORC avec R123 à une puissance nette à la sortie plus élevée qu'avec le RE347mcc.

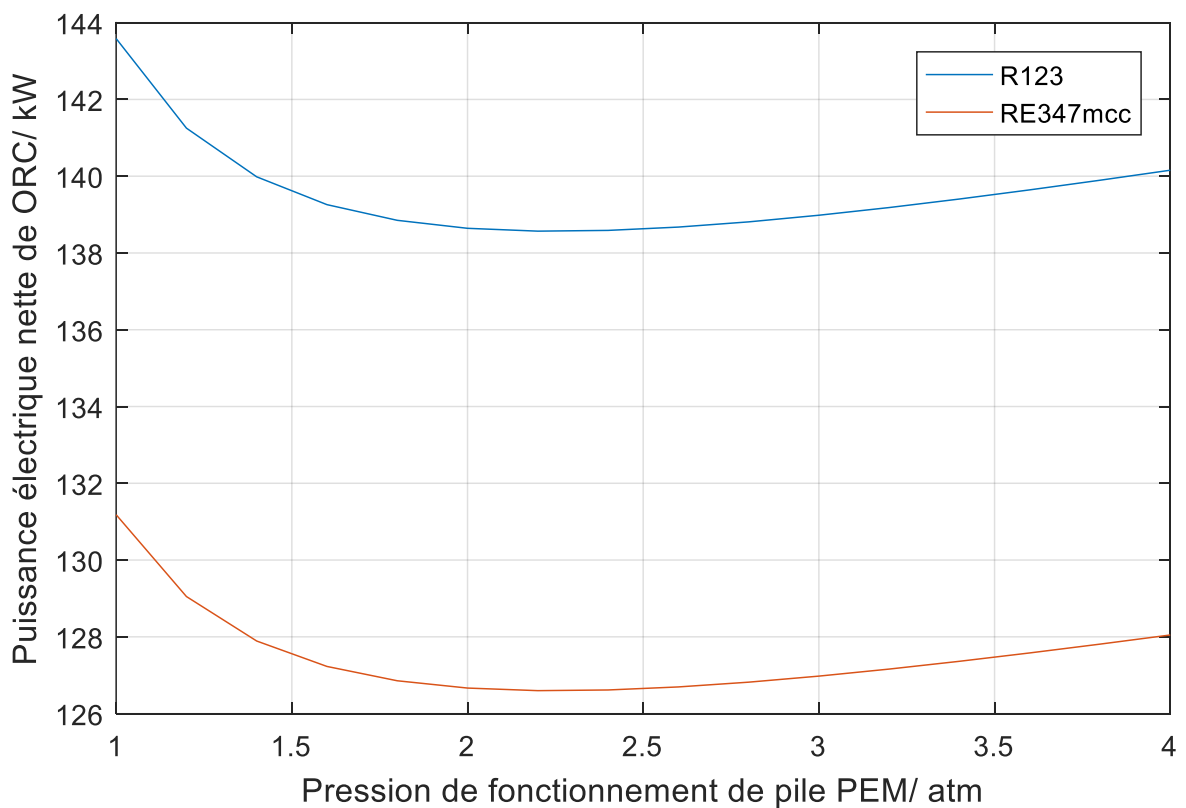


Figure 4-10 : Variation de la puissance nette à la sortie de l'ORC en fonction de la pression de fonctionnement.

La figure (4.11) montre l'effet de la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM sur la puissance nette à la sortie du système hybride. Par l'augmentation de la pression, cette puissance augmente au début, puis diminue après avoir atteint la valeur maximale de 1153KW pour R123 et de 1141KW pour RE347mcc. L'augmentation de la pression de fonctionnement permet la pile de fonctionner à haute tension ce qui provoque une augmentation de la puissance électrique nette du système hybride. Cependant, la pression de fonctionnement élevée nécessite plus de puissance de compression, d'où une décroissance de la puissance nette pour des pressions plus importantes.

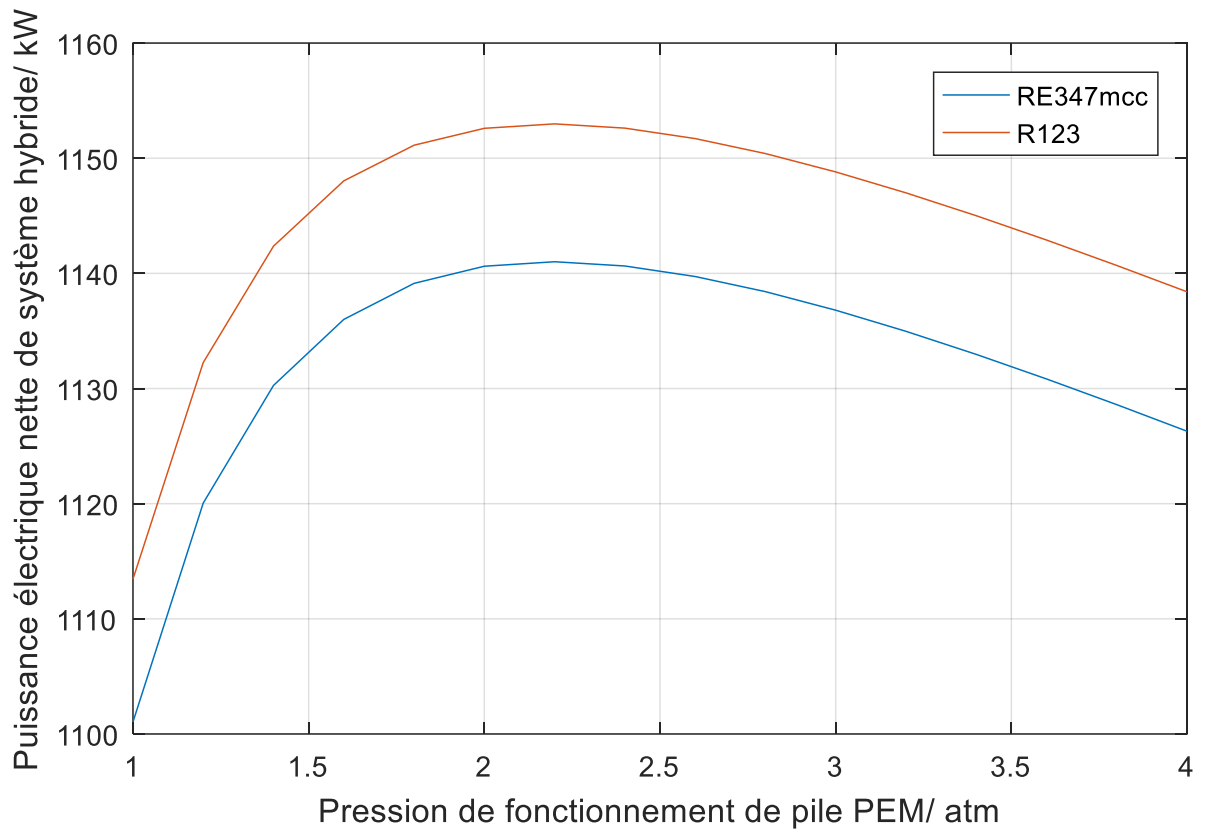


Figure 4-11 : Variation de la puissance électrique nette du système hybride en fonction de la pression de fonctionnement.

La figure (4.12) révèle l'effet de la pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM sur les rendements de la pile et du système proposé. Lorsque la pression de fonctionnement augmente, le rendement électrique global et le rendement électrique du système de la pile à combustible augmentent, puis diminuent. Il a la même tendance avec la puissance électrique nette de sortie de la pile.

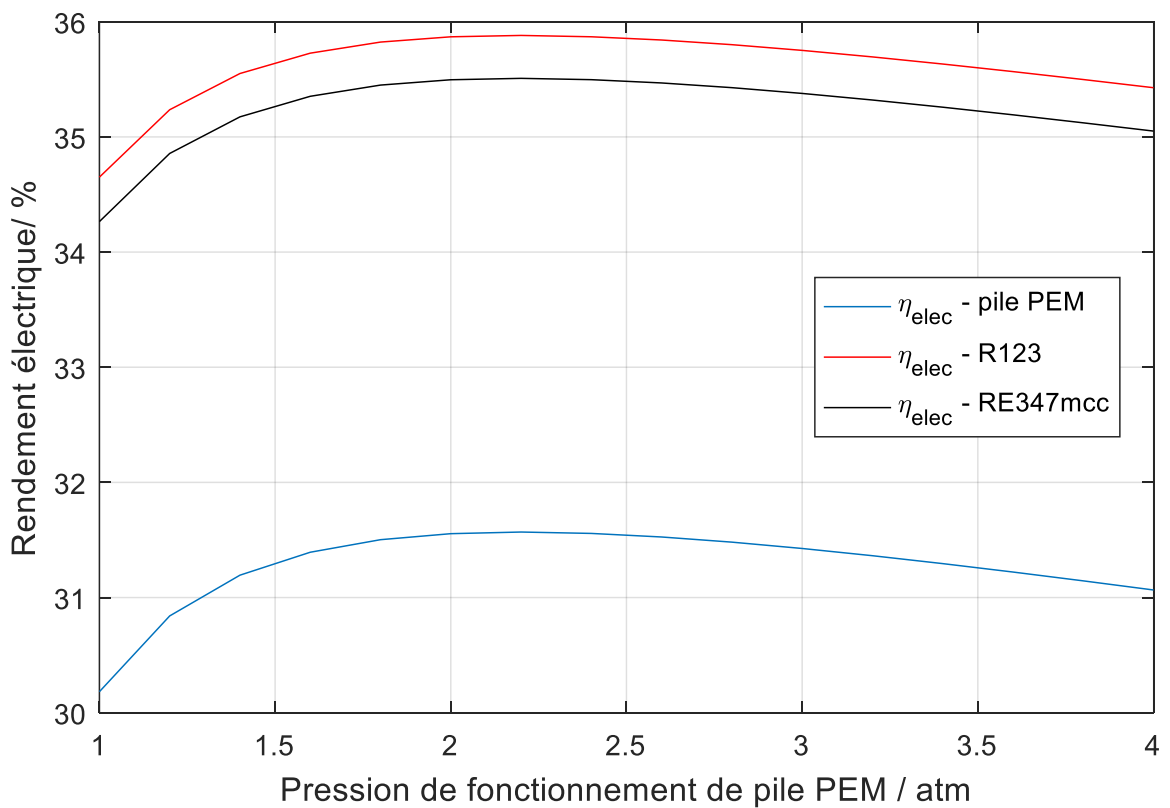


Figure 4-12 : Variation du rendement électrique en fonction de la pression de fonctionnement.

4.10 Effet de la variation de la température de fonctionnement de la pile à combustible PEM

La figure (4.13) illustre que l'effet de la variation de la température de fonctionnement est moins apparent sur la puissance électrique nette que sur la puissance thermique nette. La puissance thermique nette diminue linéairement lorsque la température augmente. Elle débute par une valeur de 1311,2 kW pour une température de 343,15K. La valeur finale est de 1267 kW pour une température de 368.15K. D'autre part, la courbe de la puissance électrique nette passe d'une valeur maximale de 1010.3 kW (pour une température de 348.15K) à une valeur minimale de 1004.3 kW (pour une température de 368.15K).

Pour la PEMFC, une élévation de la température de fonctionnement entraîne une déshydratation de la membrane et une réduction du flux d'électrons.

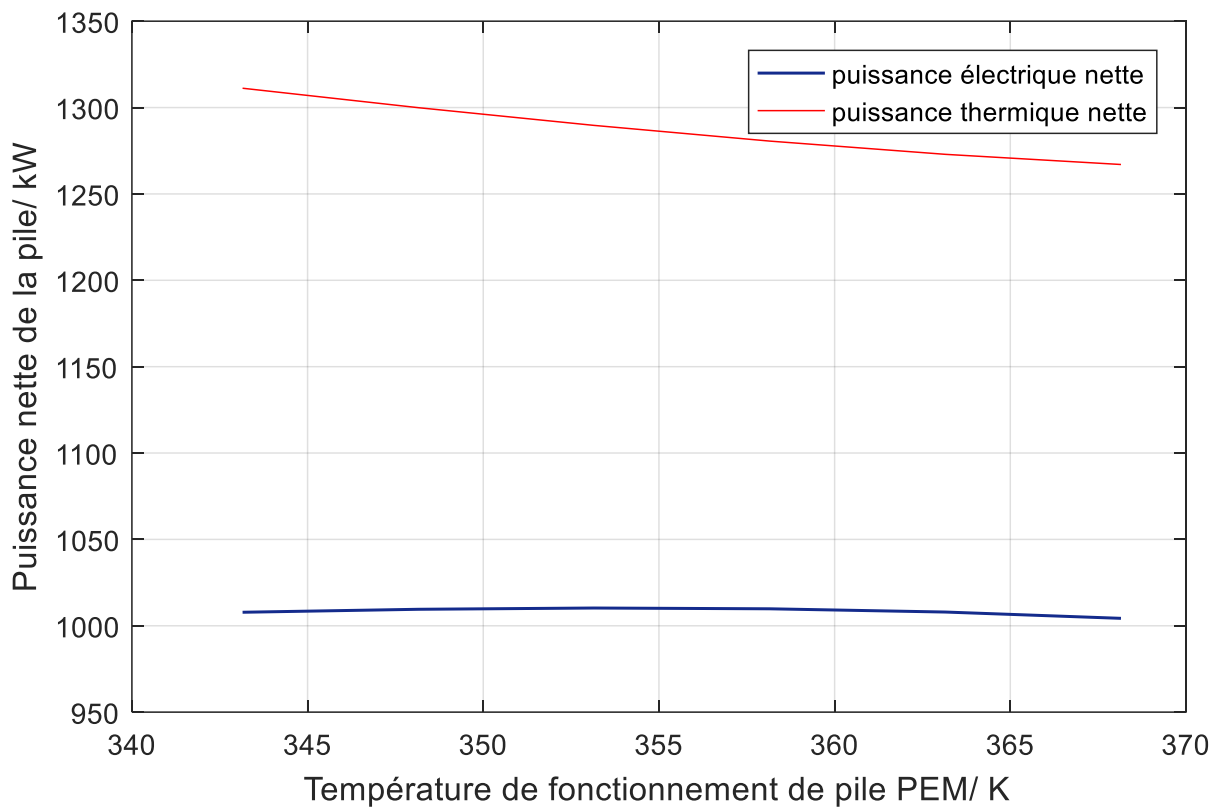


Figure 4-13 : Variation de la puissance nette de sortie du système pile PEM en fonction de la température de fonctionnement.

La figure (4.14) montre que la puissance électrique nette de l'ORC augmente avec l'augmentation de la température de fonctionnement.

Avec le R123 comme fluide de travail, nous obtenons une puissance à la sortie plus élevée que pour le cas du RE347mcc. Le décalage entre les courbes de la puissance nette dans le cas des deux fluides augmente à mesure que la température augmente. Il est évident que nous obtenons une puissance maximale à des températures plus élevées car plus d'énergie calorifique est transférée au fluide organique et donc le travail produit par la turbine augmente.

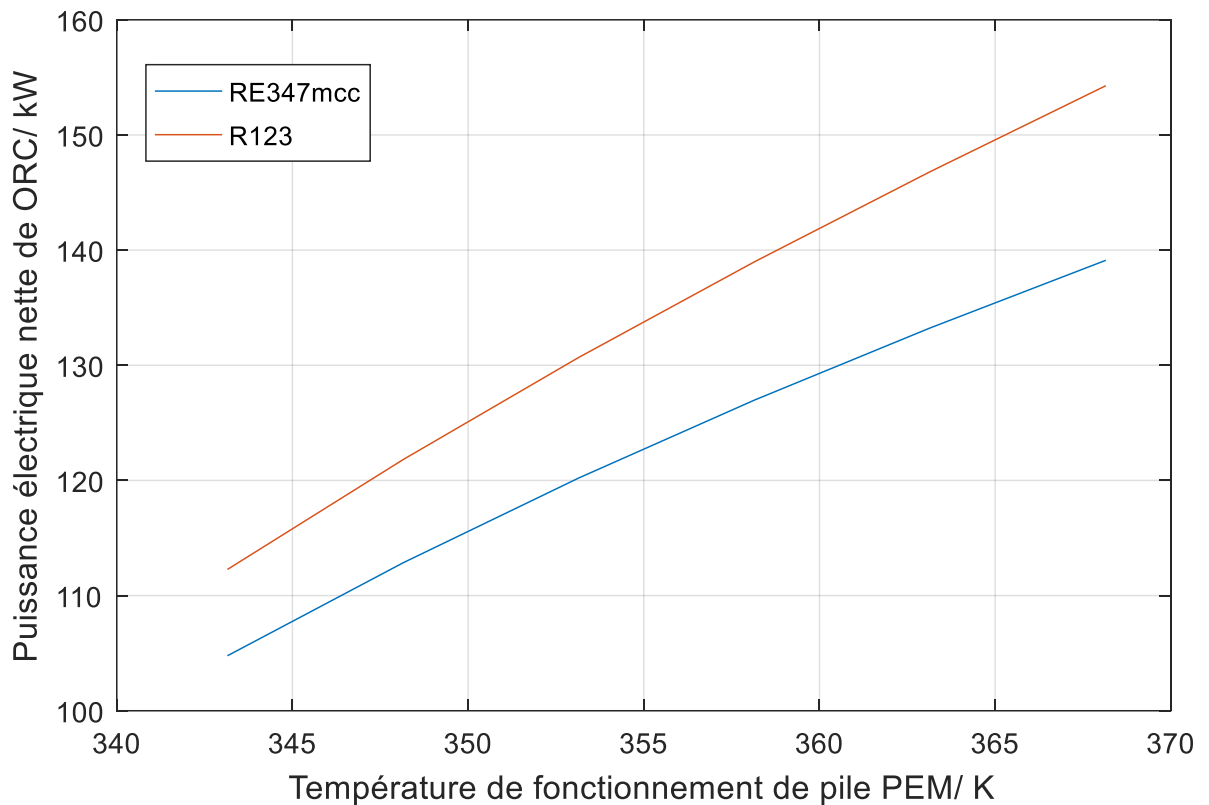


Figure 4-14 : Variation de la puissance nette de sortie de l'ORC en fonction de la température de fonctionnement.

Dans la figure (4.15), le rendement électrique de la pile à combustible PEM a une légère augmentation puis diminue après avoir atteint une valeur maximale. Cependant, le rendement électrique du système hybride augmente continuellement à mesure que la température augmente. Le système utilisant le R123 fonctionne mieux que celui utilisant le RE347mcc.

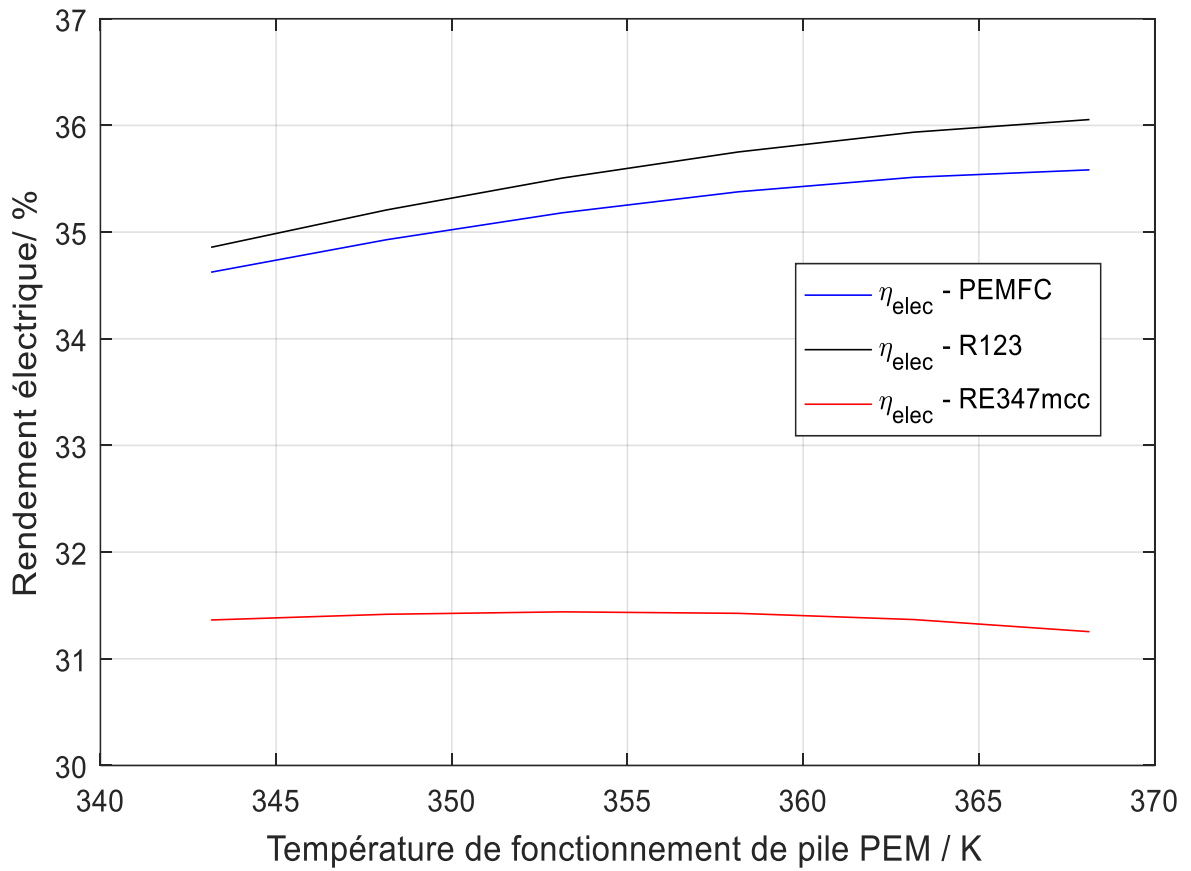


Figure 4-15 : Variation du rendement électrique en fonction de la température de fonctionnement.

La figure (4.16) indique que le rendement thermique d'ORC accroît avec l'augmentation de la température de fonctionnement. Le système en utilisant le R123 est plus performant que celui avec le RE347mcc pour récupérer la chaleur résiduelle de la pile à combustible, en obtenant un meilleur rendement thermique. A hautes températures le fluide organique transport plus d'énergie calorifique qui implique une amélioration du rendement.

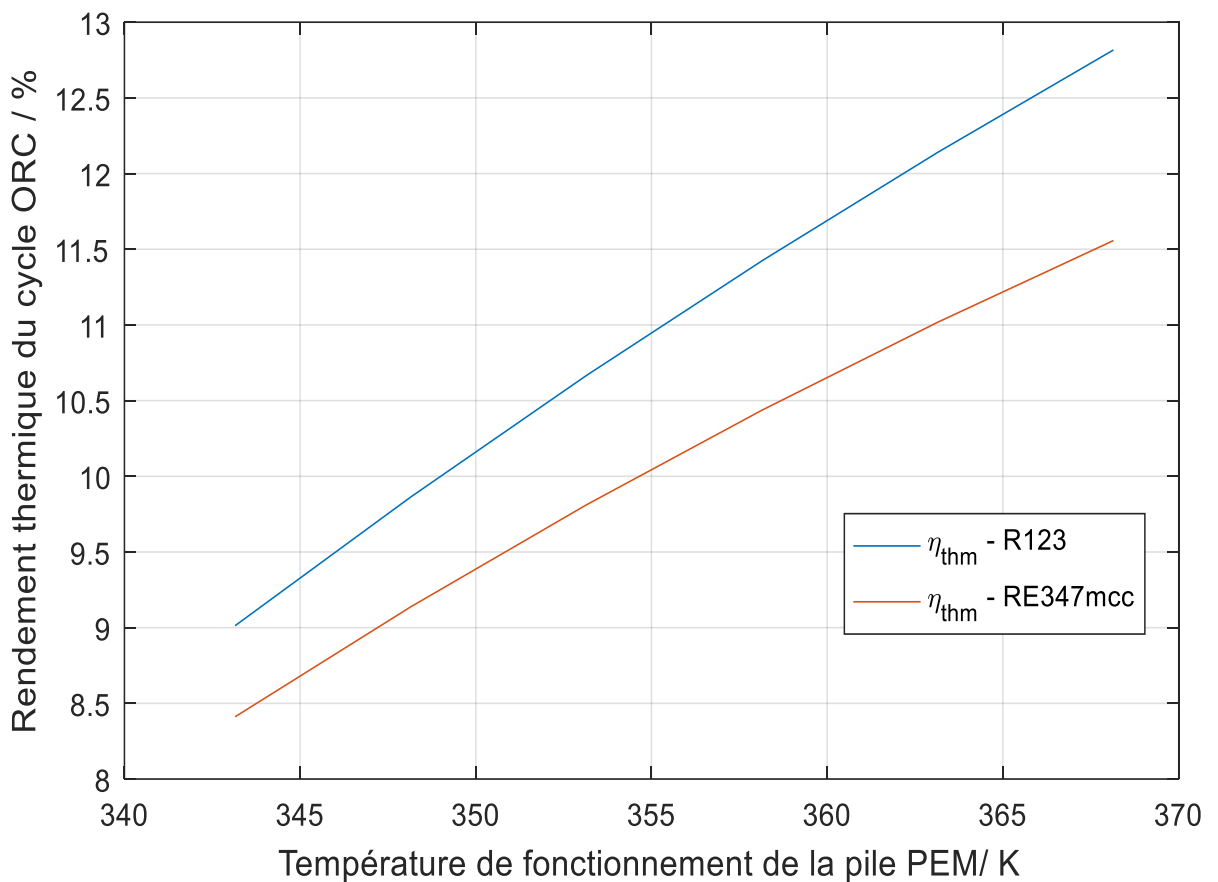


Figure 4-16 : Variation du rendement thermique en fonction de la température de fonctionnement.

La figure (4.17) montre la variation de la tension en fonction de la température de fonctionnement. On constate que la cellule produit une tension maximale de 0.65 V pour une température de 353.15 K. Cette valeur de tension peut être adopter comme étant une tension de fonctionnement acceptable pour des applications stationnaires des piles à combustible. Dans la littérature, il est recommandé de choisir une tension de fonctionnement compris entre 0.6 et 0.8 V.

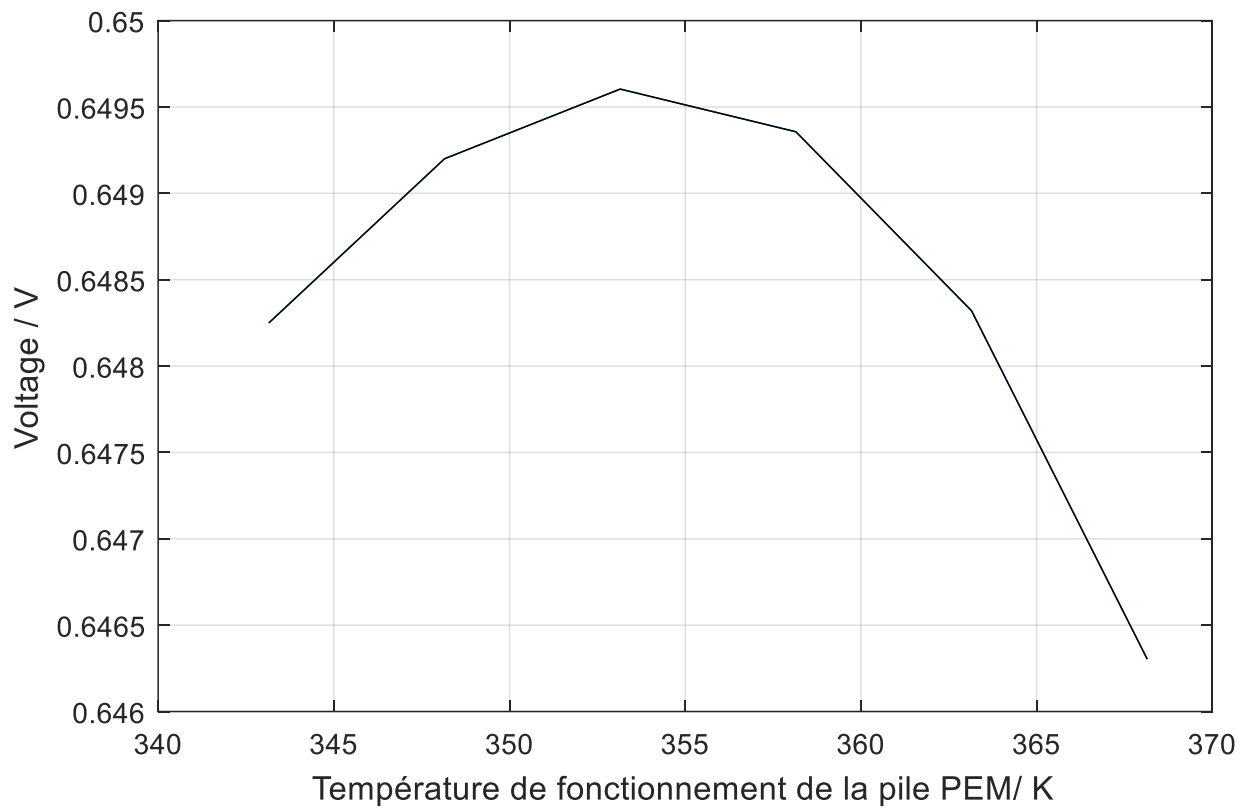


Figure 4-17 : Variation de la tension d’une cellule en fonction de la température de fonctionnement.

- **Relation entre la puissance électrique nette de la pile et son rendement électrique**

D'après la figure (4.18), la puissance électrique nette augmente au début avec l'augmentation du rendement de la pile à combustible, puis elle diminue après avoir atteint une valeur maximale de 1705 kW avec un rendement de 22,75 %. Cela montre que l'obtention d'une puissance à la sortie élevée dans une PEMFC se fait au détriment du rendement électrique de la pile et vice versa.

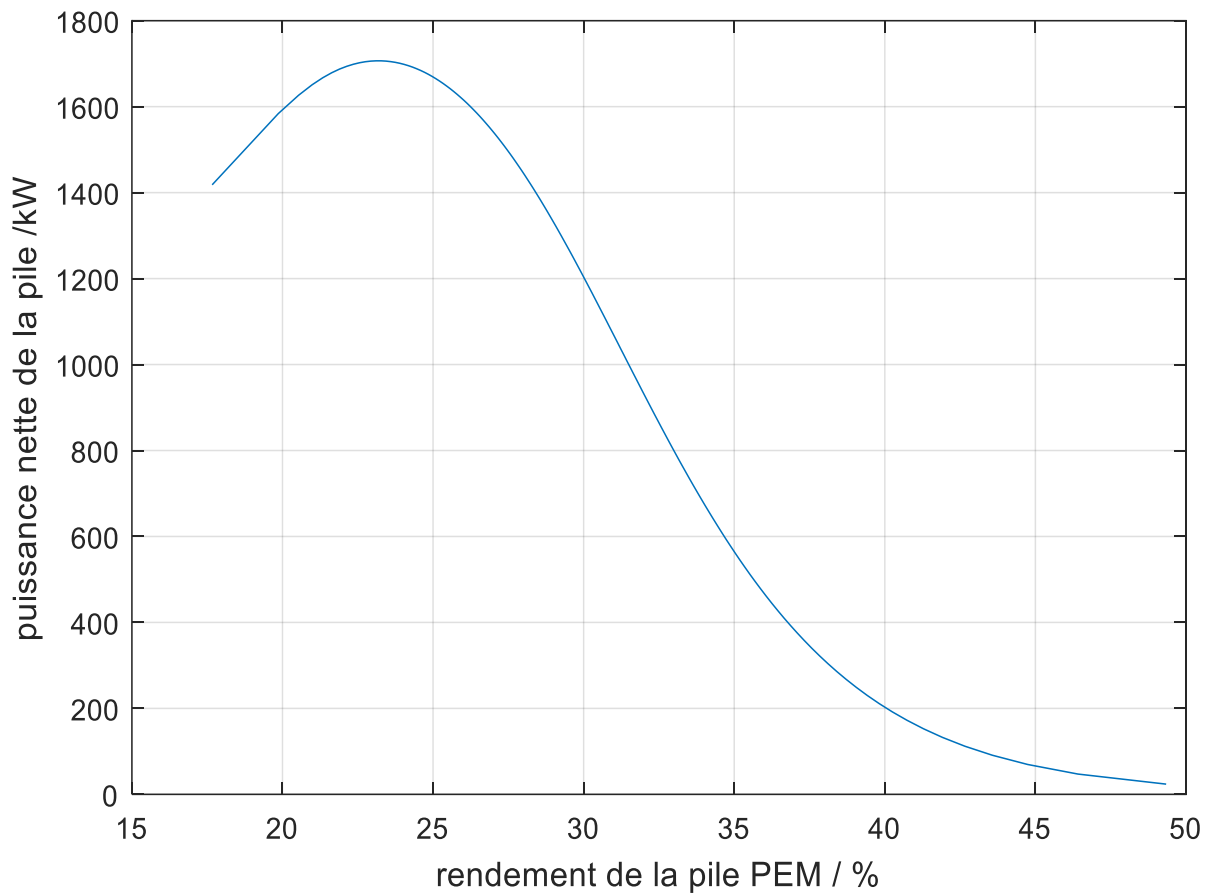


Figure 4-18 : Variation de la puissance électrique nette à la sortie de la pile à combustible PEM en fonction du rendement électrique.

- **Effet de la concentration molaire de H₂ dans la pile PEM sur son rendement électrique**

La figure (4.19) présente l'influence de la concentration de l'hydrogène dans la PEMFC sur le rendement électrique de cette dernière. Une augmentation de la concentration de l'hydrogène dans la pile entraîne une augmentation du rendement électrique. Il y a plus de molécules d'hydrogène présent pour réagir dans la pile à combustible qui génèrent de l'électricité.

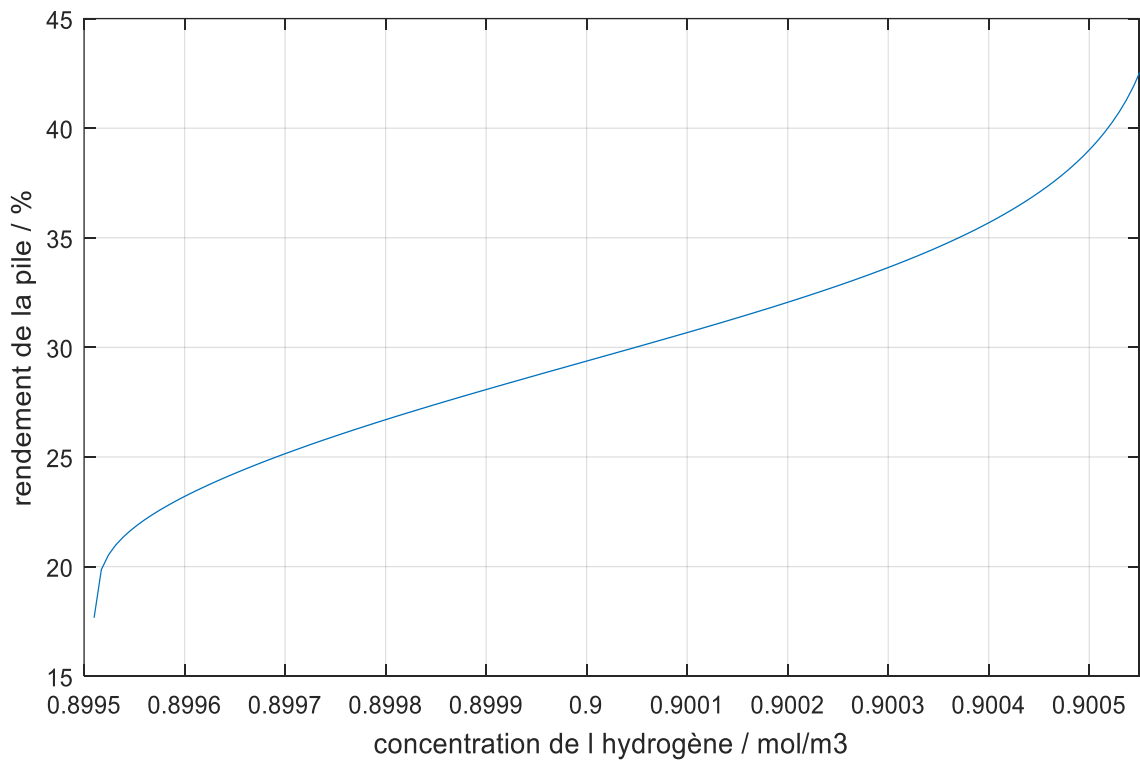


Figure 4-19 : Variation du rendement électrique de la pile en fonction de la concentration du carburant H₂.

4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysés les résultats de simulation de la PEMFC, du cycle ORC et du système hybride. L'analyse paramétrique a été effectuée et les conditions opératoires de la pile et du système ont été spécifiées. L'analyse des résultats obtenus montre que le système hybride proposé est réaliste pour des applications pratiques dans la production d'électricité et la récupération de la chaleur résiduelle des piles à combustible PEM.

On a conclu que les variations de la température et de la pression de fonctionnement de la pile à combustible ainsi que de la densité du courant et du débit de carburant ont des effets considérables sur le comportement du système hybride.

Conclusion générale

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude d'un système hybride composé d'une PEMFC à basse température et d'un système ORC permettant de récupérer la chaleur résiduelle de cette dernière. Nous avons élaboré un programme sous MATLAB qui nous permet de modéliser le système hybride et de calculer ces performances. Nous avons constaté que plusieurs paramètres clefs affectent considérablement les performances du système hybride.

Les résultats obtenus montrent que le rendement électrique global du système hybride peut s'améliorer d'environ 4 % par rapport à celui de la PEMFC sans récupération de la chaleur perdue. Nous avons constaté que le système fonctionne mieux à un courant électrique plus élevé et également à des débits de carburant élevés. Cependant, le rendement électrique diminue à haut débit de carburant.

La pression de fonctionnement de la PEMFC joue un rôle important dans les performances du système hybride. Nous avons remarqué qu'il existe une valeur de rendement électrique maximale pour une pression spécifique. Nous concluons qu'une pression de fonctionnement optimale doit être utilisée pour obtenir les meilleures performances et une durabilité du système.

De plus, on a constaté que concernant les fluides de travail ORC choisis, les résultats étaient similaires, bien que le R123 offre globalement de meilleures performances en tant que fluide de récupération de chaleur. Nous pouvons conclure également que si ce système est mis en œuvre, le choix du fluide organique devrait être basé sur des facteurs environnementaux et des aspects économiques, car le changement du fluide organique a peu d'impact sur le rendement global du système. Dans une plus large mesure, l'objectif principal de notre recherche (récupérer la chaleur perdue par la PEMFC à l'aide d'un système ORC) est un succès car une amélioration du rendement globale a été accomplie.

En perspective, il sera intéressant d'effectuer un travail de suivi sur l'optimisation des paramètres de performance de ce système hybride. La chaleur rejetée par le système ORC dans le condenseur peut être récupérée pour servir au chauffage d'eau à usage domestique.

Bibliographie

- [1] Heat, C. (2008). *Power: Evaluating the benefits of greater global investment*–IEA, Paris.
- [2] Radulescu, M. N. (2006). *Systèmes à cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vaporeformage externe*, Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- [3] Larminie, J., et al. (2003). *Fuel cell systems explained*, J. Wiley Chichester, UK.
- [4] Chen, X., et al. (2011). "An available method exploiting the waste heat in a proton exchange membrane fuel cell system." *international journal of hydrogen energy* **36**(10): 6099-6104.
- [5] Warshay, M., et al. (1997). *The NASA fuel cell upgrade program for the space shuttle orbiter. IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*, IEEE.
- [6] Kandlikar, S. G. and Z. Lu (2009). "Thermal management issues in a PEMFC stack–A brief review of current status." *Applied Thermal Engineering* **29**(7): 1276-1280.
- [7] Haider, R., et al. (2021). "High temperature proton exchange membrane fuel cells: Progress in advanced materials and key technologies." *Chemical Society Reviews* **50**(2): 1138-1187.
- [8] Schenk, A., et al. (2016). "Phosphoric Acid Tolerant Oxygen Reduction Reaction Catalysts for High-Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cells." *ECS Transactions* **75**(14): 939.
- [9] You, D. J., et al. (2018). "Pd core-shell alloy catalysts for high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells: Effect of the core composition on the activity towards oxygen reduction reactions." *Applied Catalysis A: General* **562**: 250-257.
- [10] Yin, G. and J. Zhang (2014). *Rotating electrode methods and oxygen reduction electrocatalysts*, Elsevier.
- [11] Zhang, Q., et al. (2017). "High performance and durability of polymer-coated Pt electrocatalyst supported on oxidized multi-walled in high-temperature polymer electrolyte fuel cells." *international journal of hydrogen energy* **42**(26): 16714-16721.
- [12] Devrim, Y. and E. D. Arica (2019). "Multi-walled carbon nanotubes decorated by platinum catalyst for high temperature PEM fuel cell." *international journal of hydrogen energy* **44**(34): 18951-18966.
- [13] Yang, Z. and N. Nakashima (2015). "Poly (vinylpyrrolidone)–wrapped carbon nanotube-based fuel cell electrocatalyst shows high durability and performance

- under non-humidified operation." *Journal of Materials Chemistry A* **3**(46): 23316-23322.
- [14] Gokhale, R., et al. (2018). "Implementing PGM-free electrocatalysts in high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells." *Electrochemistry Communications* **93**: 91-94.
- [15] Wang, Y. C., et al. (2018). "Surface fluorination to boost the stability of the Fe/N/C cathode in proton exchange membrane fuel cells." *ChemElectroChem* **5**(14): 1914-1921.
- [16] Cheng, Y., et al. (2019). "Iron single atoms on graphene as nonprecious metal catalysts for high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells." *Advanced science* **6**(10): 1802066.
- [17] Zakaria, I. A., et al. (2014). Steady-state potential Energy recovery modeling of an open cathode pem fuel cell vehicle. *Applied mechanics and materials, Trans Tech Publ.*
- [18] Massardo, A. F. and F. Lubelli (2000). "Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): Part A—Cell model and cycle thermodynamic analysis." *J. Eng. Gas Turbines Power* **122**(1): 27-35.
- [19] Yu, S., et al. (2010). "A dynamic model of PEMFC system for the simulation of residential power generation." *Journal of Fuel Cell Science and Technology* **7**(6).
- [20] Briguglio, N., et al. (2011). "Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP." *international journal of hydrogen energy* **36**(13): 8023-8029.
- [21] Shabani, B. and J. Andrews (2011). "An experimental investigation of a PEM fuel cell to supply both heat and power in a solar-hydrogen RAPS system." *international journal of hydrogen energy* **36**(9): 5442-5452.
- [22] Belatel, M., et al. (2011). "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte." *Journal of Renewable Energies* **14**(1): 145–162-145–162.
- [23] Zhang, X., et al. (2011). "Maximum equivalent efficiency and power output of a PEM fuel cell/refrigeration cycle hybrid system." *international journal of hydrogen energy* **36**(3): 2190-2196.
- [24] Loreti, G., et al. (2021). "High-Efficiency Combined Heat and Power through a High-Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System." *Sustainability* **13**(22): 12515.
- [25] Xu, W., et al. (2019). "How to give a full play to the advantages of zeotropic working fluids in organic Rankine cycle (ORC)." *Energy Procedia* **158**: 1591-1597.
- [26] Mahmoudi, A., et al. (2018). "A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle." *Applied Thermal Engineering* **143**: 660-675.
- [27] Zhao, P., et al. (2012). "Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell." *international journal of hydrogen energy* **37**(4): 3382-3391.

- [28] Nouman, J. (2012). Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles-ORC.
- [29] Bergman, T. L., et al. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons.
- [30] Bao, J. and L. Zhao (2013). "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle." *Renewable and sustainable energy reviews* **24**: 325-342.
- [31] Calm, J. M. and G. C. Hourahan (2011). Physical, safety, and environmental data for current and alternative refrigerants. Proceedings of 23rd international congress of refrigeration (ICR2011), Prague, Czech Republic.
- [32] Wang, C., et al. (2005). "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits." *IEEE transactions on energy conversion* **20**(2): 442-451.
- [33] Xu, S., et al. (2019). "Parameter estimation of proton exchange membrane fuel cells using eagle strategy based on JAYA algorithm and Nelder-Mead simplex method." *Energy* **173**: 457-467.
- [34] Fowler, M. W., et al. (2002). "Incorporation of voltage degradation into a generalised steady state electrochemical model for a PEM fuel cell." *Journal of power sources* **106**(1-2): 274-283.
- [35] Chen, P.-C. (2011). "The dynamics analysis and controller design for the PEM fuel cell under gas flowrate constraints." *international journal of hydrogen energy* **36**(4): 3110-3122.
- [36] Van Nguyen, T. and M. W. Knobbe (2003). "A liquid water management strategy for PEM fuel cell stacks." *Journal of power sources* **114**(1): 70-79.
- [37] Lemmon, E. , Huber, M. and McLinden, M. (2013), NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties REFPROP, Version 9.1.
- [38] Abdi, H., et al. (2021). "Modeling and optimization of a proton exchange membrane fuel cell using particle swarm algorithm with constriction coefficient." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **144**(5): 1749-1759.