



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



Université Blida 01

Faculté de technologie,  
Département de mécanique

*En vue de l'obtention du Diplôme d'un Master en  
mécanique*

Option : Énergétique

*Thème*

**Analyse thermodynamique d'un système de récupération  
de la chaleur résiduelle d'une pile PEMFC par un cycle ORC  
utilisant des fluides zéotropiques**

*Présenté par :*

**BEDJAOUI Abdelmalek**

**MOULAY Mourad**

*Encadré par :*

**Dr.ABDI Hamid**

***Année universitaire 2022 / 2023***

## *Dédicace*

*À peine je viens de terminer la rédaction du mémoire de fin de cycle de master, je voudrais très vite le dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :*

*A la pensée de mes très chers papa et grand-père que dieu les accueille dans son vaste paradis.*

*A celle qui m'a donné la vie, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, et ses précieux conseils à maman que j'adore et qu'Allah vous préserve ;*

*A ma chère sœur **Sara Imene***

*A mon cher frère **Abdelazize** ;*

*A tous les membres de la famille spécialement à **ma tante Hania** ;*

*A mon cher binôme **Mourad***

*A tous mes amis et mes connaissances spécialement **Aymen, Papou, Malik, Idir, Samy, Zinou, Ishak, Rafik, Ahmed, Fares et zaki.***

*Enfin à tous mes camarades **Kamel, Akrame, Ghano, Samir, Mohamed, Moncef, Merouane,***

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.*

**ABDELMALEK**

## ***Dédicace***

*Je tiens à remercier sincèrement ALLAH du fond de mon cœur de m'avoir aidé et de ne pas m'avoir abandonné. Je lui exprime ma gratitude pour le courage et la patience qu'Il m'a accordés, et je dis ALHAMDULILLAH.*

*Je souhaite dédier quelques mots aux personnes que j'aime et qui m'ont donné la joie et le courage.*

*À ma mère et à mon père, je vous remercie de m'avoir soutenu, éduqué et surtout d'avoir veillé à ce que j'aie accès à la meilleure éducation. Je suis encore plus fier d'avoir atteint les objectifs qu'ils avaient pour moi. Mes remerciements ne suffiront jamais à égaler tout ce que vous avez fait pour moi. Je vous aime du fond de mon cœur.*

*À toute ma famille, spécialement mon petit frère Mehdi et ma petite sœur, et un dédicace spéciales pour tous mes oncles et tantes, et la lumière de ma vie mes grands-parents.*

*À mon binôme Abdelmalek pour plein de motivation.*

*À tous mes chers amis Lazreg, Mouloua, Roof, Rugi, Walid, Les Achroufs, Redha, Bejaoui Aziz, Fares, Mamado, Guessoum, l'équipe de pharmacie Bendaoud, et tous les amis pendant ce parcours .*

*À tous mes chers camarades Akram, Ghanou, Samir, Mohamed, Moncef, Demerdji, Oussama.*

*Et à tous ceux qui m'ont aidé à avancer et m'ont donné le courage de continuer.*

*Votre soutien et votre présence ont été inestimables, et je vous suis profondément reconnaissant pour votre amitié, vos encouragements et votre contribution à mon parcours. Je porte une gratitude sincère envers chacun d'entre vous.*

*Encore une fois, merci du fond du cœur.*

***Moulay Mourad***

## *Remerciement*

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre gratitude  
Tout d'abord, nous remercions sincèrement ALLAH de nous avoir donné la force et  
le courage nécessaires.

Nous souhaitons également adresser nos vifs remerciements à notre **encadreur**,  
**Dr ABDI.H**, qui nous a accompagnés tout au long de cette période de travail. Ses  
précieus conseils ont été d'une grande aide et ses propositions ont contribué à  
enrichir notre projet.

Nos vifs remerciements vont aux **membres de jury** pour avoir accepté de juger  
notre présent travail

Nous tenons à exprimer notre chaleureuse reconnaissance à tous ceux qui ont  
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

On réserve une pensée spéciale à tous **les enseignants** de notre spécialité qui ont  
sus nous donner une formation didactique et appréciable tout au long de notre  
cursus.

Enfin, nous voudrions adresser nos remerciements les plus sincères à nos familles  
et à nos amis pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de  
nos études.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont contribué de quelque  
manière que ce soit à la réalisation de ce mémoire. Vos efforts, votre collaboration  
et votre soutien ont joué un rôle crucial dans le succès de ce projet.

## ملخص

تقدم الدراسة محاكاة لنظام PEMFC-ORC. فيما يتعلق بكفاءة الطاقة، أظهرت النتائج أن نظام PEMFC-ORC قادر على تحويل جزء كبير من الطاقة الكيميائية للهيدروجين إلى كهرباء، بكفاءة عالية. سمح دمج "خلية وقود تبادل أغشية البروتون" (PEMFC) مع "الدورة العضوية للرانكين" (ORC) باستعادة الحرارة المتبقية الناتجة عن PEMFC، وبالتالي زيادة الكفاءة الإجمالية للنظام. وتجدر الإشارة إلى أن اختيار السائل العامل العضوي أمر ضروري. أظهر تحليل النتائج أيضًا أن استخدام الخلائط الزيتروبية كسوائل عاملة لدورة ORC هو حل واعد جدًا مقارنة بالسوائل النقية.

**الكلمات المفتاحية:** PEMFC، ORC، الكفاءة الكهربائية، سائل العمل، زيتروبيك.

## Résumé

L'étude présentée concerne la simulation du système PEMFC-ORC. En termes d'efficacité énergétique, les résultats ont montré que le système PEMFC-ORC est capable de convertir une part significative de l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec un rendement élevé. L'intégration de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) avec le cycle organique de Rankine (ORC) a permis de valoriser la chaleur résiduelle générée par la PEMFC, augmentant ainsi l'efficacité globale du système. Il est à signaler que le choix du fluide organique de travail est primordial.

L'analyse des résultats a montré aussi que l'utilisation des mélanges zéotropiques comme fluides de travail pour le cycle ORC est une solution très prometteuse comparativement aux fluides purs.

**Mots clés :** ORC, PEMFC, Fluide de travail, Rendement électrique, zéotropiques

## **Abstract**

The study presented concerns the simulation of the PEMFC-ORC system. In terms of energy efficiency, the results show that the PEMFC-ORC system is capable to convert a significant proportion of the chemical energy of hydrogen into electricity, with high efficiency. The integration of the PEMFC with the ORC enabled the waste heat generated by the PEMFC to be valorized, thus increasing the overall efficiency of the system. It should be noted that the choice of the working fluid is quite important.

Analysis of the results also showed that the use of zeotropic mixtures as working fluids for the ORC cycle is a very promising solution compared with pure fluids.

**Key word :** ORC, PEMFC, Working fluid, Zeotropic, Electrical efficiency.

## SOMMAIRE

Introduction générale .....	1
Chapitre 01: État de l'art .....	3
1.1. Introduction : .....	3
1.2. État des recherches : .....	4
1.3. But de travail: .....	7
Chapitre 2 : couplage pile à combustible PEMFC à un système ORC .....	8
2.1. Introduction : .....	8
2.2. Types de piles à combustible : .....	8
2.3. Pile combustible à membrane échangeur de protons .....	10
2.4. Description du système PEMFC-ORC : .....	11
2.4.1 Rôle des composants : .....	12
2.4.2. Principe de fonctionnement du système combiné : .....	13
2.5. Choix d'un fluide de travail .....	15
2.5.1. Propriétés thermodynamique et physique .....	16
2.5.2. Propriétés de transfert de chaleur .....	17
2.5.3. Sécurité et les préoccupations environnementales : .....	18
2.6. Données environnementales et classification de sécurité : .....	18
2.7. Propriétés des fluides examinés dans notre travail .....	19
2.8. Conclusion : .....	22
Chapitre 3 : Modélisation et performance du système PEMFC-ORC .....	23
3.1. Introduction: .....	23
3.2. Description du système: .....	23
3.3. Modélisation mathématique du système PEMFC-ORC : .....	24
3.3.1. Modèle électrochimique de PEMFC : .....	24
3.3.3. Modèle mathématique du cycle organique de Rankine .....	29
3.3.4. Critères de performances : .....	30
3.4. Organigramme de calcul : .....	31
3.5. Conclusion .....	34



Chapitre 4.....	35
4.1. Introduction:.....	35
4.2. Conditions de simulation : .....	35
4.3. Résultat de simulation pour la pile PEM : .....	37
4.3.1. Effet de variation de la densité de courant : .....	37
4.3.2. Cas d'utilisation des fluides organiques purs : .....	41
4.3.3. Cas d'utilisation des fluides zéotropiques : .....	45
4.3.4. Comparaison des performances du système: .....	55
4.4. Conclusion .....	57
Conclusion générale.....	58
Bibliographie .....	60

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2 1 :</b> Type des piles à combustible [12] .....	9
<b>Tableau 2 2:</b> La classification de sécurité [18]. .....	19
<b>Tableau 2 3:</b> Nomenclature chimique pour les fluides purs [19].....	19
<b>Tableau 2 4:</b> Propriétés thermodynamiques des fluides de travail [19]. .....	20
<b>Tableau 2 5:</b> Données environnementales de sécurité [19].....	20
<b>Tableau 2 6:</b> Nomenclature chimique pour les fluides zéotropique [19];.....	21
<b>Tableau 4 1:</b> Conditions et paramètres de simulation [2]. .....	35
<b>Tableau 4 2:</b> Résultats des fluides de travail organiques purs. ....	43
<b>Tableau 4 3:</b> Résultats du rendement électrique global et de la puissance nette maximale générée du système combiné. ....	45
<b>Tableau 4 4:</b> Résultats des fluides zéotropique.....	56

## Liste des figures

<b>Figure (2.1):</b> Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons. ....	11
<b>Figure (2.2):</b> Diagramme schématique du système combiné PEMFC-ORC. ....	12
<b>Figure (2.3):</b> Diagramme T-S d'un cycle organique pur de Rankine.....	14
<b>Figure (2.4):</b> Le diagramme T-s du cycle ORC avec utilisation de fluide zéotropique. ....	15
<b>Figure (2. 5):</b> Courbe de saturation des fluides de travaux (sec, humide et isentropique). ....	16
<b>Figure (3.1):</b> Configuration du système combiné PEMFC-ORC.....	23
<b>Figure (3.2):</b> Organigramme de calcul pour fluide organique pure.....	32
<b>Figure (3.3):</b> Organigramme de calcul pour les fluides zéotropique.....	33
<b>Figure (4.1):</b> Courbe de polarisation d'une cellule en fonction de la densité du courant. ....	38
<b>Figure (4.2):</b> Courbe de puissance de la pile, puissance thermique nette, et la puissance de la pile nette en fonction de la densité du courant. ....	39
<b>Figure (4.3):</b> Variation du rendement de la pile en fonction de la densité du courant. ....	40
<b>Figure (4.4):</b> Rendement thermique du cycle ORC pour différent fluides organiques pures. ....	41
<b>Figure (4.5):</b> Variation du rendement électrique du système PEMFC-ORC en fonction de la densité du courant.....	42
<b>Figure (4.6):</b> Variation de la puissance nette ORC en fonction de la densité du courant. ....	43
<b>Figure (4.7):</b> Variation du rendement électrique globale en fonction de la puissance nette du système combiné. ....	44
<b>Figure (4.8):</b> Variation La température du glissement en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	46
<b>Figure (4. 9):</b> Variation Débit massique du fluide de travail (kg/s) en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	47
<b>Figure (4. 10):</b> Variation La puissance de la pompe en fonction de la fraction massique du premier compostant. ....	48
<b>Figure (4. 11):</b> Variation du la puissance générée par la turbine. ....	49
<b>Figure (4. 12):</b> Variation de la puissance générée par le système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	51
<b>Figure (4. 13):</b> Variation du rendement thermique du système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	52
<b>Figure (4. 14):</b> Rendement électrique du système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant.....	53
<b>Figure (4. 15):</b> Variation du travail du system combiné en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	54
<b>Figure (4.16):</b> Variation du Rendement électrique en fonction de la fraction massique du premier composant. ....	54

## Nomenclature:

$A_{cell}$	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, $mol cm^{-3}$
$C_{O_2,conc}$	Concentration d'oxygène, $mol cm^{-3}$
$E_{Nernst}$	Tension de Nernst, $V$
$F$	Constante de Faraday, $C cm^{-1}$
$h$	Enthalpie, $KJ Kg^{-1}$
$H_V$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau, $J mol^{-1}$
$i$	Densité du courant, $A cm^{-2}$
$i_L$	Densité du courant maximale, $A cm^{-2}$
$I$	Courant électrique, $A$
$L$	Épaisseur de la membrane, $cm$
$HHV$	Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, $KJ mol^{-1}$
$\dot{m}$	Débit massique, $Kg s^{-1}$
$\dot{n}$	Débit molaire, $mol^{-1} s^{-1}$
$n_e$	Nombre d'électrons
$N_{cell}$	Nombre de cellules dans la pile
$P$	Pression, $kPa$
$\dot{Q}_{in}$	Énergie calorifique
$\dot{Q}_{ch}$	Puissance électrochimique, $KW$
$\dot{Q}_{net}$	Puissance thermique nette, $KW$

$\dot{Q}_{s,l}$	Chaleur sensible et latente, $KW$
$r_{mem}$	Résistivité de membrane, $\Omega cm$
$R$	Constante du gaz universel, $J mol^{-1} K^{-1}$
$R_{int}$	Résistance interne, $\Omega$
$s$	Entropie, $KJ kg^{-1} k^{-1}$
$T$	Température, $K$
$V$	Tension, $V$
$\dot{W}$	Puissance, $KW$
$X$	Fraction molaire

**Lettres grecques :**

$\zeta$	Teneur en eau de la membrane
$\eta$	Rendement
$k$	Exposant isentropique
$\Lambda$	Coefficient stœchiométriques
$\xi_i$	Coefficients empirique de surtension d'activation
$\Pi$	Rapport de pression

**Indices et exposants :**

1,2,3,4	Points d'état
<i>act</i>	Activation
<i>air</i>	Air

<i>amb</i>	Ambient
<i>c</i>	Condenseur
<i>comp</i>	Compresseur
<i>conc</i>	Concentration
<i>Cons</i>	Réactifs consommés dans la réaction chimique
<i>gene</i>	Produits générés lors d'une réaction chimique
$H_2$	Hydrogène
$H_2O$	Eau
<i>in</i>	Entrée
$N_2$	Azote
<i>ohm</i>	Ohmique
<i>out</i>	Sotie
$O_2$	Oxygène
<i>Pàc</i>	Pile à combustible
<i>pump</i>	Pompe
<i>s</i>	Processus isentropique
<i>sat</i>	Condition de saturation
<i>turb</i>	Turbine
<i>thm</i>	Thermique

**Abbreviations:**

*ASHRAE* American society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

*FCV* Fuel Cell Vehicle

*GWP* Global Warming potential (potential de l'effet de serre)

<i>HCFC</i>	Hydro chlorofluorocarbone
<i>HFC</i>	Hydrofluor
<i>IUPAC</i>	International Union of Pure and Applied Chemistry
<i>NIST</i>	National Inustitute of Standards and Technology
<i>ODP</i>	Ozone Depletion potential (le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone)
<i>ORC</i>	Organic Rankine Cycle (cycle organique de Rankine)
<i>PEMFC</i>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (pile à combustible à membrane échangeuse de protons)

## Introduction générale

L'augmentation de la consommation d'énergie électrique constitue un défi majeur à l'échelle mondiale. La croissance économique, l'urbanisation rapide et l'électrification croissante des secteurs tels que les transports et l'industrie ont conduit à une demande croissante en électricité. Cependant, cette demande accrue nécessite des nouvelles solutions durables pour répondre aux besoins énergétiques sans compromettre l'environnement. Face à ce défi, le système combiné PEMFC-ORC (pile à combustible à membrane échangeuse de protons et cycle organique de Rankine) se présente comme une solution prometteuse pour la production d'électricité propre.

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) offre une conversion directe et propre de l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec pour seul sous-produit de l'eau. Elle présente des caractéristiques attrayantes telles qu'une densité de puissance élevée et une faible émission de polluants. Ces propriétés font de la PEMFC une technologie prometteuse pour alimenter diverses applications. Malheureusement, au cours des réactions chimiques ayant lieu au niveau de la PEMFC près de 50% de l'énergie introduite est perdue sous forme de chaleur. Pour cela, le cycle organique de Rankine (ORC) se présente comme solution de récupération et de conversion de cette chaleur résiduelle. Ce cycle utilise un fluide organique comme fluide de travail. L'ORC contribue ainsi à l'amélioration de l'efficacité énergétique globale en valorisant la chaleur précédemment perdue. Cette approche de combinaison permet d'améliorer non seulement l'efficacité énergétique du système, mais offre également une opportunité de maximiser l'utilisation des ressources et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Dans cette étude, nous nous pencherons sur l'utilisation du système PEMFC-ORC comme solution potentielle pour répondre à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique. Nous analyserons les performances de ce système combiné, en évaluant son rendement global et sa puissance électrique générée. L'objectif est de démontrer comment cette approche peut contribuer à la transition vers un avenir énergétique plus durable, en fournissant une source d'électricité propre, efficace et fiable.



Le choix des fluides de travail purs ou zéotropique utilisés pour la récupération de la chaleur résiduelle de la PEMFC sera également abordé.

Notre mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Un premier chapitre sur l'état de l'art
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes PEMFC et PEMFC-ORC.
- Dans le troisième chapitre nous présentons la modélisation mathématique du système étudié.
- Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des résultats de simulation et leurs interprétations.
- A la fin, nous présentons les conclusions et recommandations.

## Chapitre 01:

### État de l'art

#### 1.1.Introduction :

La pollution de l'environnement et l'épuisement des combustibles fossiles étant des préoccupations mondiales, il est urgent de trouver des solutions alternatives en matière d'énergie propre. La pile à hydrogène, principalement la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est un système de conversion énergétique prometteur pour les futures automobiles et applications stationnaires. La réaction dans une PEMFC est chimiquement simple : les molécules d'hydrogène se divisent en ions hydrogène et en électrons sur l'anode, tandis que les protons se recombinent avec l'oxygène et les électrons pour former de l'eau et dégager de la chaleur sur la cathode. Cependant, une pile à combustible peut être très compliquée et délicate sur le plan mécanique en raison des exigences spécifiques de puissance élevée (réaction et dynamique rapides), de longévité et d'efficacité économique [1].

Les études connexes sur les technologies de récupération de la chaleur perdue par les piles à combustible ont principalement considéré la combinaison de piles à combustible et du cycle de Rankine organique (ORC), de la cogénération (Combined Heat and Power system) et des générateurs thermiques (TEG). Les systèmes ORC ont une très bonne performance thermique dans la récupération de la chaleur perdue à basse température, une grande flexibilité et sécurité, et sont largement utilisés dans la récupération d'énergie géothermique et solaire. Ils sont également utilisés pour la récupération de la chaleur perdue des moteurs à combustion interne et d'autres systèmes énergétiques.

Marandi et al. ont combiné un système PEMFC avec un ORC à deux étages en parallèle et un système de refroidissement par évaporation d'hydrogène pour étudier l'économie d'énergie et d'exergie du système [2]. Malgré que les fluides organiques purs présentent des caractéristiques très importantes pour la récupération de la chaleur à basse température, il a été constaté que plusieurs recherches sont orientées vers l'utilisation des fluides zéotropique [2].

Un mélange zéotropique est une combinaison des deux fluides de travail ou plusieurs ayant des points d'ébullition différents, Contrairement à d'autres mélanges. Lorsqu'un mélange zéotropique est soumis à un processus de distillation ou d'évaporation, il maintient sa composition et son point d'ébullition constant. En d'autres termes, les différents composants du mélange s'évaporent ensemble et se condensent ensemble. Cela permet d'obtenir des produits finaux plus purs et d'effectuer des opérations de séparation plus efficaces [3].

Les progrès de ce travail sont les suivant:

- Récupération de la chaleur qui la pile généré au côté de l'électricité.
- L'utilisation de cette chaleur résiduelle perdue, qui doit permet d'améliorer l'efficacité globale du système combiné à la récupération et a l'utilisation de cette énergie thermique.
- L'utilisation des fluides zéotropique dans un cycle organique Rankine pour la récupération de chaleur perdue du la PEMFC offre des avantages par rapport aux cycles classiques [2].

### 1.2.État des recherches :

- **Van Long Le et Al (2014):**

Dans ce travail de recherche, une optimisation thermodynamique et économique d'une centrale de récupération d'énergie à travers un système ORC a été proposé. Le système ORC a été testé par des fluides organiques pures et zéotropiques. Les auteurs ont cherché à maximiser l'efficacité énergétique du système, pour cela, une étude d'optimisation des paramètres de conception et d'exploitation du cycle ORC a été meuné. Ils ont proposé des modèles d'optimisation pour maximiser la production d'énergie et minimiser les coûts d'investissement et de fonctionnement de la centrale de récupération d'énergie [9].

- **He, T and al (2016) :**

Dans cette étude, deux systèmes, à savoir le cycle de Rankine organique (ORC) et le cycle de Rankine organique combiné à une pompe à chaleur (HPORC), ont été proposés pour

récupérer la chaleur résiduelle d'une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC). Des simulations ont été effectuées avec différents fluides de travail. Les résultats obtenus ont montré que chaque fluide a une température de fonctionnement optimale pour l'ORC et l'HPORC lorsque la PEMFC fonctionne à une température constante de 60°C. Le R245fa produit une plus grande puissance nette et un rendement thermique de 4.03% de l'ORC, tandis que lorsque l'eau est utilisée comme fluide de travail dans la pompe à chaleur et le R123 dans l'ORC ceci a permis d'obtenir une puissance nette maximale et un rendement thermique de 4,73% dans l'HPORC. L'étude a examiné également la faisabilité d'utiliser l'ORC ou l'HPORC comme système de refroidissement pour la pile à combustible à membrane d'échange de protons [4].

- **B. Dong and al (2017) :**

Dans cet article, les auteurs ont présenté une évaluation approfondie des performances thermodynamiques et économiques d'un système ORC utilisant des fluides purs et des mélanges zéotropes. Ce travail a examiné les effets de la source de chaleur et de la fraction massique du mélange sur la puissance nette produite, la taille de l'échangeur de chaleur ainsi que les performances économiques afin de sélectionner le fluide adéquat. Les résultats montrent que l'utilisation du fluide zéotrope (R123) a permis de produire plus d'énergie nette que dans le fluide pur [5].

- **K. Satanphol, W. Pridasawas, B. Suphanit (2017):**

Cet article présente une étude sur la composition optimale d'un fluide de travail zéotrope dans un cycle de Rankine organique (ORC) pour la récupération de chaleur à basse température. L'objectif est d'optimiser la performance de l'ORC pour la production d'énergie à partir de sources de chaleur à basse température en utilisant un fluide de travail zéotrope, qui est un mélange de deux fluides ayant des températures d'ébullition différentes. La modélisation et l'optimisation ont été réalisées à l'aide du logiciel Aspen Plus v.8.4 pour déterminer les types de fluides, la composition et les conditions de fonctionnement qui permettent d'obtenir la production nette de travail maximale. Les résultats peuvent être utilisés pour concevoir des systèmes ORC plus efficaces pour la récupération de chaleur à basse température [7].

- **Su, W et Al (2018) :**

L'auteur compare les performances thermodynamiques entre les mélanges zéotropiques et les fluides purs dans le cadre du cycle de Rankine organique (ORC) avec une source de chaleur ouverte.

L'auteur se focalise sur la modélisation et l'analyse des performances, en incluant des indicateurs tels que l'efficacité de conversion de chaleur, la production d'énergie et d'autres paramètres.

L'objectif principal est de déterminer quel type de fluide, entre les mélanges zéotropiques et les fluides purs, offre les meilleures performances dans le contexte spécifique d'une source de chaleur ouverte [9].

- **Chen, X et Al (2019) :**

L'article aborde probablement des sujets tels que la modélisation du système ORC, l'optimisation de la performance, les aspects de contrôle et les avantages de l'utilisation de mélanges zéotropiques comme fluides de travail dans les systèmes ORC.

De plus, l'article pourrait inclure des discussions sur les résultats de simulations ou d'expérimentations qui ont été réalisées pour tester l'efficacité de ces stratégies de contrôle dans des situations concrètes de récupération de chaleur résiduelle [10].

- **Azad A et al (2021):**

Le travail présente l'analyse et l'optimisation d'une pile à combustible intégrée à un cycle de Rankine organique à deux étages en série avec utilisant des mélanges zéotropes comme fluides de travail. Les auteurs ont étudié l'effet des mélanges zéotropes sur l'efficacité de la conversion de la chaleur résiduelle de la pile à combustible en électricité. L'objectif principale de cette étude est d'optimiser la conception et les paramètres opérationnels du système combiné afin de maximiser son efficacité énergétique [3]

- **Enhua Wang et Al (2022):**

Cet article traite la sélection des fluides de travail zéotropiques pour faire fonctionner un système ORC combiné à d'un moteur marin afin d'améliorer l'efficacité énergétique global du système proposé. Les auteurs ont étudié l'effet des caractéristiques thermo physiques des mélanges zéotropes sur les performances du cycle ORC. Ils ont aussi analysé

l'effet de la température de la source chaude, la pression de condensation et le débit massique sur le choix du fluide de travail. Ils ont également proposé des modèles d'optimisation pour déterminer les performances optimales du cycle ORC en fonction des conditions opérationnelles spécifiques du moteur marin [8].

**1.3. But de travail:**

Le taux de conversion de l'énergie chimique en énergie électrique par une pile PEMFC est généralement de 50%, alors que le reste est perdu sous forme de chaleur. De ce fait il est indispensable de récupérer cette chaleur résiduelle. Dans ce travail on s'intéresse à l'étude des performances d'un système combiné constitué d'une pile à combustible PEMFC et un système ORC. Ce dernier sert à récupérer la chaleur résiduelle de la pile. Il est à noter que cette étude est la suite d'un travail antérieur [6]. La nouveauté principale réside dans l'utilisation des mélanges zéotropiques comme des fluides de travail pour le système ORC. Ce choix sera justifié par des comparaisons avec le cas d'utilisation des fluides organiques purs. Plusieurs combinaisons seront considérées afin d'identifier le mélange zéotropique le plus performant.

## Chapitre 2

### Couplage pile à combustible PEMFC à un système ORC

#### 2.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu des généralités sur les piles à combustible, notamment la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Nous décrivons aussi le principe de fonctionnement du système combine PEMFC-ORC.

Le système de cycle organique de Rankine (ORC) est une technologie de récupération d'énergie à basse température pour produire de l'électricité. Le système ORC a un principe de fonctionnement similaire à celui d'une centrale thermique classique, mais il utilise un liquide organique au lieu de l'eau.

Un fluide zéotropique est souvent utilisé comme fluide de travail dans les systèmes ORC, car il permet une récupération d'énergie à des basses températures. La récupération de la chaleur produite par une pile à combustible par le système ORC présente de nombreux avantages, tels que, l'amélioration de l'efficacité globale du système combiné, la réduction des coûts d'exploitation et la production d'électricité supplémentaire à partir d'une source d'énergie propre. En outre, l'utilisation d'un fluide zéotropiques dans le système ORC permet de maximiser l'efficacité de la récupération d'énergie à des températures plus basses.

#### 2.2.Types de piles à combustible :

Les piles à combustible sont classées en deux principales catégories selon leurs températures de fonctionnement : les piles à combustible à basse température, où la température est inférieure à 100°C, et les piles à combustible à haute température, où la température dépasse 150°C. Ces deux catégories présentent différentes caractéristiques et applications. L'hydrogène est généralement le combustible le plus utilisé dans les piles à combustible en raison de sa grande efficacité et de son faible impact environnemental. En convertissant directement l'hydrogène en électricité, les piles à combustible offrent une alternative propre et durable aux sources d'énergie traditionnelles [11]. Autres types des piles à combustible sont regroupés dans le tableau (2.1) ci-dessous :

Tableau 2 1 : Type des piles à combustible [12]

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Solution KOH	Membrane Polymère Conductrice De proton	Membrane Polymère Conductrice de protons	Acide phosphorique	$Li_2CO_3$ et $KCO_3$ fondu dans une matrice $LiAlO_2$	$ZrO_2$ et $Y_2O_3$
Ions dans l'électrolyte	$OH^-$	$H^+$	$H^+$	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
Niveau de température	60- 80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	$H_2$	$H_2$ (pur ou reformé)	Méthanol	$H_2$ (pur ou reformé)	$H_2$ (pur ou reformé)	$H_2$ (pur ou reformé)
oxydants	$O_2$ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobile Portable, Cogénération maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée, d'électricité, maritime	Cogénération Production centralisée, d'électricité, maritime



### 2.3. Pile combustible à membrane échangeur de protons

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique et thermique. Elle est constituée de deux électrodes, l'une alimentée en dihydrogène et l'autre en dioxygène (ou en air) qui sont séparées par une membrane échangeuse de protons (l'électrolyte). Du côté anodique, l'hydrogène est oxydé à la surface d'un catalyseur en protons avec libération d'électrons selon la demi-équation suivante:



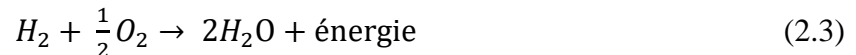
Le côté cathodique de la PEMFC est l'endroit où l'oxygène réagit avec les protons qui ont traversé la membrane électrolyte depuis l'anode. Cette réaction conduit à la formation d'eau et à la génération d'électricité grâce aux électrons qui circulent dans le circuit externe.

Cette demi-réaction de réduction s'écrit :

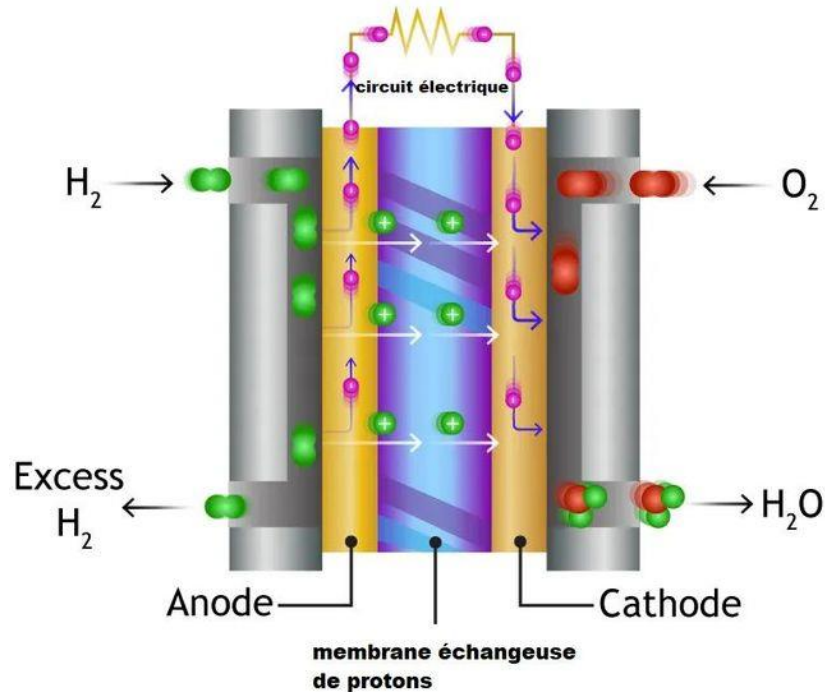


Lorsqu'un courant électrique passe dans un système, une partie de l'énergie électrique se transforme en chaleur à cause de la résistance des composants. Cette chaleur est appelée énergie thermique dissipée [13].

La réaction globale s'écrit sous la forme suivante :



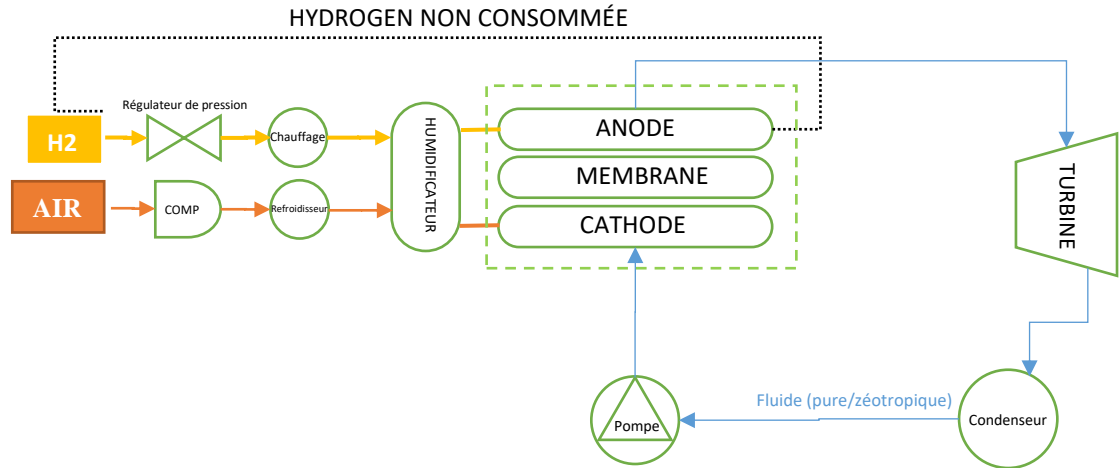
Le principe de fonctionnement d'une pile de type PEM est présenté en par la figure (2.1).



**Figure (2.1):** Schéma de base d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.

#### 2.4. Description du système PEMFC-ORC :

La figure (2.2) représente un schéma simplifié du système combiné constitué d'une pile PEMFC et un système organique de Rankine ORC pour récupérer la chaleur perdue de la pile à combustible PEM. Le système proposé se compose d'un compresseur d'air, d'un réservoir d'hydrogène, d'un régulateur de pression, d'un humidificateur, d'une pile à combustible PEM, d'une turbine, un condenseur, une pompe et d'autres composants connexes. L'empilement de piles à combustible PEM est doté d'une couche d'isolation pour minimiser les échanges de chaleur vers l'environnement.



**Figure (2.2):** Diagramme schématique du système combiné PEMFC-ORC.

#### 2.4.1. Rôle des composants :

Il s'agit d'une liste des différentes composantes d'un système de production d'énergie combinant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et un cycle de Rankine organique (ORC), ainsi que leurs rôles :

- 1- Compresseur : comprimé l'air jusqu'à la pression de fonctionnement de la pile.
- 2- Réservoir : stockage de l'hydrogène à haute pression pour alimenter la PEMFC.
- 3- Humidificateur : humidification de l'air et l'hydrogène avant leurs injections dans la PEMFC.
- 4- Régulateur de pression : régulation de la pression de l'hydrogène stocké dans le réservoir à la pression de fonctionnement de la PEMFC.
- 5- PEMFC : convertit l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique et thermique.
- 6- Turbine : convertit l'énergie de pression en énergie mécanique.
- 7- Condenseur : refroidissement et liquéfaction de la vapeur à basse pression avant qu'elle soit introduite dans la pompe.
- 8- Pompe : amène le fluide zéotropique de la pression de condensation à la pression de fonctionnement maximale du cycle organique de Rankine.
- 9- Evaporateur (PEMFC) : chauffage et vaporisation du fluide zéotropique provenant de la pompe en utilisant la chaleur résiduelle de la PEMFC.

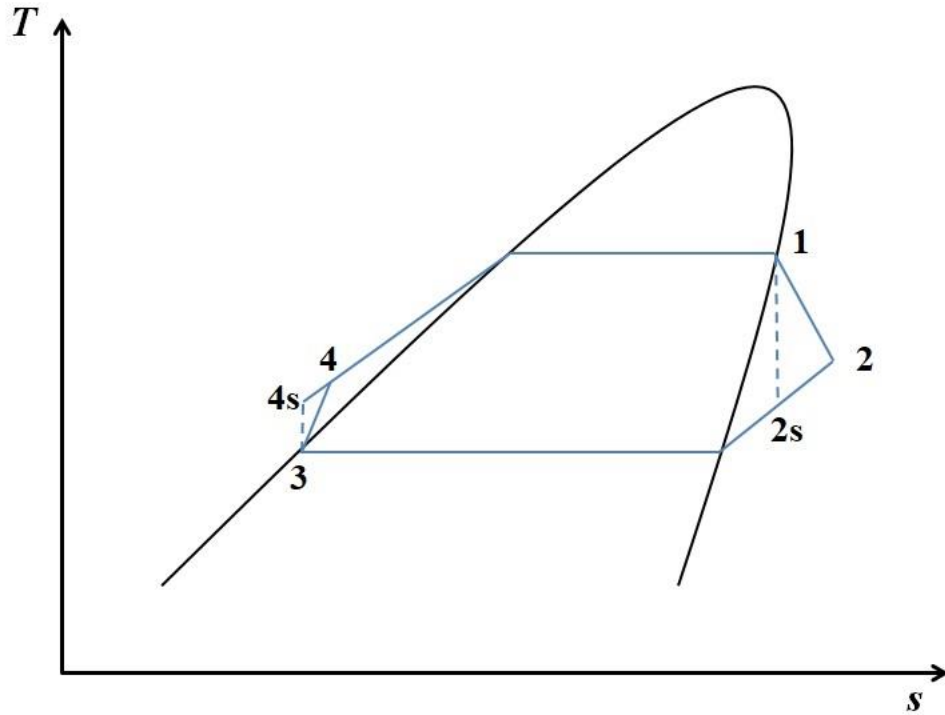
10- Génératrice : conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

#### **2.4.2. Principe de fonctionnement du système combiné :**

Le système combiné est composé d'une pile à combustible à hydrogène (PEMFC) et d'un cycle Rankine organique (ORC) utilisant un fluide de travail. La PEMFC génère de l'électricité en utilisant l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme oxydant, et dégage une quantité de chaleur. Cette chaleur est récupérée et utilisée pour alimenter le cycle ORC utilisant un fluide de travail (organique pure ou zéotropique). Le fluide de travail circule dans un circuit fermé, passant par un évaporateur où il est vaporisé par la chaleur récupérée de la PEMFC, puis il subit une détente à travers une turbine pour produire de l'énergie mécanique et puis la convertir par un générateur en énergie électrique, avant d'être condensé dans un condenseur et retourné à la pile à combustible.

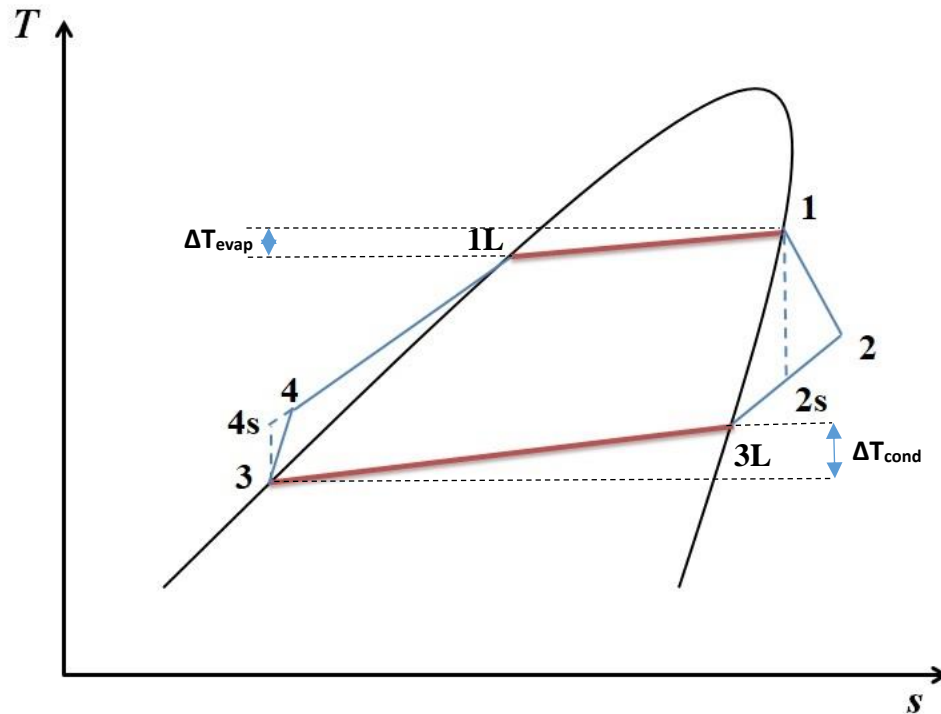
Les fluides organiques sont des composés chimiques qui peuvent être utilisés comme fluide de travail dans le cycle ORC. Ces fluides ont des avantages en termes de stabilité chimique, de conductivité thermique, de densité de vapeur et de viscosité. L'utilisation de ces fluides dans le système PEMFC-ORC est cruciale pour améliorer les performances, assurer la stabilité et garantir la sécurité.

Le diagramme température–Entropie (T-s) du cycle ORC utilisant un fluide organique pure est présenté à la figure (2.3).



**Figure (2.3):** Diagramme T-S d'un cycle organique pur de Rankine

Les fluides zéotropiques sont des mélanges de deux ou plusieurs composants avec des températures d'ébullition différentes. Contrairement aux fluides azéotropiques, le changement de phase dans les fluides zéotropiques ne s'effectue pas à température constante. Ces caractéristiques permettent une meilleure absorption et utilisation de la chaleur latente, ce qui entraîne une amélioration de l'efficacité du système ORC. Le diagramme T-s du cycle ORC avec utilisation des fluides zéotropiques est présenté par la figure (2.4).



**Figure (2.4):** Le diagramme T-s du cycle ORC avec l'utilisation des fluides zéotropiques.

Le principal avantage des fluides zéotropiques par rapport aux fluides organiques purs est leur capacité à mieux récupérer la chaleur latente. Cependant, les fluides zéotropiques peuvent avoir des températures de glissement élevées, ce qui peut causer des problèmes de séparation des fluides pendant le fonctionnement du système. La température de glissement est la différence entre la température d'ébullition et le point de rosée d'un fluide zéotrope. Par conséquent, le choix entre les fluides organiques purs et les fluides zéotropiques doit être basé sur une analyse approfondie des avantages et des inconvénients de chaque fluide y compris la température de glissement.

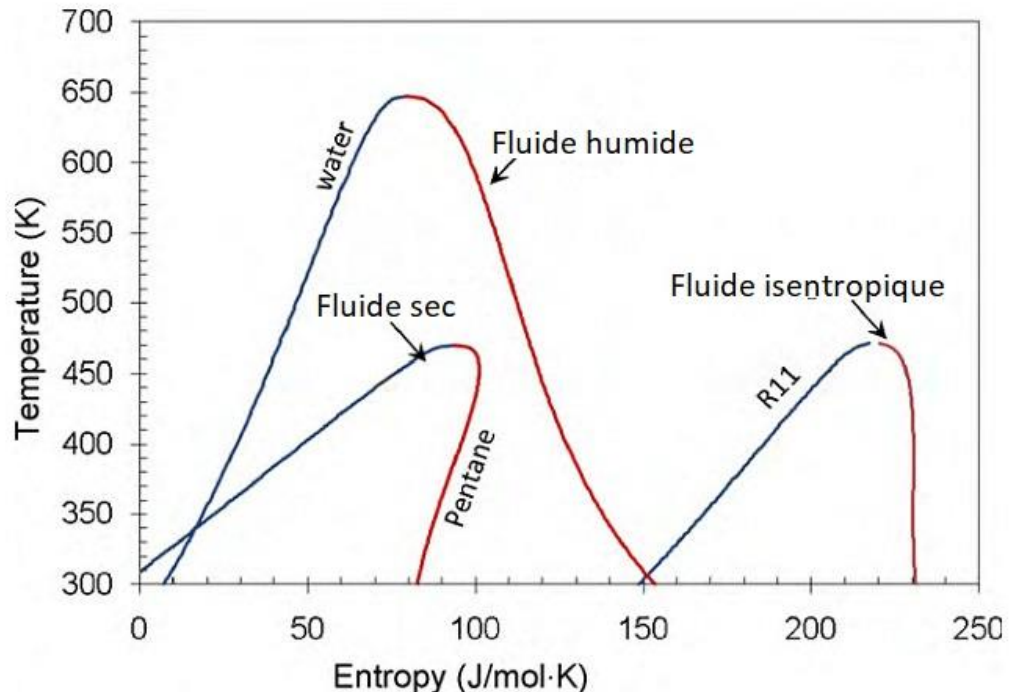
## 2.5. Choix d'un fluide de travail

Le choix d'un fluide de travail pour un système de cycle ORC dépend de plusieurs facteurs, tels que les propriétés thermodynamiques du fluide, la température maximale de la source de chaleur, les conditions de fonctionnement, la stabilité chimique et les considérations économiques. En général, les fluides organiques ont des températures de vaporisation plus basses que celle de l'eau, ce qui les rend plus adaptés aux sources de chaleur à basse température.

### 2.5.1. Propriétés thermodynamique et physique

D'un point de vue théorique, la relation entre certaines qualités des fluides de travail et les exigences de l'ORC est décrite ci-dessous.

- **Performance thermodynamique :** Un fluide de travail avec une performance thermodynamique élevée permettra d'obtenir un rendement plus élevé et une meilleure efficacité énergétique. [14]
- **Courbe de vapeur saturante positive ou isentropique :** Si la courbe de saturation est positive, la vapeur est sèche après la détente, ce qui est idéal pour la turbine. Si la courbe de saturation est négative, le fluide est humide et des gouttelettes d'eau se forment après la détente, ce qui peut endommager la turbine. Afin d'éviter cela, la vapeur doit être chauffée avant d'être introduite dans la turbine. Toutefois, si la courbe est positive, on peut utiliser un récupérateur pour rendre le cycle plus efficace [14]. La figure (2,4) présente les différents types des fluides organiques.



**Figure (2. 5):** Courbe de saturation des fluides de travaux (sec, humide et isentropique).

- **Densité de vapeur élevée :** Une grande densité de vapeur est très importante, surtout pour les fluides qui ont une pression de condensation très basse, comme les huiles de silicone. Si la densité est faible, le débit de vapeur est plus élevé, ce qui augmente les pertes de pression dans les échangeurs de chaleur et nécessite une détente plus grande. Cela a un impact significatif sur le coût du système. Cependant, il est important de noter que des débits plus importants peuvent permettre d'utiliser des turbocompresseurs, pour lesquels la taille n'est pas un facteur crucial [14].
- **Faible viscosité :** Une viscosité faible à la fois dans le liquide et dans la vapeur est importante pour assurer un transfert de chaleur efficace et réduire les pertes de frottement dans les échangeurs de chaleur [14].
- **Conductivité élevée :** Une haute conductivité est nécessaire pour obtenir un coefficient de transfert de chaleur élevé dans les échangeurs de chaleur [14].
- **Pression d'évaporation acceptable :** Une pression d'évaporation acceptable est importante car des pressions élevées augmentent généralement les coûts d'investissement et compliquent le système [14].
- **Pression manométrique positive de condensation:** La pression basse doit être supérieure à la pression atmosphérique afin d'éviter l'infiltration d'air dans le cycle [14].
- **Température de stabilité élevée :** Contrairement à l'eau, les fluides organiques ont tendance à se détériorer chimiquement et se décomposer à des températures élevées. Par conséquent, la température maximale de la source de chaleur est limitée par les propriétés chimiques du fluide utilisé [14].
- **Niveau de sécurité élevé :** La sécurité comprend deux paramètres principaux : la toxicité et l'inflammabilité. La norme ASHRAE 34 classe les fluides frigorigènes en groupes de sécurité et peut être utilisée pour évaluer un fluide [14].

### 2.5.2. Propriétés de transfert de chaleur

Naturellement dans la conception des échangeurs de chaleur, les propriétés thermiques du fluide ont une grande importance et un grand impact sur le choix de conception de ces échangeurs. Par exemple pour absorber l'énergie thermique de la source de chaleur avec une grande efficacité il faut choisir un fluide avec chaleur spécifique élevée. D'autre facteur qui



sont liés au dimensionnement du système lui-même comme le diamètre de la tuyauterie et le débit des pompes qui va affecter le nombre de Reynolds de l'écoulement du fluide, le choix du matériau et sa conductivité thermique, des facteurs liés au fluide choisi comme la conductivité thermique  $K$ , la chaleur spécifique et la viscosité qui sont utilisés pour calculer le nombre de Prandtl qui a une influence majeure dans la conception de l'échangeur de chaleur. Il est donc préférable de choisir un fluide dont la viscosité est faible pour minimiser les pertes de charge, et dont la chaleur spécifique et la conductivité thermique sont aussi élevées que possible [15].

### 2.5.3. Sécurité et les préoccupations environnementales :

Le fluide de travail comme l'eau ne présente aucun danger pour l'environnement car il est non toxique, non inflammable, n'a aucun potentiel de réchauffement de la planète et aucun potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. De nombreux fluides de travail zéotropiques ne sont pas respectueux de l'environnement car ils ont un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et certains provoquent des effets de serre. Certains fluides de travail organiques ont la caractéristique d'une toxicité élevée et d'une inflammabilité élevée [16].

### 2.6. Données environnementales et classification de sécurité :

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

- Le choix du fluide doit suivre les standards de protection environnementale en vigueur et en cours d'élaboration pour construire un cycle pérenne pour les décennies à venir. Il est donc préférable que le fluide ait un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (Ozone Depletion Potential, ODP) nul et un potentiel de réchauffement global (Global Warming Potential, GWP) le plus bas possible [17].

Selon l'ASHRAE, le tableau (2.2) répertorie les catégories de sécurité pour les fluides de travail organiques. Lorsque les fluides de travail ont une toxicité moindre, la lettre A est utilisée, et lorsqu'ils ont une toxicité plus élevée, la lettre B est utilisée. Les chiffres 1, 2 et 3 représentent la propagation de la flamme du fluide de travail. Lorsque la propagation de la

flamme est de 3, le fluide de travail a un potentiel d'inflammabilité plus élevé ; lorsqu'elle est de 2, le fluide a un faible potentiel d'inflammabilité ; et lorsqu'elle est de 1, le fluide de travail n'a pas de potentiel d'inflammabilité.

**Tableau 2 2:** La classification de sécurité [18].

	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 dans notre travail

Ce travail porte en premier lieu sur une étude paramétrique et analytique d'un système combiné utilisant quatre fluides de travail : R123, R227ea, R245fa et isobutane. Les propriétés et la nomenclature de ces fluides sont présentées dans les tableaux (2-3,2-5). Les données contenues dans les tableaux (2-3) et (2-4) ont été obtenues à partir du logiciel de NIST REFPROP version 9.1. Ce logiciel est largement reconnu et utilisé dans le domaine pour fournir des données précises sur les propriétés des fluides frigorigènes. Ces données sont essentielles pour mener une analyse approfondie du système combiné et évaluer ses performances thermodynamiques.

**Tableau 2 3:** Nomenclature chimique pour les fluides purs [19]

Type	Fluides de travail	Nom chimique UICPA	Formule chimique
HCFC	R123	2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroéthane	C <sub>2</sub> HCl <sub>2</sub> F <sub>3</sub>
HFC	R227ea	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>7</sub>
HFC	R245fa	1,1,1,3,3-pentafluoropropane	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>5</sub>
Isomères	Isobutane	2-méthylpropane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>

Les caractéristiques physiques des fluides de travail sont indiquées dans le tableau (2.4). En fonction de la température critique, ces qualités sont classées.

**Tableau 2 4:** Propriétés thermodynamiques des fluides de travail [19].

	Fluides de travail	Masse Molaire Kg/Kmol	Tcr (K)	Pcr (Kpa)	Type
1	R123	152.93	456.83	3661.8	sec
2	R227ea	170.03	374.9	2925	sec
3	R245fa	134.05	427.16	3651	sec
4	Isobutane	58.122	407.81	3629	sec

Les statistiques relatives à l'environnement et à la sécurité sont compilées dans le tableau (2.5). Selon la norme ASHRAE 34, la classification de sécurité est appliquée (voir tableau 2.2).

**Tableau 2 5:** Données environnementales de sécurité [19].

	Fluides de travail	GWP 100 Ans	ODP	Classification de sécurité	Corrosivité
1	R123	77	0.01	B1	NON
2	R227ea	3580	0.0	A1	NON
3	R245fa	1050	0.0	B1	NON
4	Isobutane	20	0.0	A3	NON

En deuxième lieu on s'intéresse à l'étude du système PEMFC-ORC utilisant des fluides zéotropiques. Trois mélanges différents à savoir, R123\R245fa, R227ea/R245fa, et isobutane/R227ea sont considérés. Les propriétés et la nomenclature de ces fluides sont présentées dans le tableau suivant.

**Tableau 2 6:** Nomenclature chimique pour les fluides zéotropique [19];

Type	Mélanges zéotropique	Nom chimique UICPA	Formule chimique
HCFC ET HFC	R123\R245fa	R123 : 1,1,1-Trifluoroéthane R245fa : 1,1,1,3,3-pentafluoropropane	C2HCl2F3/C3H2F5
HFC	R227ea/R245fa	R227ea : 1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane R245fa : 1,1,1,3,3-pentafluoropropane	C3HF7/C3H2F5
Isomers ET HFC	Isobutane/R227ea	Isobutane : 2-méthylpropane R227ea : 1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	C4H10/C3HF7

**2.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit en détail le principe de fonctionnement d'une pile à membrane d'échange de protons (PEMFC) ainsi que le principe de fonctionnement du système PEMFC-ORC proposé. De plus, nous avons examiné les avantages et les inconvénients des fluides organiques purs et zéotropiques utilisés dans le système PEMFC-ORC. Ces fluides jouent un rôle crucial dans la conversion de la chaleur résiduelle de la pile à combustible en électricité supplémentaire via le cycle organique de Rankine (ORC). En mettant en évidence les caractéristiques clés de ces fluides, nous avons évalué leur pertinence pour améliorer l'efficacité globale du système.

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

## Chapitre 3

### Modélisation et performance du système PEMFC-ORC

#### 3.1. Introduction:

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

#### 3.2. Description du système:

La figure (3.1) montre un schéma du système PEMFC-ORC. Après la décompression et la pressurisation, les températures de l'hydrogène et de l'air sont ajustées respectivement par le chauffage et le refroidisseur pour être égales à la température de fonctionnement de la pile, puis l'hydrogène et l'air entrent dans la pile après avoir passés par les humidificateurs.

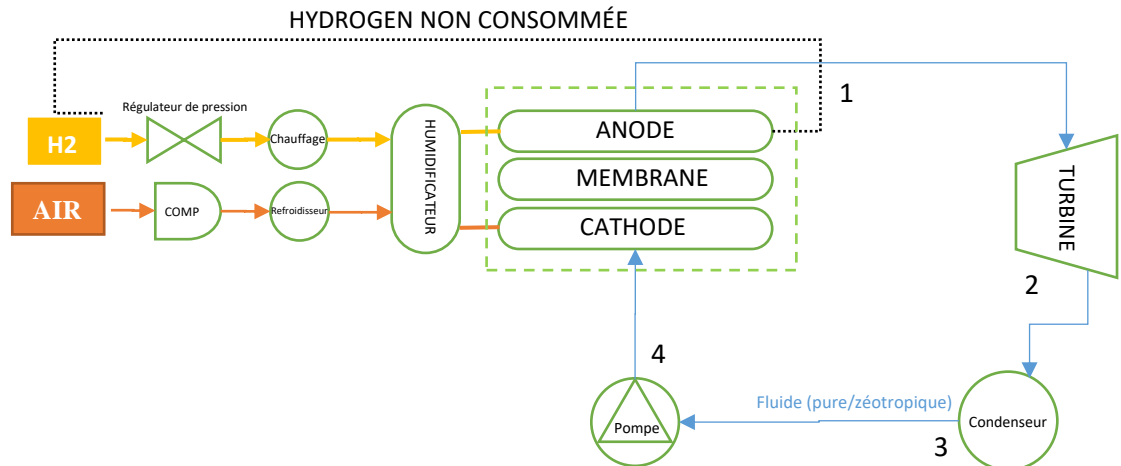


Figure (3.1): Configuration du système combiné PEMFC-ORC.

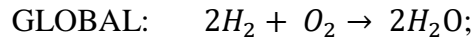
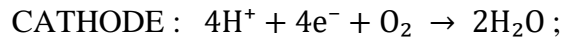
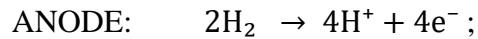
### 3.3. Modélisation mathématique du système PEMFC-ORC :

Pour simplifier les calculs, les hypothèses suivantes sont considérées :

- On considère des conditions de fonctionnement en régime permanent.
- La température et la pression de fonctionnement de la pile sont constantes.
- L'air se compose de 79 % d'azote et de 21 % d'oxygène.
- L'oxydation de l'hydrogène est considérée comme un processus isotherme.
- Le rayonnement thermique de la pile et les transferts de chaleur entre la pile et l'environnement externe sont négligeables.
- Les chutes de pressions dans l'évaporateur et le condenseur sont négligeables.

#### 3.3.1. Modèle électrochimique de PEMFC :

La réaction qui se produit dans l'anode et la cathode de la pile à combustible est comme ce suit :



Pour une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène comme réactifs, l'équation de Nernst s'exprime par [20]:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T_{pac} - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \times T_{pac} (\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2 \ln(P_{O_2})}) \quad (3.1)$$

Avec :

$T_{pac}$  : La température de la cellule (k).

$P_{H_2}$  : La pression partielle de l'hydrogène.

$P_{O_2}$  : La pression partielle de l'oxygène.

$P_{H_2O}^{sat}$  : La pression de vapeur de saturation à la température de fonctionnement [21] est donnée par l'équation (3.2) :

$$\log_{10}(P_{H_2O}^{sat}) = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \times 10^{-7}t^3 \quad (3.2)$$

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

$$t = T_{pac} - 273.15 \quad (3.3)$$

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) [22] :

$$P_{H_2} = 0.5 \times P_{H_2O}^{sat} \left[ \frac{1}{e^{\left(\frac{1653i}{T_{pac}^{1.334}}\right)} \times x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

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

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

$i$  : Densité du courant

$x_{N_2}^{channel}$ , est la fraction molaire de l'azote,  $x_{H_2O}^{sat}$  est la fraction molaire de l'eau dans le flux de gaz à saturation pour une température donnée. Cette relation est donnée par l'équation suivante [23].

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

La fraction molaire de l'azote  $x_{N_2}^{channel}$  dans le flux d'air est donnée par la moyenne logarithmique entre la fraction molaire de l'azote dans un flux d'air humidifié à l'entrée et la fraction molaire à la sortie [23].

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

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

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

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

$\lambda_{air}$  : Est le coefficient stœchiométrique de l'air.



La tension de la pile représente la différence entre la tension à circuit ouvert et les différentes surtensions. Ces derniers sont principalement la perte par activation, de la perte ohmique et la perte par concentration. La tension d'une cellule [21] peut être exprimée comme suit (3.10) :

$$V_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3.10)$$

$V_{pac}$  : 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 chute de tension par 'activation  $V_{act}$ , est causée par la cinétique lente des réactions qui se produites à la surface active des électrodes [24]. Elle est calculée selon :

$$V_{act} = -\left[ -\zeta_1 + \zeta_2 T_{pac} + \zeta_3 T_{pac} (\ln(C_{O_2,conc})) - \zeta_4 T_{pac} (\ln(I)) \right] \quad (3.11)$$

$I$  : est le courant de fonctionnement de la pile.

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  et  $\zeta_4$  sont des coefficients semi-empiriques.

$C_{O_2,conc}$  : représente la concentration de l'oxygène à l'interface cathode/membrane [23].

$C_{H_2,conc}$  : est la concentration de l'hydrogène à l'interface anode/membrane [23].

$$C_{O_2,conc} = 1.97 \times 10^{-7} \times P_{O_2} \times e^{\frac{498}{T_{pac}}} \quad (3.13)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} \times P_{H_2} \times e^{\frac{-77}{T_{pac}}} \quad (3.14)$$

La chute de tension ohmique,  $V_{ohm}$  qui est causée par la chute de tension à travers la résistance équivalente de la membrane  $r_{mem}$  et les résistances de contact à la fois entre la membrane et les électrodes, ainsi qu'entre les électrodes et les plaques bipolaires [24], peut être calculée en utilisant la loi d'Ohm de la manière suivante:

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

$R_{int}$  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) :

$$r_{mem} = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03i + 0.062 \left( \frac{T_{pac}}{303} \right)^2 i^{2.5} \right]}{[\mathcal{E} - 0.634 - 3i] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T_{pac} - 303}{T_{pac}} \right) \right]} \quad (3.17)$$

$\mathcal{E}$  : est le teneur en eau de la membrane.

La chute de tension de concentration  $V_{conc}$  est causée par le transport de masse, qui impact les concentrations d'hydrogène et d'oxygène [24]. Elle peut être déterminée par :

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

$i_L$  : est la densité de courant maximale.

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

$$W_{pac} = N_{cell} V_{pac} I \quad (3.19)$$

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

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

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

$\pi$  : 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 :

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

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

### 3.3.2. Modèle thermique de la pile à combustible PEM :

La réaction électrochimique dans la pile PEMFC permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité. Cependant, une grande partie de cette énergie est dissipée sous forme de chaleur. Selon les conditions nominales, près de 50% de l'énergie produite est dissipée sous forme de chaleur. Afin d'éviter la surchauffe de la pile à combustible, cette énergie excédentaire doit être éliminée. Le calcul de l'énergie calorifique nette est effectué à l'aide du bilan énergétique thermodynamique, qui prend en compte les différentes pertes et flux d'énergie impliqués dans le fonctionnement de la pile à combustible [25] :

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

$\dot{Q}_{net}$  : 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 calculées en utilisant le courant généré par la pile et le nombre de cellules à l'aide des équations suivantes :

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

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

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

Dans le domaine des piles à combustible, il est crucial de maintenir un équilibre entre les débits des réactifs à l'entrée de la pile. En effet, il est essentiel que les débits des réactifs soient égaux ou supérieurs aux taux de consommation afin d'éviter la dégradation de la membrane et la défaillance de la pile à combustible [26]. Pour résoudre ce problème, les coefficients stœchiométriques sont utilisés pour déterminer les débits molaires des réactifs. Ces coefficients permettent de calculer avec précision la quantité nécessaire de chaque réactif pour assurer un fonctionnement optimal de la pile à combustible.

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

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

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 :

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

$C_{H_2}$  ;  $C_{O_2}$  ;  $C_{N_2}$  ;  $C_{H_2O}$  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.

### 3.3.3. Modèle mathématique du cycle organique de Rankine

Pour éviter la surchauffe de la pile sa chaleur résiduelle est absorbé » 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 :

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

$\dot{Q}_{in}$ : 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 :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (3.34)$$

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.

#### 3.3.4. Critères de performances :

L'évaluation des performances du système PEMFC-ORC proposé basée sur la détermination du rendement thermique du système ORC, le rendement électrique de la pile à combustible PEM et le rendement électrique global du système combiné.

Le rendement thermique de l'ORC représente le rapport entre la puissance nette du système ORC est la chaleur fournie par cycle. Il est exprimé par :

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

Le rendement électrique du système ORC est donnée par :

$$\eta_{elec,ORC} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump}}{\dot{n}_{H_2,in} \cdot HHV} \quad (3.37)$$

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

$$\eta_{pac} = \frac{\dot{W}_{pac} - W_{comp}}{\dot{n}_{H_2,in} \cdot HHV} \quad (3.38)$$

Le rendement électrique global est calculé par :

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{pac} - W_{comp} + \dot{W}_{turb} - W_{pump}}{\dot{n}_{H_2,in} \cdot HHV} \quad (3.39)$$

#### 3.4. Organigramme de calcul :

La figure (3.2) indique les étapes de calcul pour évaluer les performances du système combiné lorsque la chaleur dégagée par la pile est transportée par un fluide organique pure. Tandis que la figure (3.3) présente les étapes associées à la détermination des performances du système combiné utilisant des fluides zéotropiques comme fluides de travail pour le système ORC pour une densité de courant prédéfinie.

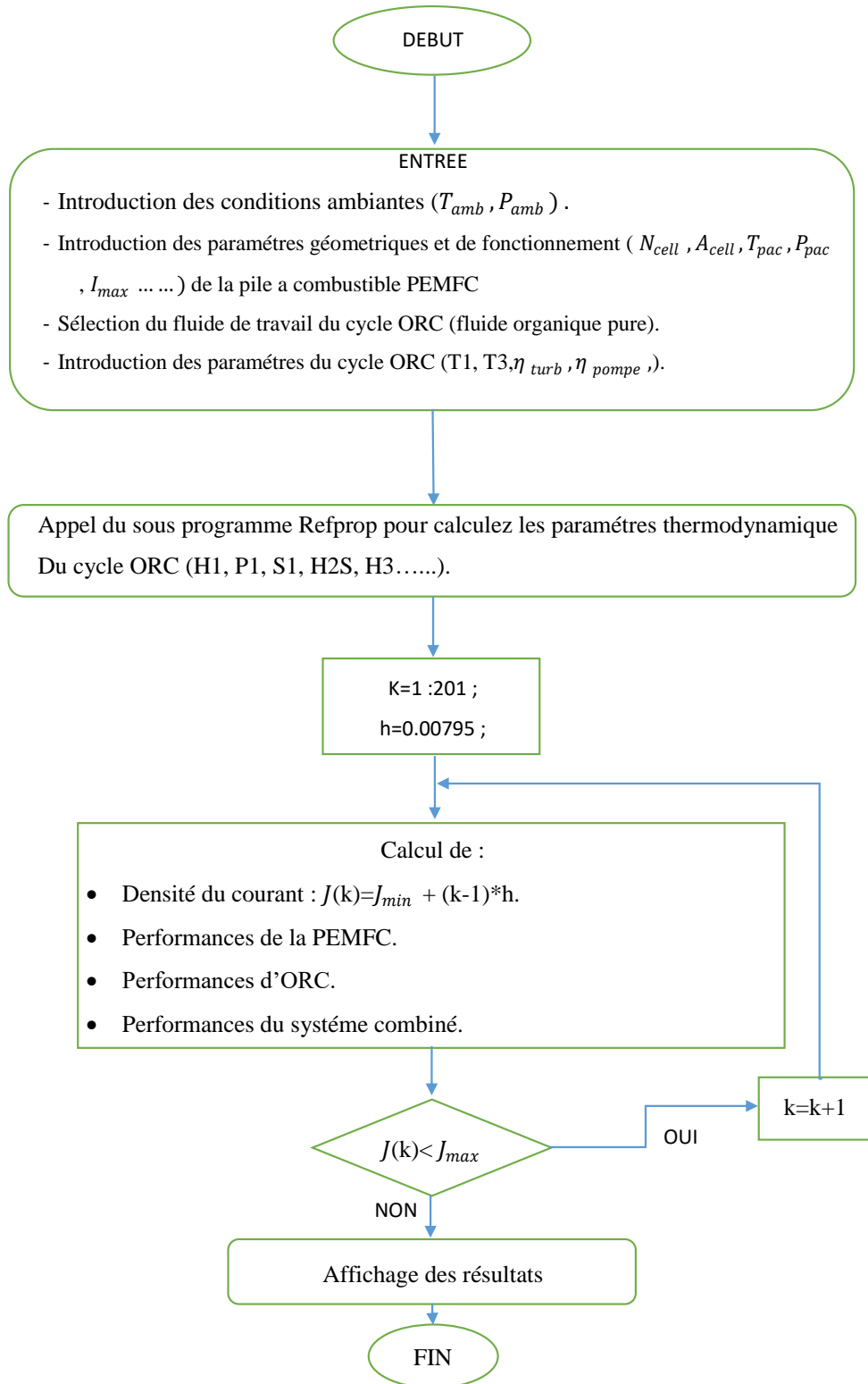
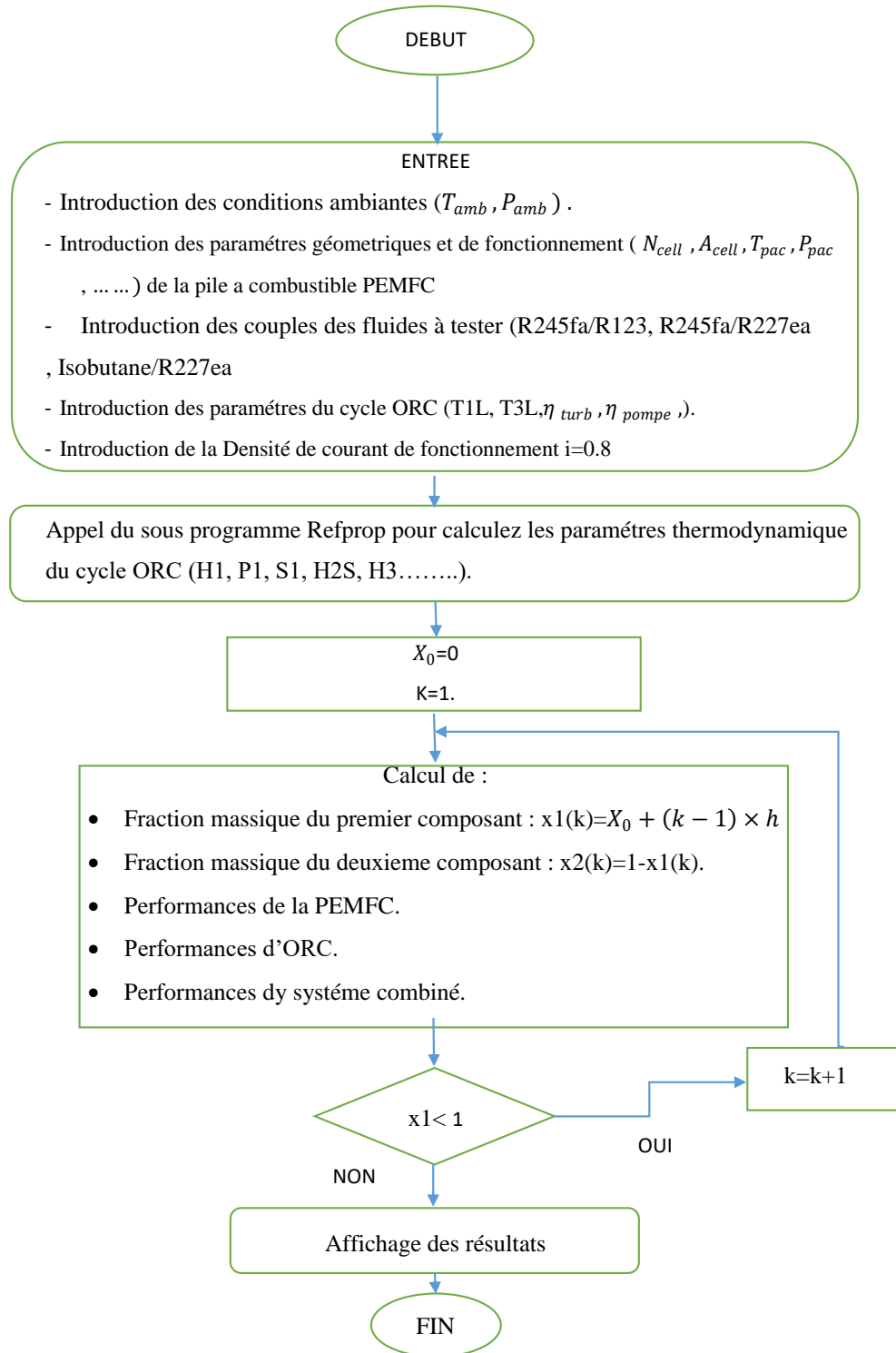


Figure (3.2): Organigramme de calcule pour fluide organique pure.



**Figure (3.3):** Organigramme de calcul pour les fluides zéotropique.



**3.5.Conclusion**

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

## Chapitre 4

### Résultats et interprétations

#### 4.1. Introduction:

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats de simulation obtenus. En premier lieu nous décrivons le comportement de la pile PEMFC ainsi que la validation du modèle électrochimique adopté. Les performances du système combiné sont également présentées, mettant en évidence son potentiel pour une production d'énergie plus efficace tous on utilise des fluides organiques purs. En deuxième lieu une étude comparative des performances du système combiné PEMFC-ORC est effectuée pour mettre en évidence l'effet d'utilisation des fluides zéotropiques sur les performances du système.

#### 4.2. Conditions de simulation :

Dans cette étude, nous utilisons deux types de fluides : les fluides organiques purs et les fluides zéotropiques. Pour les fluides organiques purs, nous utilisons quatre fluides, à savoir le R123, le R227ea, le R245fa et l'isobutane. Pour les fluides zéotropiques, nous utilisons trois mélanges spécifiques : le R123/R245fa, le R227ea/R245fa et l'isobutane/R227ea pour des conditions de fonctionnement prédéfinies. Les conditions et les paramètres du système nécessaires à simulation sont décrits en détail dans le tableau (4.1).

**Tableau 4 1:** Conditions et paramètres de simulation [2].

Symbole	Paramètre	valeur
$\zeta_1$	Coefficients paramétrique basée sur l'électrochimie.	-0.9367
$\zeta_2$	Coefficients paramétrique basée sur l'électrochimie.	0.0030

$\zeta_3$	Coefficients paramétrique basée sur l'électrochimie.	$6.4258 \times 10^{-5}$
$\zeta_4$	Coefficients paramétrique basée sur l'électrochimie.	$-9.5400 \times 10^{-5}$
$n_e$	Nombre d'électrons	2
F	Constante de Faraday	$96,485 \text{ C mol}^{-1}$
R	Constante universel des gaz parfait	$8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$T_{amb}$	Température ambiante	293.15 K
$P_{amb}$	Pression ambiante	1 atm
$N_{cell}$	Nombre de cellules dans la pile	400
$A_{cell}$	Surface active	$280 \text{ cm}^2$
$i_L$	Densité du courant maximale	$1.6 \text{ A cm}^{-2}$
L	Épaisseur de la membrane	0.00127 cm
P	Pression de fonctionnement de la pile à combustible PEM	3 atm
$T_{pac}$	Température de fonctionnement de la pile à combustible PEM	353.15 K
$i$	Densité du courant de fonctionnement de la pile	$0.8 \text{ A cm}^{-2}$
$\lambda_{air}$	coefficient stœchiométrique de l'air	2
$\lambda_{H2}$	coefficient stœchiométrique d'hydrogène	1.25

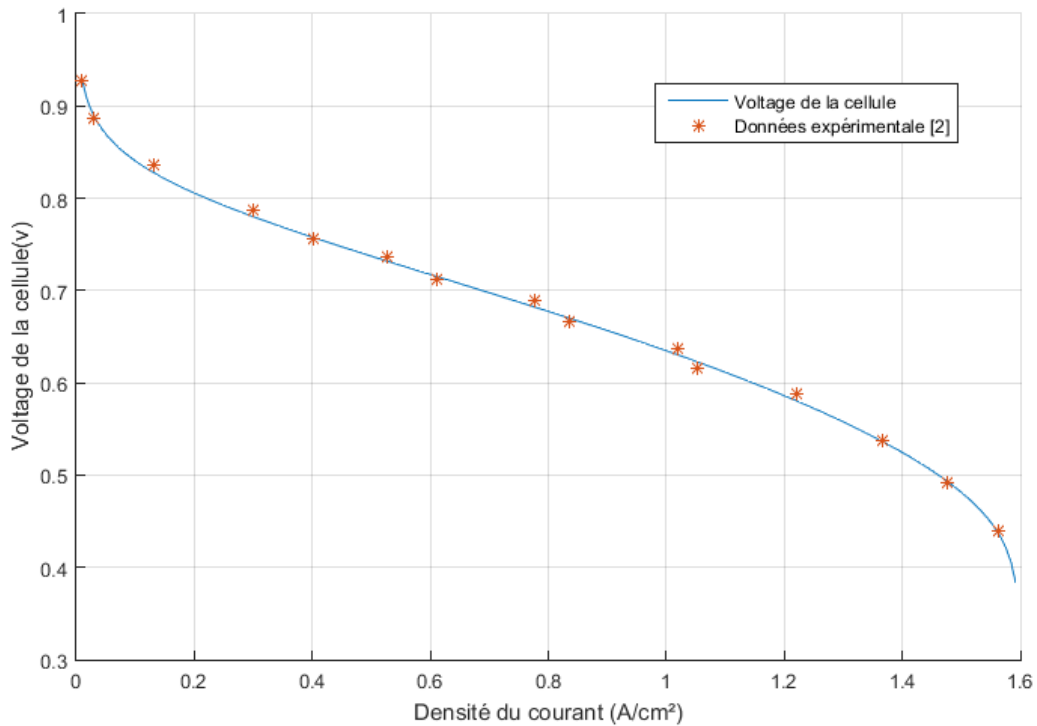
$C_{H_2}$	Capacité calorifique spécifique de l'hydrogène	28.86 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$C_{O_2}$	Capacité calorifique spécifique de l'oxygène	29.72 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$C_{N_2}$	Capacité calorifique spécifique de l'azote	28.39 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$C_{H_2O}$	Capacité calorifique spécifique de l'eau	75.95 J mol <sup>-1</sup>
$H_V$	Chaleur de vaporisation de l'eau	40,644 J mol <sup>-1</sup>
HHV	Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène	285.55 KJ mol <sup>-1</sup>
T1L	Température de début d'évaporation a l'évaporateur (PEMFC)	343.15K
T3L	Température de début de condensation dans le condenseur	293.15K
$\eta_{turb}$	Rendement isentropique de la turbine : ORC	85%
$\eta_{pump}$	Rendement isentropique de la pompe : ORC	85%
$\eta_{comp}$	Rendement isentropique du compresseur d'air : PEMFC	78%

### 4.3. Résultat de simulation pour la pile PEM :

#### 4.3.1. Effet de variation de la densité de courant :

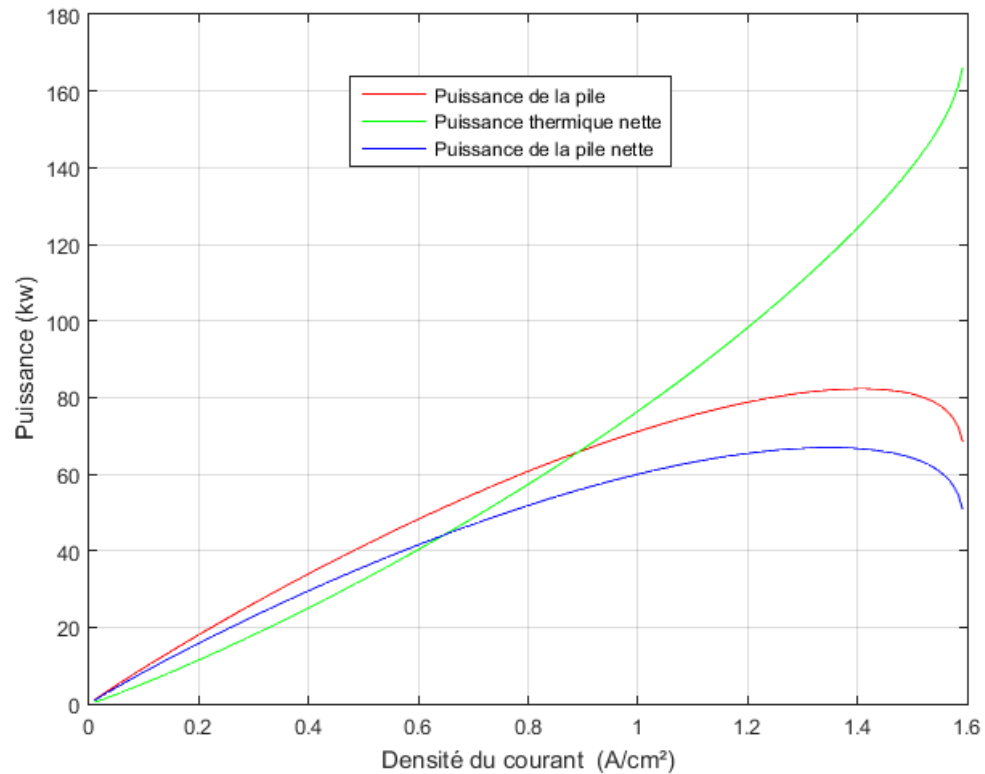
La figure (4.1) présente la variation de la tension d'une cellule PEMFC en fonction de la densité de courant. La courbe illustre une diminution progressive de la tension au début

due aux surtensions d'activation, suivie d'une décroissance linéaire causée par les surtensions ohmiques en suite une décroissance rapide à des densités de courant plus élevées. Les données expérimentales s'accordent avec les résultats de simulation ce qui implique une bonne concordance avec le modèle théorique.



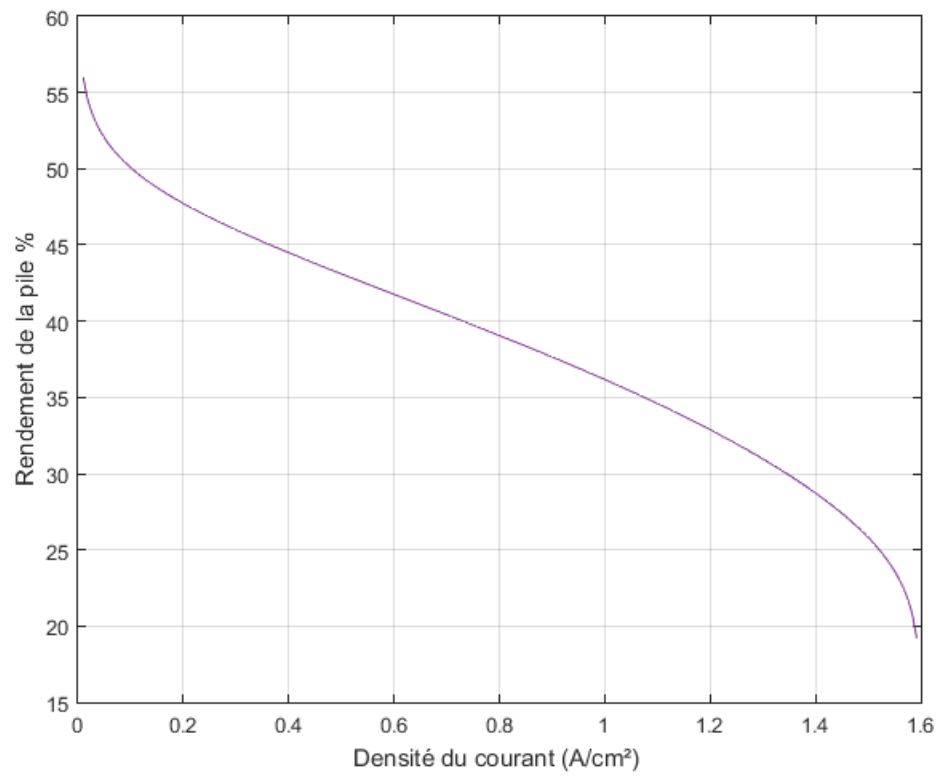
**Figure (4.1):** Courbe de polarisation d'une cellule en fonction de la densité du courant.

La figure (4.2) illustre les relations entre la puissance électrique de la pile PEMFC, la puissance nette (excluant l'énergie consommée par le compresseur) et la puissance thermique correspondant à l'énergie thermique produite par la réaction chimique en fonction de la densité du courant. Cette figure met en évidence une augmentation simultanée de la puissance électrique de la pile et de la puissance nette lorsque la densité du courant augmente. De plus, la puissance thermique générée par la réaction chimique augmente également avec l'augmentation de la densité de courant.



**Figure (4.2):** Courbe de puissance de la pile, puissance thermique nette, et la puissance de la pile nette en fonction de la densité du courant.

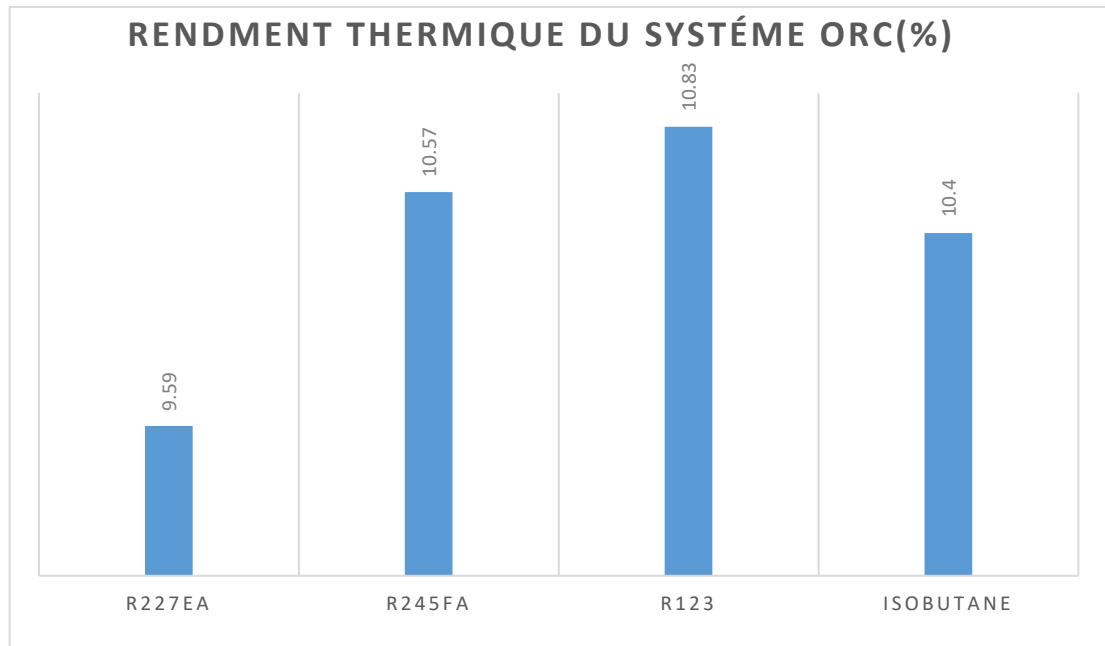
La figure (4.3) présente la variation du rendement de la pile en fonction de la densité du courant. La courbe du rendement de la pile en fonction de la densité du courant présente une pente décroissante, indiquant une diminution du rendement quand la densité du courant augmente. Lorsque la densité du courant est faible, la pile fonctionne généralement dans des conditions de charge légère. Cela permet une meilleure utilisation des réactifs chimiques et réduit les pertes d'énergie. Par conséquent, le rendement est généralement élevé à faible densité de courant.



**Figure (4.3):** Variation du rendement de la pile en fonction de la densité du courant.

#### 4.3.2. Cas d'utilisation des fluides organiques purs :

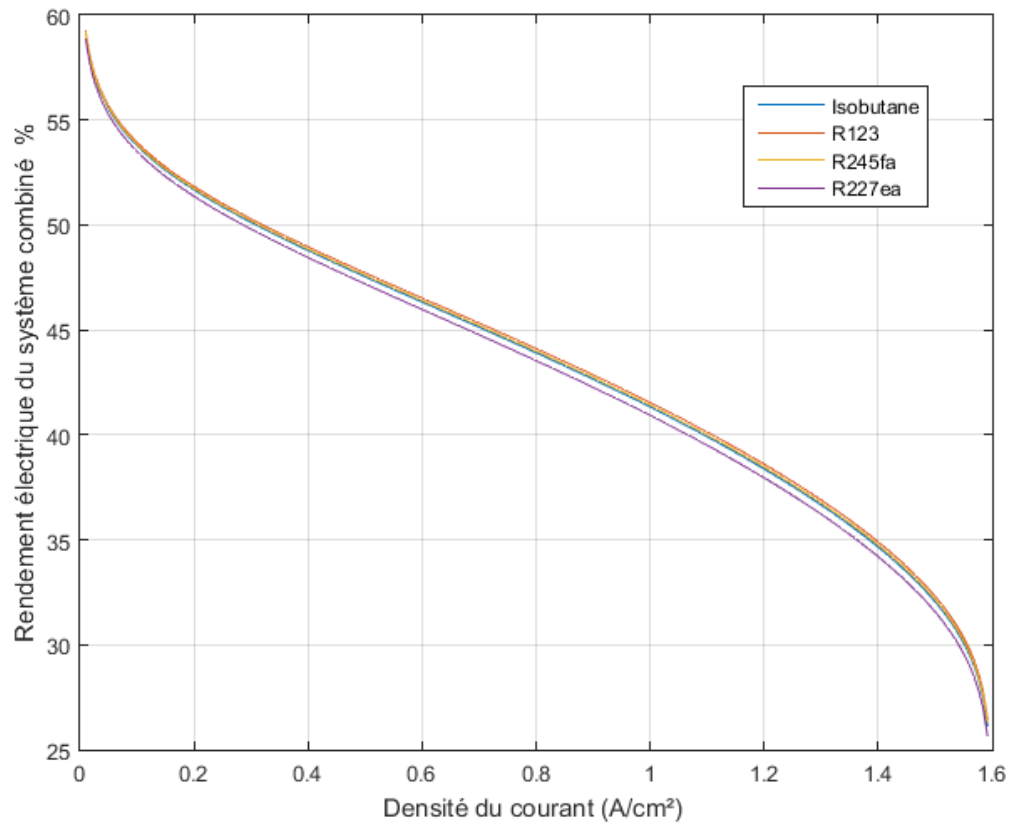
Une comparaison du rendement thermique du cycle ORC est montrée par la figure (4.4) pour différents fluides organiques purs. On constate que le fluide le plus performant est le R123 dont le rendement est de 10.83%, tandis que le R227ea permet de récupérer 9.59% de la chaleur nette de la pile.



**Figure (4.4):** Rendement thermique du cycle ORC pour différents fluides organiques purs.

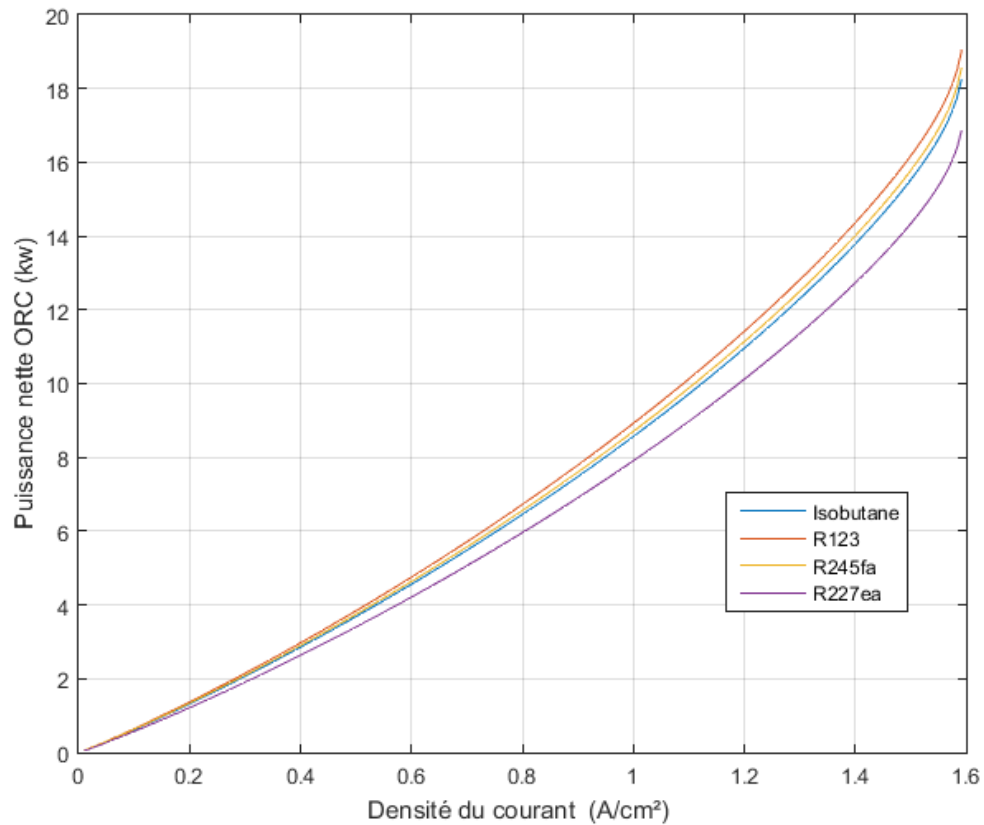
La figure 4.5 illustre la relation entre le rendement électrique global du système PEMFC-ORC en fonction de la densité du courant pour quatre fluides organiques purs (R123, R227ea, R245fa, isobutane) en tant que refroidisseurs et transporteur de chaleur. Il est constaté que le rendement électrique du système combiné suit une forme similaire que celle du rendement de la pile. Parmi les fluides testés, le R123 se présente en tant que le meilleur fluide de travail pour améliorer le rendement électrique du système combiné.





**Figure (4.5):** Variation du rendement électrique du système PEMFC-ORC en fonction de la densité du courant.

La figure (4.6) présente la variation de la puissance électrique nette du système ORC en fonction de la densité du courant pour quatre fluides de travail. On remarque que la puissance nette du système augmente de manière significative pour tous les fluides. Cependant, il est notable que le fluide R123 offre les meilleurs résultats en termes de puissance.



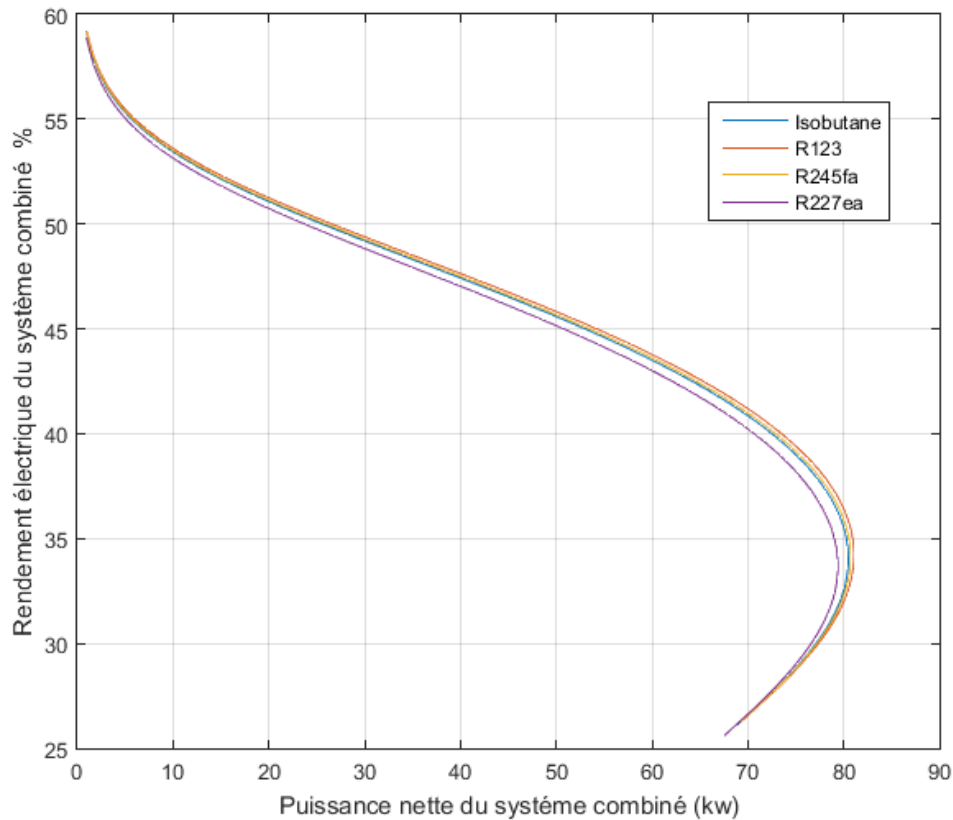
**Figure (4.6):** Variation de la puissance nette ORC en fonction de la densité du courant.

Le tableau 4-1 résume les résultats des fluides de travail purs, incluant le rendement thermique, le rendement électrique et la puissance nette, lors du fonctionnement à une densité de  $0,8 \text{ A/cm}^2$

**Tableau 4 2:** Résultats des fluides de travail organiques purs.

	R123	R227ea	R245fa	ISOBUTANE
Rendement thermique du système ORC(%)	10.83	9.59	10.57	10.4
Rendement électrique du système PEMFC-ORC (%)	44.11	43.54	43.99	43.91
Puissance nette ORC (KW)	6.72	5.96	6.56	6.45

La figure (4.7) illustre la variation du rendement électrique du système combiné en fonction de la puissance nette délivrée. Il est à noter que le rendement subit une diminution lorsque la puissance augmente. Ceci est dû principalement à l'augmentation des surtensions ayant lieu dans la PEMFC. Le R123 permet d'obtenir de meilleures performances en termes de rendement et de puissance électrique.



**Figure (4.7):** Variation du rendement électrique globale en fonction de la puissance nette du système combiné.

Le tableau (4.2) montre le rendement électrique ainsi que la puissance électrique maximale du système combiné pour les quatre fluides étudiés.

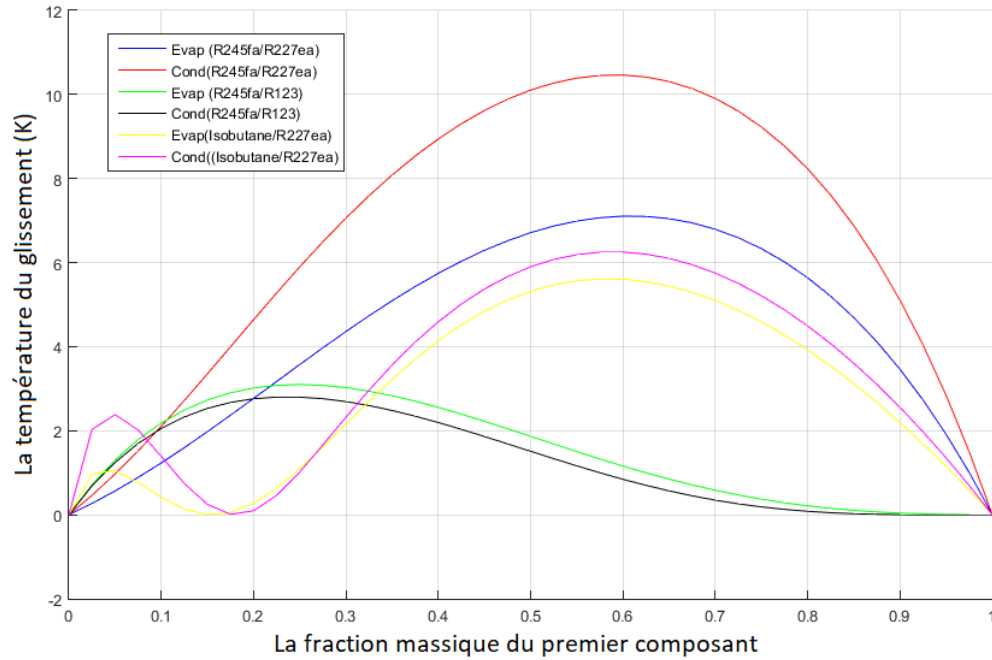
**Tableau 4 3:** Résultats du rendement électrique global et de la puissance nette maximale générée du système combiné.

type des fluides organique pure	R123	R227ea	R245fa	ISOBUTANE
Rendement électrique globale (%)	34.14	33.8	34.17	34.08
Puissance nette du système combiné (KW)	81.08	79.4	80.72	80.48

#### 4.3.3. Cas d'utilisation des fluides zéotropiques :

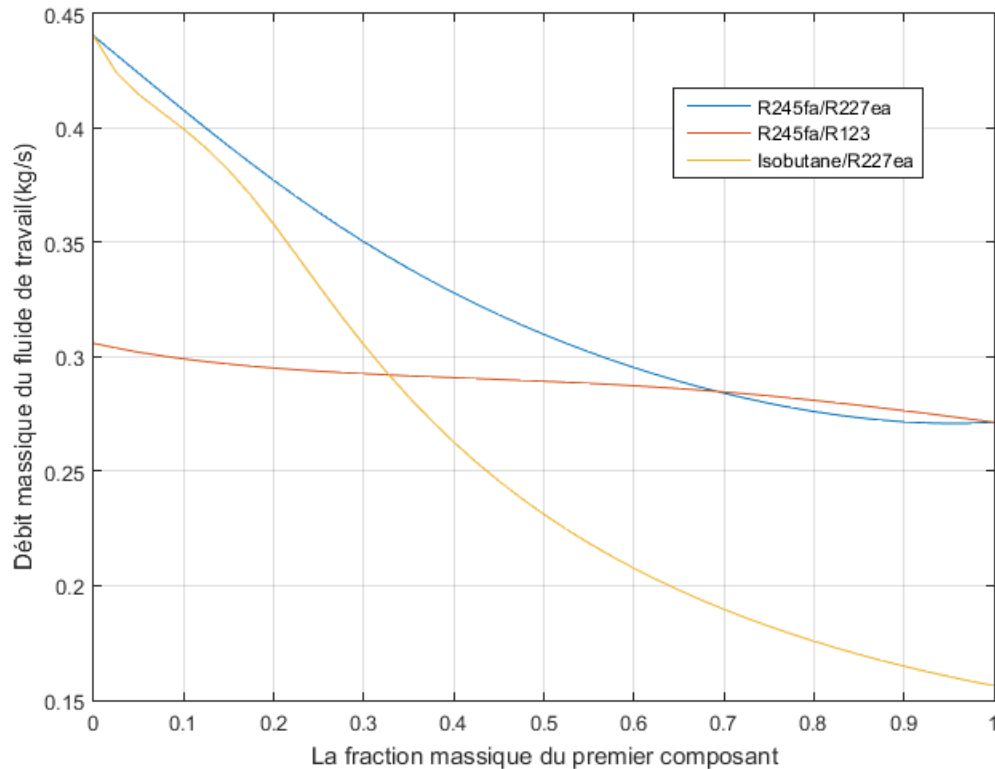
Dans cette partie on s'intéresse à la détermination des performances du système combiné lorsque les fluides zéotropiques sont utilisés pour la récupération de la chaleur nette dégagée par la pile à combustible. Les paramètres de simulation sont identiques à ceux présentés dans le tableau (4.1), sauf que les performances sont présentées pour une densité de courant prédéfinie ( $0.8\text{A}/\text{cm}^2$ ), de plus la température du fluide organique de début d'évaporation dans l'évaporateur est de  $343.15\text{K}$  (T1L), d'autre part la température de début de condensation dans le condenseur est de  $293\text{K}$  (T3L) (voir figure 2.4).

Les tendances du glissement de la température dans l'évaporateur et le condenseur en fonction de la fraction massique des mélanges zéotropiques à savoir, R245fa/R227ea, isobutane/R227ea et R245fa/R123 sont montrées dans la figure (4.8). Un comportement de type presque parabolique avec un maximum légèrement décalé est constaté en ce qui concerne le glissement de température pour le mélange R245fa/R227ea. Cependant, pour le mélange isobutane/R227ea, un point azéotrope peut être trouvé autour d'une fraction massique de 0.18 pour l'isobutane. En outre, le glissement maximal de température du mélange R245fa/R227ea est beaucoup plus élevé que celui des mélanges isobutane/R227ea et R245fa/R123. Le mélange R245fa/R123 se comporte comme un fluide azéotrope au-delà d'une fraction massique de (0.8/0.2). Cela contribuera à une meilleure compréhension de la relation entre les mélanges zéotropiques et les performances du système.



**Figure (4.8):** Variation La température du glissement en fonction de la fraction massique du premier composant.

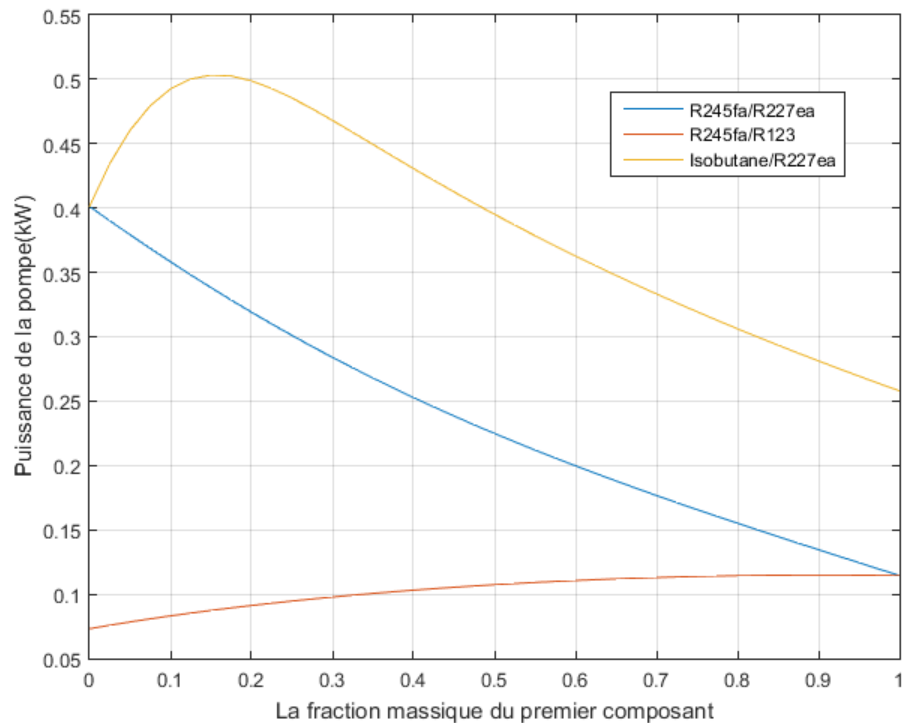
La figure (4.9) montre l'effet de la variation de la fraction massique du premier composant du mélange sur le débit de masse du fluide de travail du système ORC pour différents mélanges zéotropiques. Le débit massique est en relation directe avec les propriétés du fluide organique car la chaleur nette produite par la pile est fixe. Le débit est maximum lorsque le R227ea et R123 sont utilisés seules. On note que lors de l'utilisation des mélanges zéotropiques le débit du fluide subit une diminution. D'autre part l'utilisation de l'isobutane entraîne le plus faible débit.



**Figure (4. 9):** Variation Débit massique du fluide de travail (kg/s) en fonction de la fraction massique du premier composant.

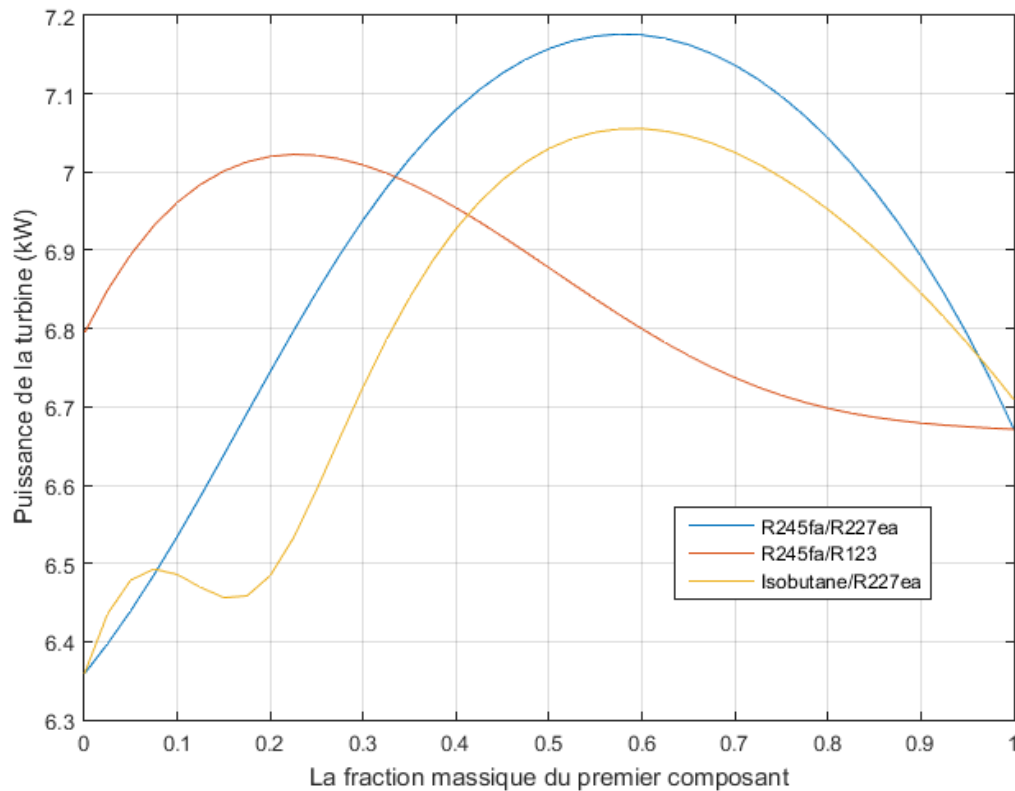
La figure 4.10 illustre l'évolution de la puissance consommée par la pompe pour les trois mélanges zéotropiques. Pour le R245fa/R227ea, on observe une diminution de la puissance consommée par la pompe au fur et à mesure que la fraction massique du premier composant augmente. Tandis que, pour le R245fa/R123 la puissance augmente progressivement. L'utilisation de Isobutane/R227ea entraîne au début une augmentation de la puissance consommée jusqu'à avoir un maximum de 0.5 kW autour d'une fraction massique de 0.18 pour l'isobutane, puis elle diminue lorsque la fraction massique de ce dernier augmente.

Il est intéressant de noter que la puissance consommée par la pompe est plus faible pour le cas du R123.



**Figure (4. 10):** Variation de la puissance consommée par la pompe en fonction de la fraction massique du premier composant.

La variation de la puissance générée par la turbine en fonction de la fraction massique du premier composant de différents fluides zéotropiques est indiquée par la figure (4.11). Pour le R245fa/R227ea, on remarque que la puissance de la turbine débute de 6.3 kW, ensuite elle augmente jusqu'à atteindre son maximum de 7.17 kW à une fraction de 0.6/0.4 (R245fa/R227ea). Au-delà de cette fraction, la puissance de la turbine diminue. Avec l'utilisation de R245fa/R123 la puissance maximale développée est de 7.02 kW pour une fraction de 0.22/0.78. L'utilisation du mélange Isobutane/R227ea nous a permis de constater, la turbine génère une puissance maximale de turbine de 7.056 kW pour une fraction massique de 0.625/0.375. L'augmentation et la diminution de la puissance sont directement liées à aux propriétés thermodynamiques du fluide de travail ainsi que le débit massique. Les mélanges de fluides zéotropiques peuvent entraîner des variations d'enthalpie, pouvant conduire soit à une augmentation, soit à une diminution de la puissance. Après avoir examiné trois mélanges étudiés, nous pouvons déduire que le mélange R245fa/R227ea offre les meilleures performances.



**Figure (4. 11):** Variation de la puissance générée par la turbine.

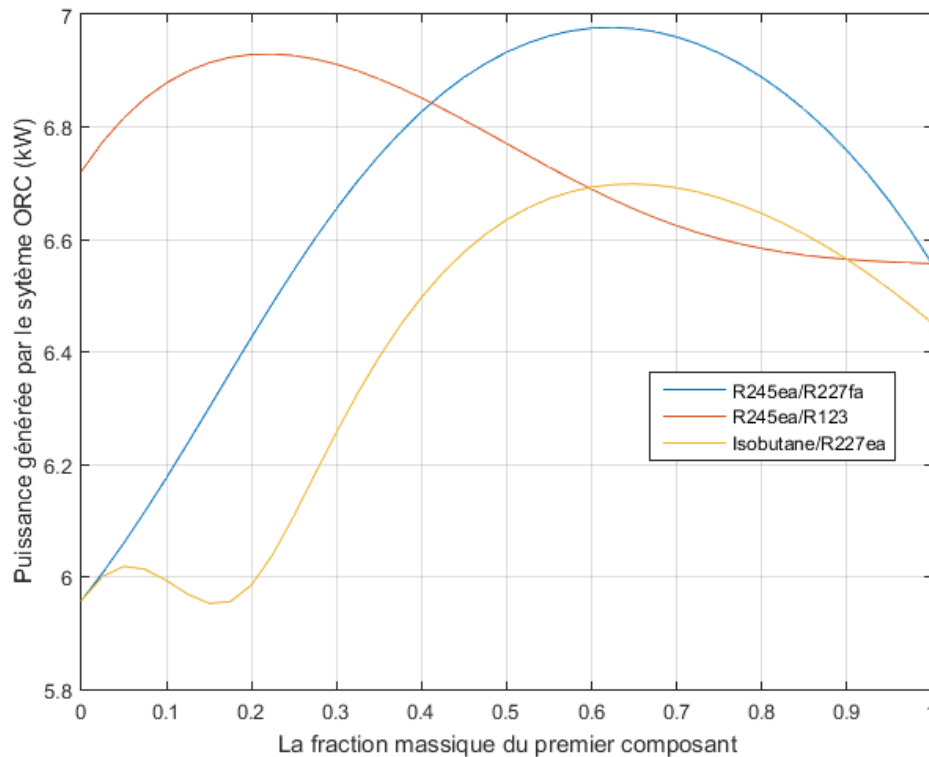
La figure (4.12) montre la variation de la puissance nette délivrée par le système ORC en fonction de la fraction massique des mélanges zéotropiques. Pour le R245fa/R227ea, la puissance débute par une valeur de 5.95 kW correspondant au cas du fluide pur R227ea. Une fois que la fraction massique du R245fa augmente tout en diminuant celle du R227ea, on remarque que la puissance générée par le système ORC augmente jusqu'à avoir une valeur maximale de 6.97 kW pour une fraction massique de 0.6/0.4. À partir de cette fraction, la puissance commence à diminuer progressivement. Une puissance de 6.56 kW est obtenue lorsque le R245fa est utilisé comme fluide de travail. Lorsque le mélange R245fa/ R123 est utilisé comme fluide de refroidissement de la pile et récupérateur de chaleur, on constate que la puissance du système ORC débute par une puissance de 6.72 kW. L'augmentation de la fraction massique du R245fa engendre une élévation de la puissance, un maximum de



6.93kW est obtenu pour une fraction de 0.225 du R245fa. Au-delà de cette fraction, la puissance subit une diminution provoquée par la diminution de la température de glissement. Une puissance de 6.56 kW est obtenue lorsque le R245fa est utilisé.

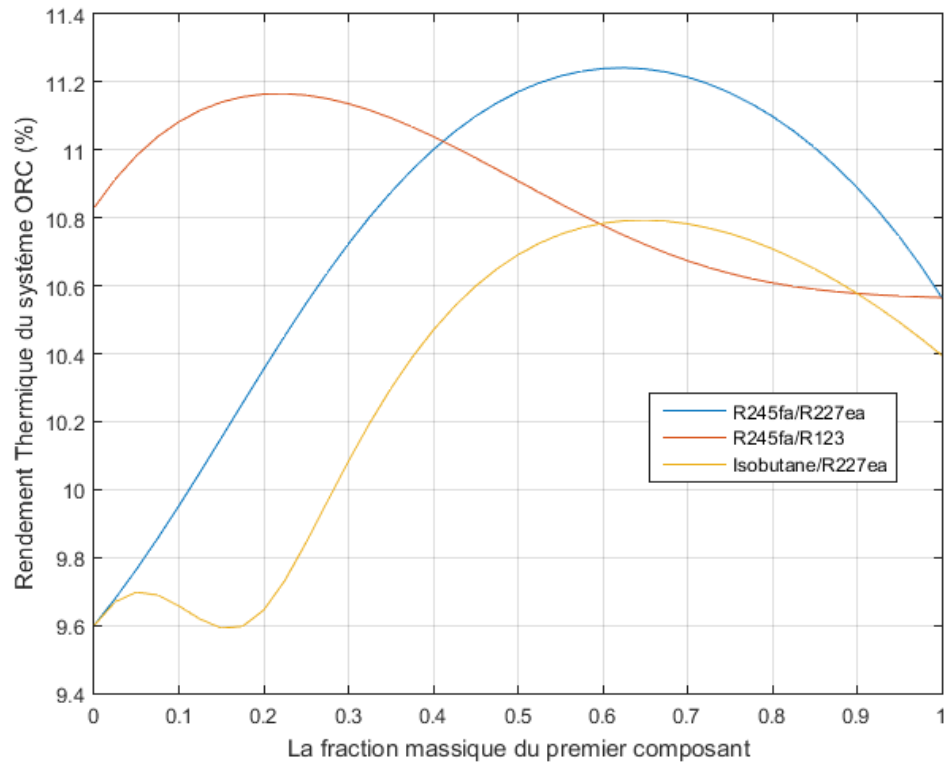
Concernant le mélange Isobutane/R227ea, la puissance générée par le système ORC est délimité par 5.95 kW et 6.45 kW correspondants respectivement au cas d'utilisation des fluides purs R227ea et Isobutane. On note aussi que l'augmentation de la fraction de l'isobutane entraine une augmentation de la puissance dont le maximum de 6.69 kW est obtenu lorsque la fraction est de 0.625/0.375. Par la suite, la courbe décroît progressivement.

L'analyse des résultats obtenus permet de conclure que la puissance développée par le système ORC est lié directement à la variation du débit massique du fluide de travail, la puissance consommée par la pompe et les propriétés thermodynamiques du fluide organique. Il est à noter que le mélange R227ea/R245fa est le plus performant comparativement à Isobutane/R227ea et R245fa/ R123.



**Figure (4. 12):** Variation de la puissance générée par le système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant.

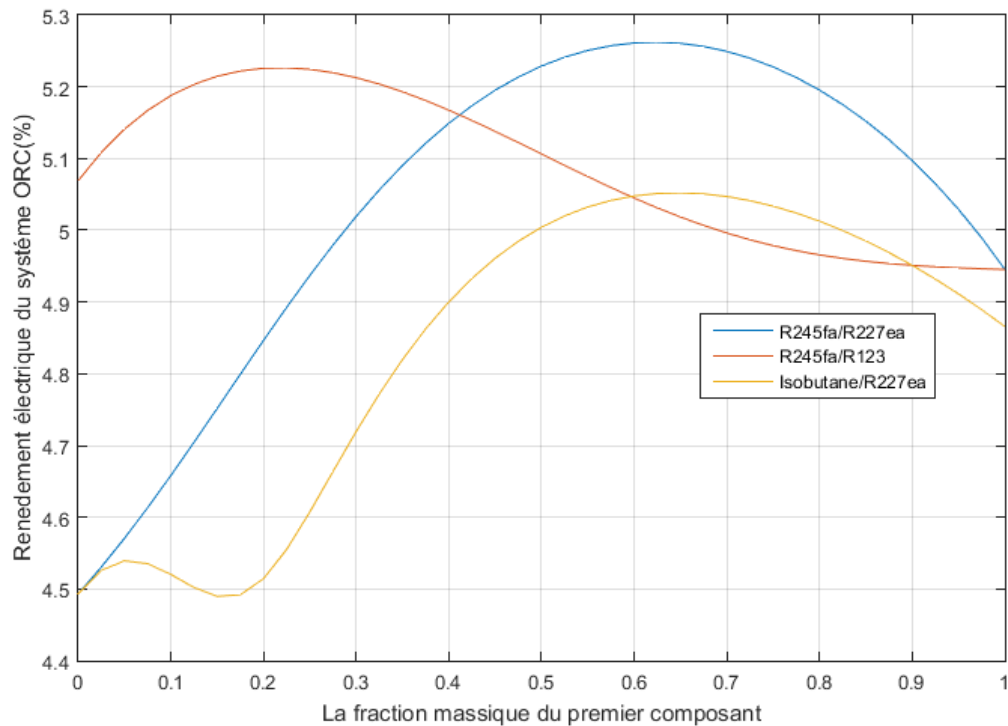
L'évolution du rendement thermique du cycle ORC est indiquée par la figure (4.13). Un comportement similaire à celui de la puissance nette développée par le système ORC est obtenu. Ceci peut être expliqué par le fait que la chaleur résiduelle de la pile est la même. L'utilisation de R245fa/R227ea offre un rendement maximum de 11.24% à une fraction massique de 0.6/0.4 suivie d'une valeur de 11.17% pour le R245fa/R123 à une fraction de 0.22/0.78, alors qu'une valeur de 10.79% est obtenue lors de l'utilisation du mélange Isobutane/R227ea à une fraction de (0.625/0.375). Une augmentation de la puissance du cycle ORC est associée à une amélioration du rendement thermique, tandis toute diminution de la puissance du cycle ORC entraîne une diminution du rendement thermique. Parmi les mélanges étudiés le R245fa/R227ea se présente comme étant le meilleur.



**Figure (4. 13):** Variation du rendement thermique du système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant.

La figure (4.14) montre la variation du rendement électrique du système ORC pour les trois mélanges étudiés. On remarque que l'évolution du rendement est affectée par la puissance

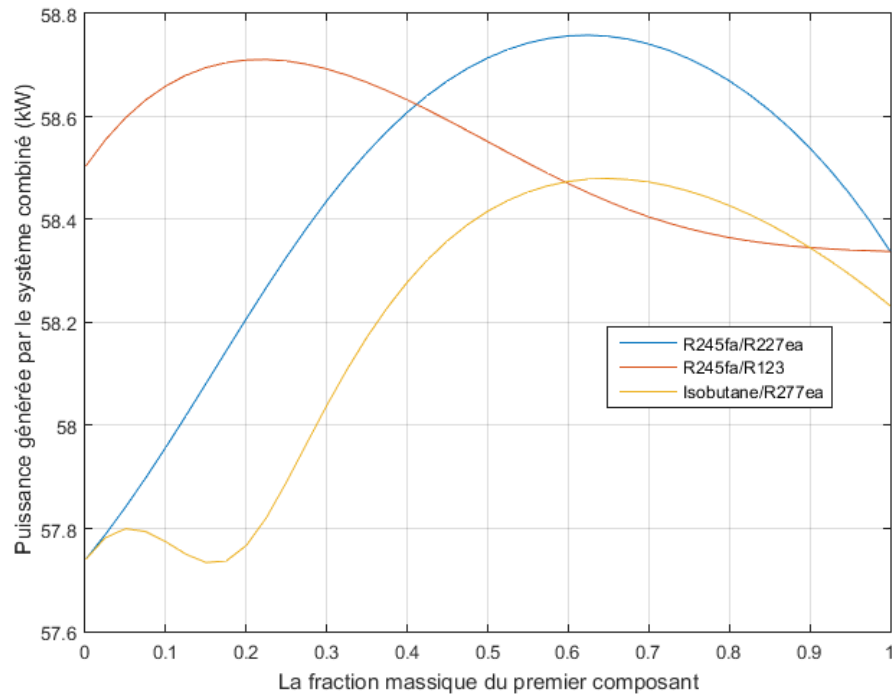
nette du système ORC. Les valeurs optimales sont 5.26% pour le R245fa/R123, 5,22% pour R245fa/R227ea et 5.05% Isobutane/R227ea.



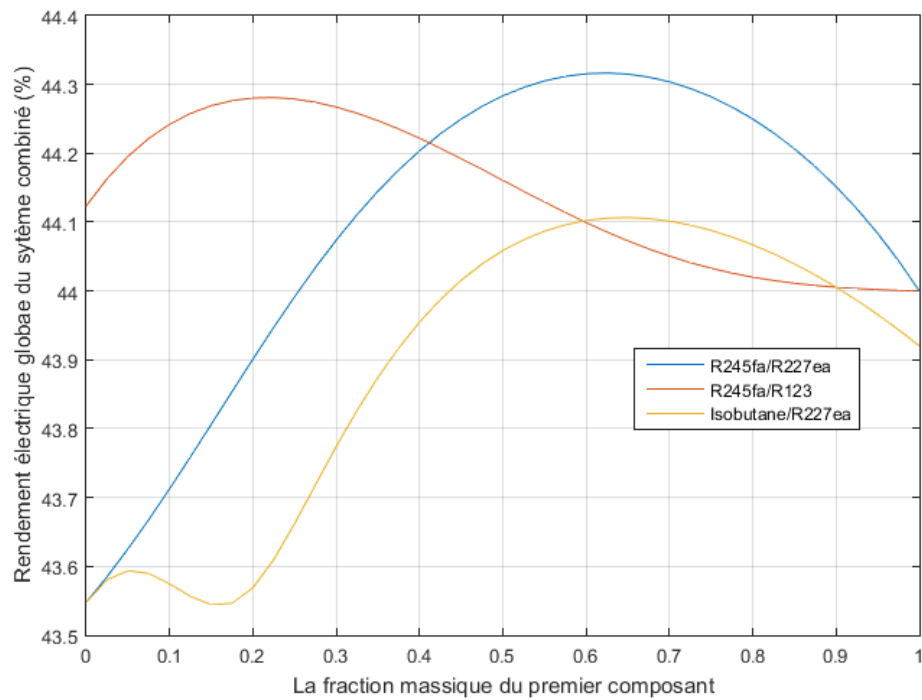
**Figure (4. 14):**Rendement électrique du système ORC en fonction de la fraction massique du premier composant

Les figures (4.15) et (4.16) montrent respectivement la variation de la puissance développée ainsi que le rendement global du système combiné PEMFC-ORC en fonction de la fraction du mélange du fluide de travail. Étant donné que la puissance électrique générée par le système PEMFC est prise constante pour un point de fonctionnement prédéfinie (0.8 A/cm<sup>2</sup>), le comportement du système combiné suit parfaitement celui du système ORC.

La puissance et le rendement du système combiné ont des valeurs optimales correspondantes aux fractions prés déduites précédemment pour chaque mélange. Il s'agit de 58.76 kW et 44.32% pour R245fa/R227ea, 58.71kW et 44.28% pour R245fa/R123 et 58.48 kW et 44.11% pour Isobutane/R227ea. Les fluides zéotropiques sont plus efficaces que les fluides organiques purs à cause du glissement de la température lors du changement de phase dans le condenseur et l'évaporateur.



**Figure (4.15):** Variation de la puissance générée par le système combiné en fonction de la fraction massique du premier composant.



**Figure (4.16):** Variation du Rendement électrique globale du système combiné en fonction de la fraction massique du premier composant.

**4.3.4. Comparaison des performances du système:**

Après avoir analysé résultats les résultats obtenus, le tableau (4-2) résumé les performances optimale du système en considérant les trois fluides zéotropique utilisés à savoir, R245fa / R227ea, R245fa/R123 et Isobutane/R227ea.

**Tableau 4 4:** Résultats des fluides zéotropique.

	(R245fa/R227ea) (0.6/0.4)	(R245fa/R123) (0.22/0.78)	(ISOBUTANE/R227ea) (0.625/0.375)
Le Debit massique (kg/s)	0.295	0.294	0.202
La Puissance consommée par la pompe (kW)	0.199	0.09	0.355
La Puissance de la turbine (kW)	7.17	7.02	7.056
La Puissance du système ORC (kW)	6.97	6.93	6.69
Rendement thermique du cycle ORC (%)	11.24	11.17	10.79
Rendement électrique du système ORC (%)	5.26	5.22	5.05
La Puissance du système combiné (KW)	58.76	58.71	58.48
Rendement électrique du système combiné (%)	44.32	44.28	44.11

**4.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats de simulation de la PEMFC, du système ORC et du système combiné. Nous avons examiné les conditions spécifiques de fonctionnement de la pile à combustible et du système. Les résultats montrent que le système combiné proposé est une bonne solution pour une utilisation pratique dans la production d'électricité et la récupération de la chaleur résiduelle des piles à combustible PEM. Nous avons noté également que la température de glissement et les propriétés thermodynamiques du fluide zéotropique ont un impact considérable sur le fonctionnement global du système combiné. Un choix adéquat du fluide approprié est essentiel pour améliorer les performances du système.



### **Conclusion générale**

L'objectif principal de notre travail est d'examiner les performances d'un système combiné PEMFC-ORC dont le système ORC permet d'exploiter la chaleur résiduelle générée par la pile à combustible et de la convertir en électricité supplémentaire. Pour ce faire un modèle mathématique a été adopté afin de simuler le comportement du système.

Dans la première partie de notre étude, nous avons simulé et analysé les performances du système combiné PEMFC-ORC en utilisant des fluides purs (R245fa, R123, R227ea et Isobutane) pour faire fonctionner le système ORC. Les résultats obtenus ont démontrés des performances satisfaisantes en termes de puissance électrique et de rendement global surtout pour le cas du R123. Cependant, des améliorations supplémentaires pourraient être envisagées pour augmenter davantage le rendement et la puissance générée.

Dans la deuxième partie de notre étude, nous avons exploré le fonctionnement du système ORC en utilisant des fluides zéotropiques. Cette approche a ouvert de nouvelles perspectives en termes de performances. Le fluide zéotropique a démontré des propriétés intéressantes telles que le glissement de la température en changement de phase. Cependant, l'utilisation d'un fluide zéotropique nécessite une attention particulière pour la gestion de la composition du mélange et la stabilité du système. Il est intéressant de mentionner que le mélange zéotropique R245fa/R227ea avec une fraction de 0.6/0.4 offre les meilleures performances comparativement à R245fa/R123 et Isobutane/R227ea.

En général, notre étude a confirmé que le système combiné PEMFC-ORC est une solution prometteuse pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la production d'électricité propre. Il est important de souligner que notre étude n'a pas abordé tous les aspects potentiels du système combiné PEMFC-ORC, et qu'il existe encore des opportunités de recherche et de développement pour améliorer les performances, la durabilité et l'efficacité de ce système. Cependant, nous espérons que nos résultats préliminaires encourageront d'autres étudiants à explorer davantage cette technologie prometteuse et à contribuer à son avancement.

## ***Conclusion générale***

---

En conclusion, le système combiné PEMFC-ORC, qu'il fonctionne avec un fluide pur ou un fluide zéotropique, présente un fort potentiel en tant que solution énergétique propre et efficace.

## **Bibliographie**

- [1] Kandlikar, S. G., & Lu, Z. (2009). Thermal management issues in a PEMFC stack – A brief review of current status. *Applied Thermal Engineering*, 29(7), 1276–1280.
- [2] Wang, C., Li, Q., Wang, C., Zhang, Y., & Zhuge, W. (2021). Thermodynamic analysis of a hydrogen fuel cell waste heat recovery system based on a zeotropic organic Rankine cycle. *Energy*, 232, 121038.
- [3] Azad, A., Fakhari, I., Ahmadi, P., & Javani, N. (2021). Analysis and optimization of a fuel cell integrated with series two-stage organic Rankine cycle with zeotropic mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [4] He, T.; Shi, R.; Peng, J.; Zhuge, W.; Zhang, Y. Waste Heat Recovery of a PEMFC System by Using Organic Rankine Cycle. *Energies* 2016, 9, 267.
- [5] B. Dong, G. Xu, T. Li, Y. Quan, J. Wen, Thermodynamic and Economic Analysis of Zeotropic Mixtures as Working Fluids in Low Temperature Organic Rankine Cycles, *Applied Thermal Engineering* (2017),
- [6] Mapengo & Miri(2022) Analyse thermodynamique d'un système hybride PEMFC-ORC (PFE 2022 USDBlida master 2)
- [7] Satanphol K, Pridasawas W, Suphanit B, A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery, *Energy* (2017).
- [8] Enhua Wang, Mengru Zhang, Fanxiao Meng, Hongguang Zhang (2022), Zeotropic working fluid selection for an organic Rankine cycle bottoming with a marine engine, *Energy* Volume 243.
- [9] Su, W., Hwang, Y., Deng, S., Zhao, L., & Zhao, D. (2018). Thermodynamic performance comparison of Organic Rankine Cycle between zeotropic mixtures and pure fluids under open heat source. *Energy Conversion and Management*, 165, 720–737.

## ***Bibliographie***

---

- [10] Chen, X., Liu, C., Li, Q., Wang, X., & Xu, X. (2019). Dynamic analysis and control strategies of Organic Rankine Cycle system for waste heat recovery using zeotropic mixture as working fluid. *Energy Conversion and Management*, 192, 321–334.
- [11] United States Department of Energy. (2019). Fuel Cell Technologies Office. Récupéré le 16 mai 2023, sur <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office>
- [12] BADIS Tarek et BELHOUT Karim Simulation d'une pile à combustible de type PEMFC », mémoire de master, université de SAAD Dahlab de Blida, décembre 2012
- [13] BLUNIER (B.) et MIRAOUI (A.). - Piles à combustible : Principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés. ELLIPSES (2007).
- [14] Sylvain Quoilin (2011). Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications. Presented to the Faculty of Applied Science of the University of Liège, Belgium
- [15] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, 2007.
- [16] Sylvain Quoilin and Vincent Lemort, The organic Rankine cycle: Thermodynamics, Applications and Optimization: Energy Systems Research Unit, University of Liège, Belgium;
- [17] <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/criteres-choix.html> (13 avril 2023)
- [18] D. C. Bândeian, S. Smolen, J. T. Cieslinski (), Working fluid selection for Organic Rankine Cycle applied to heat recovery systems
- [19] calm JM , Hourahna GC , 2011 , “physical , safety , and environmental data for current and alternative Refrigerant , “ Refrigeration for sustainable Development ( proceedings of the 23<sup>rd</sup> international congress of refrigeration (ICR 2011, Prague, Czech Republic , 2011.08.21-26), International institute of refrigeration (IIR/IIF), PARIS, FRANCE

## ***Bibliographie***

---

- [20] Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A. I., Jensen, H. M., Peppley, B. A., & Roberge, P. R. (2000). Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 86(1-2), 173–180.
- [21] Wang, C., Li, Q., Wang, C., Zhang, Y., & Zhuge, W. (2021). Thermodynamic analysis of a hydrogen fuel cell waste heat recovery system based on a zeotropic organic Rankine cycle. *Energy*, 232, 121038.
- [22] Abdi, H., et al.(2021). « Modelling 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.
- [23] Zhao, P., Wang, J., Gao, L., & Dai, Y. (2012). Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton
- [24] Alireza Askarzadeh and Alireza Rezazadeh « Optimization of PEMFC model parameters with a modified particle swarm optimization » *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* , Int. J. Energy Res. 2011; 35:1258–126
- [25] Ernest Hemingway. (2017).Efficiency and Heat Management in Fuel Cell Systems
- [26] J. Smith, (2022) Optimizing Reactant Flow Rates in Fuel Cell Stacks, *Journal of Energy Engineering*, exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(4), 3382–3391.