

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie Mécanique »

Option :

« Energétique »

Titre :

**Etude des performances d'un cycle organique de Rankine
intégré à une pile à combustible**

Réalisé par :

ATTOU Bouziane

Encadré par :

Dr. TOUAIBI Rabah

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers maman et papa, que Dieu les protège

A toute ma famille, mes amis et mes collègues

A tous ceux qui m'ont aidé à terminer cette lettre et à tous ceux qui m'ont soutenu
tout au long de ma carrière

Remerciements

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier Allah tout-puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur de ce mémoire, Rabah TOUAIBI, pour son soutien, son expertise et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail. Sa disponibilité et sa patience ont été des éléments clés dans l'aboutissement de ce projet.

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers Ahmed Mouissi, étudiant en doctorat, pour sa contribution à l'élaboration de ce travail qui s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes parents et toute ma famille pour leur soutien tout au long de mes études.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à ce travail

Résumé :

Résumé :

Cette étude présente un examen approfondi des performances d'une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) couplée à un système de cycle organique de Rankine (ORC). Pour simuler le système, un modèle thermodynamique a été développé. La recherche comporte deux volets principaux. La première phase se concentre sur l'étude des effets de la température et de la pression de fonctionnement sur les performances de la SOFC. Dans la deuxième partie, l'impact des différents fluides de travail utilisés dans l'ORC sur les performances du système SOFC/ORC a été étudié, l'étude démontre que la cogénération entre la SOFC et l'ORC améliore l'efficacité du système, qui passe de 40 % à 60 %. Les résultats révèlent que le fluide optimal pour ce système est le R290

Abstract :

Abstract :

This study presents a comprehensive investigation into the performance of a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) coupled with an Organic Rankine Cycle (ORC) system. To simulate the system a thermodynamic model was developed. The research comprises two main components. The first phase focuses on studying the effects of operating temperature and pressure on the performance of the SOFC. In the second phase. The study demonstrates that the cogeneration between the SOFC and ORC enhances the system's efficiency where it increased from 40% to 60%. In the second part, the impact of different working fluids used in the ORC on the system's performance was investigated. The findings reveal that the optimal fluid for this system is R29

ملخص :

تقدم هذه الدراسة تحقيقاً شاملاً في أداء خلية وقود الأكسيد الصلب (SOFC) إلى جانب نظام دورة رانكين العضوية (ORC). لمحاكات هذا النظام تم تطوير نموذج حراري ديناميكي عن طريق برنامج رقمي. حيث يتكون هذا البحث من عنصرين رئيسيين. تركز المرحلة الأولى على دراسة آثار درجة حرارة التشغيل والضغط على أداء SOFC. في المرحلة الثانية، يتم استكشاف تأثير سوائل العمل المختلفة المستخدمة في ORC على أداء نظام (ORC) ويتم إجراء تحقيق لفحص تأثيرات سوائل العمل في ORC على أداء نظام (SOFC / ORC)، ودراسة الفرق بين كفاءة نظام ORC بسيط ونظام مدمج (SOFC / ORC). دراسة آثار درجة حرارة المبخر والضغط على أداء النظام (SOFC / ORC) حيث كشفت النتائج أن السائل الأمثل لهذا النظام هو R290. توضح هذه الدراسة أن التوليد المشترك بين SOFC و ORC يعزز من كفاءة النظام بحيث ترتفع من 40 % إلى 60 %، كما توضح الدراسة أن أرفع من درجة حرارة المبخر يؤثر إيجابياً على كفاءة النظام

Sommaire

Dédicaces:	
Remerciements :	
Résumé :	
Liste des figures :	I
Liste des tableaux :	I
Nomenclature :	II
Les indices :	II
Abréviations:	III
Introduction générale :	1
Chapitre 01 : généralités sur les piles à combustible et les cycles ORC	
1.1 Introduction	2
1.2 Les piles à combustible	2
1.2.1 Histoire de la pile à combustible	2
1.2.2 Principe de fonctionnement des piles à combustible	3
1.2.3 Différents types de piles à combustible	4
1.2.4 Applications des piles à combustible	8
1.3 Les cycles Organique de Rankine	9
1.3.1 Principe de fonctionnement des cycles ORC	9
1.3.2 Applications des cycles ORC	10
1.4 Perspectives d'avenir pour les deux technologies	11
1.4.1 Piles à combustible :	11
1.4.2 Cycles ORC :	11
1.5 Les cycles combinés SOFC-ORC	12
1.6 Fluides organiques utilisé par les cycles de Rankine	13
Chapitre 02 : Etude paramétrique d'une pile à combustible	
2.1 Introduction	15
2.2 Description de la pile à combustible SOFC	15
2.3 Bilan électrochimique et énergétique	16
2.3.1 Bilan Electrochimique	16

2.3.2 Bilan énergétique	19
2.3.3 Les performances de la pile à combustible SOFC :.....	20
2.4 Résultats et discussions :.....	21
2.4.1 Effet de la densité du courant :	22
2.4.2 Effet de la température de fonctionnement de la pile :	23
2.4.3 Effet de la pression de fonctionnement :	24
2.5 Conclusion	25

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

3.1 Introduction.....	26
3.2 Description du système combiné pile à combustible SOFC/ Cycle ORC	26
3.3 Modélisation du système combiné pile à combustible / cycle ORC	27
3.4 Résultats et discussions :.....	31
3.4.1 Effet de la température de l'évaporateur (ORC) :.....	32
3.4.2 Effet de taux de compression :.....	36
3.5 Conclusion	40
4 Conclusion générale	40
les perspectives	40
Annexe	40
Référence	46

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma de base d'une pile à combustible.....	4
Figure 1.2 : Configuration Tubulaire.....	7
Figure 1.3 : Configuration plane.....	8
Figure 1.4 : Schéma de base d'un cycle ORC.....	10
Figure 2.1 : Schéma de base de la pile à combustible.....	17
Figure 2.2 : Effet de la densité de courant sur les tensions.....	22
Figure 2.3 : Effet de la densité de courant sur le rendement et la puissance de la pile	23
Figure 2.4 : Effet de la température de réaction sur le rendement et la puissance de la pile.....	24
Figure 2.5 : Effet de la pression sur le rendement et la puissance de la pile.....	25
Figure 3.1 : Schéma du système combiné pile SOFC/cycle ORC.....	27
Figure 3.2 : Effet de la température de l'évaporateur sur la puissance d'ORC.....	33
Figure 3.3 : Effet de la température sur la puissance net de système.....	34
Figure 3.4 : Effet de la température d'évaporateur sur le rendement d'ORC.....	35
Figure 3.5 : Effet de la température d'évaporateur sur le rendement de système.....	36
Figure 3.6 : Effet du taux de compression sur la puissance du cycle ORC.....	37
Figure 3.7 : Effet de taux de compression sur la puissance de système.....	38
Figure 3.8 : Effet de taux de compression sur le rendement d'ORC.....	39
Figure 3.9 : Effet du taux de compression sur le rendement d'ORC.....	40

Liste des tableaux

Table 2.1 : Les paramètres de base de la pile à combustible.....	22
Table 3.1 : Les propriétés thermo physiques des quatre fluides organiques.....	31
Table 3.2 : Les conditions de fonctionnement du cycle ORC.....	32

Nomenclature :

Symboles	Unités	Significations
<i>A</i>	m ²	Surface
<i>F</i>	C/mole	constante de Faraday
<i>g</i>	kJ/mol	L'énergie libre de Gibbs
<i>J</i>	A/m ²	Densité du courant
<i>h</i>	kJ/mol	Enthalpie
<i>K</i>	-	Constante d'équilibre d'une réaction chimique
<i>L</i>	m	L'épaisseur
<i>N</i>	-	Nombre de cellules
<i>\dot{n}</i>	mol/s	Débit molaire
<i>PCI</i>	J/mol	Pouvoir Calorifique Inférieur
<i>Q</i>	kJ	Quantité de chaleur
<i>R</i>	J/K .mol	Constante des gaz parfaits
<i>r</i>	-	Rapport
<i>ρ</i>	Ω m	Résistivité spécifique
<i>T</i>	K	Température
<i>U</i>	%	Taux d'utilisation
<i>V</i>	V	Tension
<i>W</i>	kW	Puissance
<i>η</i>	%	Rendement
<i>α</i>	kPas	Pression Partielle

Les indices :

a	Air
act	Activation
an	Anode
aL	Densité de courant limité
C	Compresseur
c	Carburant
ca	Cathode
conc	Concentration
Cont	Contact
e	électrolyte
ef	Effective
0C	La densité de courant d'échange de cathode
0a	La densité de courant d'échange d'anode
ech	Échangeur
in	Inter-connecteur
PC	Pile à combustible
pert	pertes
isent	Isentropique
N	Nernst
ohm	Ohmique
p	Pompe
t	Turbine
vc	Vapeur /carbone

Abréviations

SOFC pile à combustible à oxyde solide

ORC cycle organique de Rankine

Introduction générale

Aujourd'hui, la question de l'énergie est devenue plus importante que jamais, alors que les défis environnementaux et économiques continuent de se poser. Face à cette situation, les technologies énergétiques alternatives sont devenues une priorité pour la recherche et l'industrie. Les piles à combustible et les cycles ORC, en particulier, sont des solutions les plus prometteuses pour relever ces défis.

Les piles à combustible, qui produisent de l'électricité en combinant de l'hydrogène et de l'oxygène, sont une source d'énergie propre et efficace. Les cycles ORC, quant à eux, sont des systèmes qui utilisent la chaleur pour produire de l'électricité, offrant ainsi une alternative aux sources d'énergie fossiles. Grâce à ces technologies, il est possible de répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs de manière plus durable et responsable. Les SOFC peuvent être couplées avec des cycles de puissance inférieurs tels que le cycle de Brayton, le cycle de Rankine et le cycle Stirling, ainsi qu'avec des dispositifs de conversion et de stockage d'énergie renouvelable.

Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement au cycle combiné SOFC-Organic Rankine pour améliorer l'efficacité de production d'énergie dans une centrale de traitement. Nous étudions l'impact de la température et de la pression sur les performances du cycle combiné utilisant différents fluides organiques dans le cycle de Rankine.

Ce travail est présenté en trois chapitres : le premier chapitre aborde les généralités sur les piles à combustible et les cycles ORC, le deuxième chapitre propose une étude paramétrique approfondie d'une pile à combustible de type SOFC, tandis que le troisième est consacré à une étude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/cycle ORC. Enfin, une conclusion générale synthétise les résultats obtenus et met en lumière les perspectives futures pour l'utilisation des piles à combustible dans des applications pratiques.

Chapitre 1 : Généralités sur les piles à combustible et les cycles ORC

1.1 Introduction

Les défis énergétiques et environnementaux auxquels fait face notre société sont énormes, en grande partie dus à la dépendance croissante aux combustibles fossiles qui émettent des gaz à effet de serre. Pour y faire face, les technologies énergétiques alternatives, telles que les piles à combustible et les cycles ORC, sont devenues une priorité pour la recherche et l'industrie. Les piles à combustible convertissent des carburants en électricité sans émettre de gaz nocifs, tandis que les cycles ORC récupèrent la chaleur résiduelle pour produire de l'électricité. Ce chapitre examinera les principes de fonctionnement, les avantages et les limites de ces technologies, ainsi que leurs applications actuelles et futures. L'objectif est de fournir une compréhension claire et complète de ces technologies et de leur potentiel pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux auxquels nous sommes confrontés.

1.2 Les piles à combustible

1.2.1 Histoire de la pile à combustible

La pile à combustible a été découverte par Christian Friedrich Schönbein au 18^{ème} siècle. En 1839, William Robert Grove a créé la première pile à combustible en utilisant des électrodes de platine plongées dans un béccher d'acide sulfurique aqueux, produisant ainsi un courant électrique. Depuis lors, cette technologie a connu des avancées significatives, ce qui permet de produire de l'électricité avec un rendement élevé et une faible émission de polluants. Toutefois, au cours du premier siècle de recherche, les progrès ont été modestes malgré des avancées remarquables dans le domaine de l'hydrogène.

Ce n'est qu'en 1930 que Thomas Francis Bacon a repris les recherches sur les piles à combustible et a développé la première pile à hydrogène et oxygène d'une capacité de 6 kW. Cette technologie était pratique pour alimenter des machines. Dans les années 1960, la NASA s'est intéressée aux piles à combustible en tant que source d'énergie alternative

pour les vols spatiaux, ce qui a conduit à des investissements importants dans leur développement. Cependant, les coûts élevés ont limité la commercialisation de cette technologie.

Dans les années 1990, les progrès technologiques et la nécessité d'une énergie propre ont suscité un regain d'intérêt pour les piles à combustible dans diverses applications, notamment pour les véhicules et la production d'électricité. Aujourd'hui, la pile à combustible est utilisée dans de nombreuses applications et a le potentiel de devenir une source d'énergie importante pour l'avenir [1].

1.2.2 Principe de fonctionnement des piles à combustible

Les piles à combustible produisent de l'électricité en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans combustion. Le principe de fonctionnement est basé sur l'oxydation d'un combustible (hydrogène, méthanol, gaz naturel, etc.) sur l'anode de la pile, où les électrons sont libérés et circulent à travers un circuit externe pour produire de l'électricité.

Dans les pile à combustible à électrolyte acides, Les ions positifs de l'oxydant d'un combustible dans l'anode traversent une membrane électrolytique pour atteindre cathode, où ils réagissent avec les électrons et l'oxygène pour former de l'eau et de la chaleur. Dans les pile à combustible à électrolyte basique Les ions négatif de l'oxydant de l'oxygène dans la cathode traversent une membrane électrolytique pour atteindre l'anode, où ils réagissent avec l'hydrogène (ou autre combustible) pour former de l'eau et de la chaleur. Les piles à combustible ont un rendement élevé et ne produisent que de l'eau et de la chaleur comme sous-produits, ce qui en fait une technologie propre et efficace pour la production d'énergie [2].

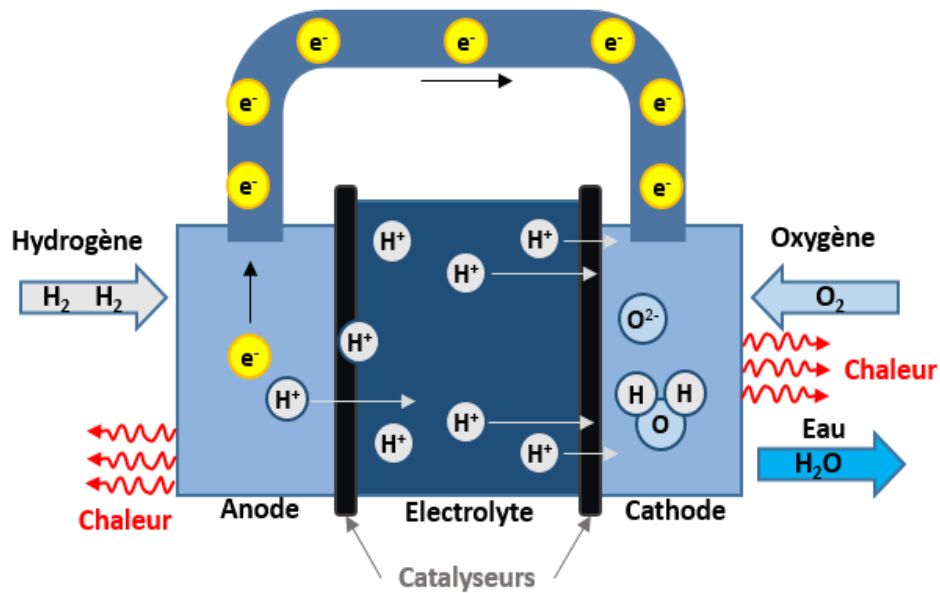


Figure1. 1. Schéma de base d'une pile à combustible

1.2.3 Différents types de piles à combustible

Les piles à combustible se distinguent par leur électrolyte qui permet la circulation des ions, déterminant ainsi leur utilisation et leur domaine d'application. On peut classer les piles à combustible en deux catégories selon la nature de leur électrolyte : les piles à combustible à électrolytes acides ou basiques [3].

A : Les piles à combustibles à électrolytes acides :

Les piles à combustible à électrolytes acides fonctionnent en faisant circuler les ions positifs de l'anode à la cathode.

A.1 Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Les piles à hydrogène PEMFC sont constituées d'un électrolyte qui fonctionne à des températures relativement basses, entre 20 °C et 100 °C. Elles se distinguent par leur rendement élevé et leur capacité à démarrer rapidement à pleine puissance. Elles peuvent être utilisées pour alimenter en énergie des véhicules électriques de taille moyenne.

A.2 Les DMFC (Direct methanol Fuel Cell)

Les piles à combustible DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) ou piles à méthanol emploient du méthanol comme carburant pour produire de l'énergie. Elles opèrent de manière similaire aux piles PEMFC, c'est-à-dire en faisant migrer des protons d'hydrogène à travers une membrane solide en polymère de l'anode à la cathode. Les piles DMFC sont appropriées pour la production d'énergie à capacité moyenne.

A.3 Les PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Les piles à acide phosphorique PAFC se distinguent des piles précédentes en ce que leur électrolyte n'est pas un matériau solide mais plutôt un acide phosphorique sous forme liquide. Elles fonctionnent à des températures allant de 150 °C à 200 °C et sont adaptées pour répondre aux besoins de production d'énergie élevés.

B Les piles à combustibles à électrolyte basique

Les piles à combustible à électrolyte basique fonctionnent en faisant circuler des ions négatifs de la cathode vers l'anode. On peut les classer en trois types distincts :

B.1 Les piles à potasse liquide AFCC

Les piles à combustible alcalines AFC représentent le type le plus ancien de système de piles à combustible, inspiré des travaux de F.T Bacon. En fait, c'est la raison pour laquelle la NASA a utilisé des piles à potasse lors des missions Apollo. Ces piles sont constituées d'un électrolyte liquide alcalin et peuvent fonctionner à des températures larges allant de 25 °C à 260 °C. Cependant, leur utilisation est limitée car elles nécessitent de l'hydrogène et de l'oxygène purs, ce qui demande une logistique importante.

B.2 Les piles à carbonates fondus MCFC

Les piles à combustible à base de carbonates utilisent des sels fondus de lithium et de potassium pour favoriser le mouvement des ions. Ces piles sont conçues pour

fonctionner à des températures élevées, généralement entre 600 °C et 700 °C, et offrent un rendement élevé pouvant atteindre 80 % en fonction de leur utilisation spécifique. Ces piles sont principalement utilisées pour des applications stationnaires de production d'énergie.

B.3 Les piles à combustibles à oxyde solide SOFC

Les piles à combustible à oxyde solide sont constituées de plusieurs couches de céramique. Elles opèrent à des températures très élevées, comprises entre 800 °C et 1000 °C. Ces piles sont principalement utilisées pour la production d'électricité stationnaire, notamment dans des installations de type chaudière.

Les SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) peuvent être classées en fonction de plusieurs critères, notamment :

1. **La température de fonctionnement** : Les SOFC peuvent fonctionner à des températures élevées (800 °C -1000 °C) ou à des températures plus basses (600 °C -800 °C), en fonction du type de matériau utilisé pour les électrodes et l'électrolyte.
2. **Le type d'électrolyte** : Les SOFC peuvent utiliser différents types d'électrolyte, notamment l'oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium (YSZ), l'oxyde de scandium et de cérium (SCDC), l'oxyde de bismuth (BSCF), etc.
3. **Le type d'anode** : Les SOFC peuvent utiliser différents types d'anodes, notamment l'anode à nickel-céramique, l'anode à nickel-métal, l'anode en poudre de nickel, etc.
4. **La géométrie** : Les SOFC peuvent être fabriquées sous différentes formes géométriques, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients en termes de performances, de coûts et de simplicité de fabrication. Les principales géométries utilisées sont :

- ✓ **Les SOFC tubulaires** : Ces cellules sont généralement utilisées pour les applications stationnaires, telles que la production d'électricité à partir de combustibles fossiles ou de gaz naturel. Elles sont caractérisées par leur haute densité de puissance et leur capacité à fonctionner à des températures élevées.

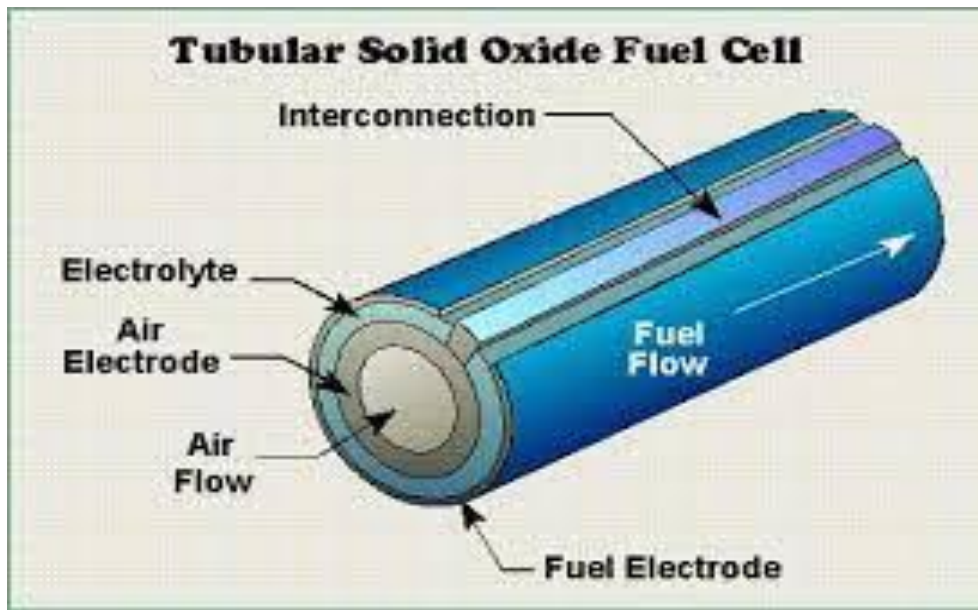


Figure1. 2 : configuration Tubulaire

- ✓ **Les SOFC planes** : Ces cellules sont utilisées pour les applications de petite taille, telles que les piles à combustible portables et les applications militaires. Elles sont caractérisées par leur faible coût et leur capacité à fonctionner à des températures plus basses que les SOFC tubulaires.

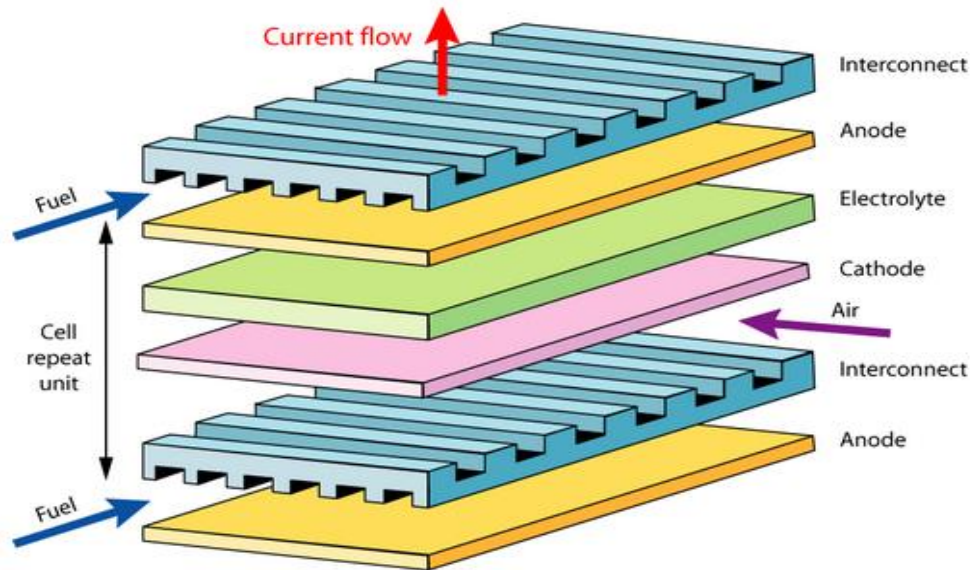


Figure 1. 3: Configuration plane

1.2.4 Applications des piles à combustible

Les piles à combustible ont un large éventail d'applications dans divers secteurs industriels. Les applications les plus courantes comprennent [3,4].

1. **Transport** : Les piles à combustible peuvent être utilisées pour alimenter les voitures, les bus, les camions, les trains et les navires. Les piles à combustible ont un grand potentiel pour remplacer les moteurs à combustion interne dans les véhicules, offrant une alternative plus propre et plus efficace.
2. **Production d'énergie stationnaire** : Les piles à combustible peuvent être utilisées pour produire de l'électricité dans les centrales électriques. Les piles à combustible sont particulièrement utiles dans les installations de cogénération où l'électricité et la chaleur sont produites simultanément.
3. **Secteur résidentiel** : Les piles à combustible peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité et de la chaleur dans les maisons et les bâtiments résidentiels.

4. **Secteur militaire** : Les piles à combustible peuvent être utilisées dans des applications militaires, telles que les drones, les sous-marins, les véhicules militaires et les camps militaires.
5. **Secteur de l'espace** : Les piles à combustible ont été utilisées dans les missions spatiales pour fournir de l'énergie électrique aux satellites et aux navettes spatiales.

1.3 Les cycles Organique de Rankine

Les cycles ORC, acronyme de "Organic Rankine Cycle", sont des cycles thermodynamiques utilisés pour la production d'énergie électrique à partir de sources de chaleur à basse ou moyenne température, telles que la géothermie, les gaz d'échappement ou encore la chaleur solaire. Leur principe est similaire à celui des cycles de Rankine utilisés dans les centrales électriques classiques, mais avec des fluides de travail organiques à la place de l'eau. Ce procédé présente l'avantage d'être plus efficace et plus adaptable à différentes sources de chaleur [5].

1.3.1 Principe de fonctionnement des cycles ORC

Les cycles ORC fonctionnent selon un principe similaire à celui des cycles de Rankine, utilisés dans les centrales électriques classiques, mais avec des fluides de travail organiques à la place de l'eau. Le cycle est composé de quatre étapes : la vaporisation du fluide à basse pression, l'expansion isentropique du fluide dans une turbine, la condensation du fluide à basse température et la compression du fluide à haute pression. Contrairement aux cycles de Rankine, les cycles ORC ont la particularité de fonctionner avec des fluides ayant des points d'ébullition plus bas que celui de l'eau, ce qui permet d'exploiter des sources de chaleur à basse ou moyenne température. Les performances des cycles ORC peuvent être optimisées en choisissant des fluides ayant des propriétés spécifiques adaptées aux sources de chaleur à exploiter [6].

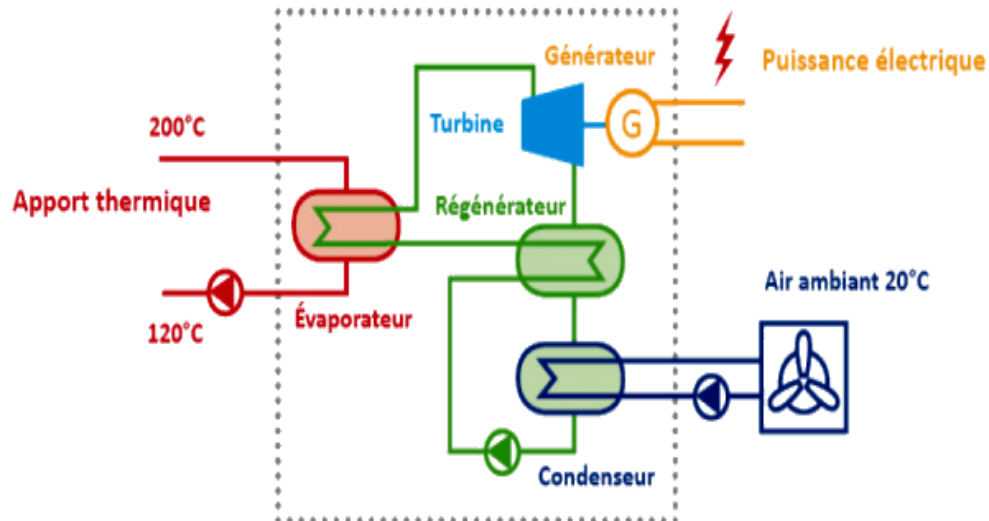


Figure 1. 4: Schéma de base d'un cycle ORC

1.3.2 Applications des cycles ORC

Les cycles ORC (Organic Rankine Cycle) sont utilisés dans diverses applications pour la production d'énergie à partir de sources de chaleur basse température ou résiduelle. Voici quelques-unes des applications des cycles ORC :

A Production d'énergie géothermique :

Les cycles ORC sont largement utilisés pour produire de l'électricité à partir de sources géothermiques. Les fluides géothermiques ont des températures relativement basses par rapport aux autres sources d'énergie thermique, ce qui les rend idéales pour les cycles ORC.

B Valorisation des déchets :

Les cycles ORC peuvent être utilisés pour valoriser la chaleur résiduelle produite par les processus de combustion des déchets. Cela permet de produire de l'énergie à partir de sources de déchets et de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge.

C Production d'énergie solaire :

Les cycles ORC sont également utilisés pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie solaire. Les panneaux solaires peuvent chauffer un fluide, qui est ensuite utilisé pour produire de l'énergie à l'aide d'un cycle ORC.

D Production d'énergie à partir de biomasse :

Les cycles ORC peuvent également être utilisés pour produire de l'énergie à partir de biomasse. Les processus de combustion de la biomasse peuvent produire de la chaleur qui peut ensuite être utilisée dans un cycle ORC pour produire de l'électricité [7].

1.4 Perspectives d'avenir pour les deux technologies

Les piles à combustible et les cycles ORC sont deux technologies prometteuses dans le domaine de l'énergie qui ont des perspectives d'avenir encourageantes [8.9].

1.4.1 Piles à combustible :

Les piles à combustible ont le potentiel de remplacer les moteurs à combustion interne dans les véhicules et les équipements de transport, ainsi que de fournir de l'électricité aux foyers et aux entreprises. Les avancées récentes dans la technologie des piles à combustible, comme l'utilisation de catalyseurs moins coûteux et plus efficaces, ont permis de réduire les coûts de production. Les piles à combustible pourraient également être utilisées pour stocker de l'énergie renouvelable sous forme d'hydrogène, ce qui aiderait à résoudre le problème de la fluctuation de la production d'énergie renouvelable.

1.4.2 Cycles ORC :

Les cycles ORC sont utilisés pour produire de l'électricité à partir de sources de chaleur basse température ou résiduelle, ce qui les rend idéales pour la production d'électricité à partir de sources géothermiques et de déchets. Avec la croissance continue de la production de déchets et la recherche de sources d'énergie renouvelable alternatives, les

cycles ORC ont un potentiel important. Les avancées récentes dans la technologie des cycles ORC, comme l'utilisation de fluides de travail plus efficaces et la conception de cycles à double étage, ont permis d'augmenter l'efficacité des cycles ORC et de réduire les coûts de production.

Les piles à combustible et les cycles ORC ont tous deux des perspectives d'avenir prometteuses dans le domaine de l'énergie. Ces technologies ont le potentiel de réduire la dépendance aux sources d'énergie fossile et de contribuer à la transition vers des sources d'énergie renouvelable.

1.5 Les cycles combinés SOFC-ORC

Les cycles combinés ORC-SOFC (Organic Rankine Cycle - Solid Oxide Fuel Cell) sont une technologie innovante dans le domaine de l'énergie qui combine deux technologies différentes pour produire de l'électricité. Les cycles combinés ORC-SOFC sont une solution hybride qui utilise une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) pour générer de l'électricité à partir d'une source d'énergie primaire, puis utilise la chaleur résiduelle pour alimenter un cycle ORC qui produit de l'électricité supplémentaire. Cette technologie est particulièrement prometteuse car elle offre des avantages significatifs par rapport aux deux technologies utilisées séparément.

Le principal avantage des cycles combinés ORC-SOFC est leur efficacité énergétique élevée. Les SOFC ont un rendement énergétique élevé, pouvant atteindre jusqu'à 60 %, ce qui signifie que la conversion d'énergie à partir d'une source primaire est très efficace. De plus, le cycle ORC peut utiliser la chaleur résiduelle de la SOFC pour produire de l'électricité supplémentaire, ce qui améliore l'efficacité globale du système.

Les cycles combinés ORC-SOFC présentent également des avantages environnementaux significatifs, car ils utilisent des sources d'énergie propres et renouvelables, telles que l'hydrogène, le biogaz, ou encore la biomasse, pour alimenter la SOFC. En outre, la technologie peut être utilisée pour récupérer la chaleur résiduelle

des processus industriels, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir la durabilité environnementale.

Les cycles combinés ORC-SOFC sont une technologie prometteuse pour la production d'énergie propre et efficace. Les avantages significatifs de cette technologie en matière d'efficacité énergétique et environnementale en font une solution attrayante pour l'avenir de l'énergie.

1.6 Fluides organiques utilisé par les cycles de Rankine

Dans le contexte du cycle de Rankine, les fluides organiques sont des composés organiques utilisés comme fluide de travail pour convertir la chaleur en travail mécanique. Ces fluides organiques sont également appelés fluide de travail organique (ORC) et présentent des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptés à ce type de cycle thermodynamique [10].

Les fluides organiques utilisés dans les cycles de Rankine présentent souvent les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Point d'ébullition bas** : Les fluides organiques ont généralement un point d'ébullition plus bas que l'eau, ce qui leur permet de s'évaporer à des températures plus basses. Cela signifie que les cycles de Rankine utilisant des fluides organiques peuvent fonctionner avec des sources de chaleur à des températures inférieures à celles requises pour les cycles de Rankine à vapeur d'eau.
- ✓ **Bonne stabilité chimique** : Les fluides organiques doivent être chimiquement stables à des températures élevées pour assurer le bon fonctionnement du cycle. Ils doivent résister à la dégradation chimique et à la formation de sous-produits indésirables qui pourraient endommager le système.
- ✓ **Faible impact environnemental** : Les fluides organiques utilisés dans les cycles de Rankine sont généralement choisis pour leur faible impact sur l'environnement. Ils sont conçus pour être non toxiques, non inflammables et ne pas contribuer à l'appauvrissement de la couche d'ozone ou à l'effet de serre.

Chapitre 01 : Généralités sur les piles à combustible et les cycles ORC

Certains exemples de fluides organiques couramment utilisés dans les cycles de Rankine comprennent le R-134a (1,1,1,2-Tétrafluoroéthane), le R-245fa (1,1,1,3,3-Pentafluoropropane), le toluène, l'isopentane, le cyclopentane, le pentane, etc. Le choix du fluide organique dépend des conditions de fonctionnement spécifiques du système et des performances thermodynamiques requises.

Il convient de noter que les cycles de Rankine utilisant des fluides organiques peuvent être utilisés dans diverses applications, notamment la production d'électricité à partir de sources de chaleur résiduelle, l'exploitation de l'énergie géothermique, la valorisation de la biomasse, etc.

Chapitre 2 : Etude paramétrique d'une pile à combustible

2.1 Introduction

Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) sont des dispositifs prometteurs pour produire de l'énergie électrique propre et efficace à partir de combustibles. Cependant, leur performance est fortement dépendante de nombreux paramètres opératoires, tels que la température, la composition des gaz d'alimentation, la géométrie des électrodes, etc. Dans ce chapitre, nous abordons une étude paramétrique de la SOFC alimentée au méthane en utilisant. L'objectif est de déterminer les paramètres les plus influents sur la performance de la pile à combustible afin d'améliorer ses performances.

2.2 Description de la pile à combustible SOFC

Le fonctionnement de la pile à combustible SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) reste le même, mais les combustibles utilisés peuvent varier. Dans le cas du méthane et de l'oxygène, le méthane est acheminé à l'anode où il est converti en hydrogène et en dioxyde de carbone par réaction avec l'eau. L'oxygène est introduit à la cathode, où il réagit avec les ions d'hydrogène qui ont traversé l'électrolyte pour former de l'eau. Les électrons libérés à l'anode sont transportés par un circuit électrique externe vers la cathode, créant ainsi un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure. La SOFC est une technologie polyvalente qui peut être alimentée avec divers combustibles, ce qui en fait une option prometteuse pour la production d'énergie propre [11].

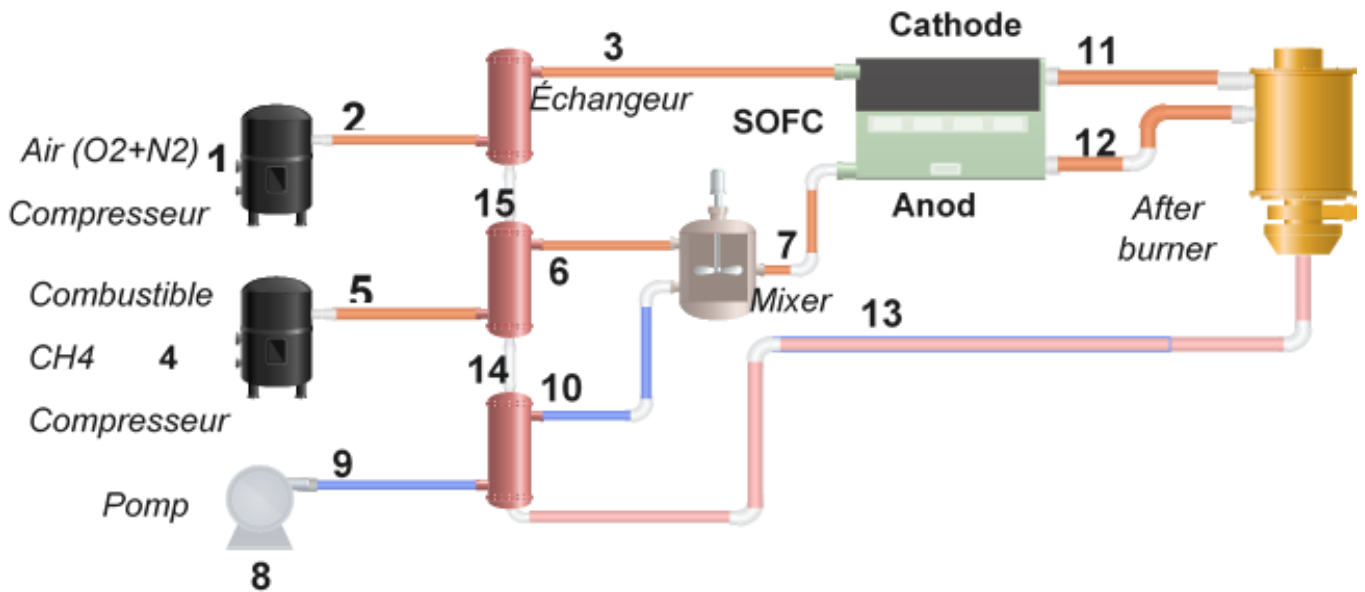


Figure 2. 1 : Schéma de base de la pile à combustible

2.3 Bilan électrochimique et énergétique

Le bilan électrochimique et énergétique est une étape cruciale dans l'analyse des performances d'une pile à combustible. Il permet de mesurer l'efficacité de la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, ainsi que les pertes d'énergie associées [11 ,12].

2.3.1 Bilan Electrochimique

La puissance générée de la pile :

La puissance générée par la pile à combustible SOFC est exprimée par :

$$\dot{W}_{PC} = N_{PC} \times A_{ef} \times V_{Pc} \times J \quad (2.1)$$

N_{PC} C'est le nombre de cellules.

Chapitre 02 : Etude paramétrique d'une pile à combustible

A_{ef} C'est la surface effective.

La tension (V_{PC}) est générée en déplaçant des électrons le long de l'espace du circuit lorsque les réactions d'équilibre se produisent, ce qui est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{PC} = V_N - V_{Pert} \quad (2.2)$$

V_N , c'est la tension de Nernst :

$$V_N = -\frac{\Delta g^\circ}{2.F} - \frac{R.T_{PC}}{2.F} \ln(K_G) \quad (2.3)$$

K_G C'est la constante d'équilibre de la réaction chimique globale dans la pile

F C'est la constante de Faraday.

$$V_N = \frac{\Delta g^\circ}{2.F} + \frac{R.T_{PC}}{2.F} \ln\left(\frac{\alpha_{H_2} \times (\alpha_{O_2})^{0.5}}{\alpha_{H_2O}}\right) \quad (2.4)$$

Δg° C'est la variation de l'enthalpie libre de Gibbs calculée par l'équation suivante :

$$\Delta g^\circ = g^\circ_{H_2O} - g^\circ_{H_2} - \frac{1}{2} g^\circ_{O_2} \quad (2.5)$$

V_{loss} C'est les pertes de tension calculé par l'équation suivante :

$$V_{Pert} = V_{ohm} + V_{act} + V_{conc} \quad (2.6)$$

Les différentes pertes de tension sont déterminées par les expressions suivantes :

Les pertes par activation

Les pertes par activation sont déterminées par l'équation suivante :

Les pertes par concentration

$$\begin{cases} V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \\ V_{act,an} = \frac{R \cdot T_{Pc}}{F} \times \sinh^{-1}\left(\frac{j}{2 \times j_{0a}}\right) \\ V_{act,ca} = \frac{R \cdot T_{Pc}}{F} \times \sinh^{-1}\left(\frac{j}{2 \times j_{0c}}\right) \end{cases} \quad (2.7)$$

Les pertes par concentration sont déterminées par l'équation suivante :

$$V_{Conc} = V_{Conc,an} + V_{Conc,ca} \quad (2.8)$$

$V_{Conc,an}$, les pertes par concentration dans l'anode

$$V_{Conc,an} = -\frac{R \cdot T_{Pc}}{2 \cdot F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{aL}}\right) + \ln\left(1 + \frac{Ph_{2,2} \times j}{Ph_{2O,(2)} \times j_{aL}}\right) \quad (2.9)$$

$V_{Conc,ca}$, les pertes par concentration dans la cathode sont calculées par l'équation suivante :

$$V_{Conc,ca} = -\frac{R \cdot T_{Pc}}{2 \cdot F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{cL}}\right) \quad (2.10)$$

Les pertes par ohmique

Les pertes par ohmique sont déterminées par l'équation suivante :

$$\{V_{ohm} = (\rho_{contact} + \rho_{an} \cdot L_{an} + \rho_{ca} \cdot L_{ca} + \rho_e \cdot L_e + \rho_{in} \cdot L_{in}) \cdot j \quad (2.11)$$

ρ C'est la résistivité électrique des composants de la pile à combustible, et L est l'épaisseur de cellule du composant de la pile à combustible.

2.3.2 Bilan énergétique

Pompe :

La puissance mécanique de la pompe s'écrit comme suit :

$$\dot{W}_p = \dot{n}_{h_2O} \cdot (h_9 - h_8) \quad (2.12)$$

Compresseur 1 :

La puissance mécanique de compresseur 1 s'écrit comme suit :

$$\dot{W}_{C1} = \dot{n}_{Air} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.13)$$

Compresseur 2 :

La puissance mécanique de compresseur 2 s'écrit comme suit :

$$\dot{W}_{C2} = \dot{n}_{combustible} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.14)$$

Echangeur 1 :

$$Q_{ech_1} = \dot{n}_{h_2O} \cdot (h_{10} - h_9) = \dot{n}_{echp} \cdot (h_{14} - h_{13}) \quad (2.15)$$

Echangeur 2 :

$$Q_{ech_2} = \dot{n}_{CH_4} \cdot (h_6 - h_5) = \dot{n}_{echp} \cdot (h_{15} - h_{14}) \quad (2.16)$$

Echangeur 3 :

$$Q_{ech_3} = \dot{n}_{Air} \cdot (h_3 - h_2) = \dot{n}_{echp} \cdot (h_{16} + h_{15}) \quad (2.17)$$

2.3.3 Les performances de la pile à combustible SOFC :

Les performances de système SOFC sont déterminées par les équations suivantes

La puissance mécanique nette :

$$W_{net} = \dot{W}_{SOFC} - (\dot{W}_p + \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}) \quad (2.18)$$

Rendement thermique :

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{n}ch_4 PCI_{CH_4}} \quad (2.19)$$

2.4 Résultats et discussions :

La performance d'une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) est influencée par divers paramètres tels que la densité de courant, la température de fonctionnement et la pression de fonctionnement. Dans cette section, nous discuterons de l'impact de ces paramètres sur la performance de la SOFC. Nous examinerons comment la densité de courant affecte la tension cellulaire, la perte de tension et l'efficacité de la pile SOFC. Ensuite, nous discuterons de l'effet de la température de fonctionnement sur la puissance et l'efficacité de la cellule. Enfin, nous analyserons comment la pression d'alimentation du carburant, de l'air et de l'eau affecte les performances de la pile SOFC. Ces analyses fourniront des informations précieuses pour optimiser la performance des piles SOFC en termes de densité de courant, de température de fonctionnement et de pression d'alimentation. Le tableau 2.1 représente toutes les données qui ont été utilisé pour l'étude paramétrique.

Tableau 2.1 : Les paramètres de base de la pile à combustible

Paramètre	Valeur	Unité
R_{cont}	0	$\Omega.m^2$
L_{an}	5×10^{-4}	m
L_{ca}	5×10^{-5}	m
L_e	1×10^{-5}	m
L_{int}	3×10^{-3}	m
A_s	0.01	m^2
N_{FC}	11000	-
rapport (vapeur /Carbone)	2.5	-
F	96485	-
U_f	0.75	-
U_a	0.15	-
J	8000	A/m^2
T_{Pc}	873	k
P_{ref}	101.15	kpas
Chute de pression dans la pile	2	%
Chute de pression dans l'échangeur	3	%
τ_{Ca}	1.19	-
τ_{Cc}	1.19	-
PCI_{CH4}	802361	j/mol

2.4.1 Effet de la densité du courant :

Les figures 2.2 et 2.3 montrent l'effet de la densité de courant sur la tension, l'efficacité et la puissance de la pile.

La figure 2.2 présente l'impact de la densité de courant sur la tension de la pile, et les pertes de tension, avec une variation de la densité de courant entre 8000 A/m² à 18000 A/m². En augmentant la densité de courant, on observe une forte augmentation des pertes de tensions d'activation, de concentration et ohmique, tandis que la tension de la pile diminue progressivement.

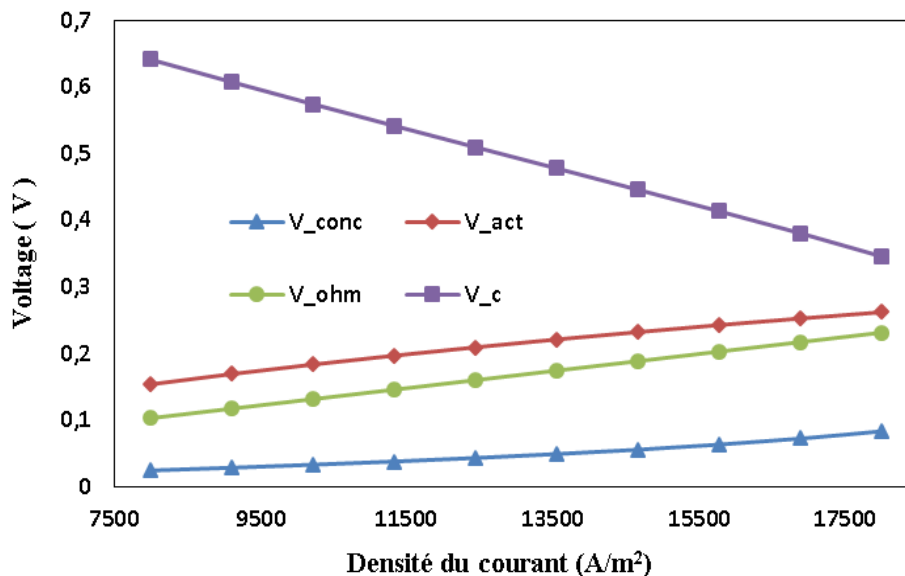


Figure 2.2 : Effet de la densité du courant sur les tensions

La figure 2.3 illustre l'effet de la densité de courant sur la puissance de la pile et son efficacité. Nous constatons qu'avec l'augmentation progressive de la densité de courant de 8000 A/m² à 18000 A/m², il y a une diminution graduelle de la puissance de la pile. Nous remarquons également qu'avec l'augmentation de la densité de courant, l'efficacité de la pile diminue linéairement.

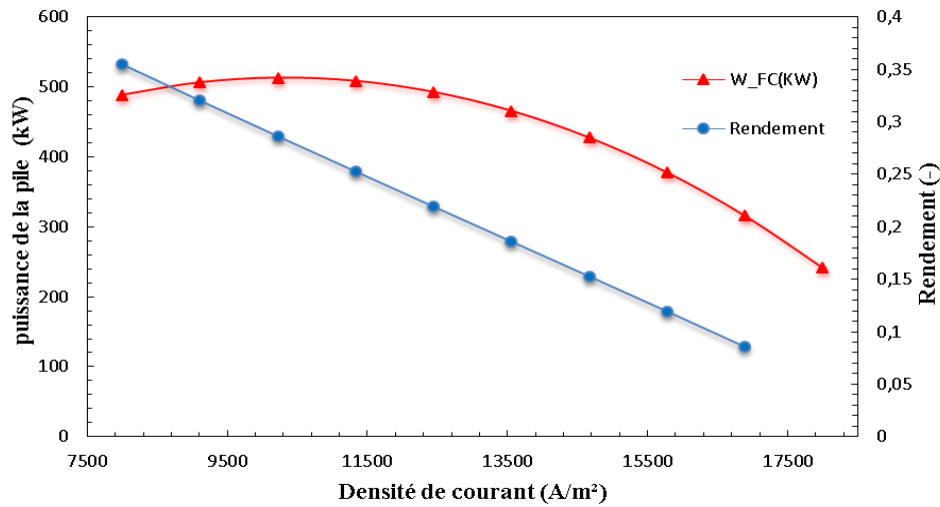


Figure 2.3 : Effet de la densité du courant sur le rendement et la puissance de la pile

2.4.2 Effet de la température de fonctionnement de la pile :

L'impact de la température de fonctionnement sur les performances de la pile à combustible, telles que la puissance et le rendement de la pile, est illustré dans la figure 2.4. Cette dernière montre clairement que la puissance et le rendement de la pile diminuent avec l'augmentation de la température de fonctionnement. Plus la température de fonctionnement de la pile est élevée, plus cette baisse de puissance et le rendement est marquée, bien que la tendance soit légère.

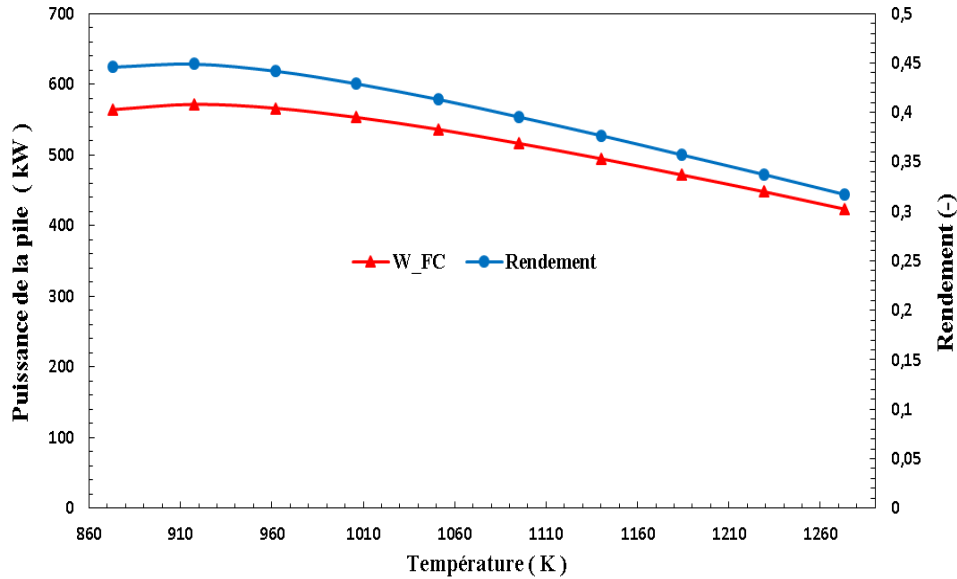


Figure 2.4 : Effet de la température de fonctionnement sur le rendement et la puissance de la pile

2.4.3 Effet de la pression de fonctionnement :

L'impact de la pression de fonctionnement sur les performances de la pile à combustible, telles que la puissance électrique et le rendement de la pile, est illustré dans la figure 2.5. Cette dernière montre clairement que le rendement et la puissance de la pile sont positivement affectés par l'augmentation de la pression du carburant, de l'eau et de l'air alimentant la pile de manière uniforme. On peut remarquer qu'avec l'augmentation de la pression, la courbe de puissance électrique et d'efficacité augmente de manière correspondante.

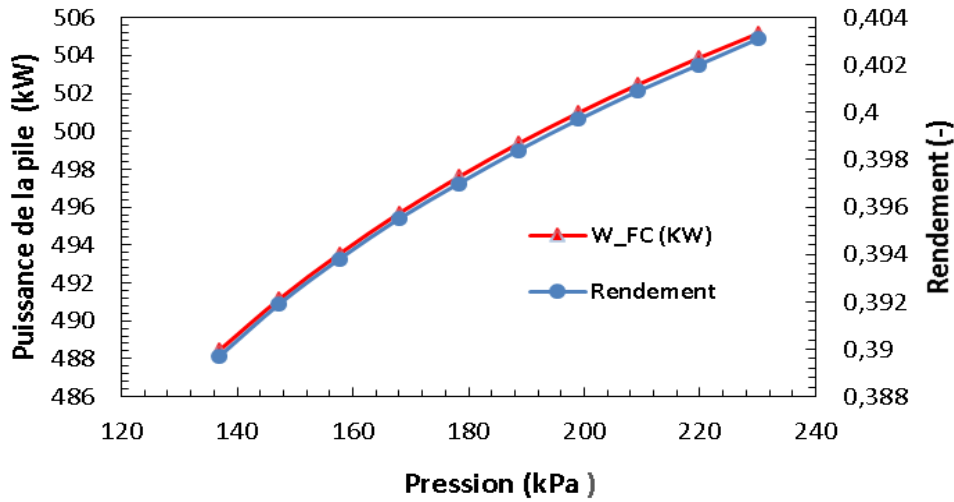


Figure 2.5 : Effet de la pression sur le rendement et la puissance de la pile

2.5 Conclusion

La performance d'une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) est influencée par divers paramètres tels que la densité de courant, la température de fonctionnement et la pression de fonctionnement. Une augmentation de la densité de courant entraîne une diminution de la tension de la pile et une baisse du rendement de la pile SOFC. De même, une augmentation de la température de fonctionnement conduit à une diminution de la puissance électrique et de l'efficacité de la pile. En revanche, une augmentation de la pression de carburant, d'air et d'eau alimentant la cellule améliore la puissance électrique et les performances de la pile.

Chapitre 3 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC

3.1 Introduction

Le système combiné pile à combustible / cycle ORC est une technologie innovante qui combine deux technologies pour produire de l'électricité de manière efficace et respectueuse de l'environnement. Ce chapitre est dédié à l'étude paramétrique de ce système combiné pile à combustible / cycle ORC, qui consiste à analyser l'impact des différents paramètres sur les performances du système. Pour ce faire, nous allons, nous allons concentrer sur la modélisation du système combiné pile à combustible / cycle ORC en utilisant le modèle de la pile à combustible qui est présenté dans le chapitre précédent (Chapitre 02) et en présentant les équations de base du cycle ORC. Nous allons ensuite présenter les résultats de simulation et les analyser pour comprendre les performances du système, en étudiant les différents paramètres et leur influence sur les performances.

3.2 Description du système combiné pile à combustible SOFC/ Cycle ORC

La figure 3.1 présente le schéma de base d'un système combinant une pile à combustible SOFC et un cycle organique de Rankine ORC. Chaque composant est représenté de manière à refléter le réseau de piles à combustible à plaques solides, de turbine, de condenseur, de pompe, de chaudières de récupération de chaleur, de compresseurs et d'échangeurs de chaleur. L'air ambiant est comprimé du point 1 au point 2, puis passe par un échangeur de chaleur pour être chauffé au point 3 avant d'entrer dans la cathode des piles à combustible à plaques solides. Le gaz méthane est également comprimé du point 4 au point 5 pour passer à travers un échangeur de chaleur et être chauffé au point 6. De même, l'eau est pompée du point 8 au point 9, chauffée au point 10 avec la même technologie, puis mélangée avec le carburant au point 7 pour produire de l'hydrogène gazeux qui alimente l'anode. Après avoir été mélangé au carburant, qui circule du point 6 au point 7, le mélange réagit pour produire de l'hydrogène gazeux, utilisé pour alimenter l'anode. Le gaz émis par l'anode et la cathode, respectivement par les points 11 et 12, est ensuite dirigé vers un transformateur thermique permettant la récupération

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

de la chaleur de l'évaporateur, qui sera utilisée pour alimenter un circuit en énergie destiné à faire fonctionner ce cycle [12].

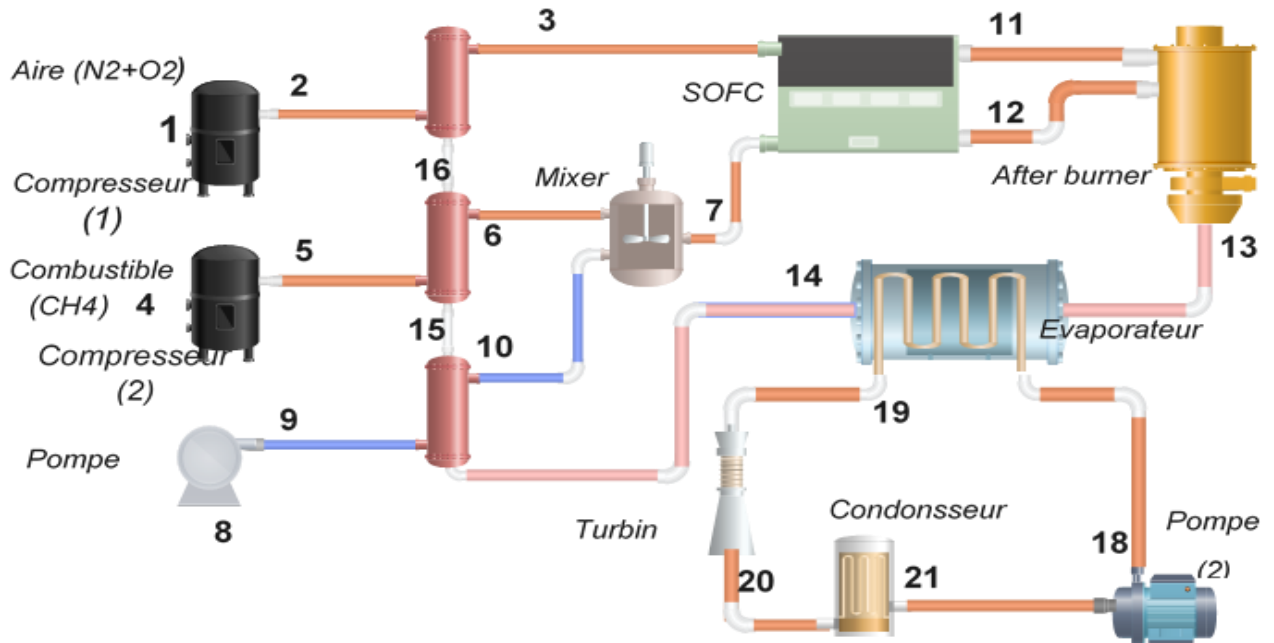


Figure 3.1 : Schéma du système combiné pile SOFC/cycle ORC

3.3 Modélisation du système combiné pile à combustible / cycle ORC

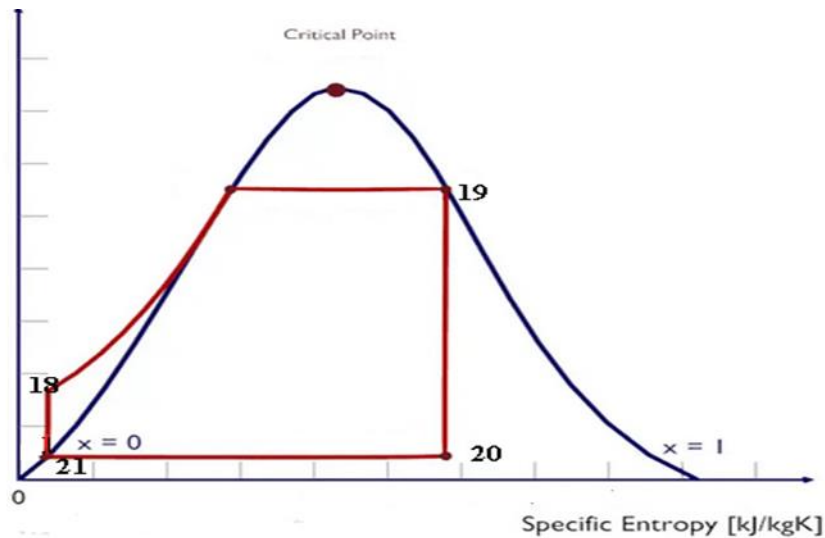
Étant donné que le bilan électrochimique et énergétique de la pile SOFC ont été présentés dans le chapitre 02, cette partie se concentre sur la présentation du bilan énergétique du cycle ORC.

L'analyse énergétique de ce système combinant une pile à combustible SOFC et un cycle ORC nécessite l'application du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert. L'équation de conservation de l'énergie peut être exprimée comme suit [9,11].

$$\sum_S \dot{n}.h - \sum_e \dot{n}.h = \dot{Q} + \dot{W} \quad (3.1)$$

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Dans un cycle ORC idéal, le système exécutant le cycle subit une série de quatre processus : deux processus isentropiques (adiabatiques réversibles) alternés avec deux processus isobare



Les bilans énergétiques, établis conformément au premier principe de la thermodynamique, pour chacun des composants qui constituent le cycle ORC, sont présentés ci-dessous :

Pompe :

La pompe de circulation permet de déplacer le fluide organique du condenseur basse pression vers l'évaporateur haute pression, et il est possible de déterminer la consommation de la pompe. Le bilan énergétique de la pompe peut être exprimé comme suit :

La pompe de circulation a pour fonction de déplacer le fluide organique du condenseur basse pression vers l'évaporateur haute pression, le bilan énergétique de la pompe peut être exprimé comme suit

$$\dot{W}_p = \dot{n}_{ORC} \cdot (h_{18} - h_{21}) \quad (3.2)$$

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Lorsque l'on considère une compression adiabatique irréversible, l'efficacité mécanique de la pompe est utilisée pour évaluer sa performance. Cette efficacité mécanique est définie comme le rapport entre le travail effectif de la pompe et le travail fourni à la pompe. Elle peut être exprimée comme suit :

$$\eta_C = \frac{W_{C,isent}}{W_{C,Reel}} = \frac{T_{21}-T'_{18}}{T_{21}-T_{18}} \quad (3.3)$$

Turbine :

Le fluide organique saturé entre dans la turbine et subit une détente jusqu'à la température du condenseur. Cette détente entraîne la production d'énergie mécanique. La puissance de la turbine peut être exprimée en fonction des enthalpies d'entrée et de sortie, ainsi que de l'efficacité isentropique de la turbine.

$$\eta_{turbine} = \frac{W_{T,reel}}{W_{T,isent}} = \frac{T_{19}-T_{20}}{T_{19}-T'_{20}} \quad (3.4)$$

La puissance mécanique de la turbine :

$$\dot{W}_t = \dot{n}_{ORC} \cdot (h_{19} - h_{20}) \quad (3.5)$$

Evaporateur :

Un flux de gaz s'écoule du système SOFC vers l'unité de récupération de chaleur pour servir de source de chaleur au cycle organique de Rankine ORC étudié. On suppose que le gaz qui sort de l'évaporateur est à l'état liquide. Le débit massique du fluide de travail organique ainsi que la température des gaz d'échappement peuvent être déterminés à partir de l'équation de bilan d'énergie.

$$\dot{n}_{echp} \times (h_{14} - h_{13}) - \dot{n}_{ORC} \cdot (h_{19} - h_{18}) = 0 \quad (3.6)$$

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Le flux de chaleur échangée entre la source chaude et le fluide travail s'écrit :

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{n}_{ORC} \cdot (h_{18} - h_{19}) \quad (3.7)$$

Condenseur :

$$\dot{Q}_{co} = \dot{n}_{ORC} \cdot (h_{20} - h_{17}) \quad (3.8)$$

Les performances du cycle (ORC) :

Les performances du système ORC sont déterminées par les expressions suivantes

La puissance mécanique nette :

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (3.9)$$

Rendement thermique :

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{ev}} \quad (3.10)$$

Les performances du Système combiné pile à combustible/cycle ORC :

Les performances du système combiné sont déterminées par les expressions suivantes :

La puissance mécanique nette de système :

$$\dot{W}_{net, système} = \dot{W}_{net, SOFC} + \dot{W}_{net, ORC} \quad (3.11)$$

Rendement thermique de système :

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net,systeme}}{\dot{n}_{ch_4} PCI_{CH_4}} \quad (3.12)$$

3.4 Résultats et discussions :

Dans cette partie, nous allons discuter des résultats de notre étude basée sur l'effet de la température de l'évaporateur (ORC) et du taux de compression sur les performances du système combiné (pile SOFC / cycle ORC), en particulier la puissance du cycle ORC et du système, le code de calcul qui a été développé en tenant compte du mode de la pile et du cycle ainsi que le rendement du cycle ORC et du système combiné. Pour cela, quatre fluides organiques, à savoir le R1270, le R-600, le R-290 et le R-245fa, ont été étudiés pour faire une comparaison et sélectionner le meilleur fluide organique.

Les propriétés thermo physiques des quatre fluides organiques utilisés comme fluide de travail dans le cycle organique de Rankine sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 2.1 Les propriétés thermo physiques des quatre fluides organiques

Réfrigérant	R1270	R-600	R-290	R-245Fa
Formule chimique	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈	C ₃ H ₃ F ₅
Masse molaire en (kg/mol)	42.08	58.1	44.10	134.05
Température critique en (°C)	92	152	370	154
Pression critique en (bar)	46.6	36.709	42.5	36.5
ODP	0	0	0	0
GWP100	0	3	<10	950

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Les conditions de fonctionnement du système combiné Pile SOFC/cycle ORC sont basées sur le tableau 2.1 cité dans le chapitre 02, ainsi que sur le tableau 3.2 utilisé pour le cycle ORC.

Tableau 3.2 : Les conditions de fonctionnement du cycle ORC.

Paramètre	Valeur	Unité
Température de l'évaporateur	90	°C
Rendement isentropique de la pompe	0.9	-
Rendement isentropique de turbine	0.85	-
Base pression	100	kPa
Haute pression	1000	kPa

Les performances du système combiné pile SOFC/cycle ORC ont été analysées en utilisant une des données provenant de la littérature. Nous avons étudié l'effet de la température d'évaporateur sur la performance du système combiné pile SOFC /cycle ORC en utilisant des températures de évaporateur variables. Nous avons également étudié l'effet du taux de compression sur les performances du système ORC en utilisant différentes valeurs de taux de compression pour le cycle ORC. Les résultats de cette étude fournissent des informations utiles pour la conception des systèmes combinés pile SOFC/cycle ORC pour la production d'énergie électrique à partir de la production d'électricité à partir de la chaleur résiduelle de la SOFC.

3.4.1 Effet de la température de l'évaporateur (ORC) :

Afin d'évaluer l'impact de la température de l'évaporateur sur l'efficacité du cycle organique de Rankine et du système ORC intégré avec SOFC en utilisant quatre fluides organiques pour le cycle de Rankine, nous avons maintenu les valeurs des paramètres de base du cycle organique de Rankine et du système SOFC. Nous avons ensuite étudié l'effet de la température de l'évaporateur pour chaque liquide organique en la faisant varier de 50 °C à 110 °C.

✓ **Effet de la température d'évaporateur sur la puissance l'ORC :**

La figure 3.2 montre l'effet de la température de l'évaporateur sur la puissance du système ORC avec quatre fluides organiques. Pour chaque fluide organique, nous avons étudié l'effet de la température d'évaporation en la faisant varier de 50 °C à 110 °C. Les résultats montrent qu'en augmentant la température de l'évaporateur, la puissance produite par le cycle de Rankine organique augmente également de manière positive. Selon les résultats, le fluide R290 est le plus efficace, produisant une puissance optimale qui commence à 150 W à 50 °C et augmente proportionnellement jusqu'à atteindre la valeur maximale de 185 W à 90 °C. Ensuite, le fluide R152a donne les meilleurs résultats dans la même plage de température d'évaporation, avec une puissance initiale de 130 W qui augmente proportionnellement jusqu'à environ 160 W. Les résultats pour le fluide R600 suivent, avec une puissance qui varie entre 85W et 110 W dans la même plage de température d'évaporation, tandis que les résultats pour le fluide R245Fa avec une puissance inférieure se situent entre 65 W et 90 W.

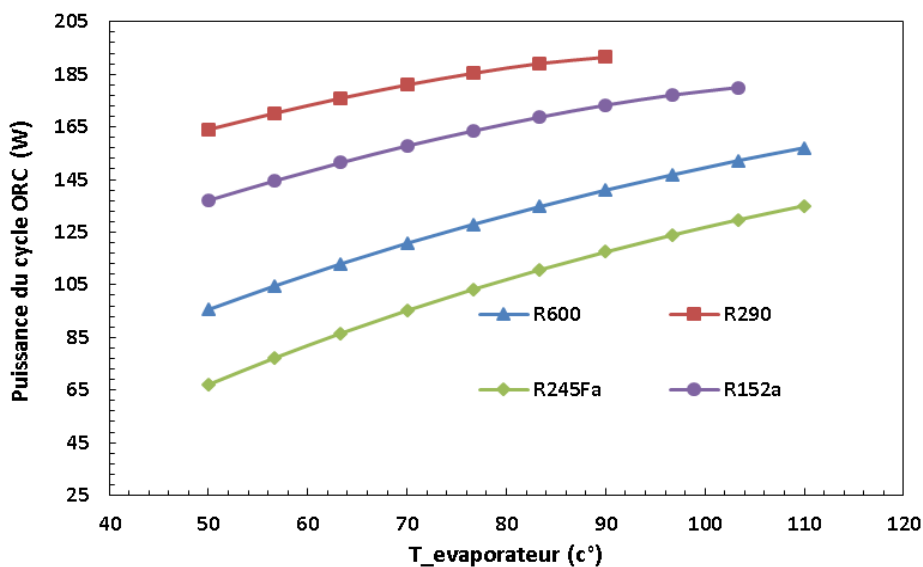


Figure 3.2 : Effet de la température de l'évaporateur sur la puissance d'ORC

✓ **Effet de la température d'évaporateur sur la puissance net de système :**

La figure 3.3 illustre comment la puissance produite par le système ORC-SOFC combiné évolue en fonction de la température de l'évaporateur. Les résultats indiquent que la puissance augmente en même temps que la température de l'évaporateur. Le fluide R290 dans le cycle de Rankine organique est celui qui permet d'obtenir les meilleures performances, avec une puissance de départ de 720 kW à 50°C qui augmente progressivement pour atteindre 750 kW à 90°C. En utilisant le fluide R152a dans la même plage de température, les résultats sont également très bons, avec une puissance initiale de 700 kW qui augmente proportionnellement jusqu'à atteindre environ 740 kW. Les résultats pour le fluide R600 suivent ensuite, avec une plage de puissance de 660 à 720 kW dans la même plage de température, suivis des résultats pour le fluide R245Fa qui donnent une puissance inférieure dans la même plage de température, allant de 630 à 699 kW.

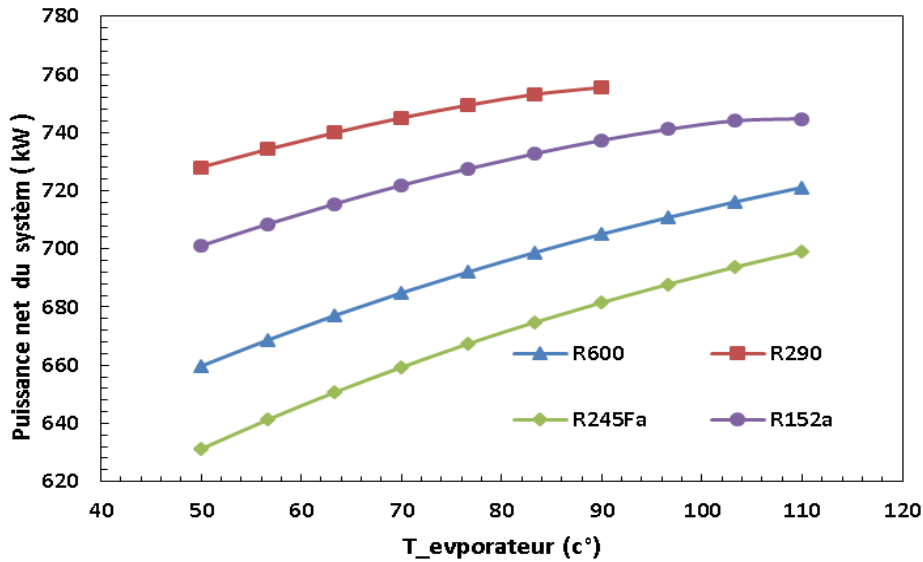


Figure3.3 : Effet de la température sur la puissance net de système

✓ **Effet de la température d'évaporateur sur le rendement d'ORC :**

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

La figure 3.4 présente l'impact de la température de l'évaporateur sur l'efficacité du cycle ORC. On constate que l'efficacité du cycle de Rankine organique augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température de l'évaporateur, passant de 0,23 à 0,26 lorsque la température augmente de 50°C à 90°C, et cela en utilisant le fluide R290 dans le cycle. Lorsque le fluide R152a est utilisé, l'efficacité du cycle augmente relativement de 0,19 à 0,25 avec l'augmentation de la température. En ce qui concerne l'utilisation du fluide R600, l'efficacité du cycle varie entre 0,13 et 0,22 pour la même plage de température, tandis qu'avec le R245Fa, son efficacité varie entre 0,09 et 0,19.

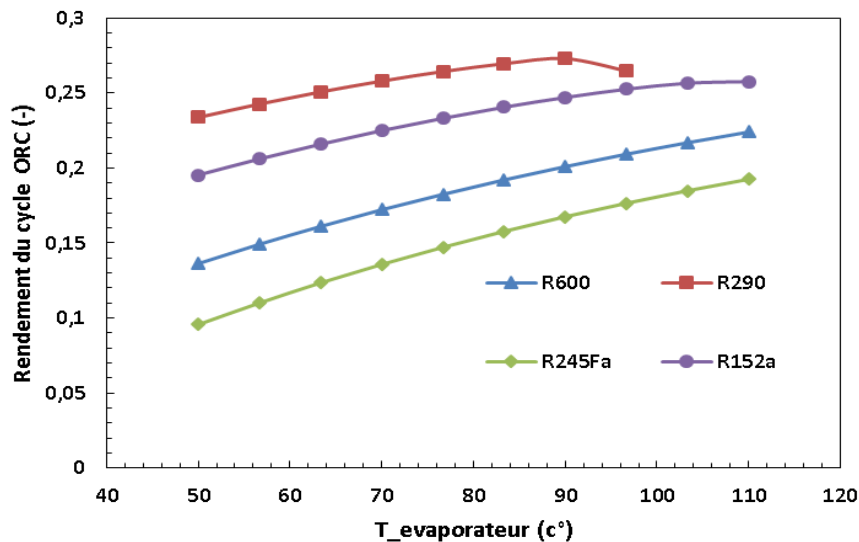


Figure 3.4 : Effet de la température d'évaporateur sur le rendement d'ORC

✓ **Effet de la température d'évaporateur sur le rendement de système :**

D'après la figure 3.5, on constate que la température de l'évaporateur a un impact sur le rendement du système composé. En effet, une augmentation de cette température conduit à une amélioration du rendement du système. Lorsqu'on utilise le fluide organique R290, on peut noter que le rendement du système est passé de 0,57 à 0,59 lorsque la température de l'évaporateur est passée de 50°C à 90°C. Pour le fluide R152a, l'efficacité du cycle augmente proportionnellement avec la température de 0,55 à 0,58.

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Les résultats pour le fluide R600 montrent une efficacité variant de 0,52 à 0,56 pour la même plage de température, tandis que pour le R245Fa, l'efficacité varie entre 0,49 et 0,55 pour la même plage de température.

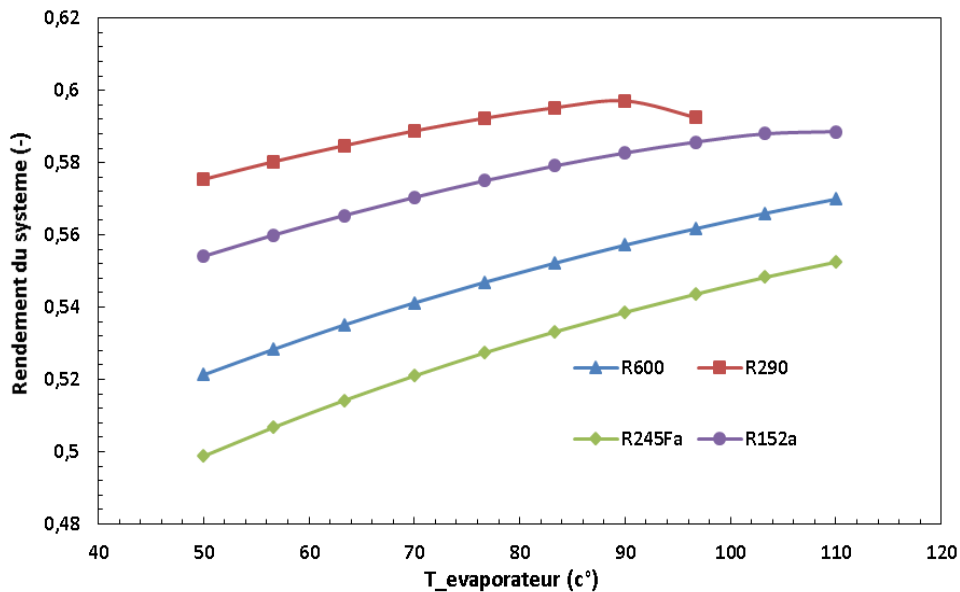


Figure3.5 : Effet de la température d'évaporateur sur le rendement de système

3.4.2 Effet de taux de compression :

Pour étudier l'impact du taux de compression dans le cycle organique de Rankine sur le cycle et le système combiné pile SOFC/cycle ORC en utilisant quatre fluides organiques pour le cycle de Rankine, nous avons fixé les valeurs des paramètres de base du cycle organique de Rankine présentées dans le tableau3.2, et pour le système SOFC présenté dans le tableau2.1. Nous avons ensuite suivi l'effet du taux de compression pour chaque liquide organique en la faisant varier de 2 à 30.

Pour étudier l'impact du taux de compression sur le cycle organique de Rankine ainsi que sur le système combiné pile SOFC/cycle ORC, tout en utilisant quatre types de fluides organiques pour le cycle de Rankine, nous avons fixé les valeurs des paramètres de base du cycle organique de Rankine (présentées dans le tableau) et celles du système

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

SOFC (présentées également dans le tableau). Ensuite, nous avons étudié l'effet de chaque liquide organique en faisant varier le taux de compression de 2 à 30.

✓ Effet de taux de compression sur la puissance l'ORC :

D'après la figure 3.6, l'impact de l'augmentation du taux de compression sur la puissance produite par le cycle organique de Rankine varie selon les fluides organiques utilisés. Le fluide R290 génère la plus grande puissance, entre 188 et 192 kW, tandis que les résultats avec le fluide R152a sont satisfaisants, avec une puissance comprise entre 170 et 174 kW. Les résultats obtenus avec le fluide R600 sont d'environ 141 kW, suivis par ceux obtenus avec le fluide R245Fa, qui atteignent environ 118 kW. Tous les quatre fluides organiques montrent une légère diminution de la puissance produite par le cycle lorsque le taux de compression augmente

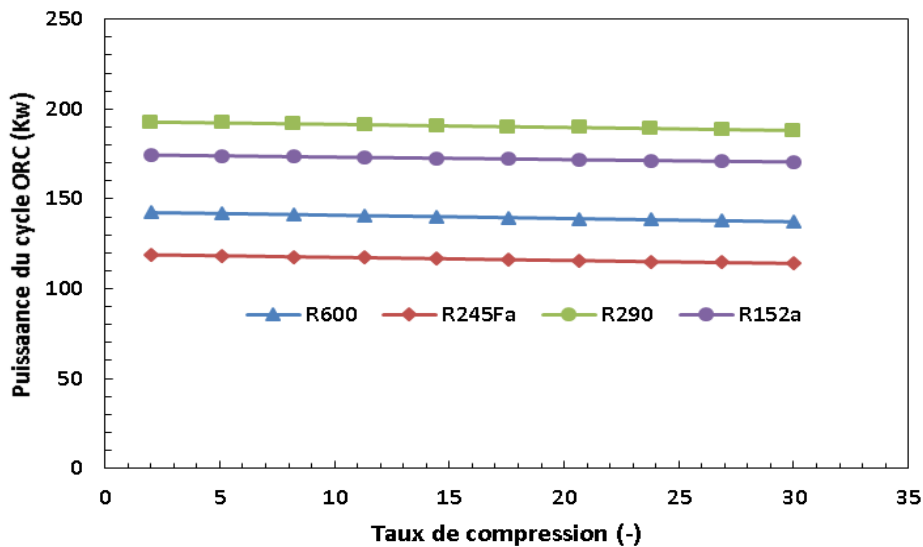


Figure 3.6 : Effet du taux de compression sur la puissance du cycle ORC

✓ **Effet de taux de compression sur la puissance de système :**

Selon la figure 3.7, l'impact de l'augmentation du taux de compression sur la puissance produite par le système combiné pile SOFC/cycle ORC varie selon les fluides organiques utilisés dans le cycle de Rankine. Le fluide R290 permet d'atteindre la plus grande puissance, allant de 752 kW à 756 kW. Les résultats obtenus avec le fluide R152a sont satisfaisants, avec une puissance allant de 734 kW à 730 kW. Les résultats obtenus avec le fluide R600 sont d'environ 706 kW, suivis par ceux obtenus avec le fluide R245Fa, qui atteignent environ 683 kW.

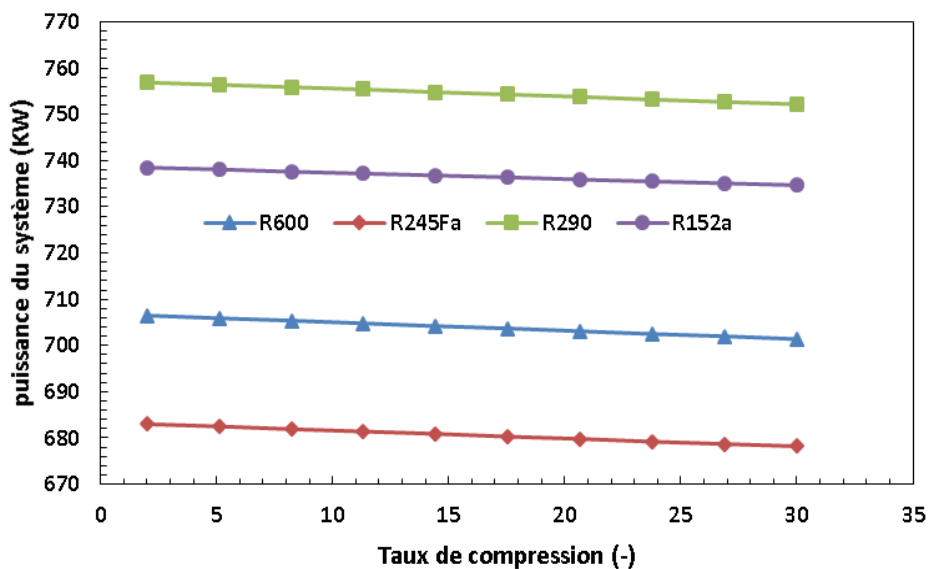


Figure 3.7 : Effet de taux de compression sur la puissance de système

✓ **Effet de taux de compression sur le rendement d'ORC :**

La figure 3.8 présente l'effet de l'augmentation du taux de compression sur l'efficacité du cycle ORC en utilisant différents fluides organiques dans le cycle. L'efficacité du cycle atteint son maximum lors de l'utilisation du fluide R290 dans le cycle de Rankine, à 0,27. Les résultats obtenus avec le fluide R152a suivent avec une efficacité de 0,24,

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

suis par ceux obtenus avec le fluide R600 avec une efficacité de 0,2, puis avec le fluide R245Fa à 0,15.

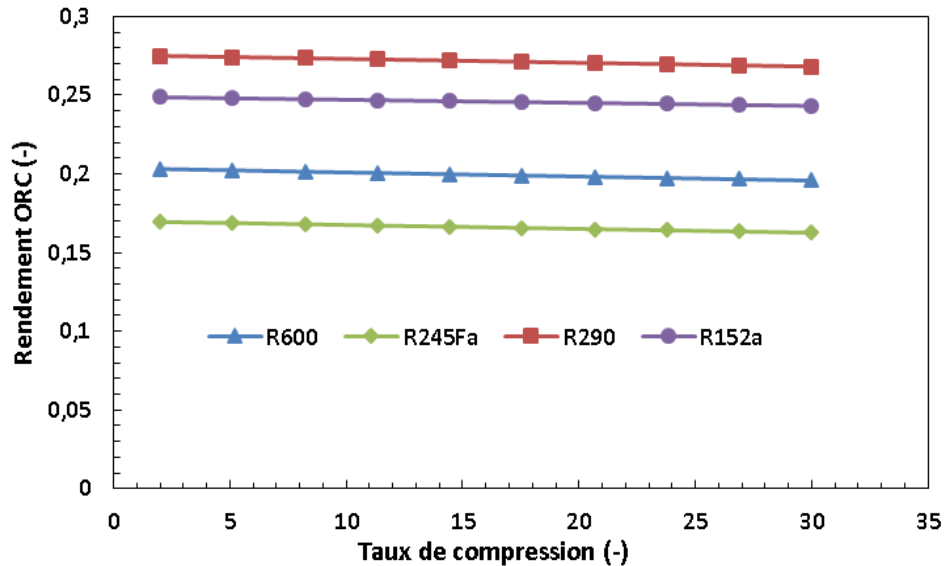


Figure 3.8 : Effet de taux de compression sur le rendement d'ORC

✓ Effet de taux de compression sur le rendement de système :

La figure 3.9 montre l'effet de l'augmentation du taux de compression sur l'efficacité du système combiné pile SOFC/ cycle ORC en utilisant différents fluides organiques dans le cycle de Rankine organique. Nous pouvons observer que l'utilisation du fluide R290 dans le cycle de Rankine conduit à une efficacité maximale de 0.59, suivie de l'utilisation du fluide R152a avec une efficacité de 0,58, puis de l'utilisation du fluide R600 avec une efficacité de 0.55 et enfin le fluide R245fa avec une efficacité de 0.53.

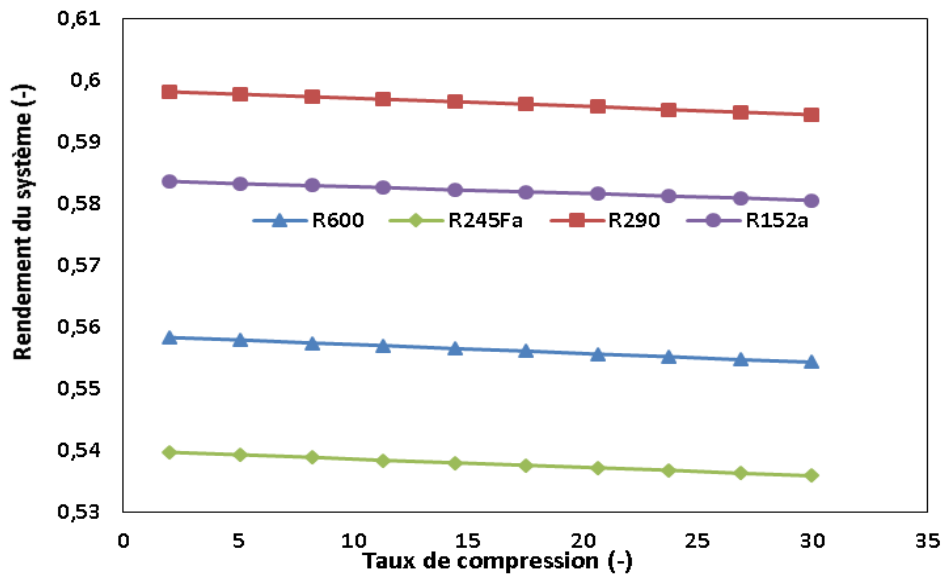


Figure 3.9 : Effet du taux de compression sur le rendement du système

3.5 Conclusion

Les résultats montrent que l'augmentation de la température de l'évaporateur augmente la puissance produite par le cycle de Rankine organique, avec des fluides organiques différents ayant des résultats variables.

Le fluide R290 dans le cycle de Rankine organique est celui qui permet d'obtenir les meilleures performances, suivi du fluide R152a, R600 et R245Fa.

L'étude montre également que la température de l'évaporateur a un impact sur l'efficacité du système composé, avec une augmentation de cette température conduisant à une augmentation de l'efficacité du système.

De plus, il est important de noter que tous les quatre fluides organiques montrent une légère diminution de la puissance produite par le cycle et une efficacité globale lorsque le taux de compression augmente. Cela suggère que les choix du fluide organique et du taux de compression sont des facteurs clés à prendre en compte lors de la conception et de l'optimisation des systèmes ORC intégrés avec SOFC.

Chapitre 03 : Etude paramétrique d'un système combiné pile à combustible/ Cycle ORC :

Enfin, ces résultats peuvent avoir des implications importantes pour l'utilisation de ces systèmes dans les applications énergétiques, car ils fournissent des informations précieuses sur les performances potentielles des différents fluides organiques dans les systèmes ORC/SOFC intégrés et les avantages de l'optimisation du taux de compression.

Conclusion générale

4 : Conclusion générale

La pile à combustible est une technologie innovante qui présente de nombreux avantages en termes de production d'électricité efficace, silencieuse et respectueuse de l'environnement, grâce à une grande variété de combustibles, y compris des sources d'énergie renouvelables. Elle est largement utilisée avec succès dans de nombreux secteurs et est considérée comme une technologie clé pour la transition vers une économie bas carbone.

De plus, la combinaison de la pile à combustible avec un cycle ORC offre une solution de production d'électricité encore plus respectueuse de l'environnement, en utilisant la chaleur résiduelle de la pile à combustible ou d'autres systèmes de production de chaleur.

Dans cette étude, une pile à combustible a été utilisée pour alimenter un cycle organique de Rankine dans le but d'améliorer ses performances.

Un modèle thermodynamique basé sur les aspects électrochimiques et énergétiques a été développé pour évaluer les performances d'une pile à combustible de type SOFC et d'un système combiné pile SOFC / Cycle ORC. Quatre fluides ont été utilisés comme fluide de travail du Cycle ORC : R600, R290, R245fa et R152a.

L'étude a également examiné l'effet de la température et de la pression de fonctionnement sur les performances de la pile à combustible et du système combiné Pile SOFC / CycleORC, y compris la puissance produite et l'efficacité énergétique.

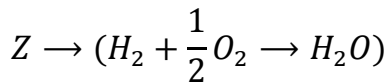
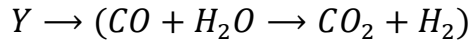
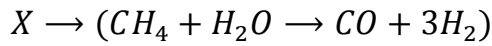
L'étude paramétrique de la pile à combustible et du système combiné pile à combustible et cycle ORC a permis de mettre en évidence les performances et les limites de ces technologies dans le domaine de la production d'énergie. Les résultats obtenus ont montré que la pile à combustible peut offrir un rendement élevé.

Les Perspectives

Cette étude sera poursuivie pour étudier d'autres types de piles à combustible et de nouvelles configurations en vue de réaliser une étude comparative visant à améliorer les performances.

Annexe

Les débits molaires d'entrée et de sortie de la SOFC peuvent être calculés en appliquant les bilans de matière



Les numéros d'indice font référence aux nombres de la figure 1. \dot{n}_i correspond aux composants molaires en i points et R_{SC} est le rapport vapeur/carbone

$$\dot{n}_{ch_4,6} = X$$

$$\dot{n}_{h_2o,11} = R_{sc} \times \dot{n}_{ch_4,6}$$

$$\dot{n}_{h_2,12} = 3X + Y - Z$$

$$\dot{n}_{co,12} = X - Y$$

$$\dot{n}_{co_2,12} = Y$$

$$\dot{n}_{h_2o,12} = R_{sc} \times X - X - Y + Z$$

$$\dot{n}_{o_2,4} = \dot{n}_{o_2,3} - Z/2$$

$$\dot{n}_{N_2,3} = \left(\frac{79}{21}\right) \times \dot{n}_{o_2,3}$$

$$\dot{n}(3) = \dot{n}_{o_2,3} + \dot{n}_{N_2,3}$$

$$\dot{n}(4) = \dot{n}_{o_2,4} + \dot{n}_{N_2,4}$$

$$\dot{n}(12) = \dot{n}_{h_2,12} + \dot{n}_{co,12} + \dot{n}_{co_2,12} + \dot{n}_{h_2o,12}$$

$$\dot{n}(11) = \dot{n}_{ch_4,11} + \dot{n}_{h_2o,11}$$

$$Z = U_f(3X + Y)$$

$$Z = U_a(2 \cdot \dot{n}_{o_2,3})$$

$$J = \frac{2F \cdot Z}{N_{PC} \cdot A_a}$$

Annexe

$$\ln(K_S) = -\frac{\Delta G_S^\circ}{R \cdot T_{Pc}} = \ln\left(\frac{Y \times (3X + Y - Z)}{(X - Y) \times (r_{vc} \times X - X - Y + Z)}\right)$$

Où ΔG° c'est le changement d'énergie libre de Gibbs à T_r et P_0 dans la réaction de déplacement

$$\Delta G_S^\circ = \bar{g}_{CO_2}^\circ + \bar{g}_{H_2}^\circ - \bar{g}_{H_2O}^\circ - \bar{g}_{CO}^\circ$$

$$j_{as} = \frac{2 \times 0.02 \times F \times Ph_{2,2}}{R \times T_{Pc} \times L_{an}}$$

$$j_{cs} = \frac{4 \times 0.005 \times F \times Po_{2,4}}{\frac{P_4 - Po_{2,4}}{P_4} \times R \cdot T_{Fc} \cdot L_{ca}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{an} = \left[\left(\frac{9.5 \times 10^7}{T_{Pc}} \right) \times \exp\left(-\frac{1150}{T_{Pc}}\right) \right]^{-1} \\ \rho_{ca} = \left[\left(\frac{4.2 \times 10^7}{T_{Pc}} \right) \times \exp\left(-\frac{1200}{T_{Pc}}\right) \right]^{-1} \\ \rho_e = \left[33400 \times \exp\left(-\frac{1030}{T_{Pc}}\right) \right]^{-1} \\ \rho_{an} = \left[\left(\frac{9.3 \times 10^6}{T_{Pc}} \right) \times \exp\left(-\frac{1100}{T_{Pc}}\right) \right]^{-1} \end{array} \right.$$

- [1]. Hamza, B. (2022). Etude, modélisation et optimisation d'un système d'énergie hybride PV/Pile à combustible (Thèse de doctorat, université msila).
- [2]. Lanz, A., Heffel, J., & Messer, C. (2001). Hydrogen fuel cell engines and related technologies (No. FTA-CA-26-7022-01.1). Collège du désert, Palm Désert, Californie, Etats-Unis, Centre de formation aux technologies de l'énergie United States. Department of Transportation. Federal Transit Administration.
- [3]. Al-Zaidi, M. K., Al-Khafaji, R. Q., Al-Zubaidy, D. K., & Salman, M. M. (2021) A Review: Fuel Cells Types and their Applications (International Journal of Scientific Engineering and Applied Science, 7(7), 2395-3470.
- [4]. Wongpromrat, W. (2015). Étude de la sublimation du chrome lors de l'oxydation haute température de l'alliage AISI 441 et recherche de solutions de protection (Thèse de doctorat, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).
- [5]. Blondel, Q. (2021). Etude et optimisation énergétique des mélanges zéotropes pour les cycles thermodynamiques de Rankine (Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes).
- [6]. Danel, Q. (2016). Étude numérique et expérimentale d'un cycle de Rankine-Hirn de faible puissance pour la récupération d'énergie (Thèse de doctorat, Paris, CNAM).
- [7]. Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Spliethoff, H. (2009). Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied thermal engineering, 29(8-9), 1809-1817.
- [8]. Asghari, M., & Brouwer, J. (2019). Integration of a solid oxide fuel cell with an organic rankine cycle and absorption chiller for dynamic generation of power and cooling for a residential application. Fuel Cells, 19(4), 361-373.
- [9]. Matthew, O., & Nieh, S. (2019). Effects of ORC Working Fluids on Combined Cycle Integrated with SOFC and ORC for Stationary Power Generation. Energy and Power Engineering, 11(4), 167-185.
- [10]. Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. Renewable and sustainable energy reviews, 24, 325-342.
- [11]. Mojaver, P., Jafarmadar, S., Khalilarya, S., & Chitsaz, A. (2019). Thermodynamic investigation and optimization of a power generation system based solid oxide fuel cell using taguchi approach. International Journal of Engineering, 32(7), 1040-1048.
- [12]. Bafekr, S. H., Chitsaz, A., & Holagh, S. G. (2022). Thermo-electrochemical modeling of oxygen ion-conducting solid oxide fuel cells with internal steam reforming in the water-energy nexus. Energy Nexus, 5, 100057.

Référence

- [13]. Dijoux, A., Sinama, F., Marc, O. M., Journoud, A., Clauzade, B., & Castaing-Lasvignottes, J. (2016, May). Influence du choix du fluide de travail sur les performances d'un cycle organique de Rankine appliqué à l'énergie thermique des mers. In Congrès français de thermique et Multiphysique.