



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued**

Faculté de la Technologie  
Département de Génie des Procédés et Pétrochimie

# MÉMOIRE

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER**

**Spécialité : Génie Chimique**

**Présenté par :**

- HENICHE Imane
- LEKHOUIMES Zohra
- ZOUARI FERHAT Ziyad
- LAHMADI Ferdaous
- NAAS Nabila

**Développement d'un modèle de critères pour la sélection des  
fluides de travail pour le cycle ORC**

Soutenue le :05 / 06 /2023

Devant le jury composé de :

**Dr : BEN MAYA Ammar**

Président

**Dr : BOUDHIAF Moussa**

Examineur

**Dr : REDJEB Youcef**

Encadreur

**Année académique : 2022/2023**

# Remerciements

*Nous tenons avant tout à remercier Allah tout puissant, pour la Pouvoir, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'étude, afin que nous puissions en arriver là.*

*La première personne à qui nous souhaitons adresser nos chaleureux remerciements, monsieur Dr. REDJEB Youcef, pour son Soutien, ses recommandations judicieuses, sa disponibilité, son suivi attentif, ses Encouragements continus et c'est ce qui nous a permis de mieux s'exprimer et Faire valoir nos connaissances. Nous remercions chaleureusement les maîtres membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre étude en acceptant d'examiner notre modeste travail et de l'enrichir par leurs Propositions.*

# Dédicaces

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, L'amour, le respect, la reconnaissance...*

*Je dédie ce travail ...*

*Mes chers parents*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux, et de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez.*

*Puisse Allah, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

*A mes chères sœurs, Nour, Hana, Wissame.*

*A mes chers frères, Oussama, Aymen, nasrallah, Abd almomen, Sohaib, Nidhal.*

*A mes chères amies, Amal khir, zohra Lekhouimes*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*جزاكم الله عني كل خير*

*Imane Heniche*

# Dédicaces

*Au propriétaire de la biographie parfumée et de la pensée éclairée, il était le premier crédit pour ma réussite dans l'enseignement supérieur  
«mon père vertueux» que Dieu prolonge sa vie*

*A celui qui m'a mis sur le chemin de la vie et a fait de moi l'ancre du corps et m'a nourri jusqu'à ce que je devienne vieux A celui vers qui les mots se précipitent pour exprimer ce qui est caché en lui Au soleil qui a illuminé mon chemin et m'a réchauffé de sa tendresse*

*A ceux qui sont plus grands qu'eux, et sur eux je compte, à ceux qui ont éclairé ma vie, à leur présence, je gagne détermination et patience*

*"Mes sœurs, ma sœur et les femmes de mes sœurs."*

*À ceux dont je dépends, petits et grands, mes sœurs et mes amis*

*« Iman Heniche » « Amal Kħair »*

*A ceux avec qui j'ai goûté les plus beaux moments, A ceux dont je souhaite me souvenir et me rappeler, A ceux qui me manqueront, A mes amis les plus chers, chacun avec son nom.*

*Au précieux qui a éclairé mon chemin avec cordialité pour moi, car il était l'homme qui m'a toujours motivé vers de meilleurs et de plus beaux chemins.« Mon fiancé est précieux »*

*Zahra Lekħouimes*

# *Dédicaces*

*À celle que j'adore de mon cœur c' est elle qui a sacrifié sa vie pour  
moi à celle qui n ' a jamais épargné aucun effort pour me rendre  
heureux, (chère mère)*

*À celui qui a veillé à notre éducation avec dévouement ( mon père)*

*À tous mes frères ,mes soeurs et surtout mon cousin Abdelkader .*

*À tout mes amis et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire ,du  
moyen,du secondaires,ou de l' enseignement superieur .*

*Zouari Ferhat Ziyad*

# Dédicaces

*Loué soit Dieu qui nous a aidés avec la connaissance, nous a ornés de patience, nous a honorés de piété et nous a embellis de bien-être. Loué soit Dieu pour le succès et le remboursement pour l'achèvement de cet humble travail. Mon désir ﷺ mon cher père ﷺ à ceux qui m'ont élevé sur l'honneur et la vertu et m'ont appris à gravir l'échelle de la vie avec sagesse et patience et m'ont aidé par des prières pour mon cher sabbat ﷺ ma tendre mère ﷺ à qui Dieu m'a donné la bénédiction de leur présence dans ma vie et fait d'eux la côte ferme qui ne tend pas ﷺ mes frères et sœurs ﷺ à ceux qui m'ont préféré à eux-mêmes Et me visitent à l'heure des difficultés et du désespoir, et plantent la graine de l'espoir dans mon âme, mes collègues, mon force, mon soutien, mon sanctuaire, et l'âme qui habitait mon cœur, mon cher mari. Nous avons appris de leurs mains et ils nous ont prodigué leurs conseils et leurs orientations. Mes honorables professeurs. Et enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin. loin avec le travail ou la supplication.*

*Lahmadi Ferdaous*

# *sommaire*

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Introduction générale</b> | 2 |
|------------------------------|---|

## **Partie bibliographique**

|  |    |
|--|----|
| <b>I. Cycle Organique de Rankine</b>   | 5  |
| <b>I.1. Introduction</b>   | 5  |
| <b>I.2. Histoire</b>   | 5  |
| <b>I.3. Les architectures</b>  | 7  |
| <b>I.4. Fluides de travail Le choix du bon fluide de travail</b>               | 9  |
| <b>I.5. Utilisations du cycle organique de Rankine</b>                         | 11 |
| <b>I.5.1. Récupération de chaleur perdue</b>                                   | 11 |
| <b>I.5.2. Solaire thermique</b>  | 12 |
| <b>I.5.3. Géothermal power plants</b>  | 12 |
| <b>I.5.4. Centrales électriques à biomasse</b>                                 | 12 |
| <b>I.6. Thermodynamique du cycle organique de Rankine</b>                      | 13 |
| <b>I.7. Conclusion</b>   | 19 |
| <b>II.1. Introduction</b>  | 22 |
| <b>II.2. Classification des fluides de travail</b>                             | 22 |
| <b>II.2.1. Définition des fluides de travail</b>                               | 22 |
| <b>II.2.2. Types de fluides de travail</b>                                     | 22 |
| <b>II.2.3. Caractéristiques thermodynamiques</b>                               | 25 |
| <b>II.2.4. Niveau de sécurité : toxicité et inflammabilité</b>                 | 26 |
| <b>II.2.5. Impacts environnementaux et normes internationales</b>              | 27 |
| <b><i>II.2.5.1. Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)</i></b> | 27 |
| <b><i>II.2.5.2. Potentiel de réchauffement climatique (GWP)</i></b>            | 27 |

|   |    |
|---|----|
| <b>II.3. Effet de la sélection des fluides sur le fonctionnement du cycle organique de Rankine</b>                    | 29 |
| <b>II.4. Conclusion</b>   | 30 |
| <b>III. Critères de sélection des fluides de travail pour le cycle organique de Rankine</b>                           | 32 |
| <b>III.1. Introduction</b>  | 32 |
| <b>III.2. Critères de sélection des fluides de travail pour le cycle organique de Rankine</b>                         | 32 |
| <b>III.2.1. Fluide de travail idéal</b>   | 32 |
| <b>III.2.2. Critères de sélection de fluide approprié</b>   | 33 |
| <b><i>III.2.2.1. Caractéristiques thermodynamiques:</i></b>   | 34 |
| <b><i>III.2.2.1.1. Critères de sélection initiale du fluide de travail, dans le cas d'un cycle sous-critique:</i></b> | 35 |
| <b><i>III.2.2.2. Propriétés de transfert de chaleur</i></b>   | 38 |
| <b><i>III.2.2.3. Critères environnementaux et de sécurité</i></b>   | 39 |
| <b><i>III.2.2.3.1. Données environnementales</i></b>  | 40 |
| <b><i>III.2.2.3.1.1. Potentiel de réchauffement planétaire (GWP)</i></b>  | 40 |
| <b><i>III.2.2.3.1.2. Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)</i></b>                                   | 40 |
| <b>III.2.2.3.2. Données de sécurité</b>   | 40 |
| <b><i>III.2.2.3.2.1. Limite inférieure d'inflammabilité (LFL)</i></b>   | 41 |
| <b><i>III.2.2.3.2.2. Classement de sécurité</i></b>   | 41 |
| <b>III.3. Conclusion:</b>   | 42 |
| <b>IV. Résultats de la simulation et discussion</b>   | 45 |
| <b>IV.1. Introduction:</b>  | 45 |
| <b>IV.2. Étude de cas:</b>  | 45 |
| <b>IV.2.1. Définition de la géothermie:</b>   | 45 |
| <b>IV.2.2. Cas sélectionné:</b>   | 45 |
| <b>IV.3. Présentation du EES</b>  | 47 |
| <b>IV.5. Sélection des fluides de travail</b>   | 51 |
| <b>IV.6. Résultats et discussion</b>  | 52 |
| <b>IV.6.1. Résultats :</b>  | 52 |
| <b>IV.7. Conclusion</b>   | 55 |

*Résumé*

## *Liste des abréviations*

- ORC:** Cycle organique de Rankine
- ODP:** Possibilité d'appauvrir la couche d'ozone
- GWP:** Potentiel de réchauffement planétaire
- A1:** Faible toxicité, pas d'inflammabilité
- A2:** Faible toxicité, faible inflammabilité
- A3:** Faible toxicité, haute inflammabilité
- B1:** Haute toxicité, pas d'inflammabilité
- B2:** Haute toxicité, faible inflammabilité
- B3:** Haute toxicité, haute inflammabilité
- EES:** Résoudre des équations d'ingénierie

## *Liste des figures*

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.1</b> Un article sur le moteur NAFTA a été publié en 1890                             | 06 |
| <b>Figure I.2</b> Anciennement le moteur d'ALENA  | 07 |
| <b>Figure I.3</b> Rank® Technologie – Comment fonctionne une pompe à chaleur                      | 08 |
| <b>Figure I.4</b> Schéma de principe du cycle VCR combiné avec évaporateurs doubles<br>ORC        | 08 |
| <b>Figure I.5</b> Diagramme T– S de l'eau et de certains fluides de travail organiques            | 10 |
| <b>Figure I.6</b> Le cycle de Rankine organique idéal et réel                                     | 14 |
| <b>Figure I.7</b> Cycle de Rankine organique, disposition de base                                 | 15 |
| <b>Figure II.1</b> Liquide « dry » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur             | 22 |
| <b>Figure II.2</b> Fluide « Isentropic » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur       | 23 |
| <b>Figure II.3</b> Fluide « wet » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur              | 23 |
| <b>Figure II.4</b> Fluides de travail dry, wet et Isentropic                                      | 24 |
| <b>Figure III.1</b> ORC avec pente positive de la courbe de vapeur saturée, vapeur<br>surchauffée | 37 |
| <b>Figure IV.1</b> Interface du logiciel EES  | 49 |

## *Liste des tableaux*

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau II.1</b> Classification des fluides selon ASHRAE 34  | 26 |
| <b>Tableau II.2</b> Propriétés physiques, impacts environnementaux et données de sécurité des fluides de travail potentiels | 28 |
| <b>Tableau IV.1</b> Physicochemical data of some hot springs of northern Algeria  | 46 |
| <b>Tableau IV.2</b> Propriétés physiques, impacts environnementaux et données de sécurité des composés sélectionnés         | 51 |
| <b>Tableau IV.3</b> Résultats de l'optimisation des composés sélectionnés   | 53 |
| <b>Tableau IV.4</b> Classement des fluides  | 54 |

# *Introduction Générale*

## ***Introduction Générale***

La conservation de l'énergie dans le monde est devenue très importante ces dernières années, en particulier l'utilisation de sources de chaleur à basse température et à faible volume. L'extraction d'énergie à partir de la chaleur résiduelle industrielle, de l'énergie de la biomasse, de l'énergie solaire et de la chaleur d'échappement des turbines devient de plus en plus courante. Le cycle de Rankine organique est un type de technologie de production d'énergie qui utilise des liquides organiques pour convertir la chaleur en électricité. Ce cycle fonctionne en utilisant une source de chaleur pour vaporiser un liquide organique, qui à son tour entraîne une turbine pour produire de l'électricité. Le cycle organique de Rankine est un moyen efficace de convertir ces sources de chaleur en énergie électrique et aide à gérer les basses températures de production d'énergie. Le cycle de Rankine conventionnel qui utilise l'eau comme fluide de travail a besoin d'une source de chaleur beaucoup plus élevée tandis que le cycle de Rankine organique peut générer plus de puissance à une température beaucoup plus basse. La température de la source de chaleur peut varier de 50 à plus de 250 degrés Celsius. De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années dans le monde entier et de nombreux systèmes de cycle organique de Rankine ont été installés avec succès dans différents pays, notamment aux États-Unis, au Canada, en Allemagne et en Italie. Afin d'obtenir des performances organiques maximales du cycle de Rankine, le choix du fluide de travail pour le cycle de Rankine organique est l'une des choses les plus importantes affectant le cycle, car il a un impact direct sur l'efficacité du cycle et le rendement net du travail. Le processus de sélection des fluides de travail est soumis à plusieurs critères, principalement liés aux fluides de travail, leurs propriétés thermodynamiques et de transfert de chaleur d'une part, et les aspects de sécurité et d'environnement d'autre part. Dans ce travail, nous passons en revue les utilisations les plus importantes du cycle de Rankine organique et des fluides de travail utilisés dans ces systèmes, y compris les propriétés thermodynamiques, leur impact sur l'environnement et la sécurité, et leur efficacité dans la production d'énergie, en plus de l'ensemble de critères auquel le processus de sélection des fluides de travail est soumis. Notre étude vise à évaluer la faisabilité de développer un modèle de critères de sélection des fluides de travail pour améliorer et soutenir les systèmes organiques du cycle de Rankine [1].

## *Partie bibliographique*

*Chapitre I : Cycle Organique de  
Rankine*

## **I. Cycle Organique de Rankine**

### **I.1. Introduction**

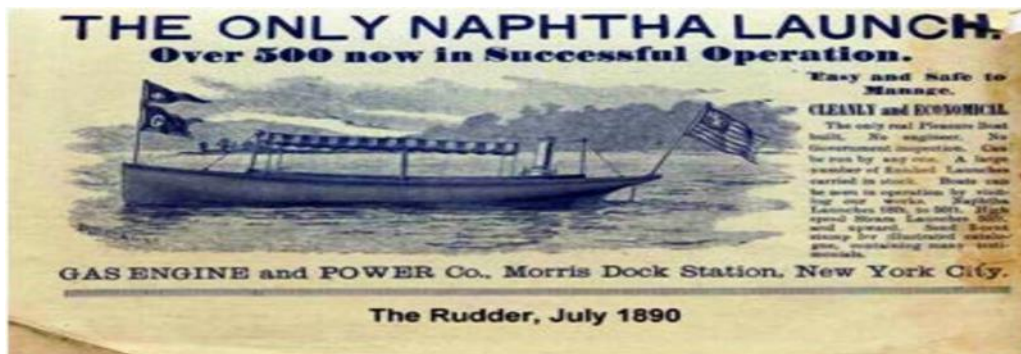
Les systèmes destinés à convertir les énergies thermiques provenant de plusieurs sources en énergie électrique sont appelés systèmes de conversion organique. On retrouve ces systèmes dans le domaine de l'industrie et de l'énergie. Les liquides sont inclus puis testés et analysés dans ces systèmes sous le nom d'ORC.

Le cycle de Rankine est un système en boucle fermée dans lequel le fluide de travail circule à plusieurs reprises à travers quatre composants pour convertir la chaleur perdue en énergie mécanique ou électrique. Si le fluide de travail choisi est de nature organique, les chercheurs appellent souvent ce système le cycle organique de Rankine (ORC).

Le cycle organique de Rankine (ORC) est largement considéré comme une technologie prometteuse pour la production d'énergie électrique à partir de sources de chaleur de faible qualité. Au cours de la dernière décennie, de nombreuses centrales électriques ont été installées dans le monde dans la gamme des mégawatts. Cependant, malgré le potentiel du marché, la commercialisation des centrales électriques ORC dans la gamme du kW n'a pas atteint un haut niveau de maturité, pour plusieurs raisons. Premièrement, le prix fixé est encore trop élevé pour offrir un délai de récupération attractif, et deuxièmement, les clients potentiels des CRO de petite taille sont généralement des petites et moyennes entreprises (PME), généralement moins conscientes des économies potentielles que cette technologie peut réaliser. . En ce qui concerne les usines à petite échelle, des problèmes de conception supplémentaires se posent qui limitent encore la disponibilité généralisée de la technologie.

### **I.2. Histoire**

Le premier cycle organique de Rankine a été mis en œuvre vers la fin du XIXe siècle lorsque certains petits bateaux ont commencé à être fabriqués avec des moteurs utilisant de l'essence bouillante au lieu de la vapeur, dont le plus célèbre a été construit par Frank W. Ofeldt, qui utilisait du naphta au lieu de l'eau dans le moteur à vapeur d'un bateau. Naphta) était supérieure à la vapeur d'eau, ce qui permettait d'obtenir une plus grande quantité d'énergie. Ce fut la première découverte du cycle organique de Rankine, puisqu'un brevet fut déposé pour le moteur Naphta en 1883.



**Figure I.1** Un article sur le moteur NAFTA a été publié en 1890

Le liquide de fonctionnement du moteur était du naphtha. Le naphtha d'hydrocarbure liquide pur peut être produit lors de la distillation fractionnée du goudron de houille ou du pétrole brut.

La température d'évaporation du naphtha est inférieure à la température de l'eau, ce qui signifie que la quantité de vapeur sera plus grande si le naphtha est utilisé à la place de l'eau, puis le moteur accomplit plus de travail. Les moteurs à naphtha sont devenus courants et sont entrés en production à partir de 1897 après que les bateaux à vapeur ont acquis la réputation de prendre des risques élevés. Fondamentalement, le moteur au naphtha utilise le même anneau que le moteur à vapeur, mais utilise du naphtha au lieu de l'eau. Il a également été utilisé comme lubrifiant pour les pièces mobiles et comme carburant pour évaporer le fluide de travail.

Ces lancements ont connu un succès commercial modéré grâce à une loi américaine exigeant la présence d'un ingénieur qualifié à bord si le moteur utilisait de la vapeur à haute pression. Cependant, la technologie ORC n'a été largement développée qu'au XXe siècle.

La compagnie d'électricité de Morris à New York a développé le moteur et après avoir progressivement abandonné les moteurs à vapeur, l'entreprise a commencé la production pour répondre aux besoins du marché. Les nouveaux moteurs ont été démarrés par les propriétaires eux-mêmes sans avoir besoin d'ingénieurs spécialisés [1].

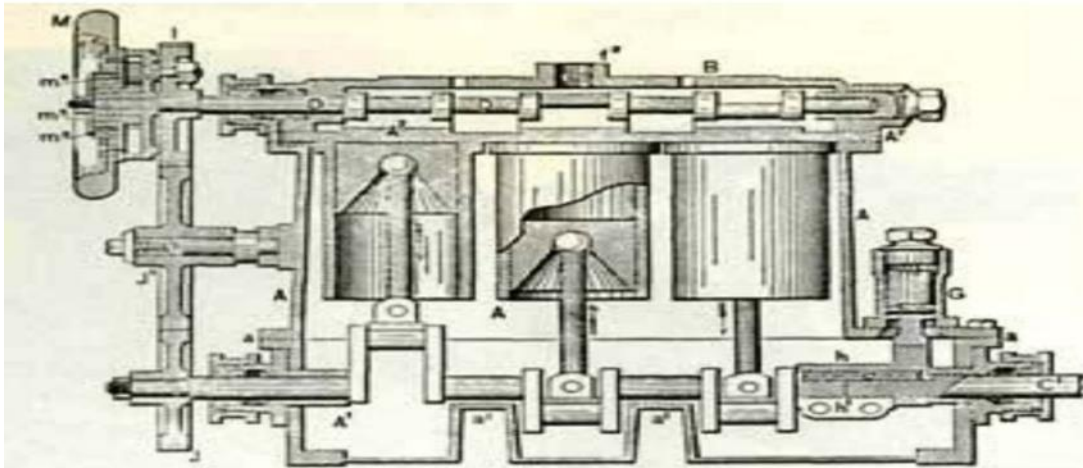


Figure I.2 Anciennement le moteur d'ALENA

### I.3. Les architectures

La densité du liquide organique joue un rôle important dans la détermination de la taille des composants du cycle thermodynamique qui dépend fortement du débit volumétrique. Une densité plus élevée du fluide conduit à un volume spécifique plus faible et donc à un débit volumétrique plus faible. Cela conduit à une taille de composant plus petite. La conception des détendeurs ou des turbines est influencée par le rapport de pression, la densité et le changement d'enthalpie. Dans les cycles de vapeur, les rapports de pression plus élevés et les changements d'enthalpie à travers le détendeur nécessitent plusieurs étapes d'expansion pour réduire la perte d'énergie et produire plus de travail. Cependant, dans l'ORC, des rapports de pression inférieurs et des changements d'enthalpie nécessitent l'utilisation de détendeurs d'expansion à un ou deux étages pour de nombreux fluides de travail. L'utilisation de fluides organiques entraîne des cycles à moindre coût et des systèmes de tuyauterie plus petits en raison des densités de fluide plus élevées dans l'évaporateur et le condenseur. ORC offre de nombreux avantages par rapport aux cycles à vapeur traditionnels, tels qu'un système de contrôle simple et une turbine simple et bon marché. La formation de projections à la fin des étapes de détente est un problème courant dans les cycles de vapeur qui endommage les aubes de turbine et réduit l'efficacité et la durée de vie du détendeur. Pour atténuer ce problème, une température plus élevée est nécessaire. Une chaudière dans un cycle de Rankine se compose généralement de trois échangeurs de chaleur séparés (préchauffeur, évaporateur et surchauffeur). Cependant, dans un cycle de Rankine organique, la chaudière est généralement constituée d'un ou deux échangeurs de chaleur, et de nombreux cycles ORC utilisent des

fluides secs ou isothermes qui ne nécessitent pas de surchauffe. Le processus d'expansion peut commencer directement à partir de la ligne de vapeur de saturation et les fluides de travail sortent du détendeur sous forme de vapeur surchauffée. La qualité de la vapeur à la fin du processus d'expansion ne nécessite aucune attention. Un récupérateur ou un échangeur de chaleur (IHE) peut ne pas être nécessaire, en particulier lorsque le fluide de travail sort du détendeur à une température bien inférieure à la température à la sortie de la pompe [2].

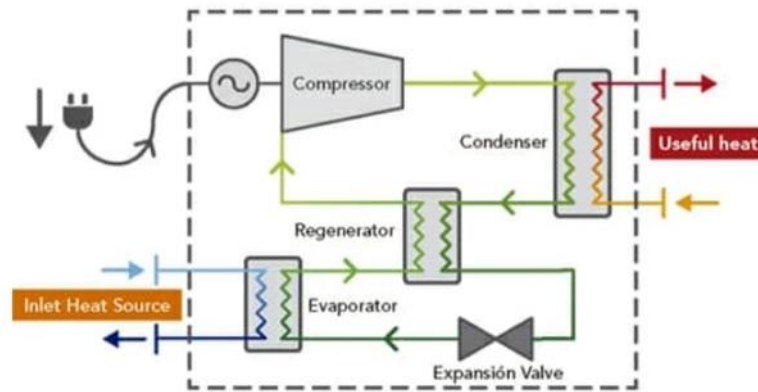


Figure I.3 Rankine Technologie – Comment fonctionne une pompe à chaleur.

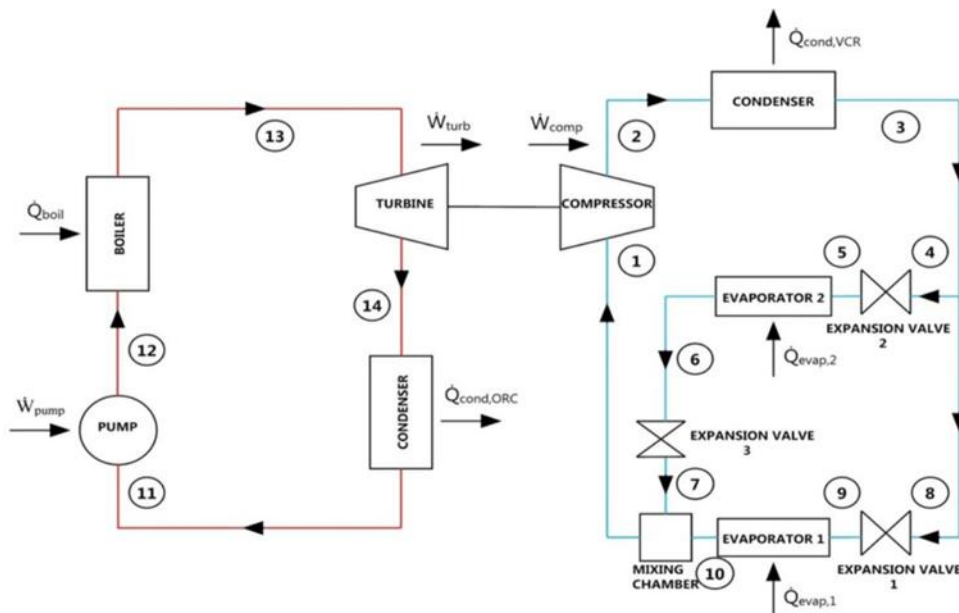
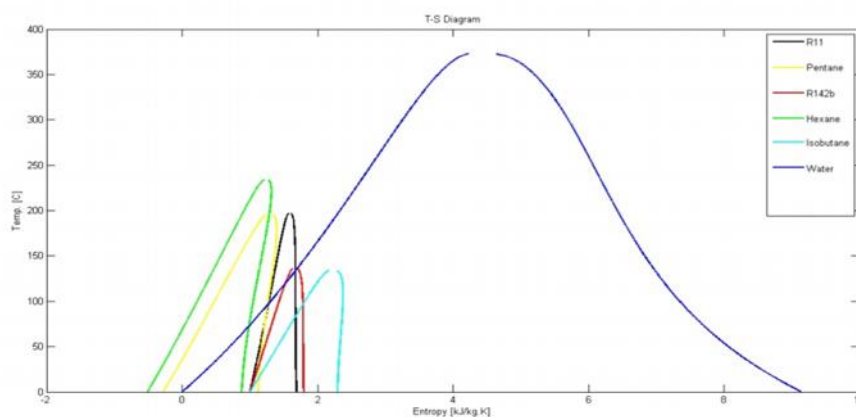


Figure I.4 Schéma de principe du cycle VCR combiné avec évaporateurs doubles ORC.

#### **I.4. Fluides de travail Le choix du bon fluide de travail**

Le choix du bon fluide de travail est de la plus haute importance pour l'efficacité du cycle, le travail en réseau, etc. Le développement de fluides de travail alternatifs est une tâche difficile et sans fin, conduisant à des avancées significatives dans la technologie du cycle organique de Rankine (ORC). Au cours des 25 dernières années. La principale différence entre le cycle vapeur et organique de Rankine est le fluide de travail utilisé dans chaque cycle. L'eau est le seul fluide de travail utilisé dans un cycle Rankine à vapeur alors qu'il existe des centaines de fluides de travail différents qui peuvent être utilisés dans un cycle Rankine organique. Concevoir et découvrir de nouvelles œuvres fluides est un processus continu. Les propriétés thermophysiques, de sécurité et environnementales varient d'un fluide de travail à l'autre. Les données environnementales et de sécurité ne sont pas disponibles pour de nombreux fluides de travail. [2] Le cycle organique de Rankine (ORC) a été identifié comme l'un des meilleurs candidats pour produire de l'électricité à partir de sources de chaleur de faible qualité. L'ORC fonctionne à des températures et des pressions plus basses que les cycles de Rankine conventionnels. Par conséquent, des liquides organiques ou des réfrigérants peuvent être utilisés comme fluides de travail pour les applications ORC, au lieu de l'eau, qui convient mieux aux applications à haute pression et à haute température. La performance et la conception d'un système ORC dépendent entièrement du fluide de travail, par conséquent, la sélection du fluide de travail pour un ORC est extrêmement importante pour une application particulière, telle que l'énergie solaire thermique, l'énergie géothermique ou la récupération de chaleur résiduelle [3] . Afin d'obtenir des performances organiques maximales du cycle de Rankine, le choix du fluide de travail est l'une des choses les plus importantes, car il a un impact direct sur l'efficacité du cycle, le rendement net du travail et les conditions de travail. Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées, certains chercheurs examinant le processus de sélection des fluides des cycles organiques de Rankine utilisés dans diverses applications Thurairaja et al. [4] La plupart des liquides organiques ont un point d'ébullition naturel inférieur à celui de l'eau. Cette propriété fait que les liquides organiques ont besoin d'une source de chaleur inférieure à la température de l'eau pour s'évaporer et récupérer l'énergie thermique des sources de chaleur à basse température. La figure 7 montre le diagramme TS de l'eau et de certains autres fluides de travail pouvant être utilisés dans les cycles de Rankine organiques. La pente de la ligne de vapeur de saturation pour les liquides organiques peut être négative, positive ou infinie tandis que pour l'eau, elle a une pente négative. Les rampes positives F Infinité sont d'énormes avantages pour les extenseurs de moteur turbo. Ces fluides de travail quittent le détendeur sous forme de vapeur super chaude et éliminent le risque de

corrosion si vous utilisez des détendeurs turbo. De plus, il n'est pas nécessaire de chauffer la vapeur avant d'y entrer.



**Figure I.5** Diagramme T – S de l'eau et de certains fluides de travail organiques.

La différence notable sur la figure (I.5) est la différence d'entropie entre la ligne de liquide de saturation et ligne de vapeur saturante. Les fluides de travail organiques ont un très faible changement d'entropie par rapport à l'eau. L'eau en tant que fluide de travail nécessite plus d'énergie thermique pour changer de phase d'un liquide saturé à un liquide saturé Vapeur saturée et peut effectuer plus d'énergie thermique par kilogramme d'eau. Présenter ceci La propriété est que l'eau a besoin d'un débit massique beaucoup plus faible que les liquides organiques pour absorber la même Quantité d'énergie thermique provenant d'une source de chaleur donnée. Un débit massique plus élevé entraîne une puissance plus élevée La consommation par la pompe et un diamètre de tuyauterie plus élevé doivent être utilisés pour vaincre la pression Pertes liées à une élévation du nombre de Reynolds. Un débit massique plus élevé signifie également un volume de composants plus important Et les pertes de charge. Certains liquides organiques ont un point de congélation très bas (en raison du point triple bas) et gèlent Le problème de condensat est éliminé même à des températures ambiantes très basses [2].

Un échangeur de chaleur (évaporateur) élargi et plus petit et moins cher peut être utilisé. , sur la base de leur étude sur la sélection des fluides de travail pour les cycles organiques de Rankine utilisés dans une centrale électrique à moteur à combustion interne pour la récupération de la chaleur des gaz d'échappement, avec une température de l'ordre de 358 ° C, dans laquelle ils ont pris en compte 37 fluides de travail, et tous les ORC examinés étaient sous-critiques et réalisés dans les mêmes conditions, et d'autre part, ils ont basé leur

sélection de ces candidats sur des critères thermodynamiques, environnementaux et de sécurité. Ils ont conclu que le fluide le plus approprié pour cette application était le R32. Ole Drescher et al.[5].

À cet égard, les performances économiques, environnementales et opérationnelles des ORC dépendent des caractéristiques du système de travail. Fluides ainsi que la conception et les caractéristiques de fonctionnement du cycle. Un liquide adapté à l'ORC doit présenter des propriétés physiques, chimiques, environnementales, de sécurité et économiques favorables telles qu'un faible volume spécifique, une viscosité, une toxicité, une inflammabilité, un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP), un potentiel de réchauffement global (GWP) et un coût, ainsi qu'une contribution favorable au processus, comme un rendement élevé ou une pression modérée dans les échangeurs de chaleur. Plusieurs travaux ont abordé la sélection des fluides ORC en fonction des propriétés liées aux fluides et aux processus en testant différents fluides disponibles dans les modèles de simulation ORC [6] .

Le modèle de cycle organique de Rankine (ORC) offrait la possibilité d'effectuer divers fluides de travail facilement, rapidement et à peu de frais. Compte tenu de la composition moléculaire du fluide de travail, la température d'ébullition normale, les propriétés critiques, la densité du liquide et la capacité thermique idéale du gaz peuvent être obtenues par des méthodes de contribution de courant de groupe (GCM).

## **I.5. Utilisations du cycle organique de Rankine**

Le cycle de Rankine organique peut être utilisé efficacement dans de nombreuses applications afin de générer du travail mécanique ou de l'énergie électrique et voici quelques-unes des applications.

### **I.5.1. Récupération de chaleur perdue**

La récupération de la chaleur résiduelle est un procédé thermodynamique qui consiste à extraire l'énergie de la chaleur résiduelle générée par divers procédés industriels. Le processus de récupération implique souvent l'utilisation de chaudières, de récupérateurs et de régénérateurs de chaleur perdue pour capter et rediriger directement la chaleur dans le processus[7]. La faisabilité économique de la récupération de la chaleur perdue dans les cycles à vapeur est souvent limitée par la température de la chaleur perdue, en particulier lorsqu'elle est basse. Cependant, le cycle organique de Rankine présente une solution viable pour générer de l'électricité à partir de sources de chaleur de faible qualité.

### **I .5.2. Solaire thermique**

L'énergie solaire thermique est une technologie éprouvée qui utilise trois technologies différentes, à savoir l'antenne parabolique, la tour solaire et l'auge parabolique pour extraire l'énergie du soleil. La technologie de la tour parabolique peut fonctionner dans une plage de température de 300 °C à 400 °C. Auparavant, cette technologie était associée au cycle de vapeur classique de Rankine pour la production d'électricité. Cependant, le cycle organique de Rankine est devenu une technologie plus prometteuse en raison de sa capacité à fonctionner à des températures plus basses, une taille de composant plus petite et des coûts d'investissement inférieurs à ceux des cycles à vapeur. Le cycle Steam Rankine nécessite une température plus élevée et plus de puissance installée pour être rentable. Le cycle organique de Rankine peut générer de l'énergie à l'échelle du kW, réduisant ainsi la puissance installée requise [8].

### **I .5.3. Géothermal power plants**

L'énergie géothermique a la capacité de fournir de l'énergie électrique durable à de nombreuses communautés. En 2007, les sources géothermiques représentaient environ 1 % de la production mondiale totale d'électricité. Cette source d'énergie se caractérise par sa propreté et sa capacité de renouvellement, et sa production peut être particulièrement efficace. L'extraction d'énergie à partir de sources géothermiques est réalisée grâce à l'utilisation de trois technologies distinctes : les centrales à vapeur sèche, les centrales à vapeur flash et les centrales à cycle binaire, identifiées par référence [9].

### **I.5.4. Centrales électriques à biomasse**

L'utilisation des combustibles fossiles traditionnels entraîne des coûts élevés et des contributions importantes au changement climatique et à l'effet de serre. En revanche, la biomasse représente une source d'énergie rentable et écologiquement durable qui connaît actuellement une expansion rapide du marché. La biomasse peut être utilisée efficacement pour générer à la fois de la chaleur et de l'électricité grâce à l'exploitation d'un système de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP). Les différentes formes de biocombustibles disponibles offrent diverses options pour la production d'énergie:

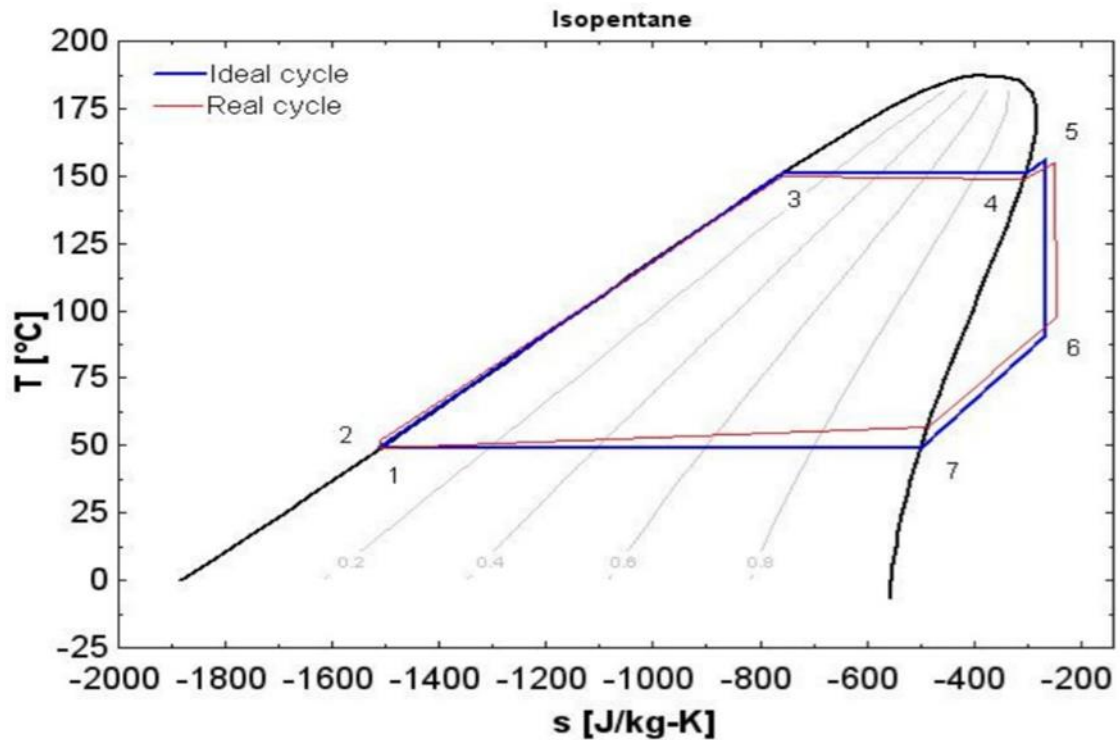
- Bois et déchets de bois et déchets agricoles combustibles;

- Biogaz à partir de matières organiques telles que les déchets agricoles ou les boues d'épuration;
- Liqueur noire qui est un sous-produit du processus de réduction en pâte.

Les sources de biomasse telles que les arbres, les cultures énergétiques, les résidus agricoles, les déchets alimentaires et les coproduits de déchets industriels ont été identifiées comme des sources typiques de biomasse. L'utilisation de combustibles issus de la biomasse présente des avantages significatifs dans l'atténuation du réchauffement climatique, des changements climatiques et de l'économie du prix du carburant. En utilisant des biocombustibles, les combustibles fossiles peuvent être remplacés, ce qui réduit les frais de déversement associés à l'élimination des déchets et libère de l'espace d'enfouissement. Il convient de noter que la différence la plus significative entre la biomasse et les combustibles fossiles est que la biomasse absorbe le carbone de l'atmosphère pendant sa croissance et le restitue lors de la combustion [10].

## **I.6. Thermodynamique du cycle organique de Rankine**

Les principes de fonctionnement d'un cycle de Rankine organique idéal sont similaires à un cycle de Rankine organique idéal. Le fluide de travail du condensat est pompé du condenseur où la pression est faible pour. L'évaporateur où la pression est élevée. Le processus se déroule à entropie constante. Haut Le fluide sous pression pénètre dans l'évaporateur et absorbe l'énergie thermique de la source de chaleur de manière stable Pression. Dans ce processus, le réfrigérant change de phase d'un liquide saturé à un liquide saturé Vapeur surchauffée. La source de chaleur externe peut être la chaleur résiduelle de l'industrie, la chaleur géothermique, Chaleur solaire, biomasse, etc. La vapeur haute pression saturée ou surchauffée sort de l'évaporateur et Il se dilate à travers un extenseur à une entropie constante pour produire un travail mécanique. Sous Processus d'expansion, la pression chute à la pression du condenseur. Après le processus d'expansion Le fluide de travail quitte le détenteur et entre dans le condenseur sous forme insaturée, saturée ou Vapeur à haute température en fonction des conditions de travail et du type de fluide de travail utilisé. Dans le Condenseur, le fluide de travail se condense et change de phase en un liquide saturé ou non refroidi Avec l'aide d'un dissipateur de chaleur, le cycle se répète.



**Figure I.6** Le cycle de Rankine organique idéal et réel [11].

Dans le cycle réel, les processus de compression et d'expansion ne sont pas équilibrés, et il y a toujours quelques manques dans la pompe et le détendeur. Les processus d'ajout de chaleur et d'expulsion de la chaleur ne sont pas isobares et il y a toujours des pertes de pression dans le système de tuyauterie. L'irréversibilité affecte aussi beaucoup de performances du système thermodynamique. Dans le cycle réel, il existe deux sources principales de génération d'entropie et ces sources sont externes et internes. La génération d'entropie interne se produit parce que [11].

Chute de pression due au frottement dans le système de tuyauterie  
 Pression et expansion inégales dans le compresseur ou le détendeur

- Transfert d'énergie interne à une différence de température limitée dans les composants.

La génération d'entropie externe se produit parce que:

- Pertes mécaniques lors du transfert de travaux
- Transfert de chaleur à une différence de température limitée

### I.6.1. Équations du système et analyse théorique

Le cycle organique de Rankine a les mêmes principes de fonctionnement et les principaux composants (évaporateur, Condenseur, détenteur et pompe) comme cycle de Rankine à vapeur. La principale différence entre les deux Cours est le fluide de travail utilisé. La figure I.7 montre le diagramme T-S d'un Rankine organique de base. Le parcours et la figure (I.8) montrent le tracé du parcours.

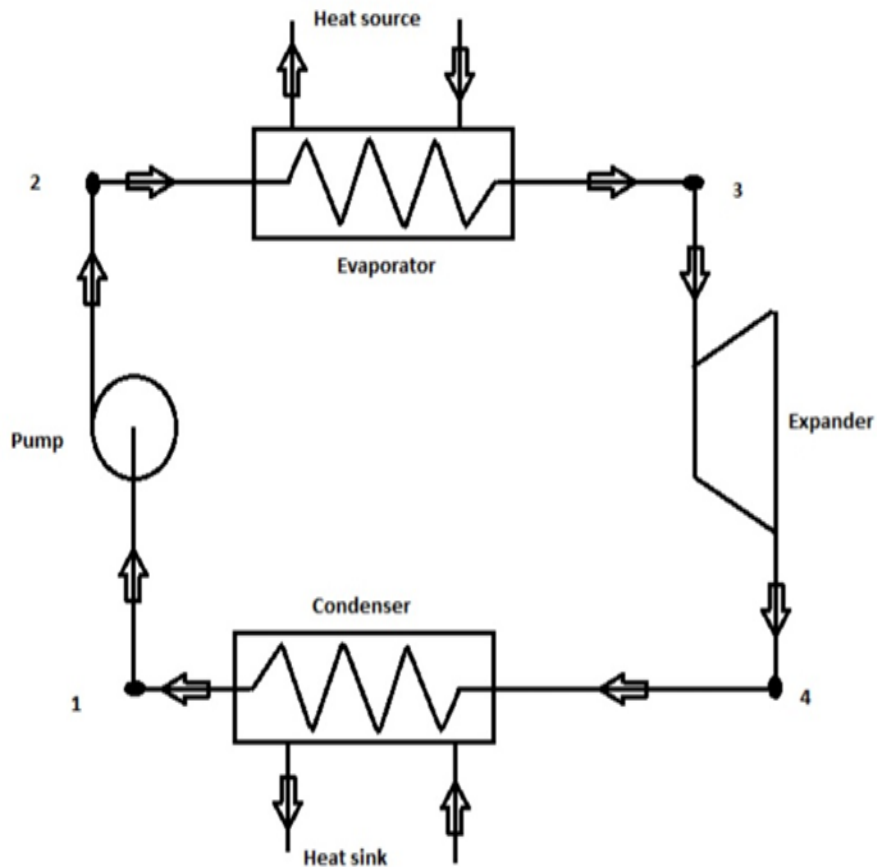


Figure I.7 Cycle de Rankine organique, disposition de base.

Le fluide de travail passe par quatre processus majeurs pour terminer un cycle. Le Voici quatre processus pour le cycle parfait.

➤ **Pression de processus (1-2)**

Le fluide de travail condensé sort sous forme de liquide saturé et est ensuite pompé vers l'évaporateur Pression à entropie constante. Ce processus est parfait mais efficace en termes de conversion d'énergie Il n'atteint jamais 100 %. L'état du fluide de travail à l'entrée de la pompe est indiqué par le point 1 et par Sortie de la pompe au point 2 (Fig. 11). L'énergie absorbée par la pompe est estimée par l'équation (1)

$$w_{12} = m' * (h_2 - h_1) \quad (1)$$

Où

$w_{12}$  :est la consommation de travail par pompe

$m'$  :est le débit massique

$h_2$  : enthalpie à l'entrée de la pompe

$h_1$  : enthalpie en sortie de pompe

Le taux de destruction d'énergie dans la pompe est donné par l'équation (2)

$$i_{12} = m' T_0 [(s_2 - s_1)] \quad (2)$$

Où

$i_{12}$  est le taux de destruction d'exergie dans la pompe

$T_0$  température ambiante en K

$s_1$  entropie à l'entrée de la pompe

$s_2$  entropie en sortie de pompe

➤ **Processus (2-3) ajoutant de la chaleur**

Dans ce processus, la chaleur est ajoutée au fluide de travail à une pression constante, le processus peut-être Ils sont considérés comme isobares malgré une légère perte de charge dans les tubes de l'évaporateur. Fluide de travail La condition à l'extérieur de l'évaporateur est indiquée par le point 3 et peut être la chaleur ajoutée au fluide de travail Calculé par l'équation (3).

$$Q_{2_3} = m' * (h_3 - h_2) \quad (3)$$

Où

$Q_{2_3}$  : fait référence à la chaleur ajoutée au fluide de travail

$h_3$  : fait référence à l'enthalpie de vapeur sortant de l'évaporateur et entrant dans le détenteur.

La température de la source de chaleur est réduite à travers l'évaporateur. Prendre la moyenne arithmétique Température ( $T_H$ ) entre température d'entrée et température de sortie,  $T_H = (T_{in} - T_{out}) / 2$  [28], puissance La destruction dans l'évaporateur peut être estimée par l'équation (4)

$$i_{2_3} = m' * T_0 [(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2) / T_H] \quad (4)$$

Où

$i_{2_3}$ : est le taux de destruction d'exergie dans l'évaporateur

$s_3$  : est l'entropie de vapeur à la sortie de l'évaporateur

#### ➤ de l'opération (3-4)

Il s'agit d'un processus d'expansion et l'énergie absorbée dans l'évaporateur est convertie en énergie utile Action mécanique au moyen d'un détenteur ou d'une turbine. Le processus est cependant isotrope L'efficacité de l'expandeur ne peut pas atteindre 100 %. L'état du fluide de travail à l'extérieur du détenteur est Indiqué par le point 4 et le travail utile peut être estimé par l'équation (5).

$$w_{3_4} = m' * (h_3 - h_4) \quad (5)$$

$w_{34}$  : est le travail utile produit par la turbine

$h_4$  : est l'enthalpie de vapeur en sortie de turbine

L'équation (6) donne le taux de destruction d'exergie dans le détenteur.

$$i_{34} = m'T_0 [(s_4 - s_3)] \quad (6)$$

Où

$i_{34}$  est le taux de destruction d'exergie dans la turbine

$s_4$  est l'entropie de vapeur en sortie de turbine

#### ➤ Processus (4-1) Expulsion de chaleur

Dans ce processus, la chaleur est rejetée dans le condenseur afin de condenser le fluide de travail et de le recycler dans le cycle. Le processus d'expulsion de la chaleur est isobare par la pression. Tombe à travers le condenseur en raison des pertes par frottement dans les tubes du condenseur. Laisser le fluide de travail condensat sous forme de liquide saturé ou non refroidi. Le point 1 indique le fluide de travail dans le condenseur. La sortie et l'entrée de la pompe sont dans le schéma T-S. La quantité de chaleur rejetée peut être estimée par Eq (7).

$$Q_{4,1} = m' * (h_4 - h_1) \quad (7)$$

Où

$Q_{4,1}$  : représente la chaleur rejetée dans le condenseur

Étant donné que la température du dissipateur thermique augmente constamment de l'entrée du condenseur à la sortie du condenseur, la moyenne arithmétique de la température,  $T_L = (T_{in} - T_{out}) / 2$  peut être utilisée pour estimer la destruction d'énergie dans Intensif [12]. L'équation (8) donne la destruction d'énergie dans le condensateur

$$i_{4,1} = m'T_0 [(s_1 - s_4) - (h_1 - h_4) / T_L] \quad (8)$$

Où

$i_{4_1}$  : fait référence au taux de destruction d'exergie dans le condenseur

Pour l'analyse thermodynamique, les modèles ORC sont construits sur la base des première et deuxième lois de la thermodynamique. Les hypothèses suivantes sont prises en compte : Le système étudié fonctionne en régime permanent.

- Les pertes de chaleur et les frottements sont négligés dans les échangeurs de chaleur et les tubes;
- La source de chaleur est formée à partir des gaz d'échappement à la sortie des chaudières industrielles.
- Le débit et la température d'entrée de la source de chaleur résiduelle sont de 10 kg.s<sup>-1</sup>

Et 150 °C, respectivement.

Afin de récupérer le plus d'énergie possible et d'éviter l'usure à basse température, la température de sortie des gaz d'échappement est maintenue au niveau minimum autorisé. La température est de 82°C.

Le rendement homogène de la turbine et de la pompe est respectivement de 0,75 et 0,8. Largement

J'ai réalisé que l'efficacité de la pompe peut être grandement affectée par la conception et le monde réel. Les opérations peuvent indiquer des rendements très faibles, mais pour le point nominal du modèle actuel. Scénario II a été accepté de supposer 0,8 comme valeur constante, à des fins d'évaluation. Les fluides de travail mentionnés et la structure de la composition. Le rendement du générateur a été supposé à 95 %. De l'eau à 20°C est utilisée comme fluide de refroidissement ; La température de condensation est supposée 30 degrés Celsius.[13] Les propriétés thermophysiques de divers liquides organiques sont évaluées à l'aide de CoolProp.

## **I.7.Conclusion**

Ce chapitre vise à introduire le principe de fonctionnement d'ORC. Presque un orc semblable au cycle de vapeur, de même, le concept a été appliqué avec une force physique réelle. Systèmes avec une croissance incroyable dans le développement technologique. La principale raison du succès. Un avantage d'ORC Power Systems est sa grande flexibilité. C'est une technologie qui peut être utilisée. La conversion de sources externes d'énergie thermique

à des niveaux de température très différents et sur une large plage Éventail de capacités. Cette fonctionnalité place les systèmes ORC à la pointe de la technologie Convient à la régénération pour convertir l'énergie thermique équivalente renouvelable (géothermie, Combustion de la biomasse, énergie solaire, récupération de la chaleur résiduelle industrielle, récupération de la chaleur résiduelle des Moteurs alternatifs et turbines à gaz, OTEC). Un bref historique des systèmes ORC est présenté, Citant des événements importants dans le développement de ce type de cycle thermodynamique. Scientifique La connaissance de plusieurs configurations orques possibles est discutée. Global cumulati La capacité des systèmes énergétiques ORC à convertir l'énergie thermique renouvelable et les déchets Croissance rapide, a commencé il y a dix ans, selon le dernier Évolution du scénario de transition énergétique. Actuellement, l'ORC sous-critique est le plus Une configuration largement utilisée en raiyson de sa simplicité, de sa sécurité et de sa stabilité de fonctionnement.

*Chapitre II : Sélection des fluides de  
travail pour le cycle organique de  
Rankine*

## II. Sélection des fluides de travail pour le cycle organique de Rankine

### II.1. Introduction

Le choix du fluide de travail est l'un des facteurs les plus importants pour obtenir une performance organique maximale du cycle de Rankine organique, car il a un impact direct sur l'efficacité du cycle, le rendement net du travail et les conditions de travail globales. Dans ce contexte, nous nous sommes principalement concentrés dans ce chapitre sur la classification des fluides de travail et l'étude de l'influence de la sélection des fluides sur les performances du cycle de Rankine organique.

### II.2. Classification des fluides de travail

#### II.2.1. Définition des fluides de travail

Les fluides de travail sont des fluides qui permettent au système d'effectuer un travail ou d'avoir du travail, ils sont généralement utilisés dans les cycles thermodynamiques, pour transférer l'énergie de la chaleur au travail.

#### II.2.2. Types de fluides de travail

Les fluides de travail classés selon leur ligne de saturation de vapeur en trois types, fluides secs, isentropiques ou humides, cette étiquette revient à la pente si elle est respectivement positive, verticale ou négative.

- Les fluides « dry » : sont des liquides organiques avec une masse molaire élevée qui montrent une pente positive sur le graphique.

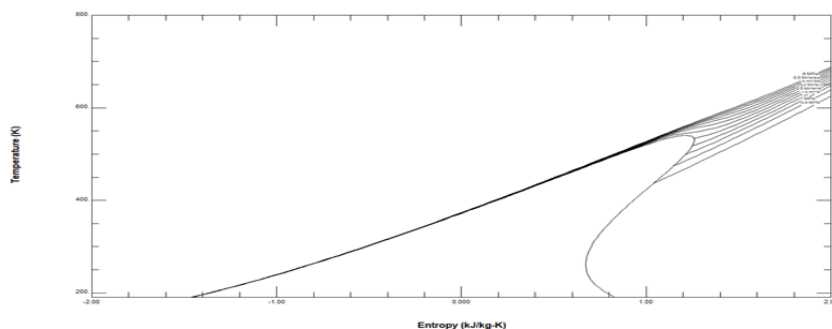


Figure II.1: Liquide « dry » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur.

- Les fluides « Isentropic »: En général, les isofluides de masse partielle moyenne apparaissent infinis ou presque verticaux sur le diagramme.

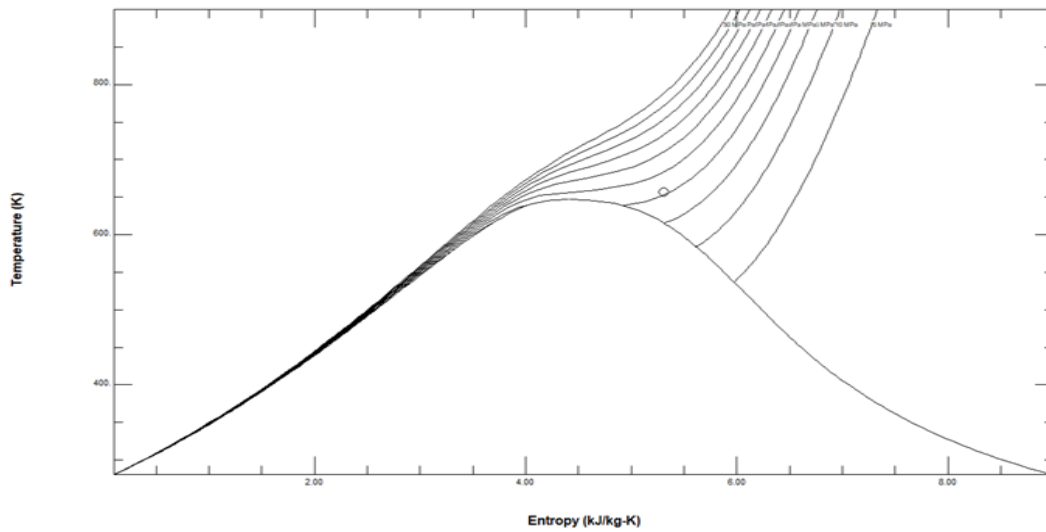


Figure II.2: Fluide « Isentropic » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur.

- Les fluides « wet »: sont des liquides organiques de faible poids moléculaire qui présentent un gradient en série sur le diagramme schématique [27].

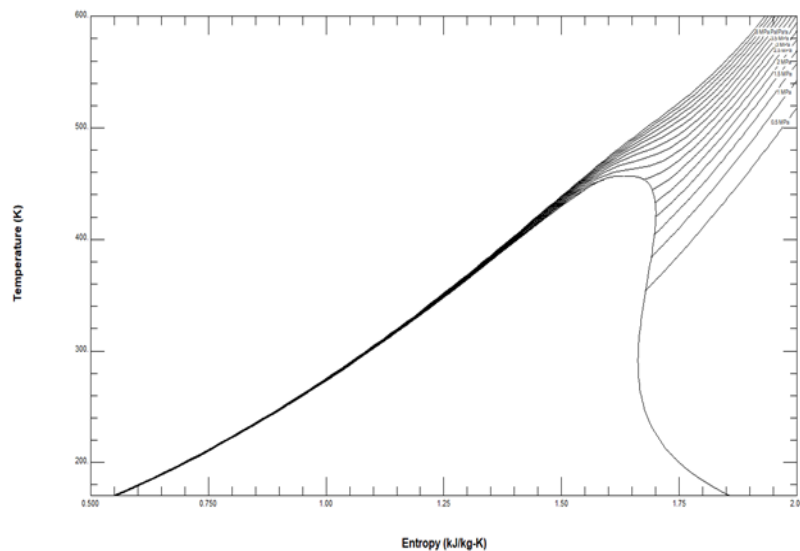
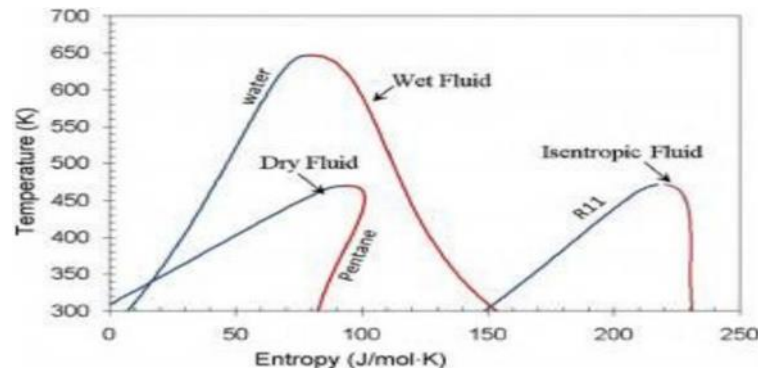


Figure II.3: Fluide « wet » selon la pente de la ligne de saturation de vapeur.

Certains chercheurs indiquent que les deux premiers types sont préférés au dernier type car les deux premiers permettent d'éviter le problème de formation de gouttelettes lors du processus de détente, ce qui signifie que la section de chauffage excessive dans l'évaporateur n'est pas nécessaire. Des fluides de travail en fonction de la pente de la ligne de saturation de vapeur pour trois fluides de travail différents [28].

Une approche alternative pour identifier la catégorie des fluides de travail a été initialement introduite par Liu et al. Dans leur publication [28]. Cette technique consiste à calculer l'entropie en fonction de la température, désignée  $\epsilon$  par les auteurs.



**Figure II.4:** Fluides de travail dry, wet et Isentropic

La classification du fluide de travail peut être déterminée sur la base de la valeur de  $\epsilon$ , où  $\epsilon > 0$  désigne un fluide sec,  $\epsilon = 0$  représente un fluide isentropique et  $\epsilon < 0$  signifie un fluide humide. Afin de simplifier le calcul, Liu et al. [28] ont utilisé les relations des gaz parfaits pour développer une équation permettant de prédire cette classification.

$$\epsilon = \frac{dS}{dT_H} \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{dS}{dT_H} = \frac{C_P}{T_H} - \frac{\frac{nT_{rH}}{1 - T_{rH}} + 1}{T_H^2} \Delta h_H \quad (10)$$

Où :  $T_H$  est le point d'ébullition standard,  $\Delta h_H$  est le changement d'enthalpie d'évaporation et  $n$  est fixé entre 0,375 et 0,380,  $C_P$  est la chaleur spécifique, est (11)

$$T_{rH} = \frac{T_H}{T_C} \quad (11)$$

### **II.2.3. Caractéristiques thermodynamiques**

#### **➤ Pression de condensation minimale**

Selon la majorité des auteurs et chercheurs, il est recommandé que la pression minimale à laquelle un fluide se condense soit supérieure à la pression atmosphérique pour éviter l'infiltration d'air ou d'eau. Cependant, cette recommandation présente un défi pour les fluides à point d'ébullition élevé, en particulier ceux ne le faites pas la température critique est élevée, ce qui limite les options disponibles pour la sélection des fluides. Sauret et al.[29] suggèrent que la sélection d'une pression supérieure à la pression atmosphérique peut atténuer le risque d'infiltration. A l'inverse, Rayegan [30] et Drescher [18] proposent une limite inférieure de 5000 Pa pour la pression de condensation.

#### **➤ Point de fusion**

Le point de fusion d'une substance est défini comme la température à laquelle ses phases solide et liquide sont en équilibre. Vélez [19] suggère que le point de fusion d'un fluide de travail utilisé dans un cycle doit être inférieur à la température la plus basse pouvant être atteinte par le cycle, qui est généralement la température ambiante. Cette recommandation vise à prévenir les risques de gel, notamment lors des saisons froides et des arrêts de process pour maintenance.

#### **➤ Faible viscosité et conductivité élevée**

Dariusz [20] suggère que les fluides idéaux pour les systèmes d'échange de chaleur sont ceux qui ont une faible viscosité à la fois dans leurs états vapeur et liquide. Cette caractéristique permet un transfert de chaleur efficace et minimise les pertes par frottement dans l'échangeur de chaleur. De plus, les fluides à conductivité thermique élevée favorisent des coefficients de transfert élevés, optimisant davantage l'efficacité de l'échange de chaleur.

#### **➤ La chaleur latente de vaporisation**

La plupart des chercheurs recommandent d'utiliser des fluides à chaleur latente élevée pour les systèmes d'échange de chaleur. Il a été suggéré que cette caractéristique est associée à une ligne de saturation de vapeur presque verticale (isentropique). Papadopoulos et al.[21] ont confirmé que l'utilisation de fluides à chaleur latente élevée permet d'obtenir une

efficacité de cycle élevée sans avoir besoin d'un générateur interne. De même, Maizza et al.[22] ont démontré que les fluides à chaleur latente élevée permettent un transfert élevé lors du changement de phase, améliorant ainsi l'efficacité globale sans nécessiter de générateur interne.

### ➤ **Pression et température maximales**

Plusieurs chercheurs ont discuté du concept de limitation de pression maximale pour les fluides de travail dans les cycles d'échange de chaleur. Il a été noté que des pressions élevées peuvent conduire à l'adoption de tuyaux coûteux et complexes, et il est donc recommandé de rester dans une classe de tuyauterie raisonnable. Par exemple, certains chercheurs ont proposé de limiter la pression à 40 bar (comme suggéré dans [23]) ou 30 bar (comme suggéré par Alireza et al. [24]). A l'inverse, d'autres chercheurs comme Drescher [18] et Lee et al. [25] proposent de limiter la pression maximale à 20 bars pour réduire les dépenses matérielles et les risques de sécurité. En ce qui concerne la température maximale, la plupart des chercheurs recommandent de la maintenir en dessous de la température critique, car des températures élevées peuvent entraîner une détérioration chimique et la décomposition de la plupart des fluides (contrairement à l'eau). Delgado [26] propose de fixer la température maximale à 10-15°C en dessous de la température critique, tandis que Chys et al. [27] proposent une limite d'environ 90 % de la température critique. Vivian et al. [28] rapportent que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la température est réglée à 35°C en dessous de la température critique.

#### **II.2.4. Niveau de sécurité : toxicité et inflammabilité**

Selon la norme ASHRAE 34 [29], les niveaux de sécurité des fluides de travail classés en deux catégories dans leur partie qui retourne à la toxicité qui sont (A= Faible Toxicité, et B= Haut toxicité), et ils sont classés en 3 catégories dans leur part qui revient à l'inflammabilité qui sont (1= Pas de propagation de flamme, 2= faible inflammabilité, 3= Haute inflammabilité), le tableau II.1 présente la classification des fluides de travail selon ASHRAE 34.[30]

**Tableau II.1:** Classification des fluides selon ASHRAE 34

| Inflammabilité \ Toxicité | Faible Toxicité              | Haut Toxicité |
|---------------------------|------------------------------|---------------|
|                           | Pas de propagation de flamme | A1            |
| Faible inflammabilité     | A2                           | B2            |
| Haute inflammabilité      | A3                           | B3            |

### II.2.5. Impacts environnementaux et normes internationales

Dans le cadre de la protection de l'environnement et de la couche d'ozone, et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les chercheurs ont mis deux paramètres qui doivent être pris en considération lors du processus de sélection des fluides de travail, qui sont, le potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP) et le potentiel de réchauffement global (GWP).

#### II.2.5.1. Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)

ODP est un acronyme qui représente le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone d'une substance, qui mesure l'étendue de l'appauvrissement de la couche d'ozone causée par la substance. L'ODP du R11 est fixé à 1,0 et l'ODP des autres substances est évalué par rapport au R11, en fonction de leur capacité à appauvrir la couche d'ozone. Les fluides de travail à ODP élevé tels que le R11 et le R114 ont été désignés pour une élimination progressive par les protocoles de Montréal et de Kyoto en raison de leur impact négatif direct sur la couche d'ozone. Dans cette optique, la production de R11 et R114 aux États-Unis a cessé en 1996.

#### II.2.5.2. Potentiel de réchauffement climatique (GWP)

Le potentiel de réchauffement global (GWP) d'une substance représente son impact sur le réchauffement climatique, tandis que le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) mesure son impact sur la couche d'ozone. Une valeur GWP de 1 est attribuée au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), qui sert de point de référence pour comparer l'impact d'autres substances. En règle générale, la valeur GWP sur une période de 100 ans est utilisée pour

évaluer l'impact à long terme des substances sur le réchauffement climatique. Cependant, pour les substances dont le GWP est des milliers de fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>, comme certains fluides de travail répertoriés dans le tableau II.2, l'impact du GWP peut ne pas être significatif si le fluide de travail n'est pas rejeté dans l'atmosphère. Par conséquent, la valeur GWP peut ne pas être un facteur crucial dans la sélection d'un fluide de travail pour certaines applications. [30]

**Tableau II.2:** Propriétés physiques, impacts environnementaux et données de sécurité des fluides de travail potentiels [30]

| Potential Working Fluid | Physical Properties |          |            |            | Environmental    |              |
|-------------------------|---------------------|----------|------------|------------|------------------|--------------|
|                         | Fluid               | $T_{cr}$ | $P_{cr}$   | Fluid Type | Turning Point °C | ODP          |
| R11                     | 197.69              | 4.408    | Isentropic | 118.78     | 1.0              | <b>4750</b>  |
| R113                    | 214.06              | 3.392    | Dry        | 192.18     | 0.8              | <b>6130</b>  |
| R114                    | 154.68              | 3.257    | Dry        | 121.13     | 1.00             | <b>10000</b> |
| R115                    | 79.95               | 3.129    | Dry        | 52.98      | 0.6              | <b>7370</b>  |
| R12                     | 111.97              | 4.136    | Wet        | -          | 1.0              | <b>10900</b> |
| R123                    | 183.68              | 3.662    | Dry        | 150.62     | 0.02             | <b>77</b>    |
| R124                    | 122.28              | 3.624    | Dry        | 82.93      | 0.022            | <b>609</b>   |
| R125                    | 66.0<br>2           | 3.618    | Wet        | -          | 0                | <b>3500</b>  |
| R134a                   | 101.06              | 4.059    | Wet        | -          | 0                | <b>1430</b>  |
| R141b                   | 204.35              | 4.212    | Isentropic | 166.11     | 0.12             | <b>725</b>   |
| R142b                   | 137.11              | 4.055    | Isentropic | 73.99      | 0.07             | <b>2310</b>  |
| R143a                   | 72.7<br>1           | 3.761    | Wet        | -          | 0                | <b>4470</b>  |
| R152a                   | 113.26              | 4.517    | Wet        | -          | 0                | <b>124</b>   |
| R21                     | 178.33              | 5.181    | Wet        | -          | 0.04             | <b>151</b>   |
| R22                     | 96.1<br>5           | 4.990    | Wet        | -          | 0.05             | <b>1810</b>  |

|         |        |       |     |        |   |              |
|---------|--------|-------|-----|--------|---|--------------|
| R227ea  | 101.75 | 2.925 | Dry | 82.56  | 0 | <b>3220</b>  |
| R236fa  | 124.92 | 3.200 | Dry | 97.47  | 0 | <b>9810</b>  |
| R236ea  | 139.29 | 3.502 | Dry | 122.93 | 0 | <b>1370</b>  |
| R245ca  | 174.42 | 3.925 | Dry | 147.70 | 0 | <b>693</b>   |
| R245fa  | 154.01 | 3.651 | Dry | 127.02 | 0 | <b>1030</b>  |
| RC318   | 115.23 | 2.778 | Dry | 100.69 | 0 | <b>10300</b> |
| R32     | 78.11  | 5.782 | Wet | -      | 0 | <b>675</b>   |
| R365mfc | 186.85 | 3.266 | Dry | 170.44 | 0 | <b>794</b>   |
| C4F10   | 113.18 | 2.323 | Dry | 103.38 | 0 | <b>8860</b>  |
| C5F12   | 147.41 | 2.045 | Dry | 141.17 | 0 | <b>9160</b>  |
| R600    | 151.98 | 3.796 | Dry | 125.23 | 0 | <b>4</b>     |
| R600a   | 134.66 | 3.629 | Dry | 107.79 | 0 | <b>4</b>     |
| R601    | 196.55 | 3.370 | Dry | 179.40 | 0 | <b>0.1</b>   |
| R601a   | 187.20 | 3.378 | Dry | 171.10 | 0 | <b>0.1</b>   |

### **II.3. Effet de la sélection des fluides sur le fonctionnement du cycle organique de Rankine**

Comme mentionné précédemment, le processus de sélection du fluide de travail est l'étape la plus importante pour les applications des cycles organiques de Rankine, car la sélection du fluide approprié conduit à la meilleure performance du cycle (haute efficacité, haute efficacité de récupération de chaleur ...), donc le travail fluide doit fournir plusieurs facteurs et conditions basés sur les différentes caractéristiques qui ont été mentionnées dans la dernière section. D'un point de vue thermo-physique, le fluide doit avoir une stabilité chimique adéquate dans les plages de température souhaitées et doit avoir une bonne compatibilité avec le matériau en contact avec, car les fluides organiques présentent une détérioration chimique et une décomposition à haute température, et selon que la température maximale du cycle soit fixée [13,14,15] et de même que la pression reste dans les conditions raisonnables de pompage [23]. De l'autre côté, le fluide doit fournir une chaleur latente élevée [21] et une faible chaleur spécifique car cela entraîne une faible charge pour le condenseur et

fait augmenter l'efficacité de la récupération de chaleur. De plus, le fluide doit avoir un point de fusion inférieur au température minimale dans le cycle, pour éviter les risques de gel surtout pendant la saison froide et pendant le processus d'entretien, mais l'inverse pour le point d'éclair car il doit être le plus élevé possible, pour éviter l'auto inflammabilité du fluide. Ensuite, du point de vue de la sécurité, le fluide doit avoir une faible toxicité et une faible inflammabilité, pour éviter la nécessité de mesures de protection latérales, et enfin d'un point de vue environnemental, en terme de potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et de potentiel de réchauffement global, la valeur de ces indicateurs pour le fluide doivent se trouver dans la zone contrôlée prévue par les accords et réglementations internationaux, car cela fait que le cycle fonctionne dans une zone sûre pour les aspects environnementaux .

## **II.4. Conclusion**

Dans cette étude, un examen complet a été effectué pour la sélection des fluides de travail pour les applications ORC. La classification des fluides et leurs propriétés thermophysiques ont été discutées, et la mesure dans laquelle ces propriétés affectent le fonctionnement du cycle de Rankine organique, et la réflexion du choix des fluides sur les facteurs de base qui doivent être pris en compte lors du choix tels que la sécurité, la protection de l'environnement, l'appauvrissement de la couche d'ozone et la possibilité de réchauffement climatique.

***Chapitre III : Critères de sélection  
des fluides de travail pour le cycle  
organique de Rankine***

## **III. Critères de sélection des fluides de travail pour le cycle organique de Rankine**

### **III.1. Introduction**

L'efficacité du cycle de Rankine organique est étroitement liée aux critères de sélection du fluide de travail, une mauvaise sélection du fluide de travail peut entraîner une unité de production moins efficace. Certains critères de sélection ont été proposés, notamment les propriétés thermodynamiques et une simple analyse des critères thermodynamiques pour sélectionner le fluide de travail approprié pour les cycles sous-critiques, en plus d'autres critères liés à la protection de l'environnement et à la sécurité publique

### **III.2. Critères de sélection des fluides de travail pour le cycle organique de Rankine**

#### **III.2.1. Fluide de travail idéal**

Badr et al. [31] ont mené une enquête initiale concernant la sélection des fluides de travail pour un cycle organique de Rankine (ORC) et ont délibéré sur les propriétés qu'un fluide de travail devrait idéalement présenter. Il a été rapidement déterminé qu'aucun fluide de travail ne remplissait tous les critères nécessaires, et le choix du fluide est souvent à la discrétion du concepteur en fonction de ses critères de sélection spécifiques. Les propriétés souhaitées qui ont été discutées incluent:

- Le fluide de travail doit aboutir à une efficacité optimale du cycle thermique résultant en une conversion optimale de la chaleur d'entrée en puissance.
- La pression d'évaporation ne doit pas être excessive, une pression modérée est recommandée afin d'éviter les problèmes de contraintes mécaniques.
- La pression de condensation doit être maintenue au-dessus de la pression atmosphérique pour éviter d'avoir à faire fonctionner le condenseur sous vide. Par conséquent, pour des raisons de sécurité et d'économie, la pression dans les unités d'échange de chaleur doit être maintenue supérieure à un bar pour les condenseurs et inférieure à 25 bars pour les évaporateurs.
- Le point triple doit être bien en dessous de la température ambiante minimale souhaitée. Cela garantit que le fluide ne se solidifie pas à tous les points de fonctionnement du système.

- Une faible viscosité, une chaleur latente de vaporisation élevée et une conductivité thermique élevée du fluide de travail sont préférées. Ces propriétés garantissent que les pertes de charge dans les échangeurs et les conduites auxiliaires sont faibles et que le taux d'échange thermique dans les échangeurs est élevé.
- Un bon fluide doit avoir de faibles volumes spécifiques de vapeur et de liquide. Ces propriétés affectent les taux de transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. Les volumes spécifiques de vapeur sont directement liés à la taille et au coût du détendeur
- La pente de la ligne de vapeur saturée des fluides doit être proche de la verticale.
- Le liquide doit être non corrosif.
- Le fluide de travail doit être chimiquement stable à tous les niveaux de température utilisés dans le système. La résistance à la décomposition thermique du fluide de travail en présence de lubrifiants et de matériaux de récipient est un critère important.
- La non-toxicité, l'ininflammabilité, la non-explosivité et la non-radioactivité sont également des caractéristiques souhaitables.
- Le fluide doit avoir de bonnes propriétés de lubrification.
- Un faible coût et une grande disponibilité sont souhaités .

Compte tenu de l'abondance de critères de conception à remplir et d'un large éventail de fluides de travail potentiels parmi lesquels choisir, il est inévitable que plusieurs chercheurs se soient efforcés de classer les fluides de travail dans le but de recommander des sélections optimales pour des applications spécifiques. Tchanche et al. [32] ont intégré un modèle ORC thermodynamique avec des considérations relatives aux fluides de travail pour suggérer des fluides appropriés pour un ORC solaire à basse température fonctionnant avec une température de source de chaleur de 90°C. L'étude a conclu qu'aucun fluide ne remplissait tous les critères de manière satisfaisante, mais le R134a a été proposé comme le candidat le plus approprié pour cette application particulière. Néanmoins, le R152a, le butane et l'isobutane ont également été identifiés comme des alternatives appropriées .

### **III.2.2. Critères de sélection de fluide approprié**

La sélection du fluide de travail le plus approprié dépend principalement de la température de la source de chaleur et du dissipateur thermique. Pour chaque niveau de température, il existe différents candidats potentiels qui démontrent une corrélation favorable entre les températures de la source de chaleur et du puits de chaleur et les conditions aux limites du cycle. Le processus de sélection d'un fluide de travail approprié est difficile, car il nécessite d'équilibrer les exigences thermodynamiques avec des considérations de sécurité,

environnementales et économiques. Afin d'identifier les candidats les plus appropriés, les critères suivants doivent être pris en compte [2].

### ***III.2.2.1. Caractéristiques thermodynamiques :***

Les propriétés thermodynamiques sont d'une importance capitale dans le processus de conception des cycles organiques de Rankine, Concernant l'utilisation optimale de l'énergie et la réduction des pertes énergétiques. Voici quelques éléments importants Propriétés thermodynamiques des fluides de travail :

- Pour un dissipateur thermique et une source de chaleur donnés, la puissance de sortie nette, l'efficacité thermique et L'efficacité de la seconde loi doit être aussi élevée que possible .
- La pression de condensation doit être supérieure à la pression atmosphérique pour éviter les fuites Problèmes .
- Dans les cycles sous-critiques, la pression critique du fluide de travail doit être supérieure à la Pression dans l'évaporateur.
- Densité de vapeur.

Plus la densité est élevée, plus le volume spécifique et le débit volumétrique sont faibles. Faible Le débit volumétrique est souhaitable pour obtenir des composants plus petits et des machines plus compactes. Les fluides à faible densité ont un volume spécifique élevé et nécessitent des composants plus gros (chaleur Échangeurs et détenteur). Une taille de composant plus grande conduit à des unités plus chères et Des systèmes plus coûteux. De plus, un volume spécifique élevé augmente la perte de charge dans Les échangeurs de chaleur et nécessite un travail de pompe plus important.

- Ligne de vapeur de saturation

En ce qui concerne la ligne de vapeur de saturation, il existe trois types de fluides de travail qui sont secs, fluides de travail isentropiques et humides. L'utilisation d'un fluide humide peut entraîner la formation de gouttes à la fin du processus d'expansion. La goutte La formation peut entraîner de graves dommages dans les détenteurs des turbomachines. Pour éviter la chute Formation, la surchauffe est nécessaire mais nécessite un évaporateur plus gros et plus cher. Par En utilisant des fluides secs ou isentropiques, les problèmes liés à la formation de gouttes peuvent être Éliminé.

- Une grande variation d'enthalpie dans la turbine conduit à un travail net élevé.

- Un coefficient de chaleur convective plus élevé et une conductivité thermique élevée augmentent la chaleur Processus de transfert entre la source de chaleur, le dissipateur thermique et le fluide de travail.
- La capacité calorifique élevée (CP) du liquide conduit à une meilleure récupération d'énergie de la source de chaleur Et diminuer le débit massique du fluide de travail
- Le fluide de travail doit être thermiquement et chimiquement stable.[33]

**III.2.2.1.1. Critères de sélection initiale du fluide de travail, dans le cas d'un cycle sous-critique :**

➤ **Un cycle “wet” sous-critique**

$$\eta = \frac{l_{cycle}}{q_{in}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \quad (12)$$

Enthalpie contenue dans l'Eq. Mentionné précédemment peut être écrit en termes d'état de saturation liquide correspondant, et l'enthalpie de pré-expansion peut être écrite en termes de  $h_3$ :

$$h_1 = h_3 + c_p(T_1 - T_2) + h_{lv_1} \quad (13)$$

$$h_2 = h_3 + x_2 h_{lv_2} + \Delta h_{superheat} \quad (14)$$

La relation citée en haut est une formule générale décrivant l'état après détente dans une turbine. Dans le cas des fluides secs  $x_2 = 1$  alors que dans le cas des fluides humides  $Dh_{surchauffe} = 0$  en général, les deux derniers termes de l'équation (3) peuvent être combinés pour la productivité

$$h_2 = h_3 + \Delta H(T_2) \quad (15)$$

En substituant toutes ces informations dans (1), nous obtenons l'efficacité du cycle.

$$\eta = \frac{h_3 + c_p(T_1 - T_2) + h_{lv_1} - h_3 - \Delta H(T_2)}{h_3 + c_p(T_1 - T_2) + h_{lv_1} - h_3} = 1 - \frac{\Delta H(T_2)}{c_p(T_1 - T_2) + h_{lv_1}} \quad (16)$$

La différence de température entre les niveaux de condensation et d'évaporation peut être exprimée en termes d'efficacité du cycle de Carnot puis du cycle sous-critique

$$\eta = 1 - \frac{\frac{\Delta H(T_2)}{h_{lv}(T_1)}}{\frac{c_p T_1}{h_{lv}(T_1)} \eta_c + 1} = 1 - \frac{\frac{\Delta H(T_2)}{h_{lv}(T_1)}}{Ja(T_1) \eta_c + 1} \quad (17)$$

L'analyse de l'équation au-dessus de permet de conclure que le rendement global du cycle est fonction du rapport  $\Delta H(T_2) / h_{lv1}$  et du nombre de Jakob. Elle découle directement de l'Eq. (6) Nous devons considérer les rapports de  $\Delta H(T_2) / h_{lv1}$  et  $c_p / h_{lv1}$  lorsque nous voulons considérer une substance comme un fluide de travail. En d'autres termes c'est pour que non seulement le liquide soit caractérisé par une valeur élevée de la chaleur spécifique et une faible valeur de la chaleur latente de vaporisation, mais que le rapport de ces valeurs doive prendre des valeurs élevées pour valeurs spécifiques des températures des sources de chaleur supérieure et inférieure. Les auteurs conseillent généralement d'utiliser des valeurs moyennes de chaleur dans la plage de température souhaitée; Alternativement, la chaleur spécifique moyenne peut être obtenue comme un rapport de la différence entre l'enthalpie et la différence de température. Une analyse similaire peut être effectuée pour le fluide dans l'équation. (6) qui donne le rapport.  $\Delta H(T_2) / h_{lv1}$  prendre les plus petites valeurs possibles afin d'atteindre des valeurs élevées de rendement global .

### ➤ Cycle “dry” sous-critique

Des considérations similaires conduisent à la proposition d'un fluide de travail associé pour une centrale électrique combinée avec le fluide organique sec comme fluide de travail sans surchauffe. Avec un liquide sec et un échangeur de chaleur de régénération, une moindre demande de chaleur externe est obtenue dans l'évaporateur. Dans le cas d'un liquide sec, la régénération interne doit également être envisagée, Fig. 1. Toutes les modifications visant à améliorer leur efficacité ORC entraînent des zones d'échange de chaleur supplémentaires et de petites améliorations de l'efficacité effective.

Dans l'analyse du liquide sec, les hypothèses suivantes ont été faites:

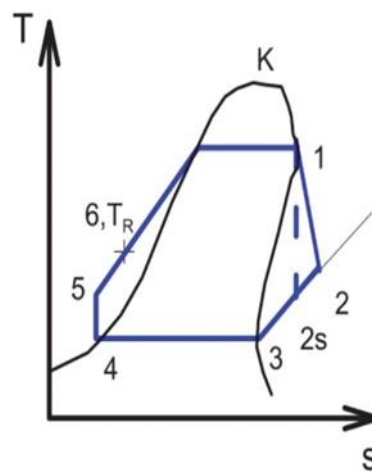
Le chauffage externe de la phase liquide du fluide de travail est effectué à partir de la température  $T_R$

La température  $T_R$  correspond à l'état 2, qui se trouve à l'interception de l'épisyntrope  $s_1$  et est égale à la pression correspondant à la pression du condensateur,  $p_{sat}(T_s)$

Les propriétés du fluide de travail sont constantes dans tout le cycle thermodynamique,

L'action de la pompe est négligée, la chute de pression dans le HE, et la détente ne s'inverse pas dans la turbine

On suppose que l'efficacité du régénérateur est de 100 %



**Figure III.1** ORC avec pente positive de la courbe de vapeur saturée, vapeur surchauffée

La principale différence dans la définition du rendement du cycle est qu'il s'oppose au cycle sans régénération : la chaleur fournie au cycle est égale à la différence d'enthalpie entre les états 6 et 1, plutôt que 5 et 1. Il en résulte :

$$\eta = \frac{w_T}{\dot{q}_k} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} = 1 - \frac{h_{lv}(T_s)}{c_p(T_p - T_R) + h_{lv}(T_p)} \quad (18)$$

L'efficacité du cycle dans l'équation ci-dessus peut maintenant être présentée sous la forme finale :

$$\eta = 1 - \frac{\frac{h_{lv}(T_s)}{T_s \bar{c}_{pv}}}{\frac{\bar{c}_{pl} T_p}{\bar{c}_{pv} T_s} - \frac{\bar{c}_{pl} \left(\frac{T_p}{T_s}\right)^{\frac{\bar{c}_{pl}}{\bar{c}_{pv}}}}{\exp(k)} + \frac{h_{lv}(T_p)}{T_s \bar{c}_{pv}}} \quad (19)$$

On peut maintenant se soumettre à équation ci-dessus (8) Nombres de Jakob spécifiés de manière appropriée, déterminés sur la base de la température d'évaporation du fluide de travail, de sa température de condensation et de l'efficacité de Carnot. Ainsi on obtient:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{Ja_l(T_s)}{\frac{\bar{c}_{pl}}{\bar{c}_{pv}} \left[ \frac{1}{1-\eta_c} - \frac{1}{(1-\eta_c)^{\frac{\bar{c}_{pl}}{\bar{c}_{pv}}} \exp(k)} \right] + Ja_l(T_p)}}} \quad (20)$$

Dans l'éq. Équation écrite ci-dessus ; les définitions du nombre de Jacob sont les suivantes :

$$Ja_l(T_s) = \frac{T_s \bar{c}_{pv}}{h_{lv}(T_s)} \quad Ja_l(T_p) = \frac{T_s \bar{c}_{pv}}{h_{lv}(T_p)} \quad (21)$$

L'analyse d'expression (9) ou son équivalent (10) permet l'analyse thermodynamique des cycles utilisant la régénération et la sélection du fluide de travail dans le but de l'implémenter dans un ORC. Les résultats obtenus avec l'étalon sont approximatifs, mais il peut être un outil très utile pour analyser initialement un grand nombre de liquides en vue de les pré-trier. La norme stipule que dans le cas des liquides dits secs, la récupération de chaleur régénérative n'est pas toujours possible. Dans un tel cas le papier des courbes de saturation est important ce qui s'exprime par le rapport de leurs nombres de Jacob respectifs sinus ( $T_p$ ) sur sinus ( $T_s$ ) La deuxième valeur est plus petite que la première et généralement le rapport prend des valeurs supérieures à l'unité. Plus ce rapport est proche de l'unité, meilleur est le rendement du cycle. La condition nécessaire à la régénération est que  $T_2 > T_5$  .. L'analyse thermodynamique a été appliquée aux liquides suivants : ammoniac, perfluorobutane C5F12, éthanol, heptane, isohexane, g-méthanol, R11, R113, R123, R141b, R227, R245ca, R245ea, R365mfc, SES36, toluène et eau.[34]

### III.2.2.2. Propriétés de transfert de chaleur

Les propriétés de transfert de chaleur représentent un paramètre critique dans le dimensionnement des échangeurs de chaleur et sont d'une importance primordiale. Une valeur CP élevée permet une absorption efficace de l'énergie thermique de la source de chaleur par le

fluide de travail. Ceci, à son tour, permet une meilleure approche du profil de température dans les échangeurs de chaleur et améliore l'efficacité globale. Le processus de transfert de chaleur est influencé par plusieurs facteurs, dont certains sont associés à l'architecture du cycle, tels que la conception de la tuyauterie, les débits (nombre de Reynolds) et la sélection des matériaux, tandis que d'autres sont liés aux propriétés du fluide de travail, qui affectent la capacité de transfert de chaleur. La conductivité thermique ( $k$ ), la chaleur spécifique ( $CP$ ) et la viscosité ( $\mu$ ) du fluide de travail sont trois propriétés fondamentales utilisées pour déterminer les nombres de Prandtl ( $Pr = \mu * CP / k$ ) qui sont largement utilisés dans la conception des échangeurs de chaleur. Il est souhaitable d'avoir un fluide de travail avec la viscosité la plus faible possible, ainsi que la chaleur spécifique et la conductivité thermique les plus élevées possibles [35].

### ***III.2.2.3. Critères environnementaux et de sécurité***

Les critères environnementaux et de sécurité sont d'une importance capitale dans la sélection des fluides de travail, mais de nombreux travaux sont progressivement supprimés ou en passe de l'être. Les fluides de travail éliminés ont un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone élevé ODP et un potentiel de réchauffement global GWP. Certains fluides de travail ont de bonnes propriétés thermodynamiques mais ont en même temps des effets indésirables sur l'environnement et la sécurité [36].

Selon le règlement CE 2037/2000, de nombreux fluides de travail tels que les réfrigérants CFC, HCFC et HCFC sont déjà éliminés. Ces réfrigérants sont interdits en raison de leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone ODP et de leur potentiel de réchauffement global GWP .

Le règlement CE 2037/2000 concerne les utilisateurs, les producteurs, les fournisseurs, les techniciens de maintenance et d'entretien et les personnes impliquées dans l'élimination de toutes les substances appauvrissant la couche d'ozone. Le nouveau règlement comprend les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les halons, le 1,1,1 trichloroéthane, le tétrachlorure de carbone et le bromochlorométhane (CBM). Ces fluides frigorigènes sont principalement utilisés dans la réfrigération, la climatisation, le soufflage de mousse, comme solvants et dans la lutte contre les incendies.

### **III.2.2.3.1. Données environnementales**

Les données environnementales incluent le potentiel de réchauffement global GWP et le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone ODP. Dans cette thèse, les données environnementales sont principalement issues de la physique, de la sécurité et Données environnementales par James M. Calm[37] .

#### **III.2.2.3.1.1. Potentiel de réchauffement planétaire (GWP)**

Le nombre de potentiel de réchauffement global (GWP) fait référence à la quantité de réchauffement climatique causé Par un certain fluide de travail par rapport au CO<sub>2</sub> pendant une période de 100 ans. Ou en d'autres termes, le GWP est Le rapport du réchauffement causé par une substance au réchauffement causé par une masse similaire de carbone Dioxyde. Ainsi, le GWP du CO<sub>2</sub> est défini comme étant de 1,0. L'eau a un GWP de 0. Le dioxyde de carbone est Utilisé comme référence car il a le plus grand impact net sur le réchauffement climatique. Il convient ici de mentionner que certaines valeurs de GWP comme (~20) ou (<20) reflètent l'incertitude dans Calculs et il n'y a pas de consensus scientifique à ce jour [37].

#### **III.2.2.3.1.2. Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)**

Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) fait référence à la capacité des réfrigérants et autres produits chimiques à détruire ozone stratosphérique par rapport à R11 [37]. L'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis définit l'ODP comme "le rapport du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone d'un produit chimique au potentiel d'une masse similaire de CFC-11". Les CFC et les HCFC ont des ODP allant de 0,01 à 1,0, tandis que les halons ont des ODP allant jusqu'à 10. Le tétrachlorure de carbone a un ODP de 1,2 et l'ODP du méthylchloroforme est de 0,11. En revanche, les HFC ne contiennent pas de chlore et ont donc un ODP nul [38]. La sélection des fluides de travail doit tenir compte de leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, et ceux dont l'ODP est très faible ou nul doit être préférés. Le protocole Monorail rend obligatoire l'élimination progressive des fluides de travail avec tout ODP [35].

### **III.2.2.3.2. Données de sécurité**

Les données de sécurité de cette thèse incluent le niveau d'inflammabilité inférieur LFL et la classification de sécurité de Fluides de travail et réfrigérants. Les données de sécurité sont principalement extraites de le physique, sécurité et Données environnementales par James M. Calm [37].

#### **III.2.2.3.2.1. Limite inférieure d'inflammabilité (LFL)**

La limite inférieure d'inflammabilité LFL est généralement mesurée en pourcentage de volume et se réfère à l'extrémité inférieure Concentration d'un solvant inflammable dans l'air ambiant lorsque le mélange peut s'enflammer dans un Température et pression. Il existe une variation des valeurs LIE entre les différents laboratoires et c'est Parce qu'ils utilisent des récipients ou des sources d'inflammation différents ou des normes d'évaluation différentes [37][39].

#### **III.2.2.3.2.2. Classement de sécurité**

Selon la norme ASHRAE 34 (ASHRAE, 2010a et 2010b), les lettres A font référence à « inférieur » toxicité tandis que la lettre B signifie une toxicité plus élevée. Les chiffres 1, 2 et 3 font référence à la propagation de la flamme, le numéro 1 signifie aucune propagation de la flamme, le numéro 2 signifie une faible inflammabilité et le numéro 3 signifie plus grande inflammabilité. Le raccourcissement "wwf" indique le pire cas de fraction d'inflammabilité ou pire cas de formulation, et cela signifie que le fluide de travail est inflammable en vapeur ou phase liquide. [1].

#### **III.2.2.4. Tendances chimiques :**

Selon le guide d'application AG 31-007 (2002) de McQuay International, ce qui suit les tendances se produisent avec l'utilisation de divers éléments. Les tendances sont : • L'augmentation du carbone augmente généralement le poids moléculaire et le point d'ébullition. • L'augmentation de l'azote rend généralement le composé plus réactif. Cela peut entraîner une toxicité et une instabilité questions. • L'augmentation de l'oxygène réduit généralement la stabilité atmosphérique, ce qui est bon pour le GWP et l'ODP, mais peut entraîner aux problèmes de toxicité, d'inflammabilité et de réactivité. • L'augmentation du soufre augmente généralement la toxicité et diminue la stabilité. • L'augmentation de l'hydrogène réduit généralement la durée de vie atmosphérique, ce qui est bon pour le GWP et l'ODP mais augmente inflammabilité. • L'augmentation du fluor attaché au carbone augmente le GWP. • L'augmentation du chlore améliore la miscibilité du lubrifiant mais augmente également l'ODP et la toxicité. • L'augmentation du brome augmente l'ODP mais réduit l'inflammabilité. • L'utilisation de bore au lieu de carbone crée des produits chimiques qui sont réactifs et généralement toxiques. • L'utilisation de silicium au lieu de carbone crée des

substances qui réagissent négativement avec l'eau et n'ont pas fonctionné bien thermodynamiquement. [40]

### **III.3. Conclusion :**

La sélection du fluide de travail approprié pour un système de cycle de Rankine organique nécessite une évaluation minutieuse de ses critères de protection humaine ainsi que de ses performances économiques et environnementales. Une approche globale qui prend en compte tous ces facteurs peut aboutir à une technologie ORC plus sûre, plus efficace et durable.

## *Partie simulation*

*Chapitre IV : Résultats et  
Discussion de la simulation*

## **IV. Résultats de la simulation et discussion**

### **IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, la sélection du cas est étudiée et le développement d'un code logiciel à l'aide du programme EES Nous avons travaillé sur la sélection d'un groupe de liquides, les améliorer et les simuler, et discuter les résultats obtenus.

### **IV.2. Étude de cas:**

#### **IV.2.1. Définition de la géothermie :**

L'énergie géothermique est l'énergie thermique qui est générée et stockée dans la Terre. Il est dérivé de la chaleur naturelle résultant de la désintégration de matières radioactives telles que l'uranium, le thorium et le potassium, ainsi que de la chaleur résiduelle de la formation de la Terre. L'énergie géothermique peut être exploitée et utilisée pour produire de l'électricité et assurer le chauffage et la climatisation des maisons et des bâtiments. L'énergie géothermique de la Terre existe sous la forme d'eau chaude et de vapeur emprisonnée dans des formations rocheuses sous la surface de la Terre. Cette eau chaude et cette vapeur sont accessibles par des centrales géothermiques, qui utilisent la vapeur pour faire fonctionner des turbines et produire de l'électricité. Alternativement, l'énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage et le refroidissement directs, grâce à l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques qui transfèrent la chaleur du sol aux bâtiments pour le chauffage en hiver et le refroidissement en été. L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable, car la chaleur de la Terre est constamment produite et renouvelée. C'est également une source d'énergie propre, car elle n'émet pas de gaz à effet de serre ou de polluants dans l'atmosphère pendant son fonctionnement. Cependant, le développement des ressources géothermiques peut avoir des impacts environnementaux, tels que le potentiel d'affaissement du sol, l'épuisement des eaux souterraines et la libération de fluides géothermiques contenant des métaux dissous et des éléments traces.[41]

#### **IV.2.2. Cas sélectionné :**

Jusqu'à présent, seules les ressources géothermiques à faible enthalpie ont été identifiées dans le pays, qui sont plus adaptées aux applications d'utilisation directe. En effet, plus de 282 sources chaudes du nord de l'Algérie ont été recensées par l'Agence nationale des ressources en eau (ANRH). Il est réparti sur 24 provinces avec une concentration plus élevée dans le nord-est du pays. Les températures de surface mesurées vont de 22 à 98 °C et les plus

nombreuses sont les sources thermales avec une température comprise entre 22 et 45 °C, suivies de celles dont la température est comprise entre 45 et 60 °C et enfin celles dont la température est supérieure à 60 °C . La température a été enregistrée à 66 degrés Celsius dans la région du nord-ouest (Hammam Bouhanifia), et 70 degrés Celsius dans la région du nord -

est (Hammam As-Salihin). Le tableau IV.1 présente les données physiques et chimiques de quelques sources chaudes de la partie nord.[41]

Pour cette étude, nous avons choisi Hammam al-Saliheen situé à Khenchela, en raison de sa température plus élevée

**Tableau IV.1:** Données physicochimiques de quelques sources chaudes du nord algérien [42].

| Source chaude   | Province   | Temp (C) | TDS (mg/l) | Débit (l/s) |
|-----------------|------------|----------|------------|-------------|
| Ouled Aich unit | Batna      | 35       | 7143       | 4           |
| Sillel          | Bejaia     | 46       | 2221       | 10          |
| Chegua          | Biskra     | 50       | 6210       | 20          |
| Boughrara       | Tlemcen    | 43       | 398        | 6.5         |
| Charef          | Djelfa     | 42       | 1670       | 38          |
| Sidi Aisa       | Saida      | 44.5     | 2502       | 5           |
| Touansa         | Medea      | 22       | 8970       | 5           |
| Delaa           | Msila      | 42       | 1980       | 25          |
| Bouhanifia      | Mascara    | 66       | 2012       | 23          |
| Sidi Trad       | El Tarf    | 63       | 542        | 1.8         |
| Sidi Slimane    | Tissemsilt | 42       | 2374       | 5           |
| Elssalhine      | Khenchela  | 70       | 2082       | 60          |
| Serghine        | Tiaret     | 40       | 4400       | 12          |
| Righa           | Ain Defla  | 68       | 2466       | 2.5         |
| Ksena           | Bouira     | 60       | 3520       | 50          |

### IV.3. Présentation du EES

EES (Engineering Equation Solver) est un outil logiciel de calcul spécialisé visant à résoudre des équations complexes rencontrées dans divers domaines de l'ingénierie, notamment la thermodynamique, la mécanique des fluides, la thermique, la mécanique, l'électricité et autres. Le logiciel est largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie pour l'analyse numérique, la simulation, la résolution de problèmes de conception et de performance et l'optimisation de systèmes.

EES est développé par F-Chart Software, une société spécialisée dans le développement d'outils logiciels de simulation et d'optimisation pour les applications d'ingénierie. Le logiciel offre aux ingénieurs une interface conviviale et intuitive qui facilite la création de modèles de systèmes complexes à l'aide d'équations mathématiques. EES offre des fonctionnalités de calcul avancées, notamment la résolution symbolique et numérique d'équations, la manipulation d'unités et la création de représentations graphiques telles que des tableaux et des graphiques. De plus, EES comprend des outils d'optimisation pour l'optimisation des paramètres de conception, qui peuvent aider à la conception et à l'optimisation des performances de systèmes complexes.

EES est un outil logiciel multilingue disponible en plusieurs langues, dont le français, et il comprend une vaste bibliothèque d'équations et de fonctions spécifiques à l'ingénierie. Cela en fait un outil très avantageux pour les Ingénieurs francophones qui cherchent à modéliser et à résoudre des problèmes d'ingénierie. L'EES est largement utilisé dans divers secteurs d'ingénierie tels que l'énergie, l'aérospatiale, l'automobile et l'ingénierie des procédés, entre autres.

EES fournit une suite complète de fonctionnalités de résolution d'équations qui permettent aux ingénieurs de résoudre efficacement des problèmes complexes. Ces fonctionnalités incluent la capacité de résoudre des équations algébriques et différentielles à la fois symboliquement et numériquement, de résoudre des systèmes d'équations, de manipuler des unités (supportant plus de 1500 unités différentes), de créer des fonctions définies par l'utilisateur et de visualiser les résultats graphiquement. Ces capacités dotent les ingénieurs d'un outil de calcul puissant pour analyser et résoudre des problèmes d'ingénierie complexes dans divers domaines.

EES propose une bibliothèque complète d'équations intégrées adaptées aux besoins spécifiques des ingénieurs. La bibliothèque englobe de nombreux domaines, y compris, mais sans s'y limiter, la thermodynamique, la mécanique des fluides, la thermique, la mécanique, l'électricité, la chimie et bien d'autres. Cette bibliothèque fournit aux ingénieurs une vaste gamme d'équations prédéfinies applicables à leur domaine d'étude spécifique, facilitant ainsi la modélisation et la résolution efficaces des problèmes d'ingénierie.

EES est équipé d'une interface graphique conviviale qui permet aux ingénieurs de modéliser facilement des systèmes complexes à l'aide d'équations mathématiques. L'interface propose divers outils pour créer, modifier et organiser des équations et des variables. De plus, il facilite la visualisation des résultats sous forme de tableaux et de graphiques, et offre une manière intuitive de gérer les unités. Cette interface conviviale rationalise le processus de modélisation, réduit le temps et les efforts nécessaires pour analyser et résoudre des problèmes d'ingénierie complexes et améliore l'efficacité du processus de conception technique.

EES est équipé de fonctionnalités d'optimisation qui permettent aux ingénieurs de trouver les valeurs optimales des variables de conception pour atteindre des objectifs spécifiques, tels que l'optimisation des performances du système, la réduction de la consommation d'énergie ou la satisfaction d'autres critères définis par l'utilisateur. Ces fonctionnalités offrent aux ingénieurs un outil puissant pour optimiser leurs conceptions et améliorer les performances de leurs systèmes. Grâce à l'utilisation d'algorithmes d'optimisation, les ingénieurs peuvent explorer efficacement l'espace de conception et identifier les paramètres de conception optimaux qui répondent à leurs objectifs de conception. Cette capacité d'EES peut améliorer considérablement la qualité des conceptions techniques et réduire le temps et les coûts de développement.[43]



Figure IV.1 Interface du logiciel EES

#### IV.4. Paramètres d'optimisation :

En ce qui concerne les paramètres d'optimisation, un code a été développé à l'aide du logiciel EES dans le but d'optimiser le cycle ORC, où deux paramètres différents sont supposés être optimisés : T1 et T2. La première valeur se réfère à la température d'évaporation, tandis que la deuxième valeur se réfère à la température de condensation. Cependant, leurs valeurs minimales et maximales ont été fixées en fonction de la température de la source de chaleur comme suit :

$$T_{1\_min} = 45 \text{ °C}, T_{1\_max} = 65 \text{ °C},$$

$$T_{2\_min} = 15 \text{ °C}, T_{2\_max} = 25 \text{ °C}.$$

Les autres valeurs comme l'efficacité globale de la pompe et de la turbine sont supposées être de 100% (travail idéal) ; leurs valeurs sont fixes comme mentionné principalement parce que l'objectif de ce travail est seulement d'évaluer l'importance de la bonne sélection des fluides de travail, et non pas de mener un scénario réel du cycle ORC. Les autres paramètres requis sont fixés comme suit :

$$m_{hot}=60 \text{ kg/s.}$$

$$T_{hot\_in}=70 \text{ °C.}$$

$$T_{hot\_out}=30 \text{ °C.}$$

$$p_{hot}=100 \text{ kPa.}$$

Le code développé dans le logiciel EES pour le calcul des différents points du cycle ORC peut être présenté comme suit :

$$T_{\text{hot,in}} = 70$$

$$T_{\text{hot,out}} = 30$$

$$p_{\text{hot}} = 100$$

$$h_{\text{in,hot}} = \mathbf{h}(\text{water}, T = T_{\text{hot,in}}, P = p_{\text{hot}})$$

$$h_{\text{out,hot}} = \mathbf{h}(\text{water}, T = T_{\text{hot,out}}, P = p_{\text{hot}})$$

$$\eta_{\text{turb}} = 1$$

$$\eta_{\text{pump}} = 1 \quad x1 = 1 \quad x3 = 0 \quad x3 = 0$$

$$\text{Power}_{\text{available}} = m_{\text{hot}} \cdot \left[ \frac{h_{\text{in,hot}} - h_{\text{out,hot}}}{1000} \right]$$

$$h1 = \mathbf{h}(\text{R1234yf}, T = T1, x = x1) \quad s1 = \mathbf{s}(\text{R1234yf}, T = T1, x = x1)$$

$$p1 = \mathbf{P}(\text{R1234yf}, T = T1, x = x1)$$

$$s2 = s1 \quad h2 = \mathbf{h}(\text{R1234yf}, s = s2, T = T2)$$

$$p2 = \mathbf{P}(\text{R1234yf}, s = s2, T = T2)$$

$$T3 = T2$$

$$h3 = \mathbf{h}(\text{R1234yf}, T = T2, x = x3)$$

$$s3 = \mathbf{s}(\text{R1234yf}, T = T2, x = x3)$$

$$p3 = \mathbf{P}(\text{R1234yf}, T = T2, x = x3)$$

$$s4 = s3$$

$$h4 = \mathbf{h}(\text{R1234yf}, P = p1, s = s4)$$

$$T4 = \mathbf{T}(\text{R1234yf}, P = p1, s = s4)$$

$$Q_E = m_{\text{cycle}} \cdot (h1 - h4)$$

$$m_{\text{cycle}} = m_{\text{hot}} \cdot \left[ \frac{h_{\text{in,hot}} - h_{\text{out,hot}}}{h1 - h4} \right]$$

$$Wp = m_{\text{cycle}} \cdot (h4 - h3)$$

$$Wt = m_{\text{cycle}} \cdot (h1 - h2)$$

$$\eta_{\text{cycle}} = \left[ \frac{Wt - Wp}{Qe} \right] \cdot 100$$

$$\text{Power}_{\text{cycle}} = Wt - Wp$$

### IV.5. Sélection des fluides de travail

Nous avons sélectionné des fluides selon les critères que nous avons évoqués précédemment dans d'autres chapitres, et sur la base de recherches publiées, nous avons sélectionné des fluides dont la température critique est supérieure à la température de la source utilisée pour produire de l'électricité, en plus des fluides qui assurent la protection de l'environnement comme leur GWP Ils sont tous inférieurs à 120, et en plus d'avoir un ODP presque nul, nous tenons également compte de la norme de sécurité selon ASHRAE34, dans laquelle la lettre A signifie toxicité "la plus faible". Les numéros 1, 2 et 3 indiquent la propagation de la flamme, le numéro 1 signifie aucune propagation de la flamme, le numéro 2 signifie une faible inflammabilité et le numéro 3 signifie une plus grande inflammabilité. Dans certains cas, le groupe 2 est désigné par la lettre L (comme A2L) et ici la lettre L signifie plus difficile à allumer. Le tableau ci-dessous représente le groupe de composés sélectionnés, en plus de certaines propriétés physiques telles que la température, la pression, l'ODP et le potentiel de réchauffement global pour chaque composé, en plus du niveau de sécurité.

**Tableau IV.2** Propriétés physiques, impacts environnementaux et données de sécurité des composés sélectionnés

| Fluide     | $T_c$ [°C] | $P_c$ [bar] | ODP | GWP | Sécurité |
|------------|------------|-------------|-----|-----|----------|
| Pentane    | 196.6      | 33.7        | 0   | 20  | A3       |
| Isopentane | 187.2      | 33.8        | 0   | 20  | A3       |

|            |       |      |        |     |     |
|------------|-------|------|--------|-----|-----|
| R1233zd(E) | 165.6 | 35.7 | 0.0003 | 1   | A1  |
| Butane     | 152.0 | 38.0 | 0      | 20  | A3  |
| Neopentane | 160.6 | 32.0 | 0      | 20  | A3  |
| Isobutane  | 134.7 | 36.3 | 0      | 3   | A3  |
| R152a      | 113.3 | 45.2 | 0      | 120 | A2  |
| R161       | 102.1 | 50.1 | 0      | 12  | A3  |
| R1234ze(E) | 109.4 | 36.3 | 0      | <1  | A2L |
| Propylene  | 91.1  | 45.6 | 0      | 20  | A3  |
| Propane    | 96.7  | 45.2 | 0      | 3   | A3  |
| R1234yf    | 94.7  | 33.8 | 0      | 6   | A2L |

## IV.6. Résultats et discussion

### IV.6.1. Résultats :

Après optimisation et simulation des composés sélectionnés, nous avons trouvé ce qui suit:

**Tableau IV.3** Résultats de l'optimisation des composés sélectionnés

| Fluid      | Powercycle<br>[kW] | Power<br>available<br>[MW] | Wt<br>[kW] | Wp<br>[kW] | P1<br>[kPa] | P2<br>[kPa] | P3<br>[kPa] | S1<br>[kJ/kg·K] | S2<br>[kJ/kg·K] | S3<br>[kJ/kg·K] | S4<br>[kJ/kg·K] | T1<br>[°C] | T2<br>[°C] | T3<br>[°C] | T4<br>[°C] |
|------------|--------------------|----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| Pentane    | 1701               | 10.04                      | 1708       | 7.049      | 247.2       | 26.81       | 47.23       | 1.281           | 1.281           | -0.08285        | -0.08285        | 65         | 15.17      | 15.17      | 15.23      |
| Isopentane | 1736               | 10.04                      | 1745       | 9.338      | 312.2       | 35.63       | 63.52       | -0.4727         | -0.4727         | -1.766          | -1.766          | 65         | 15         | 15         | 15.08      |
| R1233zd(E) | 1457               | 10.04                      | 1469       | 12.1       | 448         | 72.34       | 89.56       | 1.765           | 1.765           | 1.066           | 1.066           | 65         | 15.11      | 15.11      | 15.23      |
| Butane     | 1534               | 10.04                      | 1555       | 21.25      | 721         | 134.3       | 176.5       | 2.456           | 2.456           | 1.126           | 1.126           | 65         | 15.02      | 15.02      | 15.32      |
| Neopentane | 1864               | 10.04                      | 1882       | 17.37      | 521         | 60.39       | 123         | 1.213           | 1.213           | 0.04318         | 0.04318         | 65         | 15.01      | 15.01      | 15.18      |
| Isobutane  | 1519               | 10.04                      | 1551       | 31.53      | 972.9       | 199.3       | 258.8       | 2.349           | 2.349           | 1.125           | 1.125           | 65         | 15.01      | 15.01      | 15.35      |
| R152a      | 1282               | 10.04                      | 1326       | 43.17      | 1687        | 439.7       | 439.7       | 2.042           | 2.042           | 1.092           | 1.092           | 65         | 15.03      | 15.03      | 15.62      |
| R161       | 1274               | 10.04                      | 1337       | 63.19      | 2414        | 695.8       | 695.8       | 2.244           | 2.244           | 1.116           | 1.116           | 65         | 15         | 15         | 15.89      |
| R1234ze(E) | 1324               | 10.04                      | 1369       | 44.54      | 1436        | 334         | 366.2       | 1.685           | 1.685           | 1.072           | 1.072           | 65         | 15.02      | 15.02      | 15.52      |
| Propylene  | 1243               | 10.04                      | 1341       | 97.96      | 2800        | 894.3       | 894.3       | -0.6463         | -0.6463         | -1.782          | -1.782          | 65         | 15.02      | 15.02      | 16.33      |
| Propane    | 1239               | 10.04                      | 1321       | 81.93      | 234.3       | 735.1       | 735.1       | 2.316           | 2.316           | 1.137           | 1.137           | 65         | 15.17      | 15.17      | 16.2       |
| R1234yf    | 1283               | 10.04                      | 1350       | 66.67      | 1835        | 476         | 510.9       | 1.608           | 1.608           | 1.07            | 1.07            | 65         | 15.04      | 15.04      | 15.78      |

L'optimisation de l'anneau au Pentane a montré que la puissance maximale pouvant être produite est de 1701kw à une valeur de température de 196,1°C et une pression de 33,7 bar, D'autre part, la même optimisation a été apportée en utilisant L'Isopentane, où les résultats obtenus indiquent que la quantité maximale d'énergie est de 1736kw à deux températures et pressions de 187,2°C et 33,8bar, Revenant aux fluides R1234ze(E) et R1233zd(E), l'optimisation de l'anneau en les utilisant a montré des résultats acceptables. Comme l'optimisation en utilisant le premier liquide a été effectuée à une température de 109,4°C et une pression de 36,9bar Quant au deuxième liquide, il a été fait à une température de 165,6°C et une pression de 35,7 bar, donc la quantité d'énergie produite était de 1324 kw et 1457 kw, respectivement. Cette optimisation en utilisant du Butane à une température de 152,0°C et une pression de 38,0 bar a montré que la puissance maximale pouvant être produite est de 1534 kw, De la même manière, nous avons effectué une optimisation de l'anneau à l'aide de Neopentane, et il a montré que l'énergie générée était de 1864 kw à une température de 160,6°C et une pression de 32,0 bar, nous avons également utilisé R152a et R161 pour améliorer la boucle, où la quantité maximale d'énergie produite était de 1282kw et 1274kw à des températures de 113,3°C et 102,1°C et des pressions de 45,2bar et 50,1bar chacune respectivement. Et nous constatons que l'optimisation de l'anneau en utilisant du Propylène à deux températures de 91,1°C et une pression de 45,6 bar indique que la puissance maximale pouvant être produite est de 1243 kw. La même optimisation a été faite sur le Propane, où les résultats obtenus indiquent que la puissance maximale est de 1239kw à une température de 96,7°C et une pression de 42,2bar, Quant à l'optimisation de l'anneau en utilisant du R1234yf à une température de 94,7°C et une pression de 38,8 bar, elle a montré que la quantité maximale d'énergie pouvant être produite est de 1238 kW.

D'après la discussion précédente, nous constatons que le meilleur liquide parmi les composés en termes de la quantité d'énergie produite est le néopentane avec 1864kw

**Tableau IV.4.** Classement des fluides

| Classement | Fluides    | Power cycle | ODP | GWP |
|------------|------------|-------------|-----|-----|
| 1          | Neopentane | 1864 [kW]   | 0   | 20  |
| 2          | Isopentane | 1736 [kW]   | 0   | 20  |
| 3          | Pentane    | 1701 [kW]   | 0   | 3   |
| 4          | Butane     | 1534 [kW]   | 0   | 20  |
| 5          | Isobutane  | 1534 [kW]   | 0   | 3   |

|    |             |           |        |     |
|----|-------------|-----------|--------|-----|
| 6  | R1233zd (E) | 1457 [kW] | 0.0003 | 1   |
| 7  | R1234ze (E) | 1324 [kW] | 0      | <1  |
| 8  | R1234yf     | 1283 [kW] | 0      | 6   |
| 9  | R152a       | 1282 [kW] | 0      | 120 |
| 10 | R161        | 1274 [kW] | 0      | 12  |
| 11 | Propylene   | 1243 [kW] | 0      | 20  |
| 12 | Propane     | 1239 [kW] | 0      | 3   |

De plus, il est clair que la sélection des fluides les plus appropriés fait référence à différents critères tels que le Potentiel de Réchauffement Global (GWP), le Potentiel de Destruction de l'Ozone (ODP), la stabilité, la conductivité thermique, etc. Ces éléments sont des points clés qui orientent le choix du candidat le plus adapté pour le cycle de Rankine Organique (ORC) dans une application particulière, comme dans notre cas où la source était l'énergie géothermique.

Lors du processus de sélection, il est essentiel de prendre en compte l'impact environnemental du fluide. Le GWP et le ODP sont des indicateurs utilisés pour évaluer la contribution potentielle au changement climatique et à la destruction de la couche d'ozone, respectivement. L'objectif est de choisir un fluide avec des impacts minimes ou négligeables dans ces domaines, afin d'assurer un fonctionnement durable et respectueux de l'environnement.

La stabilité est un autre critère essentiel, car elle garantit les performances à long terme et la fiabilité du fluide au sein du système ORC. Un fluide stable réduit les risques de dégradation, de corrosion et d'autres réactions indésirables, ce qui prolonge la durée de vie de l'équipement et réduit les besoins en maintenance.

La conductivité thermique est également un élément important à prendre en compte, car elle affecte l'efficacité du transfert de chaleur au sein du système ORC. Un fluide présentant une conductivité thermique élevée permet un meilleur échange de chaleur, ce qui se traduit par une conversion d'énergie améliorée et des performances globales du système accrues.

## IV.7. Conclusion

Nous avons pu constater que le Neopentane se révèle être, dans une certaine mesure, le fluide de cycle le plus performant pour obtenir une quantité d'énergie élevée. Les résultats de

nos recherches indiquent que le Neopentane présente des caractéristiques uniques qui en font un excellent choix pour maximiser l'efficacité de récupération de chaleur.

Le Neopentane possède des propriétés thermodynamiques favorables, telles qu'une faible viscosité et une grande capacité de transfert de chaleur.  $GWP = 20$  et  $ODP = 0$ , Ces caractéristiques permettent au fluide de cycle de circuler de manière plus efficace dans le système avec un impact très faible a l'environnement.

En outre, le Neopentane présente également des avantages en termes de stabilité chimique et de durabilité, ce qui en fait un choix fiable et durable pour une utilisation à long terme dans les systèmes de récupération de chaleur.

# ***Conclusion Général***

Choisir le fluide de travail optimal pour le cycle de Rankine organique n'est pas un processus facile. Il existe de nombreux fluides de travail différents parmi lesquels choisir et plusieurs critères doivent être pris en compte. Certains fluides de travail ont de bonnes propriétés thermodynamiques mais en même temps ils ont des données environnementales et de sécurité indésirables. D'autres fluides ont de bons profils environnementaux et de sécurité mais sont thermodynamiquement inefficaces. Il n'y a pas de fluide de travail parfait qui puisse atteindre toutes les normes requises et le processus de sélection du fluide est un compromis entre les propriétés thermodynamiques, environnementales et de sécurité. D'un point de vue thermodynamique, la sélection du fluide de travail optimal dépend principalement des températures de la source de chaleur et du dissipateur thermique. Pour chaque température de source de chaleur et de dissipateur de chaleur, il existe un certain nombre de candidats au bon fonctionnement. Les fluides de travail sélectionnés doivent avoir de bonnes propriétés thermodynamiques telles qu'une efficacité thermique élevée, une efficacité de deuxième loi et un travail net. Le débit volumétrique et la viscosité du fluide de travail doivent être aussi bas que possible pour réduire le volume des composants, la perte de pression et le travail de pompage. Conductivité thermique Le fluide de travail est un autre aspect important qui doit être pris en compte dans le processus de sélection du fluide de travail. En ce qui concerne les normes environnementales et de sécurité, le fluide de travail sélectionné doit avoir zéro ozone

Dans ce travail, plusieurs fluides ont été sélectionnés et choisis en fonction de critères préalablement expliqués. Par la suite, un outil a été développé dans le logiciel EES pour évaluer et optimiser le cycle ORC, ainsi que pour sélectionner le fluide le plus approprié parmi les choix effectués. Les résultats ont révélé des perspectives prometteuses en termes de production d'énergie et de protection de l'environnement. Toutefois, une évaluation économique supplémentaire est nécessaire pour valider et généraliser ces résultats.

Cependant, la sélection des candidats appropriés constitue la première étape cruciale pour obtenir les meilleurs résultats du cycle de Rankine Organique (ORC). Cette étape revêt une importance majeure car elle constitue la clé pour obtenir les meilleurs résultats.

# Références bibliographiques

[1]- Nouman, Jamal. "Études et analyses comparatives des fluides de travail pour les cycles organiques de Rankine-ORC." (2012).

[2]- Naitali, Azzeddine, and Tarek Medaoud. *Analyse du cycle de vie d'un système hybride biomasse-solaire pour la production de biocarburants*. Diss. 2020.

[3]- Thurairaja, Kankeyan, et al. "Working fluid selection and performance evaluation of ORC." *Energy Procedia* 156 (2019): 244-248.

[4]-S. Douvartzides et I. Karmalis, "Sélection du fluide de travail pour la récupération de la chaleur d'échappement du cycle organique de Rankine (ORC) d'une centrale électrique à moteur à combustion interne", IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 161, non. 1, 2016, doi : 10.1088/1757-899X/161/1/012087.

[5]- Jérôme Frutiger, Stefano Cignitti, Jens Abildskov, John M. Woodley, Gürkan Sin. Process and Systems Engineering Center (PROSYS), Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark (DTU), Søtofts Plads, Building 229, DK-2800 Kongens Lyngby, Danemark Reçu le 25 janvier 2018, révisé le 16 juillet 2018, accepté le 14 août 2018, disponible en ligne le 19 août 2018, version du dossier le 15 avril 2019

[6]- Ngoc Anh Lai 1, Martin Wendland, Johann Fischer. Institut de technologie des procédés et de l'énergie, Université des ressources naturelles et des sciences de la vie, Muthgasse 107, A-1190 Vienne, Autriche. Reçu le 28 mars 2010, révisé le 15 octobre 2010, accepté le 25 octobre 2010, disponible en ligne le 7 décembre 2010

[7]- Ozone Layer Protection | US EPA. (n.d.). Retrieved April 31, 2023, from <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection>

[8]- Landelle, Arnaud. Étude expérimentale et numérique des cycles de Rankine organiques transcritiques pour la conversion de la chaleur à faible teneur en électricité à partir de diverses sources. Insulter. Université de Lyon, 2017.

[9]- Geothermal Power - Clean Energy Ideas. (n.d.). Retrieved May 31, 2023, from <https://www.clean-energy-ideas.com/geothermal/geothermal-power/>

[10]- Forest Research. (n.d.). Retrieved April 31, 2023, from <https://www.forestresearch.gov.uk/>

[11]- Gang Pei, Jing Li, Yunzhu Li Dongyue Wang, Jie Ji Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Jinzhai Road 96#, Hefei City , province d'Anhui, République populaire de Chine. Reçu le 15 Octobre 2010, révisé le 24 février 2011, accepté le 3 mars 2011, disponible en Ligne le 3 avril 2011

[12]-UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE MECANIQUE Projet de Fin d'études Pour l'obtention de diplôme de Master en Génie Mécanique Spécialité : Energétique Détermination des performances d'un cycle organique de Rankine Relié à un concentrateur solaire parabolique et à un concentrateur à miroir de Fresnel Proposé et encadré par : Pr . Boussad Boumeddane Etudié par : Djeldjellani Billel Guebli Nedjmeddine Fékkrache Abdelbasset Année Universitaire 2020/2021

[13]- Wei, Donghong et al. "Analyse des performances et optimisation du cycle de Rankine organique (ORC) pour la récupération de la chaleur perdue." *Conversion et gestion de l'énergie* 48.4 (2007): 1113-1119.

[14]-Habibzadeh, A., & Rashidi, M. M. Analyse thermodynamique de différents fluides de travail utilisés dans le cycle de Rankine organique pour récupérer la chaleur résiduelle du GT-MHR. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11 (1), 2016, 121–135

[15]- Liu, Bo-Tau, Kuo-Hsiang Chien et Chi-Chuan Wang. "Effet des fluides de travail sur le cycle organique de Rankine pour la récupération de la chaleur perdue." *Énergie* 29.8 (2004): 1207-1217.

[16]- Sauret, Emilie, et Andrew S. Rowlands. "Turbines à flux radial candidats et fluides de travail à haute densité pour les systèmes d'énergie géothermique." *Énergie* 36.7 (2011): 4460-4467.

[17]- Rayegan, R., et Y.X. Tao. "Une procédure pour sélectionner les fluides de travail pour les cycles solaires organiques de Rankine (ORC)." *Énergies renouvelables* 36.2 (2011) : 659-670.

[18]- Bruggemann, D. "Sélection de fluides pour le cycle organique de Rankine (ORC) dans les centrales électriques et thermiques à biomasse." *Appl. Thermie. Eng* 27 (2007): 223-228.

[19]- Vélez, Fredy. "Sélection de fluides de travail dans un cycle de Rankine organique pour la production d'électricité à partir de sources de chaleur à basse température." *Dyna* 81.188 (2014): 173-180.

[20]- Mikielwicz, Dariusz et Jarosław Mikielwicz. "Critères de sélection du fluide de travail dans l'ORC à basse température." *Génie chimique et des procédés* 37.3 (2016).

[21]- Chitsaz, Ata, S. Mohammad S. Mahmoudi et Marc A. Rosen. "Analyses des émissions de gaz à effet de serre et de l'exergie d'un système de trigénération intégré piloté par une pile à combustible à oxyde solide." *Génie Thermique Appliqué* 86 (2015): 81-90.

[22]-V. Maizza et A. Maizza, "Fluides de travail non conventionnels dans les cycles de Rankine organiques pour les systèmes de récupération d'énergie des déchets", *Appl. Thermie. Eng.*, vol. 21, non. 3, pages 381 à 390, 2001, doi : 10.1016/S1359-4311(00)00044-2.

[23]- Marcucilli, Frédéric et Samuel Zouaghi. "Turbines radiales à flux entrant pour les cycles de Kalina et de Rankine organique." *système* 2.1 (2007).

[24]- Javanshir, Alireza, Nenad Sarunac et Zahra Razzaghpahan. "Analyse thermodynamique de l'ORC et son application pour la récupération de la chaleur perdue." *Durabilité* 9.11 (2017): 1974.

[25]-M. J. Lee, D. L. Tien et C. T. Shao, "Capacité thermophysique des fluides de travail sans danger pour la couche d'ozone pour un système de cycle de Rankine organique", *Heat Recover. Syst. CHP*, vol. 13, non. 5, pages 409 à 418, 1993, doi : 10.1016/0890-4332(93)90042-T.

[26]- Delgado-Torres, Agustín M., et Lourdes García-Rodríguez. "Cycle de Rankine organique à double cascade pour le dessalement par osmose inverse à énergie solaire." *Dessalement* 216.1-3 (2007): 306-313.

[27]- Chys, Michael, et al. "Potentiel des mélanges zéotropiques en tant que fluides de travail dans les cycles organiques de Rankine." *Énergie* 44.1 (2012): 623-632.

[28]-J. Vivian, T. Morosuk, G. Manente et A. Lazzaretto, "Critères thermodynamiques pour sélectionner le fluide de travail et la configuration des cycles organiques de Rankine pour les sources de chaleur à basse et moyenne température", *Proc. 27e Int. Conf. Efficace. Coût, Optim. Simul. Environ. Système d'énergie d'impact. ECO 2014*, 2014.

[29]-D. U. Froid, « Classification des fluides frigorigènes », *Int. Inst. Réfrig.*, non. Cl, p. 1–6, 2001.

[30]- Wang, Xingchao et al. "Sélection du fluide de travail pour la production d'énergie organique à cycle de Rankine utilisant du CO<sub>2</sub> supercritique produit à chaud à partir d'un réservoir géothermique." *Génie Thermique Appliqué* 149 (2019): 1287-1304.

[31]-Bahadormanesh N, Rahat S, Yarali M. Optimisation multi-objectifs contrainte des expenseurs radiaux dans les cycles organiques de Rankine par l'algorithme Firefly. Conversion et gestion de l'énergie 2017 ;148:1179–93. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.070>

[32]- Tchanche, Bertrand Fankam, et al. "Sélection de fluide pour un cycle de Rankine organique solaire à basse température." Génie Thermique Appliqué 29.11-12 (2009): 2468-2476.

[33]-Jamal Nouman, Études et analyses comparatives de Fluides de travail pour Organic Rankine Cycles – ORC.

[34]-CRITÈRES DE SÉLECTION DU FLUIDE DE TRAVAIL EN ORC BASSE TEMPÉRATURE Dariusz Mikielwicz<sup>1\*</sup>, Jaroslaw Mikielwicz<sup>2</sup> 1 Université de technologie de Gdansk, Faculté de génie mécanique, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Pologne 2Institut Szewalski des machines à écoulement de fluide PAS, Fiszera 14, 80-231 Gdansk

[35]- Daikin Applied | Commercial HVAC | Solutions for Indoor Air Quality. (n.d.). Retrieved May 11, 2023, from <https://www.daikinapplied.com/>

[36]-Par Lundqvist, Fluides de travail pour le cycle organique de Rankine.

[37]-J.M. Calm, G.C. Hourahan (2011). Données physiques, de sécurité et environnementales pour les Réfrigérants alternatifs, ICR 2011, du 21 au 26 août – Prague, République tchèque .

[38]- KCORC.org . (n.d.). Retrieved May 11, 2023, from <https://www.kcorc.org/en/>

[39]- Ozone Layer Protection | US EPA. (n.d.). Retrieved May 31, 2023, from <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection>.

[40]-J., David D. Didion ,À la conférence sur la réfrigération ASHRAE/NIST, 6-7 octobre 1997 Atlanta, Ga3.

[41]-Utilisation de l'énergie géothermique en Algérie : Un état des lieux actuel par rapport au monde, les opportunités d'utilisation et contre-mesures

[42]-(Bahri and Saibi, 2011 ; Ouali et al., 2018).

[43]- EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software : Engineering Software.  
(n.d.). Retrieved May 20, 2023, from <https://fchartsoftware.com/ees/>

## الملخص:

تقدم هذه الدراسة تعريف لدورة رانكين العضوية ORC وإستعمالاتها بالإضافة إلى الديناميكا الحرارية للدورة وإختيار سوائل العمل المثلى لها حيث يعد إختيار مائع العمل أهمية رئيسية لكفاءة الدورة وصافي العمل مع التركيز على الجوانب الحرارية والفيزيائية والبيئة والسلامة في هذا العمل تم تصنيف سوائل العمل بناء على نوعها و جوانب مختلفة مثل الخصائص الديناميكية ومستوى الأمان والسلامة لمائع العمل و دراسة مدى تأثيرها على عمل دورة رانكين العضوية. كما قمنا بدراسة أهم المعايير الواجب اتباعها لإختيار سائل العمل الأمثل حيث أن تحديد مائع العمل الأمثل ليس بالأمر السهل هناك العديد من المعايير المختلفة للتعامل معها و تتعلق هذه المعايير بشكل اساسي بسوائل العمل؛ خصائص الديناميكا الحرارية ونقل الحرارة من جانب والسلامة والجوانب البيئية من جانب اخر. تم إختيار مجموعة من المركبات بناء على المعايير المدروسة سابقا من ثم إجراء تحسين ومحاكاة للمركبات المقترحة بواسطة EES والمقارنة بينها وترتيبها بحسب كمية الطاقة المنتجة .

## الكلمات المفتاحية

دورة رانكيل العضوية - موانع العمل - جاف - متساوي - رطب - معايير - قدرة استنفاد طبقة الأوزون - قدرة الاحترار العالمي - حل المعادلات الهندسية - تحسين.

## Résumé :

Cette étude présente une définition du cycle organique de Rankine (ORC) et de ses utilisations, en plus de la thermodynamique du cycle et de la sélection du fluide de travail optimal pour ce cycle. Divers aspects tels que les propriétés dynamiques et le niveau de sécurité et la sécurité du fluide de travail et l'étude de leur impact sur le fonctionnement du cycle organique de Rankine. Nous avons également étudié les critères les plus importants à suivre pour choisir le fluide de travail optimal, car déterminer le fluide de travail optimal n'est pas une mince affaire. Il existe de nombreux critères différents à traiter, et ces critères sont principalement liés aux fluides de travail ; Propriétés thermodynamiques et transfert de chaleur d'une part et aspects sécuritaires et environnementaux d'autre part. Un groupe de composés a été sélectionné sur la base des critères précédemment étudiés, puis une amélioration et une simulation des composés proposés par EES ont été réalisées, comparées et classées en fonction de la quantité d'énergie produite.

## Mots clés :

Cycle organique de Rankine – fluides de travail – dry – Isentropic – wet – Critères – ODP – GWP – EES – Optimisation.