REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

---

## Analyse et optimisation exergo-environnmentale d'un cycle organique de Rankine solaire (ORC) avec les fluides mélangés

---


Présenté par

**BENCHENEB Yasmine**

**MENACER Anfel**

Proposé et Dirigé par

**FERGANI Zineb**


**Promotion 2024**

# Remerciement

Nous Souhaitons exprimer notre gratitude à notre seigneur, ALLAH, qui est la source de toute connaissance et qui nous a donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous sommes également profondément reconnaissants envers notre superviseur, le Dr. Fergani Zineb, pour son soutien, sa disponibilité, son écoute et ses conseils tout au long de ce projet.

Nous aimerions également remercie les membres du jury, pour leur honneur et leur plaisir d'accepter et d'évaluer notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

# *Dédicace*

*Je dédie cet humble travail à :*

- *A Mes chers parents : Mon père* ***Nacer*** *et ma mère* ***Amina .***

*Aucune dédicace, aussi expressive qu'elle soit, ne saurait exprimer mon amour éternel, mon respect, ma considération et ma reconnaissance. Vous avez su m'entourer d'attention, m'inculquer les valeurs nobles de la vie, m'apprendre le sens du travail, l'honnêteté et la responsabilité. MERCI pour votre grand soutien tout au long de mes études et d'avoir été toujours là pour moi. CE TRAVAIL EST VOTRE ŒUVRE ! Puisse DIEU miséricordieux vous protéger du mal, vous procurer une longue vie, santé et bonheur afin que je puisse vous rendre un minimum de ce que je vous dois. Je vous aime fort !*

- *A Mes chers frères* ***Aymen*** *Et* ***Mohamed Zineddine*** *et ma sœur* ***Nesrine*** *et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

- *Mon cher mari* ***Aymen*** *pour son soutien et la confiance qu'il m'a accordé.*

- *A la famille de mon mari, Merci pour vos encouragements et vos prières pour ma réussite.*

- *A Ma Famille, Mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

- *A tous mes amis* ***Latifa, Loubna, Fatiha, Soumia*** *et* ***Rania*** *qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

- *Sans oublier mon binôme* ***Anfel*** *pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

- *A tous ceux que j'aime. Merci !*

***Yasmine***

*Je dédie Ce travail*

*À Allah tout puissant, qui m'a inspiré, qui m'a guidé dans le bon chemin, je vous dois ce que je suis.*

*Ce mémoire est dédié à* ***ma mère****, lumière de mes jours, source de mes efforts, flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, pour son amour, sacrifices. Merci Maman, vous êtes tout simplement parfaite.*

*Je Dédie aussi ce travail à mon Example éternel, mon soutien moral, qui dieu vous garde et vous bénisse, à vous,* ***mon père*** *! Merci mon père, pour tout l'amour, l'éducation et le soutien que vous m'avez apporté.*

*A Mes belles sœurs* ***Manel, Hadil, Abir****, en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour le dévouement et les sacrifices dont vous avez toujours fait preuve à mon égard.*

*A tout Ceux qui m'aiment.*

*A* ***Yasmine****, mon précieux ami bien avant d'être mon binôme, pour sa compréhension et sa bienveillance.*

***Anfel***

## Résumé

Cette étude vise à optimiser un cycle organique de Rankine (ORC) en utilisant des mélanges zéotropes comme fluides de travail pour valoriser les rejets thermiques industriels et l'énergie solaire. Un modèle MATLAB a été développé pour analyser et optimiser le système en prenant en compte des paramètres tels que la pression, la température et le point de pincement. L'objectif est d'améliorer les performances exergetiques et environnementales en trouvant un compromis optimal entre efficacité et impact environnemental grâce à une approche d'optimisation multi-objectif. Nos résultats indiquent que l'impact environnemental du mélange benzène-toluène est nettement amélioré, avec un impact mesuré à 318,6 m Pts/GJ, démontrant ainsi une alternative écologique par rapport aux fluides purs.


**Mots-clés :** Cycle organique de Rankine, Mélanges zéotropes, Optimisation multi-objectif, Analyse exergo-environnmentale.



## Abstract

This study aims to optimize an Organic Rankine Cycle (ORC) using zeotropic mixtures as working fluids to utilize industrial waste heat and solar energy. A MATLAB model was developed to analyze and optimize the system, considering parameters such as pressure, temperature, and pinch point. The objective is to enhance exergetic and environmental performance by finding an optimal compromise between efficiency and environmental impact through a multi-objective optimization approach. Our results indicate that the environmental impact of the benzene-toluene mixture is significantly improved, with a measured impact of 318.6 mPts/GJ, thus demonstrating an eco-friendly alternative to pure fluids.


**Keywords:** Organic Rankine Cycle, Zeotropic mixtures, Multi-objective optimization, Exergoenvironmental analysis.



## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين دورة رانكين العضوية باستخدام خلائط زيوتروبية كسوائل عمل لاستغلال الحرارة الناتجة عن النفايات الصناعية والطاقة الشمسية. تم تطوير نموذج MATLAB لتحليل وتحسين النظام، مع مراعاة معلمات مثل الضغط ودرجة الحرارة. الهدف هو تعزيز الأداء الحركي والبيئي من خلال العثور على توازن مثالي بين الكفاءة والتأثير البيئي من خلال نهج التحسين متعدد الأهداف. تشير نتائجنا إلى أن التأثير البيئي لخليط البنزين والتولوين قد تحسن بشكل كبير، بتأثير قدره 318.6 ملييوينت/جيجاجول، مما يدل على بديل صديق للبيئة بالمقارنة مع السوائل النقية.


**كلمات مفتاحية**: دورة رانكين العضوية، خلائط زيوتروبية، تحسين متعدد الأهداف، تحليل اكسارجي بيئي.

# Sommaire

**Remerciements** ……...

**Dédicace**……...

**Résumé**……...

**Liste des figures**……...

**Liste des tableaux**……

**Liste des symboles et des abréviations**……...

Introduction Générale…… **01**

**Chapitre I : Cycle Organique de Rankine (ORC)**…… **03**

I.1.Introduction……... **03**

I.2.Cycle de Carnot…… **03**

I.3.Cycle de Rankine……..... **05**

I.3.1. Cycle de Hirn ……... **06**

I.4.Cycles Organiques de Rankine (ORC)……..... **07**

I.4.1. Principe de fonctionnement……... **08**

I.4.2. Configuration du Cycle ORC…… **09**

I.4.2.1. Cycle organique de Rankine sous-critique……..... **09**

I.4.2.2. Cycle organique de Rankine trans-critique et supercritique……..... **10**

I.4.3. Applications des cycles (ORC)……..... **11**

I.4.3.1. La biomasse…… **11**

I.4.3.2. L'énergie Solaire…… **12**

I.4.3.3. L'énergie géothermique……. **14**

I.4.3.4. Valorisation des rejets thermique industriels……..... **15**

I.5. Cycles organiques de Rankine Hybrides……..... **16**

I.6. Conclusion……... **17**

**Chapitre II : Les fluides de travail dans les cycles organiques de Rankine**…… **18**

II.1. Introduction……. **18**

II.2. Le choix des fluides organiques……..... **18**

II.2.1. Fluide caloporteur…… **18**

II.2.2. Fluides organiques……... **18**

II.3. Fluides de travail purs……..... **20**

II.3.1. Les hydrocarbures…… **20**

II.3.2. Les perfluorocarbures……..... **20**

II.3.3. Siloxanes (MM, MM/MDM/MD2M) ……. **20**

II.3.4. Les hydrocarbures de chaines droite…… **21**

II.3.5. Ethers et éthers fluorés……..... **21**

II.3.6. Les alcools……... **21**

II.3.7. Les fluides inorganiques……..... **21**

II.4. Fluides de travail mélangés……..... **21**

II.4.1. Les mélanges azéotropique……..... **22**

II.4.2. Les mélanges zéotropique…… **23**

II.4.3. La différence entre les mélanges azéotropique et zéotropique…… **23**

II.5. Critères de sélection du fluide de travail organique……... **24**

II.5.1. Fluide de travail idéal……..... **24**

II.5.2. Critères de sélection de fluide……..... **25**

II.5.2.1. Caractéristiques thermodynamiques……. **25**

II.5.2.2. Propriétés de transfert de chaleur……..... **26**

II.5.2.3. Critères environnementaux de sécurité……..... **26**

II.5.2.4. Tendances chimiques dans les fluides de travail……..... **27**

II.6. Etudes antérieures sur les fluides de travail mélanges…… **28**

II.7. Conclusion……..... **28**

**Chapitre III : Analyse Exergo-environnmentale des systèmes énergétiques**….. **29**

III.1. Introduction……... **29**

III.2. Approche exergétique…… **29**

III.2.1. Exergie…… **29**

III.2.2. Différents formes d'exergie…… **30**

III.2.3. Bilan d'exergie……... **30**

III.2.4. Critères d'évaluation exergetique……... **31**

III.3. Approche exergo-environnmentale……... **31**

III.3.1. Bilan exergo-environnmentale……... **31**

III.3.2. Analyse de cycle de vie……..... **32**

III.3.3. Critère d'évaluation exergo-environnmentale…… **32**

III.4. Importance de l'optimisation exergo-environnmentale……. **33**

III.5. Conclusion……. **33**

**Chapitre IV : Modélisation et optimisation multi-objective d'un cycle organique de Rankine avec des fluides de travail mélangés**…..... **34**

IV.1. Introduction……... **34**

IV.2. Description du système ORC étudie……. **34**

IV.3. Sélection des fluides de travail……..... **36**

IV.4. Modélisation exergo-environnmentale du système ORC……..... **37**

IV.4.1. Bilan massique……... **37**

IV.4.2. Bilan énergétique et exergétique…… **37**

IV.4.3. Bilan exergo-environnmentale……... **38**

IV.4.4. Performances du système ORC……..... **40**

IV.5. Etude paramétrique……... **40**

IV.5.1. Effet de la pression d'entrée de la turbine……..... **41**

IV.5.2. Effet de la température du fluide caloporteur……..... **43**

IV.5.3. Effet de point de pincement dans condenseur…… **44**

IV.6. Optimisation Multi-objectif……... **46**

IV.6.1. Fonction objective……..... **46**

IV.6.2. Variable de décision……... **46**

IV.6.3. Résultats de l'optimisation multi-objtif……..... **47**

IV.6.4. Sélection de la solution optimale du front de Pareto…..... **48**

IV.7. Conclusion…… **49**

**Conclusion générale**..... **50**

**Références bibliographiques**…… **51**

# Liste des figures

**Figure I.1.** Diagramme pression-volume pour un cycle de Carnot…….. **04**

**Figure I.2.** Diagramme T-s pour un cycle de Carnot……..... **04**

**Figure I.3.** Représentation schématique d'un cycle de Rankine…… **06**

**Figure I.4.** Cycle de Hirn sur un diagramme (T.S)……..... **07**

**Figure I.5.** Schéma du cycle de Hirn……..... **07**

**Figure I.6.** Schéma représentatif d'un ORC……..... **08**

**Figure I.7** : Fonctionnement du cycle organique de Rankine…… **09**

**Figure I.8** : Schéma d'un cycle organique de Rankine avec un récupérateur…… **10**

**Figure I.9.** Diagramme T-s pour le cycle organique de Rankine supercritique (a) et trans-critique (b)…… **11**

**Figure I.10.** Répartition des sites ORC par secteur d'activité (A) en nombre (B) en puissance installée……. **11**

**Figure I.11.** Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse…… **12**

**Figure I.12**. Principe de fonctionnement d'un système ORC solaire…… **14**

**Figure 1.13**. Principe de fonctionnement d'un système ORC géothermique…..... **15**

**Figure I.14.** Système de récupération de chaleur à base de pentane pour la cogénération D'électricité dans l'usine allemande de Lengfurt…….. **16**

**Figure II.1.** Les fluides Frigorigènes selon la température…….. **19**

**Figure II.2.** Représentation du travail net volumique et du rendement thermique de cycle pour 27 fluides de travail…… **22**

**Figure II.3.** Evolution des Températures dans un évaporateur pour trois types de fluide : un fluide pur, un mélange zéotropique et un fluide pur à l'état supercritique…… **23**

**Figure II.4.** Diagramme en T du système ORC Utilisant un fluide de travail pur **24**

**Figure III.1.** Schéma représentatif d'un système ouvert……... **31**

**Figure IV.1.** Schéma descriptif du système ORC proposé…… **35**

**Figure IV.2.** Description d'un collecteur cylindro-parabolique…… **36**

**Figure IV.3.** Effet de la pression d'entrée de la turbine sur l'efficacité exergetique……..... **42**

**Figure IV.4.** Effet de la pression d'entrée de turbine sur l'impact environnemental……... **42**

**Figure IV.5.** Effet de la température du fluide caloporteur sur l'efficacité exergetique……... **43**

**Figure IV.6.** Effet de la température du fluide caloporteur sur l'impact environnemental……... **44**

**Figure IV.7.** Effet de point de pincement dans le condenseur sur l'efficacité exergétique……... **45**

**Figure IV.8.** Effet de point de pincement dans le condenseur sur l'impact environnemental……... **45**

**Figure IV.9.** Front de Pareto de l'optimisation multi-objectif…… **47**

**Figure IV.10.** Point optimal final du front de Pareto…….. **48**

## Liste des Tableaux

**Tableau IV.1 :** Propriétés des fluides de travail……..... **36**

**Tableau IV.2** : Valeur des paramètres utilisés pour la simulation du système ORC……... **40**

**Tableau IV.3** : Valeurs optimales finales de paramètres de conception et des fonctions objectives……... **49**

# Liste des symboles et des abréviations

**Symboles**

| | | |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{C_p}$ | Chaleur spécifique | Kj/Kg-k |
| $\boldsymbol{E_X}$ | Exergie | |
| $\eta_{ex}$ | Rendement exergétique | |
| $\Delta_T$ | Différence de température logarithmique moyenne | **K** |
| $\dot{\boldsymbol{m}}$ | Débit Massique | **Kg/s** |
| $\dot{\boldsymbol{Z}}$ | Cout d'investissement | **$/h** |
| Ƞ | Efficacité | **%** |
| φ | Efficacité Exergétique | **-** |
| $\boldsymbol{\mu}$ | Viscosité dynamique | **Pa.s** |
| P | Pression | **Bar** |
| S | Entropie spécifique | **KJ/Kg k** |
| $\dot{Q}$ | Flux de chaleur | **Kw** |

**Abréviation**

| | |
|---|---|
| ACV | Analyse de cycle de vie |
| Coll | Collecteur |
| Con | Condenseur |
| Cond | Condensateur |

# *Introduction générale*

# Introduction générale

La transition vers des systèmes énergétiques durables est devenue une priorité mondiale, avec un accent particulier sur l'optimisation de l'utilisation des ressources disponibles et la réduction des émissions de carbone. Dans cette perspective, l'intégration de technologies innovantes telles que les cycles organiques de Rankine (ORC) revêtent une importance cruciale. Ces systèmes offrent la possibilité de récupérer et d'utiliser efficacement la chaleur résiduelle provenant de divers processus industriels, tout en s'inscrivant dans une démarche de réduction de l'empreinte carbone. De plus, l'intégration de sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire vient enrichir cette approche, offrant une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques tout en contribuant à la transition vers une économie plus verte et plus durable.

Cependant, bien que les cycles ORC présentent des avantages potentiels indéniables, des défis persistent quant à l'optimisation de leur performance énergétique et environnementale. Dans cette optique, notre étude se concentre sur l'amélioration d'une configuration spécifique du cycle ORC. Outre l'utilisation de l'énergie solaire et des rejets thermiques industriels comme sources de chaleur, nous explorons également une approche novatrice en intégrant l'utilisation de mélanges zéotropiques comme fluides de travail. Les mélanges zéotropiques, composés de combinaisons spécifiques de fluides, présentent des propriétés thermodynamiques uniques qui peuvent être exploitées pour optimiser les performances du système ORC. En ajustant la composition du mélange en fonction des conditions de fonctionnement, il est possible d'améliorer l'efficacité énergétique du système et de maximiser la récupération d'énergie à partir des flux de chaleur disponibles. Cette approche offre un potentiel considérable pour relever les défis actuels en matière de performance énergétique et environnementale des cycles ORC, en ouvrant la voie à des solutions plus efficaces et durables pour la production d'énergie, tout en mettant l'accent sur une analyse exergo-environnmentale approfondie.

Ce mémoire vise à améliorer une configuration spécifique du cycle de Rankine en utilisant un mélange de fluides organiques pour exploiter l'énergie des rejets thermiques d'une cimenterie. Une analyse et une optimisation ergo-environnementale du système ORC sont menées pour déterminer ses performances optimales. Le choix d'un mélange zéotropique de toluène et de benzène (50 % chacun) comme fluide de travail est justifié. Le document est structuré en quatre parties distinctes :

- Le premier chapitre présente Une revue bibliographique sur le cycle organique de Rankine, ses principes de fonctionnement, ses configurations et ses applications Ainsi qu'un état de la recherche actuelle sur le cycle ORC.
- L'importance de choisir le fluide de travail approprié dans la conception du cycle ORC, en raison de ses propriétés thermo physiques et de son impact sur les performances, la taille et la conception du système.
- Le troisième chapitre se consacre à l'analyse exergétique et exergo-environnmentale, exposant les principes généraux et théoriques de cette approche pour la modélisation et l'optimisation.
- Le quatrième chapitre de cette étude se concentre sur la modélisation thermodynamique et environnementale d'un cycle organique de Rankine, avec le développement d'un code de calcul en MATLAB pour faciliter la modélisation et l'optimisation du système.

# *Chapitre I*

# *Cycle Organique de Rankine (ORC)*

## I.1. Introduction

Depuis plusieurs années, le cycle de Rankine et l'utilisation de fluides organiques font l'objet de recherches scientifiques intenses. Cette technologie prometteuse offre une alternative viable aux cycles à vapeur traditionnels pour la conversion de chaleur en électricité, notamment à partir de sources de chaleur à basse et moyenne température [1].

Ce chapitre examine en détail les cycles thermodynamiques de Carnot et de Rankine, ainsi que le cycle organique de Rankine. Il décrit leurs principes de fonctionnement, leurs différentes configurations, ainsi que leurs applications. De plus, il analyse l'état actuel de la recherche sur le cycle ORC et les cycles organiques de Rankine hybrides. Il présente également un état de l'art sur les cycles de Rankine solaires et hybrides. Enfin, il conclut sur les avancées et les perspectives futures dans ce domaine.

## I.2. Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot, introduit par l'ingénieur français Sadi Carnot en 1824, repose sur une séquence de quatre processus réversibles. En raison de sa réversibilité totale, ce cycle représente le moyen le plus efficace de convertir la chaleur fournie au système en travail utile [2]. Un moteur thermique fonctionnant selon le principe du cycle de Carnot est communément appelé moteur de Carnot. Cependant, dans la pratique, aucun cycle thermodynamique n'est entièrement réversible, ce qui fait du cycle de Carnot un modèle théorique [3].

Le cycle théorique de Carnot est un cycle fermé, chauffé de manière externe, qui absorbe la chaleur d'un réservoir thermique à haute température (TH) et la rejette vers un réservoir thermique à basse température (TC) (voir Figure I.1). Ce cycle se compose de quatre étapes réversibles, à savoir :

- 1-2 : Expansion isotherme à la température TH
- 2-3 : Expansion isentropique de température TH à TC
- 3-4 : Compression isotherme à la température TC
- 4-1 : Compression isentropique de température TC à TH.

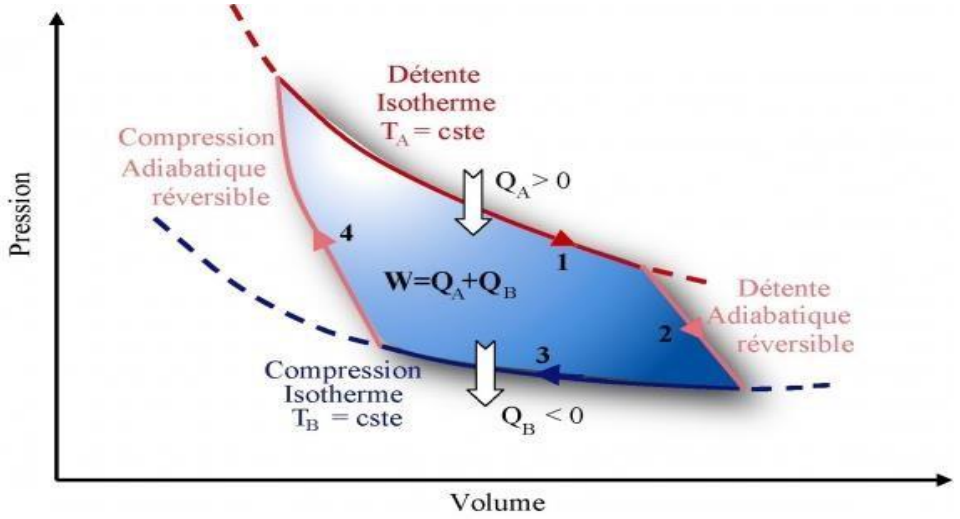



**Figure I.1** : Diagramme pression-volume pour un cycle de Carnot [4].

Les processus réversibles du cycle de Carnot sont représentés dans un diagramme pression-volume dans la Figure I.1. Une autre manière courante de représenter ce cycle est à l'aide d'un diagramme température-entropie (T-s), comme illustré dans la Figure I.2. En effet, le diagramme T-s est souvent privilégié pour l'analyse des cycles de puissance [5]. Le cycle de Carnot atteint le rendement le plus élevé possible pour tout cycle de puissance opérante entre deux températures fixes.

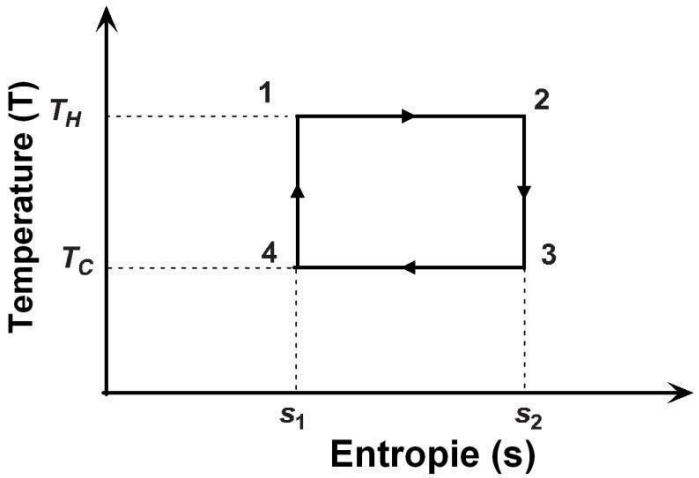



**Figure I.2** : Diagramme T-s pour un cycle de Carnot [6].

Comme précédemment souligné, le cycle de Carnot est un modèle réversible qui demeure hors de portée en pratique, car les irréversibilités inhérentes à chaque processus ne peuvent être éliminées qu'en considérant des durées de fonctionnement infinies et/ou des surfaces d'échange infinies. Cependant, l'intérêt de ces cycles réside dans le fait qu'ils définissent les limites

supérieures de performance pour les cycles réels. De plus, les cycles réversibles servent de points de départ dans le développement des cycles réels, et ils sont ajustés au besoin pour répondre à des exigences spécifiques [7].

### I.3. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur composé de deux isobares et de deux adiabatiques. Il se rapproche le plus du cycle de Carnot [8], mais diffère de celui-ci par la compression isentropique du liquide, suivie d'une transformation isobare de chauffage en chaleur sensible, puis de chauffage en chaleur latente [9]. Dans un cycle de Rankine, l'eau est utilisée comme fluide de travail, traversant une série d'étapes où son état, sa température et sa pression sont modifiés. L'évaporation de l'eau sous haute pression permet de récupérer la chaleur disponible de la source. À la sortie de l'évaporateur, la vapeur d'eau atteint sa température la plus élevée dans le cycle. Cette vapeur est ensuite détendue dans une turbine jusqu'à la pression basse, générant ainsi de l'énergie mécanique qui sera convertie en énergie électrique. La vapeur restante est ensuite condensée, généralement en utilisant une source froide peu coûteuse, comme l'eau de rivière. Enfin, l'eau liquide est comprimée par une pompe pour assurer la circulation du fluide dans le cycle. La Figure I.3 illustre les différentes étapes du cycle de Rankine.

Le schéma de principe d'un cycle organique de Rankine simple est présenté ci-dessous. Il montre que cette installation comprend quatre composants, tous parcourus par le même débit de fluide :

- Une pompe
- Un générateur de vapeur
- Une machine de détente
- Un condenseur.

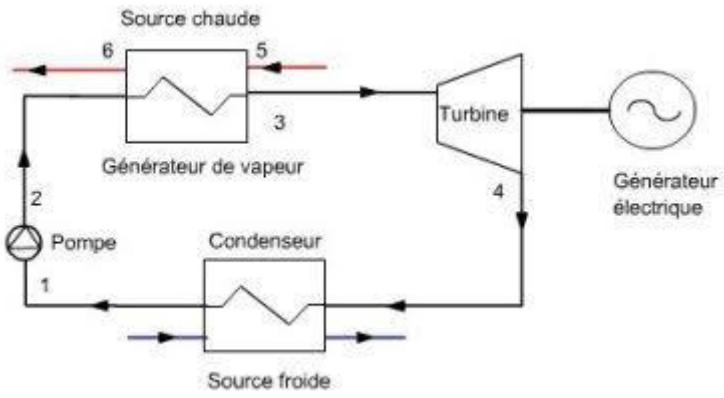



**Figure I.3** : Représentation schématique d'un cycle de Rankine [10].

Dans les grandes installations, la machine de détente est généralement une turbine. Dans les moyennes, on utilise de préférence des machines à vis, et, pour les toutes petites puissances, des scrolles [10]. Les transformations subies par l'eau sont donc les suivantes :

- 1 –2 détente de la vapeur d'eau à haute pression vers la pression basse dans la turbine, cette étape permet de générer l'électricité.
- 2 – 3 condensation du mélange liquide–vapeur.
- 3 – 4 Compression de l'eau liquide vers la pression haute.
- 4 – 1 évaporation de l'eau liquide à haute pression, cette étape permet de récupérer la chaleur de la source chaude.

### I.3.1. Cycle de Hirn

La figure I.3.1 illustre le cycle avec surchauffe, connu sous le nom de cycle de Hirn lorsque l'eau est le fluide utilisé. Ce cycle diffère du cycle de Rankine uniquement par l'ajout d'une surchauffeur, comme illustré dans la figure I.3.2 [11].

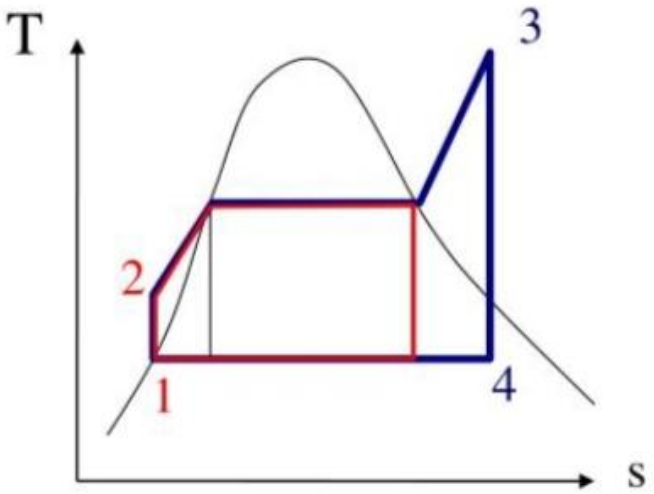



**Figure I.4** : Cycle de Hirn sur un diagramme (T.S) [11]

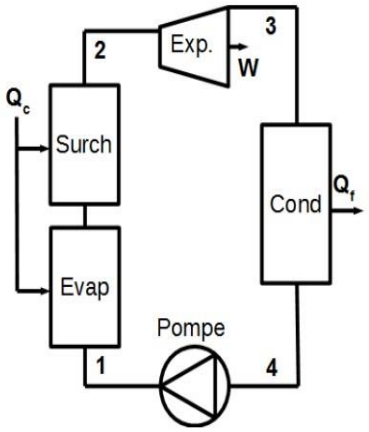



**Figure I.5** : Schéma du cycle de Hirn [11].

## I.4. Cycles organiques de Rankine (ORC)

Le cycle organique de Rankine (ORC) est un cycle thermodynamique utilisé pour convertir la chaleur en énergie électrique. Il est similaire au cycle de Rankine classique, mais utilise un fluide organique à la place de l'eau. Dans ce cycle, les principaux éléments sont :

- Évaporateur : La source de chaleur (biomasse, géothermie, solaire thermique) chauffe le fluide organique, le transformant en vapeur.
- Turbine : La vapeur haute pression détendue dans la turbine génère une puissance mécanique.

- Condenseur : La vapeur à basse pression est ensuite condensée en liquide à l'aide d'un fluide caloporteur (eau).
- Pompe : Le fluide organique liquide est pompé à haute pression pour boucler le cycle [12].

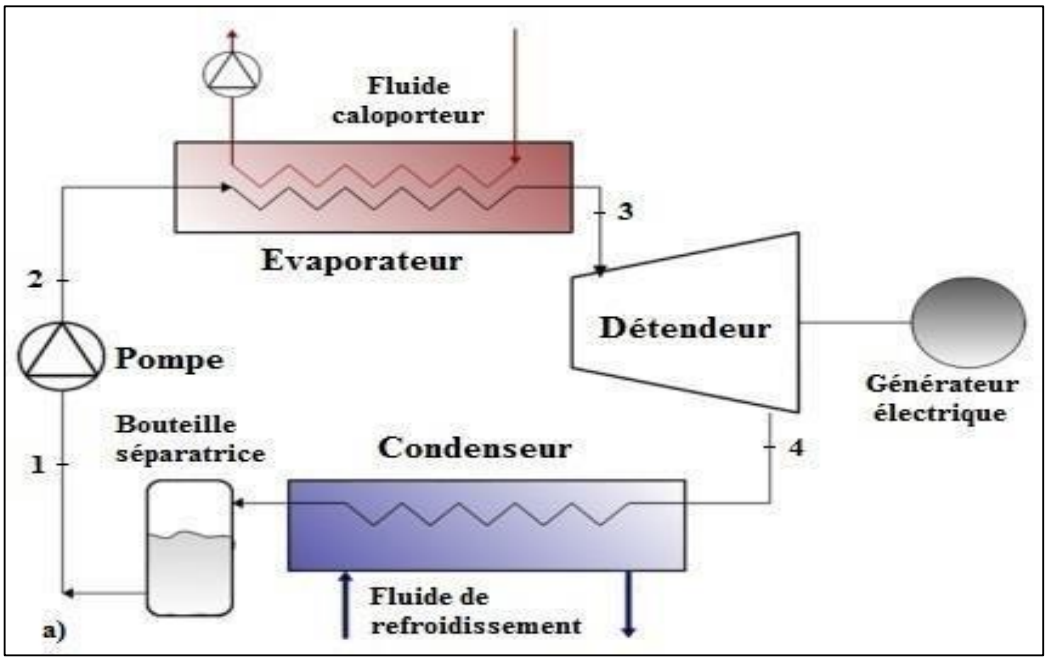



**Figure I.6** : Schéma représentatif d'un ORC [13]

### I.4.1. Principe de fonctionnement

Le principe d'un ORC est comparable à celui d'une machine à vapeur classique, mais il se distingue par l'utilisation d'un fluide organique à la place de l'eau. Ce choix est motivé par les propriétés thermodynamiques spécifiques du fluide organique, lui permettant de fonctionner à des températures plus basses que l'eau [14].

Dans un ORC, un fluide de travail est comprimé par une pompe et dirigé vers l'évaporateur, où il absorbe la chaleur et se vaporise. La vapeur haute pression ainsi obtenue est ensuite détendue dans un dispositif de détente, produisant ainsi un travail mécanique. Après détente, la vapeur est refroidie et condensée dans le condenseur avant d'être à nouveau pompée. La différence majeure réside ainsi dans le choix du fluide utilisé [15].

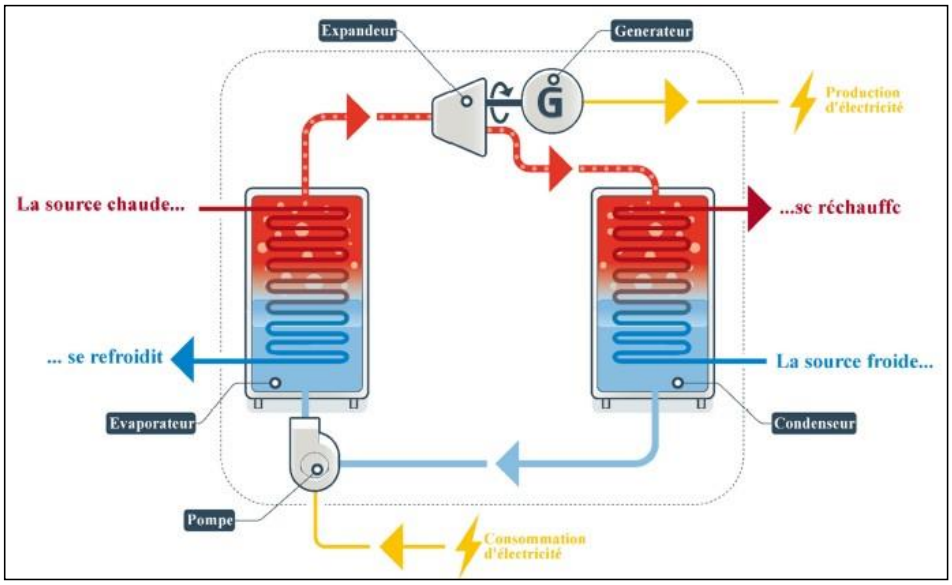



**Figure I.7** : Fonctionnement du cycle organique de Rankine [14]

### I.4.2. Configurations du système ORC

#### 1.4.2.1. Cycle organique de Rankine sous-critique

Dans un cycle organique de Rankine sous-critique, l'évaporation du fluide de travail se produit à une pression inférieure au point critique. Deux configurations principales sont couramment utilisées pour ce type de cycle :

- Cycle ORC simple ou standard : le fonctionnement de ce cycle a été expliqué dans la section consacrée au cycle de Rankine.
- Cycle ORC avec récupérateur ou échangeur de chaleur interne : ce composant est positionné entre la sortie de la turbine et l'entrée du condenseur, d'une part, et entre la sortie de la pompe et l'entrée de l'évaporateur, d'autre part. Son rôle est de récupérer l'énergie thermique de la vapeur du fluide organique à la sortie de la turbine lorsqu'elle est suffisamment chaude. Cette énergie récupérée permet un préchauffage partiel du fluide de travail, réduisant ainsi la quantité de chaleur requise pour l'évaporation (voir Figure I.8) [16].

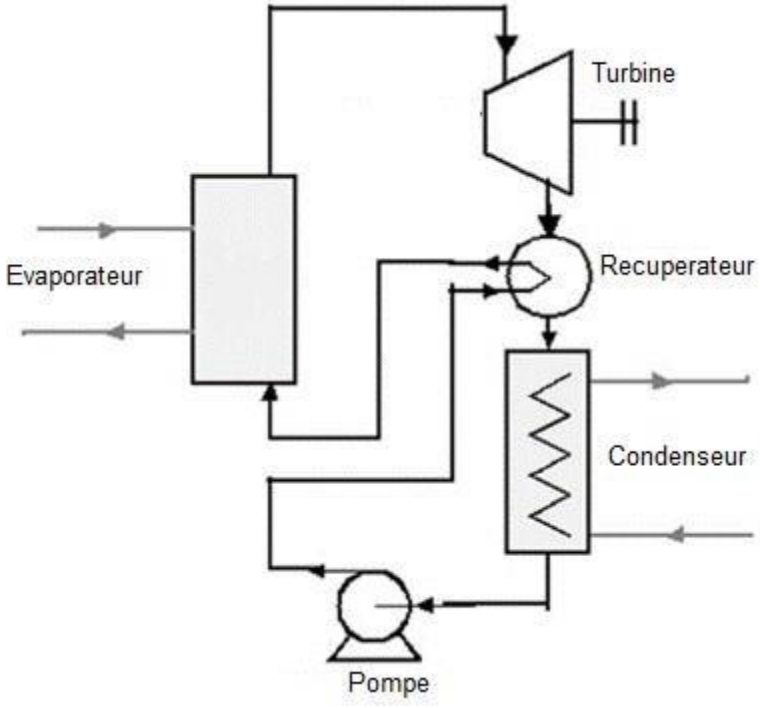



**Figure I.8** : Schéma d'un cycle organique de Rankine avec un récupérateur [17]

Il est intéressant de noter que la performance (efficacité thermique) de cycle ORC est améliorée par l'addition de l'échangeur interne de chaleur cependant, le système devient plus complexe amenant à un coût d'investissement plus élevé.

### I.4.2.2. Cycle organique de Rankine trans-critique et supercritique

La figure I.9 illustre les diagrammes T-s pour un cycle organique de Rankine trans-critique et supercritique. La principale distinction entre ces deux cycles réside dans les processus de compression et d'expansion du fluide de travail. Dans le cas trans-critique, le fluide est comprimé à une pression supérieure à sa pression critique, puis détendu à une pression sous-critique. En revanche, dans le cas du cycle supercritique, le fluide est utilisé entièrement au-dessus de sa pression critique.

Actuellement, les cycles organiques de Rankine trans-critique et supercritique suscitent un vif intérêt pour la production d'électricité en raison de leurs performances énergétiques améliorées. Cependant, ces deux cycles ORC présentent des défis à relever, notamment les exigences de pression opérationnelle élevée, ainsi que les incertitudes liées aux propriétés du fluide de travail dans la région supercritique [16].

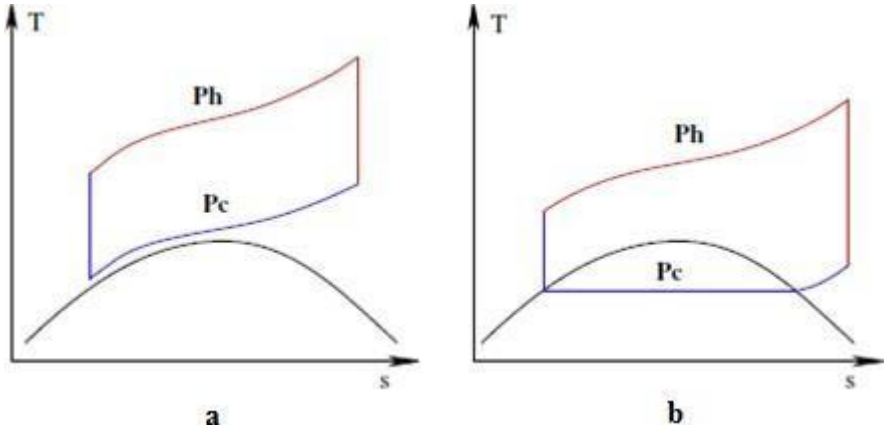



**Figure I.9 :** Diagramme T-s pour le cycle organique de Rankine supercritique (a) et trans-critique (b) [17]

### I.4.3. Applications des cycles ORC

La technologie de l'ORC trouve des applications variées, tant dans la récupération de chaleur industrielle que dans les énergies renouvelables telles que le solaire thermique, la géothermie et la biomasse. En général, elle est adaptée aux applications à des températures considérées comme "basses" (inférieures à 200°C). La Figure I.10 illustre la répartition des ORC par secteur d'activité [18].

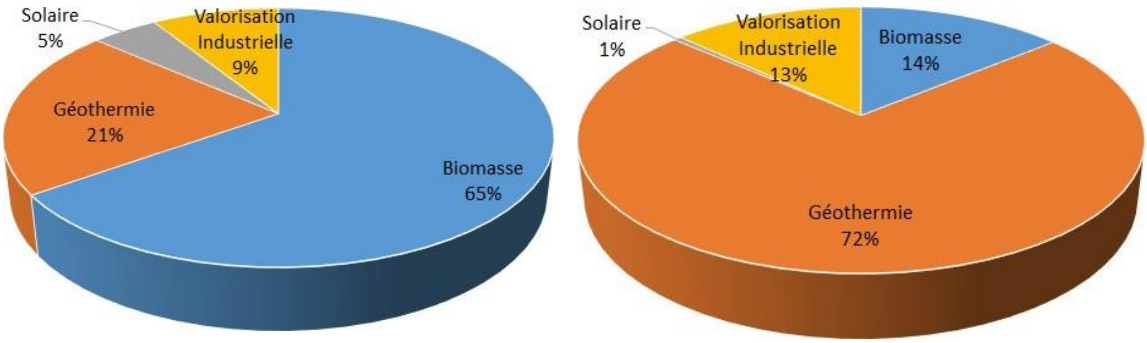



**Figure I.10 :** Répartition des sites ORC par secteur d'activité (A) en nombre (B) en puissance installée [18]

#### 1.4.3.1. La biomasse

Le coût croissant et l'utilisation continue des combustibles fossiles traditionnels entraînent des impacts environnementaux significatifs, tels que le changement climatique et la pollution

atmosphérique. Parallèlement, la biomasse émerge comme une alternative attrayante en raison de son coût plus bas et de son caractère respectueux de l'environnement par rapport aux combustibles fossiles. Les biocombustibles, issus de diverses sources telles que le biogaz et les déchets agricoles, offrent des avantages significatifs en termes de réduction des coûts et d'impact sur le réchauffement climatique [19].

L'utilisation locale de la biomasse présente deux avantages principaux : d'une part, sa faible densité énergétique par rapport aux combustibles fossiles entraîne des coûts de transport plus élevés ; d'autre part, la demande de chaleur et d'électricité est souvent présente sur place, ce qui rend les installations de biomasse particulièrement adaptées pour les applications hors réseau ou peu fiables. Les centrales électriques locales, de petite taille (<1-2 MWe), sont privilégiées, ce qui exclut l'utilisation de cycles de vapeur traditionnels peu rentables dans cette gamme de puissance. La chaleur générée par la combustion est transférée au fluide caloporteur dans les échangeurs de chaleur, à des températures variantes entre 150 et 320°C. Ce fluide caloporteur, généralement de l'huile thermique, est ensuite dirigé vers le cycle ORC pour évaporer le fluide de travail, à une température légèrement inférieure à 300°C [20]. La Figure 1.11 illustre l'application de l'ORC en utilisant la biomasse.

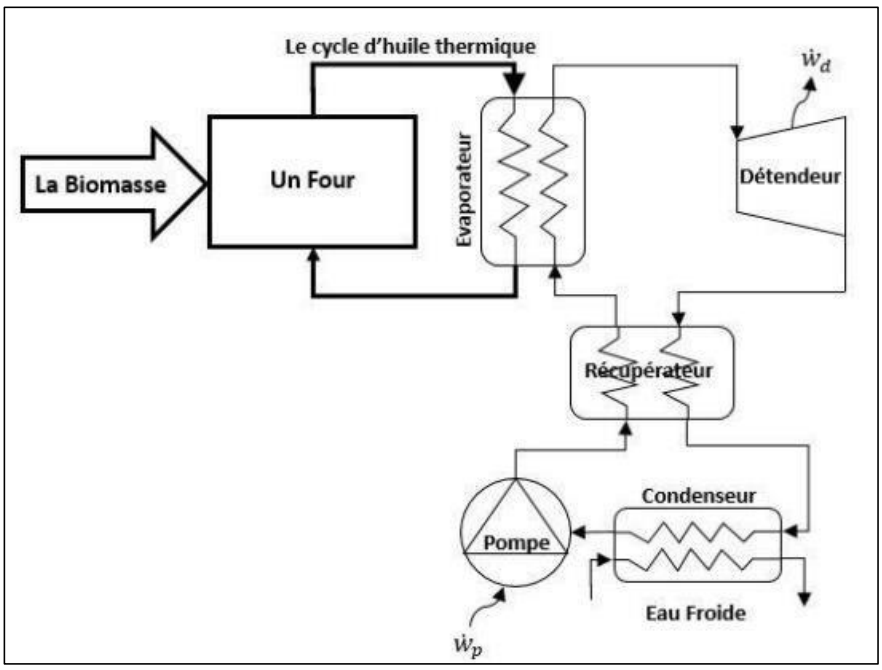



**Figure 1.11** : Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse.

### I.4.3.2 L'énergie solaire

Les cycles combinés solaires intégrés avec ORC sont actuellement utilisés dans les pays à fort rayonnement solaire incident afin d'augmenter la puissance de sortie nette et de réduire la consommation spécifique de carburant. L'énergie solaire est connue comme une source

d'énergie renouvelable gratuite, durable et totalement inépuisable, contrairement aux combustibles fossiles qui sont limités.

L'énergie solaire est la conversion de la lumière du soleil en électricité, soit directement en utilisant le photovoltaïque (PV), soit indirectement en utilisant l'énergie solaire concentrée. Les systèmes d'énergie solaire concentrés utilisent des lentilles ou des miroirs et des systèmes de rails pour concentrer une grande zone de lumière du soleil en un petit faisceau.

Le soleil est suivi et réfléchi sur un collecteur linéaire ou ponctuel, transférant la chaleur vers un fluide à haute température. La chaleur est ensuite transférée à un cycle de production d'électricité. Les trois principales technologies de concentration sont l'antenne parabolique, la tour solaire et le creux parabolique. Les antennes paraboliques et les tours solaires sont des technologies de concentration ponctuelle conduisant à un facteur de concentration plus élevé et des températures plus élevées. Les cycles de puissance les mieux adaptés à ces technologies sont le moteur Stirling (pour les petites installations), le cycle à vapeur ou encore le cycle combiné pour les tours solaires [21]. Les auges paraboliques fonctionnent à une température plus basse (300 ° C à 400 ° C) que les systèmes CSP ponctuels. Ils sont essentiellement couplés aux cycles classiques de Rankine à vapeur pour générer de l'énergie [22]. Les cycles organiques de Rankine sont une technologie favorable pour réduire les coûts d'investissement à petite échelle : ils peuvent fonctionner à des températures plus basses et la puissance totale installée peut être réduite à l'échelle du kW. Le principe de fonctionnement d'un tel système est présenté dans la figure I.12. Shaaban [23] a récemment décrit un cycle combiné solaire intégré modifié (ISCC) avec un ORC de cycle de Rankine organique. L'ORC a été utilisé pour refroidir l'air comprimé et générer une puissance nette à partir de l'énergie thermique reçue. Les performances du cycle proposé ont été optimisées. Quinze fluides de travail ont été étudiés dans l'ORC. Le fluide de travail R1234ze (z) montre un bon accord entre les considérations thermodynamiques, économiques, de sécurité et environnementales. Une augmentation de la puissance de sortie de 19,5% avec contribution solaire et de 23,1% sans contribution solaire a été montrée pour le cycle avec R1234ze (z). Quoilin et coll [24] ont décrit la conception d'un cycle solaire organique de Rankine installé au Lesotho à des fins d'électrification rurale. Le modèle permet de dimensionner les différents composants du cycle et évalue les performances du système. Ils ont comparé différents fluides de travail et deux configurations de machines d'expansion différentes simulées sont simulées (à un et deux étages).

Des technologies telles que les concentrateurs linéaires de Fresnel [25] sont particulièrement appropriées pour les ORC solaires car elles nécessitent un coût d'investissement moindre mais fonctionnent à une température plus basse.

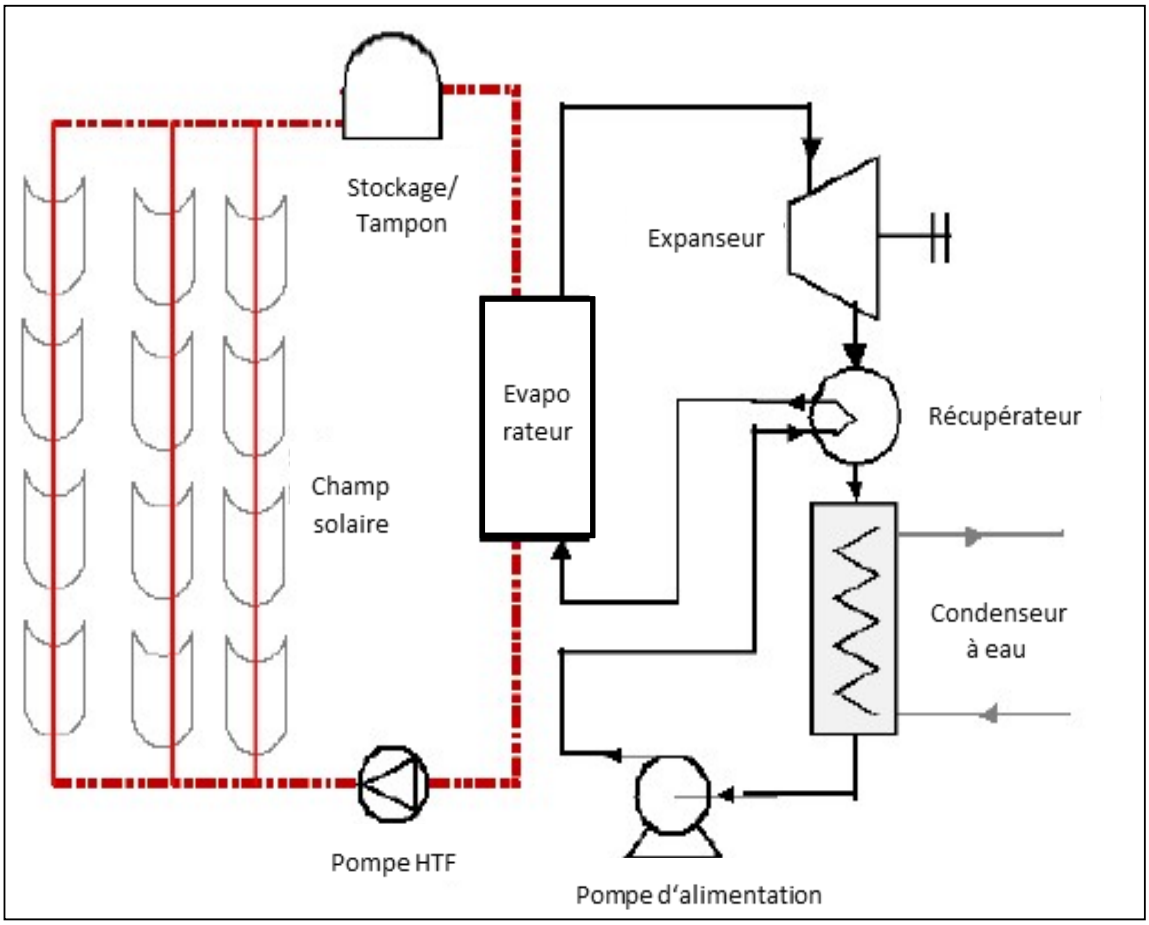



**Figure I.12** : Principe de fonctionnement d'un système ORC solaire [26].

Dans les concentrations ponctuelles, la température du fluide caloporteur peut atteindre 1000°*C*, ce qui induit que la technologie ORC n'est pas applicable. En revanche, dans les centrales à concentration linéaire, les températures n'excèdent pas les 400°*C*. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser un ORC comme système de génération électrique, notamment dans des champs solaires de petite dimension ou à faible ensoleillement. De plus, ces centrales sont moins onéreuses que les centrales à collection ponctuelle [27].

### I.4.3.3 L'énergie géothermique

Les sources de chaleur géothermiques sont disponibles dans une large gamme de températures, allant de quelques dizaines de degrés jusqu'à 300°C. La limite technologique actuelle pour la production d'électricité est d'environ 80°C : en dessous de cette température, l'efficacité de la conversion devient trop faible et les centrales géothermiques ne sont pas économiques. Pour récupérer la chaleur à une température acceptable, les trous de forage doivent généralement être forés dans le sol, pour le puits de production et pour le puits d'injection.

La saumure chaude est pompée du premier et injectée dans le second à une température plus basse. Selon la configuration géologique, les forages peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres de profondeur, nécessitant plusieurs mois de travail continu. Cela conduit à une part élevée du forage dans le coût d'investissement (jusqu'à 70%) d'une usine ORC géothermique [28].

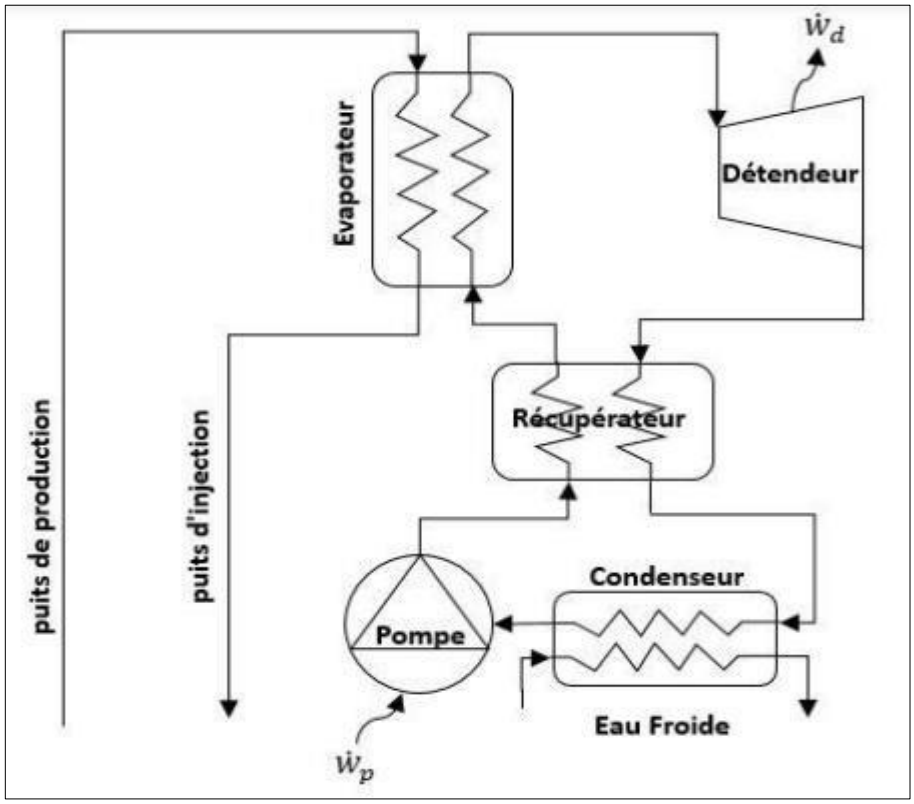



**Figure 1.13** : Principe de fonctionnement d'un système ORC géothermique [28].

### I.4.3.4. Valorisation des rejets thermiques industriels

Dans de nombreuses industries, une quantité considérable de chaleur est dissipée dans l'atmosphère à des températures inférieures à 350°C, une perte à la fois économique et environnementale. La valorisation de cette chaleur représente donc un double défi, tant sur le plan financier que sur celui de la durabilité environnementale. Les cycles organiques de Rankine émergent comme l'une des technologies prometteuses pour récupérer cette énergie thermique perdue, avec une capacité typique allant de 1,5 à 4 MW électriques.

Les principaux secteurs industriels ciblés comprennent la sidérurgie, la chimie, l'agroalimentaire, la cimenterie et le secteur pétrolier et gazier. Un exemple notable est celui

de la cimenterie de Lengfurt en Allemagne, pionnière dans l'utilisation du cycle organique de Rankine (ORC) à basse température, avec le pentane comme fluide de travail. Cette application représente une première mondiale dans le domaine [29]. Le schéma de principe de ce procédé est illustré dans la figure (I.14).

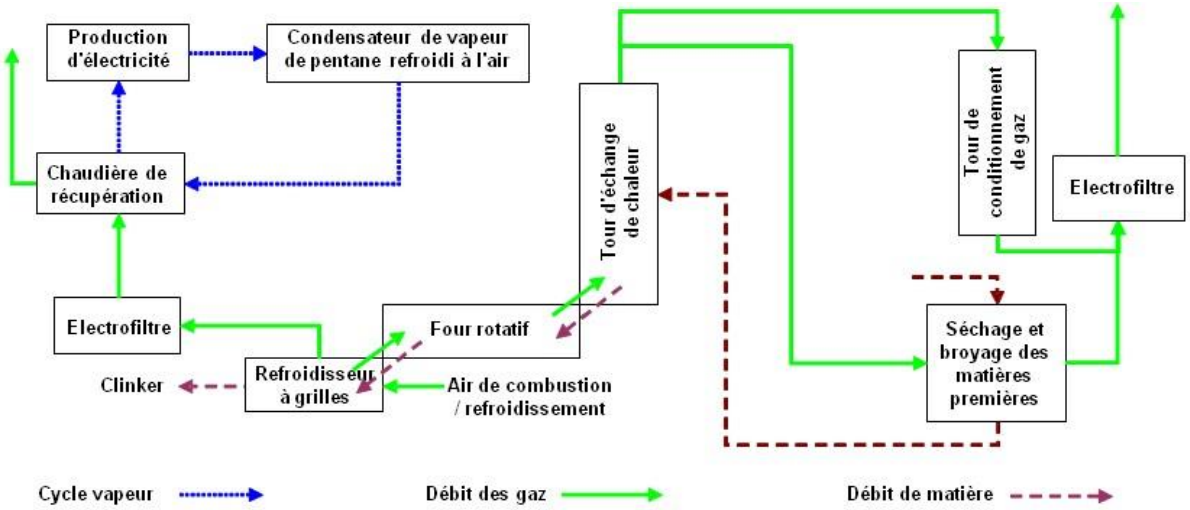



**Figure I.14 :** Système de récupération de chaleur à base de pentane pour la cogénération D'électricité dans l'usine allemande de Lengfurt [16].

## I.5. Cycles organiques de Rankine Hybrides

Les cycles organiques de Rankine (COR) hybrides ouvrent la voie à une intégration plus poussée des sources d'énergie renouvelable dans un même système. Cette approche innovante vise à maximiser l'efficacité énergétique en combinant différentes sources d'énergie [30], telles que la géothermie, l'énergie solaire et les rejets thermiques industriels, au sein d'un seul cycle ORC.

L'intégration de la géothermie dans les cycles ORC hybrides permet de tirer parti de la chaleur emmagasinée dans le sous-sol terrestre. Cette source d'énergie stable et constante peut être utilisée conjointement avec l'énergie solaire pour assurer une production continue d'électricité. Par exemple, la chaleur géothermique peut être utilisée comme source de chaleur principale pour évaporer le fluide de travail dans l'évaporateur du cycle ORC, tandis que l'énergie solaire peut être utilisée comme source de chaleur auxiliaire pour augmenter l'efficacité globale du système, en particulier pendant les périodes de forte irradiation solaire. De même, les rejets thermiques industriels peuvent être intégrés dans les cycles ORC hybrides pour valoriser la

chaleur perdue par divers processus industriels. Cette chaleur résiduelle, souvent rejetée dans l'environnement, peut être récupérée et utilisée pour alimenter le cycle ORC, augmentant ainsi l'efficacité énergétique globale de l'installation industrielle.

En combinant ces différentes sources d'énergie au sein d'un même cycle ORC, les cycles organiques de Rankine hybrides offrent une solution polyvalente et durable pour la conversion de la chaleur fatale en électricité, contribuant ainsi à la transition vers une économie plus verte et plus durable.

## I.6. Conclusion

Le cycle organique de Rankine est une technologie prometteuse pour la production d'électricité à partir de sources thermiques de basse température. Il présente de nombreux avantages par rapport au cycle à vapeur d'eau, mais il reste encore quelques défis à relever pour que l'ORC puisse atteindre son plein potentiel.

# *Chapitre II*

# *Les fluides de travail dans les cycles organiques de Rankine*

## II.1. Introduction

Le choix du fluide de travail dans les cycles de Rankine organiques (ORC) est d'une importance cruciale, car il influe directement sur les performances, la taille et la conception globale du système. Les fluides de travail, qu'ils soient liquides ou gazeux, agissent comme le cœur du processus, transformant les variations de pression et de température en électricité exploitable. Comprendre les caractéristiques thermodynamiques et les propriétés des fluides de travail est essentiel pour optimiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes ORC.

Dans ce chapitre, nous explorons en détail les différents types de fluides de travail utilisés dans les cycles ORC, allant des produits chimiques purs aux mélanges complexes de composants. Nous examinons leur impact sur les performances du système et discutons des critères clés influençant le choix du fluide de travail pour des applications spécifiques. En analysant les recherches actuelles et les développements récents, nous évaluons les tendances émergentes dans la sélection des fluides de travail et leur contribution à l'avancement des technologies ORC.

## II.2. Le choix de fluides organiques :

### II.2.1. Fluide caloporteur :

Un fluide caloporteur joue un rôle essentiel dans la transmission efficace de la chaleur entre différentes sources de température. Il est largement utilisé dans divers secteurs, notamment dans les systèmes de refroidissement des moteurs, les chaudières et les centrales électriques. Les principales fonctions d'un fluide caloporteur sont les suivantes :

- Stocker l'énergie thermique générée par une source de chaleur, que ce soit sous forme de chaleur sensible ou latente.
- Transférer cette énergie de manière efficiente jusqu'à son point d'utilisation [31].

### II.2.2. Fluides organiques :

Les fluides organiques utilisés dans les systèmes ORC se répartissent en plusieurs catégories, chacune avec ses caractéristiques et ses applications spécifiques :

- Fluides synthétiques : Ces fluides sont des hydrocarbures dotés de compositions moléculaires définies ou de mélanges complexes. Leur structure chimique contrôlée leur

confère des propriétés thermiques et de transfert de chaleur optimisées, adaptées aux exigences des systèmes ORC.

- Fluides frigorigènes : Ces liquides ou mélanges de liquides jouent un rôle essentiel dans les cycles ORC en permettant le transfert de chaleur et la génération d'électricité. Ils existent sous forme liquide, gazeuse ou mixte, en fonction des conditions de température et de pression, et sont largement utilisés dans les applications de réfrigération à basse température [31].

Le fluide frigorigène transporte la chaleur captée à l'évaporateur vers le condensateur, facilitant ainsi la conversion de chaleur en électricité. Cependant, il convient de noter que l'huile de compresseur, bien que nécessaire pour le fonctionnement du compresseur, peut être considérée comme un inconvénient car elle est souvent inutile pour les autres composants du circuit de réfrigération [32].

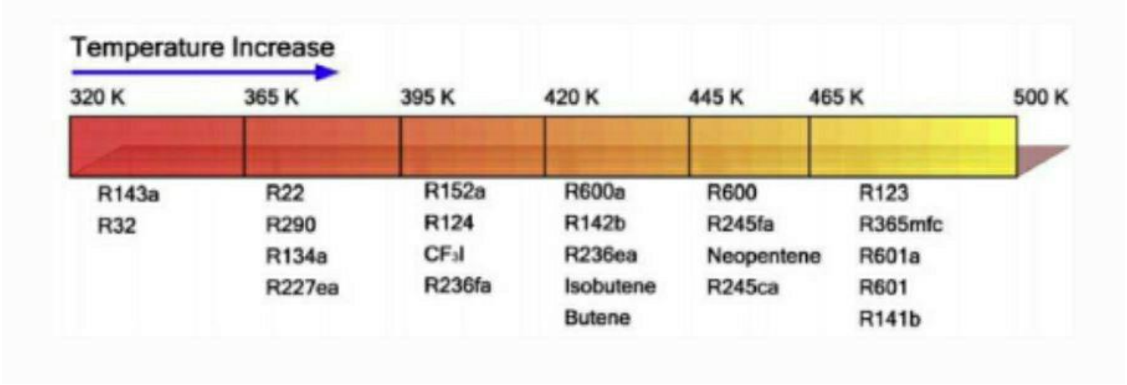



**Figure II.1 :** Les fluides Frigorigènes selon la température [33].

Actuellement, plusieurs ensembles de données sur les propriétés thermo physiques des liquides purs et mélangés sont disponibles. Les logiciels suivants peuvent être utilisés pour extraire les propriétés thermo physiques des liquides ORC :

- REFPROP - NIST : C'est l'abréviation de fluide référence Propretés. Ce logiciel a été développé par l'Institut national des standards et des technologies (NIST) pour effectuer des calculs des propriétés thermodynamiques et de transport de liquides d'importance industrielle et de leurs mélanges [34].

- EES : (Engineering Equation Solver) est un logiciel utilisé pour les simulations des fluides frigorigènes et autres fluides [35].

### II.3. Fluides de travail purs

Les fluides de travail purs sont largement privilégiés dans les cycles ORC pour plusieurs raisons bénéfiques :

- Leur composition chimique est bien définie, ce qui assure une compréhension claire de leurs propriétés thermodynamiques, facilitant ainsi la conception et l'optimisation des systèmes.
- Ils sont généralement abordables sur le plan financier et facilement accessibles sur le marché, ce qui réduit les coûts d'approvisionnement et de maintenance des installations ORC.
- Leur stabilité chimique les rend résistants à la dégradation au fil du temps, assurant ainsi une durabilité à long terme des équipements.
- En outre, ces fluides sont souvent non toxiques et non inflammables, ce qui garantit un environnement de travail sûr et conforme aux normes de sécurité.

Les principales catégories de fluides de travail purs et leurs principaux avantages et inconvénients sont les suivantes [36] :

#### II.3.1. Les hydrocarbures :

- Avantages : Ils possèdent généralement des propriétés thermodynamiques souhaitables.
- Inconvénients : Cependant, ils peuvent poser des problèmes d'inflammabilité, ce qui limite leur utilisation dans certains contextes.

#### II.3.2. Les perfluorocarbures :

- Avantages : Ces fluides sont très inertes et stables.
- Inconvénients : Leur haute complexité moléculaire peut entraîner des propriétés thermodynamiques indésirables.

#### II.3.3. Siloxanes (MM, MM/MDM/MD2M) :

- Avantages : Ils présentent un mélange attrayant de propriétés physiques et thermiques.
- Inconvénients : Souvent disponibles sous forme d'azéotropes plutôt que de liquides purs, ce qui peut compliquer leur utilisation.

### II.3.4. Les hydrocarbures de chaîne droite :

- Avantages : Certains fluides avec un potentiel de déplétion de l'ozone (ODP) nul peuvent présenter un intérêt.

### II.3.5. Éthers et éthers fluorés:

- Inconvénients : Leur inflammabilité et leur toxicité sont des problèmes potentiels, en plus de caractéristiques thermodynamiques indésirables.

### II.3.6. Les alcools

- Avantages : Ils sont facilement solubles dans l'eau.
- Inconvénients : Toutefois, ils peuvent poser des problèmes d'inflammabilité et présenter des caractéristiques thermodynamiques indésirables.

### II.3.7. Les fluides inorganiques :

- Avantages : Ils ont un faible impact sur l'environnement.
- Inconvénients : Leur coût peut varier selon les cas et ils peuvent parfois causer des problèmes opérationnels.

Les fluides de travail ORC sont également classés en trois catégories selon leur application spécifique [37] :

- Les huiles de silicone : Utilisées dans les petits ORC (< 4 MWe), pour la biomasse, et la récupération de chaleur à températures modérées et élevées (par exemple, les gaz d'échappement de turbine) ainsi que dans les centrales solaires concentrées.

- Hydrocarbures : Principalement utilisés dans la géothermie, mais leur utilisation est limitée en raison de leur inflammabilité et de la taille importante des unités requises.

- Fluides fluorés : Employés pour la récupération de chaleur à basse température (par exemple, dans les chemises d'eau moteur, l'eau chaude de procédé) et également dans la géothermie.

## II.4. Fluides de travail mélangés :

Les mélanges de fluides, tels que les mélanges zéotropes, sont largement utilisés dans les cycles Rankine organiques (ORC) pour optimiser les performances thermodynamiques. Toutefois, comparer les performances des liquides purs à celles des mélanges peut s'avérer complexe en

raison des variations potentielles des conditions de fonctionnement optimales. Ces mélanges peuvent être composés d'un ensemble pouvant aller jusqu'à 30 ingrédients différents, incluant des huiles de base et des additifs avancés. Il est donc essentiel de suivre des pratiques approuvées pour la préparation de ces mélanges, notamment en ce qui concerne la dilution adéquate et le maintien de la concentration recommandée.

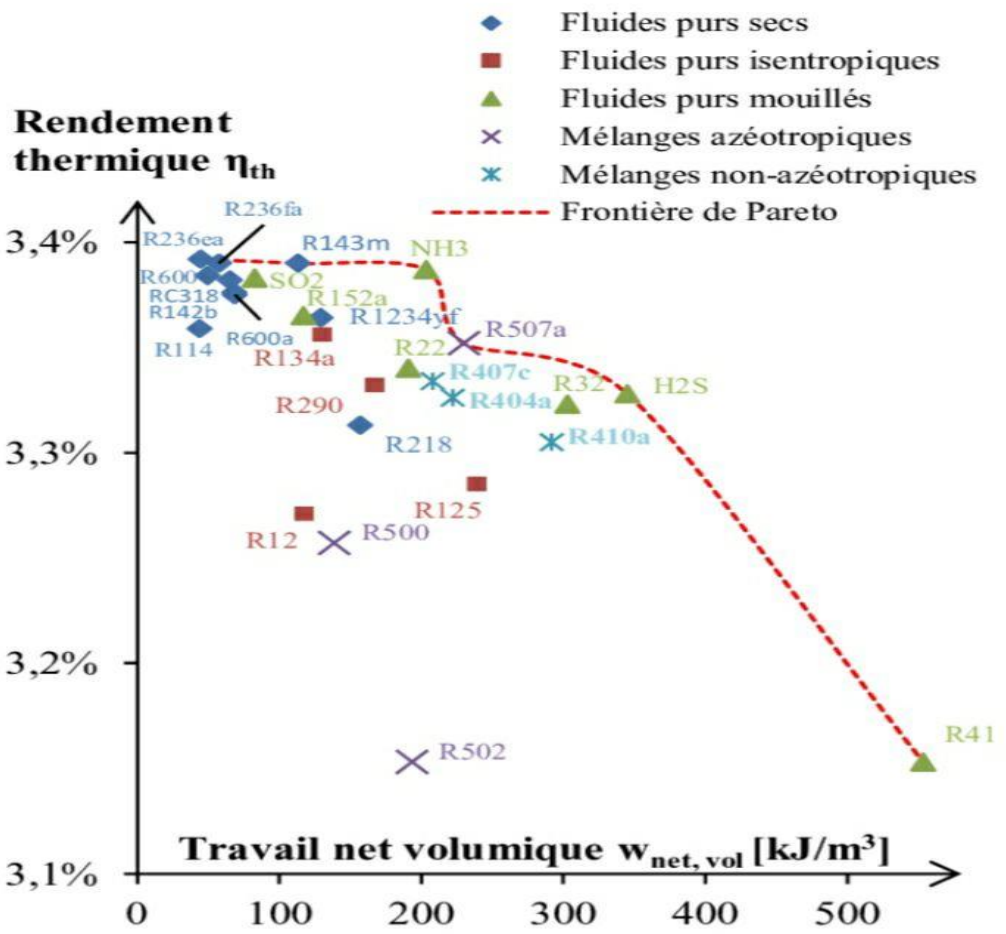



**Figure II.2** : Représentation du travail net volumique et du rendement thermique de cycle pour 27 fluides de travail [38]

### II.4.1. Les mélanges azéotropiques

Un mélange azéotropique est un mélange où la phase vapeur a la même composition que la phase liquide en équilibre, conduisant à des points d'ébullition et de rosée isobares au point d'azéotrope. Ces propriétés sont cruciales en génie chimique et en procédés de séparation, où la distillation azéotropique est utilisée pour séparer les composants d'un azéotrope [39].

### II.4.2. Les mélanges zéotropiques

Ce sont intégrés aux cycles ORC afin d'améliorer les échanges thermiques aux sources de chaleur, ce qui accroît le rendement de conversion du cycle. Ils permettent aussi de formuler un fluide de travail efficace, performant et respectueux de l'environnement. Des recherches ont confirmé que l'utilisation de mélanges zéotropiques dans les cycles ORC représente une solution très prometteuse. Ces mélanges se caractérisent par des compositions différentes entre la phase vapeur et liquide lors de leur coexistence, phénomène désigné sous le terme de glissement de température [39].

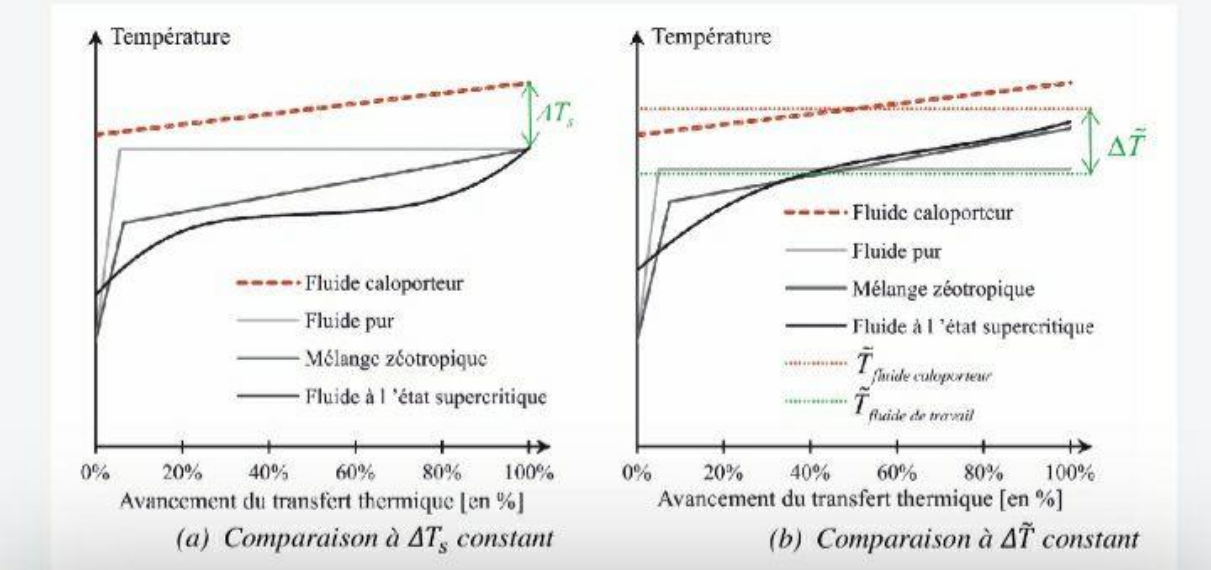



**Figure II.3 :** Evolution des Températures dans un évaporateur pour trois types de fluide : un fluide pur, un mélange zéotropique et un fluide pur à l'état supercritique [40]

### II.4.3. La différence entre les mélanges azéotropique et zéotropique :

Le mélange zéotropique contient des concentrations inégales de phase liquide et de vapeur. Cette propriété du mélange provoque une augmentation de la température pendant le changement de phase. Contrairement à un mélange azéotrope, le diagramme T-S d'un Le zéotrope montre une non-linéarité éminente [41].

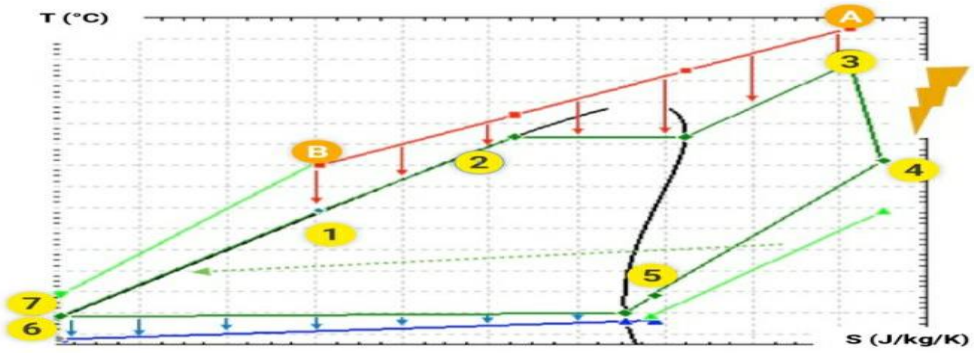



**Figure II.4** : Diagramme en T du système ORC Utilisant un fluide de travail pur [42]

## II.5. Critères de sélection du fluide de travail organique :

L'efficacité des cycles Rankine organiques est étroitement liée aux critères de sélection du milieu de travail, une mauvaise sélection du fluide de travail peut réduire l'efficacité de l'unité de production. En plus d'autres critères liés à la protection de l'environnement et à la sécurité publique, plusieurs critères de sélection ont été proposés, tels qu'une simple analyse des propriétés thermodynamiques et des critères thermodynamiques pour sélectionner des fluides de travail adaptés aux cycles sous-critiques.

### II.5.1. Fluide de travail idéal

Badr et al.[ 43] ont réalisé une étude initiale sur la sélection des fluides de travail pour un cycle organique de Rankine (ORC), abordant les caractéristiques idéales que ces fluides devraient présenter. Ils ont constaté qu'aucun fluide ne satisfaisait tous les critères requis, laissant souvent le choix du fluide à la discrétion du concepteur en fonction de ses propres critères de sélection. Les propriétés souhaitées discutées comprenaient :

- Le fluide de travail doit être efficace pour convertir la chaleur d'entrée en puissance de manière optimale dans le cycle thermique.
- Il est recommandé de maintenir une pression d'évaporation modérée pour éviter les contraintes mécaniques excessives.
- La pression de condensation doit être maintenue au-dessus de la pression atmosphérique pour éviter le fonctionnement du condenseur sous vide, assurant ainsi la sécurité et l'efficacité économique.

- Les pressions recommandées dans les échangeurs de chaleur sont supérieures à un bar pour les condenseurs et inférieures à 25 bars pour les évaporateurs.
- Le point triple du fluide doit être considérablement inférieur à la température ambiante minimale souhaitée pour éviter sa solidification à tous les points de fonctionnement du système.
- Un fluide de travail idéal présente une faible viscosité, une chaleur latente de vaporisation élevée et une conductivité thermique élevée pour minimiser les pertes de charge et maximiser le taux d'échange thermique dans les échangeurs.
- Des volumes spécifiques de vapeur et de liquide faibles sont préférables pour influencer positivement les taux de transfert de chaleur et réduire la taille et le coût du détendeur.
- La pente de la ligne de vapeur saturée doit être proche de la verticale.
- Le fluide doit être non corrosif et chimiquement stable à toutes les températures du système, avec une résistance à la décomposition thermique.
- Des caractéristiques comme la non-toxicité, l'ininflammabilité, la non- explosivité et la non-radioactivité sont également souhaitables.
- Bonnes propriétés de lubrification et faible coût avec une grande disponibilité sont également des critères importants.

### II.5.2. Critères de sélection de fluide

Le choix du fluide de travail le plus adapté dépend principalement de la température de la source de chaleur et adapté dépend principalement de la température de la source de chaleur et du dissipateur thermique. Pour chaque niveau de température, plusieurs options peuvent présenter une corrélation favorable entre les températures de la source de chaleur et du puits de chaleur, ainsi que les conditions aux limites du cycle. Sélectionner un fluide de travail approprié est complexe, car cela implique de trouver un équilibre entre les exigences thermodynamiques et des considérations de sécurité, environnementales et économiques. Pour identifier les meilleurs candidats, il est nécessaire de prendre en compte les critères suivants [44] :

#### II.5.2.1. Caractéristiques thermodynamiques

Les propriétés thermodynamiques revêtent une importance capitale dans la conception des cycles organiques de Rankine, visant à optimiser l'utilisation de l'énergie et à minimiser les pertes. Voici quelques points clés à prendre en compte :

- Maximiser la puissance de sortie nette, l'efficacité thermique et l'efficacité de la seconde loi pour un dissipateur thermique et une source de chaleur donnés. Il est crucial de maintenir une pression de condensation supérieure à la pression atmosphérique pour éviter les fuites.
- S'assurer que la pression critique du fluide de travail dans les cycles sous-critiques dépasse la pression dans l'évaporateur.
- Gérer la densité de vapeur pour influencer le volume spécifique et le débit volumétrique, ce qui peut avoir un impact sur la taille et le coût des composants ainsi que sur la perte de charge dans les échangeurs de chaleur.
- Sélectionner le type de fluide de travail (sec, isentropique, humide) en fonction des exigences pour éviter les problèmes de formation de gouttes à la fin du processus d'expansion.
- Favoriser une grande variation d'enthalpie dans la turbine pour augmenter le travail net.
- Utiliser des fluides présentant un coefficient de chaleur convective élevé, une conductivité thermique élevée et une capacité calorifique élevée pour améliorer le transfert de chaleur et la récupération d'énergie.
- Veiller à ce que le fluide de travail soit thermiquement et chimiquement stable pour assurer la fiabilité du système [45].

### II.5.2.2. Propriétés de transfert de chaleur

Les caractéristiques de transfert de chaleur sont essentielles lorsqu'on conçoit des échangeurs de chaleur. Une valeur élevée de chaleur spécifique (Cp) permet au fluide de travail d'absorber efficacement l'énergie thermique de la source de chaleur, ce qui améliore le profil de température et l'efficacité globale des échangeurs. De nombreux facteurs, tels que la conception du système, les débits et les matériaux, influencent ce processus, tout comme les propriétés intrinsèques du fluide de travail, comme la conductivité thermique (k), la chaleur spécifique (CP) et la viscosité (μ). Ces propriétés sont cruciales pour déterminer les nombres de Prandtl, qui guident la conception des échangeurs de chaleur. Idéalement, le fluide de travail devrait avoir une viscosité minimale et des valeurs maximales de chaleur spécifique et de conductivité thermique [46].

### II.5.2.3. Critères environnementaux et de sécurité

Les critères environnementaux et de sécurité revêtent une importance cruciale dans le choix des fluides de travail. Cependant, de nombreux produits sont actuellement supprimés ou sur le point

de l'être en raison de leur potentiel élevé d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) et de réchauffement global (GWP). Bien que certains fluides présentent des propriétés thermodynamiques favorables, ils ont également des effets indésirables sur l'environnement et la sécurité [47]. D'après le règlement CE 2037/2000, de nombreux fluides de travail, tels que les réfrigérants CFC, HCFC et les halons, sont désormais interdits en raison de leur impact sur la couche d'ozone et sur le réchauffement climatique. Ce règlement concerne les utilisateurs, producteurs, fournisseurs, techniciens de maintenance et les personnes impliquées dans l'élimination de ces substances. Les fluides frigorigènes concernés sont principalement utilisés dans divers domaines tels que la réfrigération, la climatisation, la fabrication de mousse et la lutte contre les incendies.

### II.5.2.4. Tendances chimiques dans les fluides de travail

Selon le guide d'application AG 31-007 (2002) de McQuay International, les tendances observées lors de l'utilisation de différents éléments sont les suivantes :

- L'augmentation du carbone entraîne généralement une augmentation du poids moléculaire et du point d'ébullition.
- L'augmentation de l'azote rend généralement le composé plus réactif, ce qui peut entraîner des problèmes de toxicité et d'instabilité.
- L'augmentation de l'oxygène diminue généralement la stabilité atmosphérique, ce qui est bénéfique pour le GWP (Potentiel de Réchauffement Global) et l'ODP (Potentiel de Déplétion de l'Ozone), mais peut causer des 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 bénéfique pour le GWP et l'ODP, mais augmente l'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 à la place du carbone crée des produits chimiques réactifs et généralement toxiques.
- L'utilisation de silicium à la place du carbone crée des substances qui réagissent négativement avec l'eau et présentent des problèmes thermodynamiques [48].

## II.6. Études antérieures sur les fluides de travail mélangés

Les études antérieures sur les mélanges de fluides ont couvert une gamme étendue de sujets, notamment l'écoulement des fluides, leurs propriétés thermodynamiques et l'impact de la composition sur l'équilibre des mélanges. Par exemple, certaines recherches ont examiné l'influence des forages pétroliers inclinés sur la diffusion moléculaire, tandis que d'autres ont cherché à optimiser les performances des machines frigorifiques et des pompes à chaleur en prédisant les diagrammes de phases des mélanges. De plus, des travaux ont porté sur les mélanges zéotropes dans les cycles de réfrigération, analysant leurs caractéristiques et leurs effets sur les composants mécaniques. Ces études ont considérablement enrichi notre compréhension des mélanges de fluides et de leurs applications dans divers secteurs industriels [49].

## II.7. Conclusion

Le fluide de travail est essentiel au bon fonctionnement du cycle organique de Rankine (ORC), convertissant la chaleur en électricité par le biais de variations de pression et de température. Du stade d'évaporation à celui de condensation, le fluide subit des transformations cruciales. Son choix est donc déterminant, devant s'adapter aux spécificités de la source de chaleur, aux conditions ambiantes et aux performances requises du système.

# *Chapitre III*

# *Analyse Exergo-environnmentale des systèmes énergétiques*

## III.1. Introduction

L'économie d'énergie est au cœur de chaque unité et processus, une notion fondamentale de la thermodynamique. Selon la première loi de la thermodynamique, l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais elle peut être transformée d'une forme à une autre. Pourtant, chaque processus comporte des phénomènes irréversibles qui entraînent une perte de qualité énergétique. C'est là que la deuxième loi de la thermodynamique entre en jeu, révélant que l'énergie se dégrade inévitablement sous forme d'entropie. Cette dégradation se traduit par une augmentation de l'entropie du système, signifiant la perte d'exergie, une mesure de l'énergie utile.
Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux de l'exergie, un outil essentiel pour la modélisation et l'optimisation thermodynamique et environnementale des systèmes énergétiques.

## III.2. Approche exergetique

L'analyse exergétique, constitue une méthode thermodynamique cruciale pour évaluer la qualité et l'exploitabilité de l'énergie. Au cœur de cette approche se trouve le concept d'exergie, qui représente la quantité maximale de travail utile pouvant être extraite d'un système thermodynamique donné [50].

### III.2.1. Exergie

Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs définitions de l'exergie d'un système quelconque. Nous retiendrons la suivante « l'exergie d'une certaine quantité de matière contenue dans un système est une mesure du potentiel de production (ou de réception) d'un travail maximal (ou minimal) par le super système (constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant ». Rivero–Rodriguez énonce cinq propriétés de l'exergie qui se résument ainsi :

- L'exergie d'un système représente l'énergie nette (utile) qui peut être extraite de l'ensemble système-environnement en amenant cet ensemble à l'équilibre.
- Elle constitue la partie de l'énergie qui, dans un environnement spécifique, peut être transformée en d'autres formes d'énergie nobles.

- L'exergie d'un système mesure la capacité du système à induire un changement.
- Elle évalue la qualité intrinsèque de l'énergie contenue dans le système.

- L'exergie représente le potentiel maximal de travail du système par rapport à son environnement [51].

### III.2.2. Différentes formes d'exergie

Comme l'énergie, l'exergie d'un flux de matière peut être divisée en différentes composantes. Cependant, cela exclut les effets nucléaires, magnétiques, électriques et de tension superficielle [52]. Selon Szargut et ses collègues [53], l'exergie (Ex) est définie sous différentes formes, constituant une grandeur extensive additive.

$$Ex = Ex_c + Ex_p + Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (1)$$

Avec :

$Ex_c$: exergie cinétique

$Ex_p$ : exergie potentielle

$Ex_{ph}$: exergie physique

$Ex_{ch}$: exergie chimique

### III.2.3. Bilan d'exergie

L'analyse exergétique fournit une approche comptable qui intègre à la fois le premier et le deuxième principe de la thermodynamique. Cette méthode comptable est essentielle pour évaluer à la fois qualitativement et quantitativement les pertes d'énergie. L'établissement d'un bilan d'exergie en régime permanent ressemble à celui d'un bilan d'énergie, avec une distinction cruciale : l'énergie est conservée tandis que l'exergie peut être dégradée, nécessitant ainsi l'inclusion d'un terme pour l'exergie dégradée dans le bilan. La formule générale qui exprime le bilan exergétique appliqué à un volume de contrôle en régime permanent (figure III.1) est donnée par l'équation suivante [16] :

$$\sum_e \dot{m}_e \ ex_e - \sum_s \dot{m}_s \ ex_s + \sum_k (1 - \frac{T_0}{T_k})\dot{Q}_k - \dot{W} - \dot{E}x_D = 0 \quad (2)$$

$\sum_e \dot{m}_e \ ex_e$ : somme des flux exergetiques entrant du volume de contrôle.

$\sum_s \dot{m}_s \ ex_s$ : somme des flux exergetiques sortant du volume de contrôle.

$\sum_k (1 - \frac{T_0}{T_k})\dot{Q}_k$ : exergie fournie par la source de chaleur.

$\dot{W}$: exergie associée au travail mécanique.

$\dot{E}x_D$ : l'exergie détruite en raison des différentes irréversibilités.

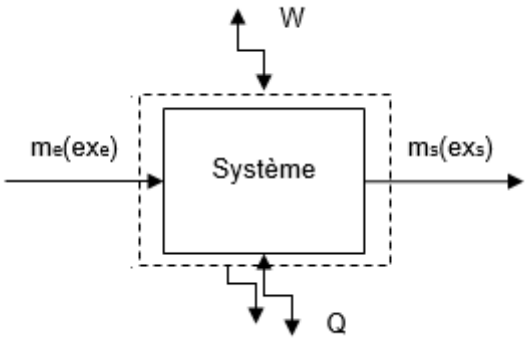



**Figure III.1 :** Schéma représentatif d'un système ouvert [16]

### III.2.4. Critères d'évaluation exergetique

- **Rendement Exergétique**

Le rendement exergétique exprime le rapport entre l'exergie utile (Exutile) et l'exergie entrante (Exentrante).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{utile}}{\sum_e \dot{E}x_e} \quad (3)$$

### III.3 Approche exergo-environnmentale

L'approche exergo-environnmentale constitue une méthodologie avancée d'analyse et d'évaluation des systèmes, combinant les principes de l'exergie et de l'analyse du cycle de vie (ACV). Son objectif principal est de détecter et de réduire les impacts environnementaux d'un système tout en optimisant l'exploitation de ses ressources [54].

### III.3.2 Bilan exergo-environnmentale

En régime stationnaire, Le bilan exergo-environnmentale d'un composant (k) peut être décrit comme suit :

$$\sum_{s} \dot{B}_{s,k} + \dot{B}_{W,k} = \dot{B}_{q,k} + \sum_{e} \dot{B}_{e,k} + \dot{Y}_k \quad (4)$$

$$\dot{B}_j = b_j \, \dot{Ex}_j \quad (5)$$

Avec :

$\dot{Y}$ : impact environnemental d'un composant (k) du système qui est déterminé par LCV.

$\dot{B}$ : impact environnemental exprimé en point de l'éco-indicateur par unité de temps (Pts/s ou mPt/s).

### III.3.3 Analyse de cycle de vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode standardisée visant à examiner les aspects environnementaux et les impacts potentiels sur l'ensemble du cycle de vie d'un système, qu'il s'agisse d'un procédé, d'un produit ou d'un service. Cela englobe l'extraction et le traitement des matières premières, la transformation, le transport et la distribution, la consommation, le recyclage, l'élimination et la gestion des déchets associés. Les objectifs de l'ACV incluent l'identification des étapes du processus ayant le plus grand impact environnemental, l'orientation dans le choix des sources d'énergie, des matières premières et des filières de traitement des rejets, ainsi que la réalisation d'études comparatives entre des systèmes ayant des fonctions similaires [51].

### III.3.4 Critère d'évaluation exergo-environnmentale

La performance environnementale du système analysé peut être évaluée en utilisant les variables exergo-environnmentale. Ces variables sont définies pour chaque composant du système comme :

$$b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{Ex}_{F,k}} \quad (6)$$

$$b_{P,k} = \frac{B_{P,k}}{\dot{Ex}_{P,k}} \quad (7)$$

$$\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} \dot{Ex}_{D,k} \quad (8)$$

## I.4. Importance de l'optimisation exergo-environnmentale

L'optimisation exergo-environnmentale représente une approche globale visant à améliorer simultanément l'efficacité énergétique et la performance environnementale d'un système. Elle se fonde sur deux piliers interdépendants :

- L'analyse exergetique : Cette discipline utilise le concept d'exergie pour identifier les sources d'inefficacité et les gaspillages dans un système. En analysant les flux d'exergie, elle permet de déterminer les points d'amélioration afin de maximiser l'utilisation de l'énergie et de minimiser les pertes.

- L'analyse du cycle de vie (ACV) : Cette méthode évalue l'impact environnemental d'un système tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la fin de vie. Elle prend en compte les émissions polluantes, la consommation de ressources, ainsi que les impacts sur la santé humaine et l'écosystème.

L'optimisation exergo-environnmentale combine ces deux approches pour optimiser les systèmes, réduisant ainsi leur impact environnemental tout en améliorant leur performance énergétique.

## III.5. Conclusion

L'analyse exergo-environnmentale combine l'évaluation de l'efficacité énergétique d'un système par le biais de l'analyse exergétique avec l'évaluation de son impact environnemental sur l'intégralité de son cycle de vie. Cette approche offre un outil puissant pour évaluer la performance environnementale des systèmes thermodynamiques, en intégrant à la fois les aspects énergétiques et environnementaux dans une perspective globale.

# *Chapitre IV*

# *Modélisation et optimisation multi-objective d'un cycle organique de Rankine avec des fluides de travail mélangés*

## IV.1 Introduction

Ce chapitre traite de la modélisation thermodynamique et environnementale d'un cycle organique de Rankine, avec pour objectif l'optimisation d'une configuration spécifique utilisant un mélange de fluides organiques pour récupérer l'énergie des rejets thermiques d'une cimenterie. Le modèle développé repose sur l'analyse des bilans thermiques, massiques, énergétiques et Exergo-environnementaux et inclut la création d'un code de calcul MATLAB dédié pour faciliter les différentes étapes de la modélisation.

## IV.2 Description du Système ORC étudié

Afin de maximiser l'utilisation des ressources énergétiques à basse température et de renforcer l'efficacité des cycles organiques de Rankine, nous présentons un système ORC innovant alimenté par deux sources d'énergie distinctes : la chaleur résiduelle et l'énergie solaire. Cette configuration unique nous permet d'explorer les effets d'une source de chaleur supplémentaire sur les performances globales du cycle ORC, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour une valorisation plus efficace et durable de ces ressources énergétiques.

Le fonctionnement de ce système diffère légèrement de celui d'un système ORC conventionnel, principalement dans les processus de chauffage. Ici, le fluide de travail est chauffé à la fois par la chaleur du gaz provenant du préchauffeur et par l'énergie solaire. Nous avons opté pour l'utilisation de capteurs solaires cylindro-paraboliques (PTC) afin de capter le rayonnement solaire et de transférer la chaleur vers le système. Les PTC ont été choisis pour leur fiabilité et leur capacité à fonctionner à des températures pouvant atteindre 400°C, en faisant ainsi un choix adapté à notre application. Un capteur cylindro-parabolique se compose d'un réflecteur parabolique, d'une structure métallique et d'un tube récepteur, le tout enveloppé dans une gaine transparente en verre (voir figure IV.2). Le réflecteur collecte le rayonnement solaire, qui est ensuite concentré par le miroir vers le tube récepteur, où circule un fluide caloporteur. Ce fluide est chauffé lors de son passage à travers le récepteur et est ensuite utilisé comme source de chaleur. Dans cette étude, le Therminol-VP1 est choisi comme fluide caloporteur. Il s'agit d'une huile synthétique présentant d'excellentes propriétés de transfert de chaleur et une régulation de température précise. De ce fait, il est largement utilisé dans divers systèmes énergétiques exploitant des capteurs cylindro-paraboliques [55-57].

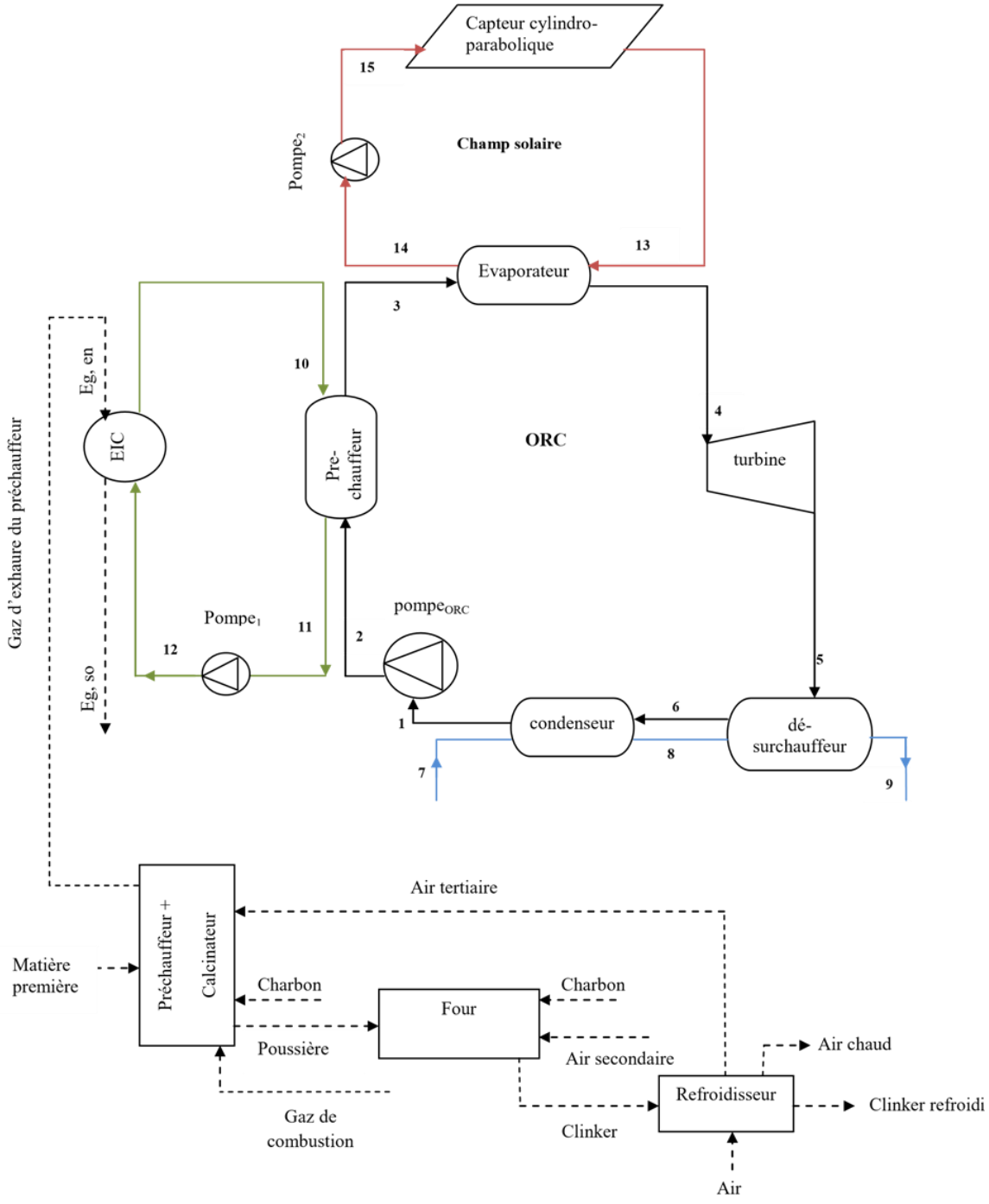



**Figure IV.1 :** Schéma descriptif du système ORC proposé [16].

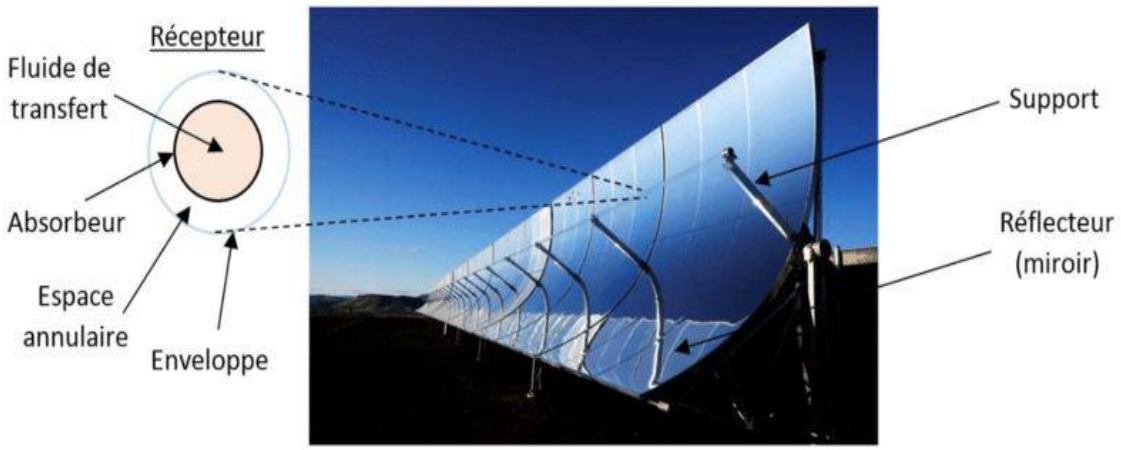



**Figure IV.2** : Description d'un collecteur cylindro-parabolique

## IV.3 Sélection des fluides de travail

Le choix du fluide de travail pour le cycle organique de Rankine est d'une importance capitale. Une vaste documentation existe sur la sélection des fluides de travail pour l'élaboration de systèmes ORC [57]. Les fluides organiques secs et isentropiques sont préférables pour les systèmes ORC en raison de la détente qui se produit dans une région monophasique, évitant ainsi une condensation précoce dans la turbine, contrairement aux fluides humides. Le choix du fluide de travail dépend également de la température (classe) de la source de chaleur. Les fluides à température critique élevée ou à point d'ébullition élevé, comme le toluène, le benzène, et le cyclohexane, sont généralement privilégiés lorsque la source de chaleur atteint des températures élevées, souvent près de 300°C. En se basant sur ces considérations, un mélange zéotropique de deux fluides organiques (50% de Benzène et 50% de toluène) a été choisi comme fluide de travail pour le cycle organique de Rankine dans le cadre de cette étude. Les propriétés des fluides sélectionnés sont résumées dans le tableau ci-dessous [16].

**Tableau IV.1 :** Propriétés des fluides de travail.

| Fluide | Masse Moléculaire (g/mole) | Température Critique (°C) | Pression Critique (Bar) | Type |
|---|---|---|---|---|
| Benzène | 78.11 | 288.5 | 48.90 | Isentropique |
| Toluène | 92.15 | 320.73 | 42.40 | Isentropique |

## IV.4 Modélisation exergo-environnmentale du système ORC

Chaque composant du système sera analysé en détail, avec des équations de masse et d'énergie ainsi qu'un bilan exergétique et des bilans environnementaux pour évaluer le rendement exergétique, l'irréversibilité du système et son impact environnemental. Pour simplifier l'analyse, certaines hypothèses simplificatrices tirées de la littérature [58] seront prises en compte, notamment :

- Le fonctionnement du système est considéré en régime permanent.
- Les énergies cinétiques et potentielles sont négligées.
- Les pertes de pression dans les conduites de raccordement sont également négligées.

### IV.4.1. Bilan massique

Le bilan massique s'écrit comme :

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{hto} \tag{9}$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} = \dot{m}_{hto} \tag{10}$$

### IV.4.2. Bilan énergétique et exergetique

- **Préchauffeur**

$$Q_{pre} = \dot{m}_{ft}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{hto} Cp_{hto}(T_{10} - T_{11}) \tag{11}$$

$$\dot{E}x_{D,pre} = (\dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{11}) + (\dot{E}x_2 - \dot{E}x_3) \tag{12}$$

- **Evaporateur**

$$Q_{pre} = \dot{m}_{ft}(h_4 - h_3) = \dot{m}_{hto} Cp_{hto}(T_{13} - T_{14}) \tag{13}$$

$$\dot{E}x_{D,pre} = (\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14}) + (\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4) \tag{14}$$

- **Echangeur interne de chaleur (IHE)**

$$Q_{ihe} = \dot{m}_{hto} Cp_{hto}(T_{10} - T_{12}) = \dot{m}_g Cp_g(T_{g,e} - T_{g,s}) \quad (15)$$

$$\dot{E}x_{D,ihe} = (\dot{E}x_{g,e} - \dot{E}x_{g,s}) + (\dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{10}) \quad (16)$$

- **Pompe 1 (HTO)**

$$\dot{W}_{p\,1,hto} = \dot{m}_{hto} Cp_{hto}(T_{12} - T_{11}) \quad (17)$$

$$\dot{E}x_{D,p,1,hto} = \dot{W}_{p.1,hto} + \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{12} \quad (18)$$

- **Pompe 2 (HTO)**

$$\dot{W}_{p\,2,hto} = \dot{m}_{hto} Cp_{hto}(T_{15} - T_{14}) \quad (19)$$

$$\dot{E}x_{D,p,2,hto} = \dot{W}_{p.2,hto} + \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{15} \quad (20)$$

- **Turbine**

$$\dot{W}_{tur} = \dot{m}_{ft}(h_4 - h_5) \quad (21)$$

$$\dot{E}x_{D,tur} = -\dot{W}_{tur} + \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 \quad (22)$$

- **Collecteur**

$$Q_{tot} = A_{ap} F_r\, S\, Col_r \quad (23)$$

$$\dot{E}x_{D,coll} = \dot{E}x_{coll} + \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{13} \quad (24)$$

### IV.4.3. Bilan exergo-environnmentale

Les équations de bilan de l'impact environnemental et les équations auxiliaires pour ce système sont données ci-dessous.

- **Pompe ORC**

$$\dot{B}_1 + \dot{B}_{P,ORC} + \dot{Y}_{P,ORC} = \dot{B}_2 \quad (25)$$

- **Préchauffeur**

$$\dot{B}_2 + \dot{B}_{10} + \dot{Y}_{Pre} = \dot{B}_3 + \dot{B}_{11} \quad (26)$$

$$\dot{B}_{10} = \dot{B}_{11}$$

- **Evaporateur**

$$\dot{B}_3 + \dot{B}_{13} + \dot{Y}_{eva} = \dot{B}_4 + \dot{B}_{14} \quad (27)$$

$$\dot{B}_{13} = \dot{B}_{14}$$

- **Turbine**

$$\dot{B}_4 + \dot{Y}_{tur} = \dot{B}_5 + \dot{B}_{tur} \quad (28)$$

$$\dot{B}_4 = \dot{B}_5$$

- **Désurchauffeur**

$$\dot{B}_5 + \dot{B}_{12} + \dot{Y}_{des} = \dot{B}_6 + \dot{B}_{13} \quad (29)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{B}_6$$

- **Condenseur**

$$\dot{B}_6 + \dot{B}_{11} + \dot{Y}_{con} = \dot{B}_1 + \dot{B}_{12} \quad (30)$$

$$\dot{B}_1 = \dot{B}_6$$

- **Echangeur interne de chaleur**

$$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{g,e} + \dot{Y}_{IHE} = \dot{B}_{10} + \dot{B}_{g,s} \quad (31)$$

$$\dot{B}_{g,e} = \dot{B}_{g,s}$$

- **Pompe 1 (HTO)**

$$\dot{B}_{11} + \dot{B}_{P,1,HTO} + \dot{Y}_{P,HTO} = \dot{B}_{12} \quad (32)$$

- **Pompe 2 (HTO)**

$$\dot{B}_{14} + \dot{B}_{P.2,HTO} + \dot{Y}_{P,HTO} = \dot{B}_{15} \quad (33)$$

- **Collecteur**

$$\dot{B}_{15} + \dot{B}_{coll} + \dot{Y}_{coll} = \dot{B}_{13} \quad (34)$$

$$\dot{B}_{coll} = 0$$

### IV.4.4. Performances du système ORC

- **Rendement exergetique**

$$\dot{\eta}_{ex} = \frac{\dot{W}_{nette}}{\dot{E}x_{g,e} + Ex_{coll}} \quad (35)$$

- **Impact environnemental de la puissance produite**

$$b_{net,sys} = \frac{\dot{B}_{net}}{\dot{W}_{net}} \quad (36)$$

## IV.5 Etude paramétrique

Une analyse paramétrique a été réalisée pour examiner l'impact de certains paramètres opérationnels sur le rendement exergetique et l'impact environnemental du système ORC. Pendant cette étude, chaque paramètre examiné a été modifié individuellement tandis que les autres étaient maintenus constants. Les valeurs des principaux paramètres fixes utilisées pour la simulation et l'optimisation des cycles ORC sont répertoriées dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2** : Valeur des paramètres utilisés pour la simulation du système ORC [55,59,60-62].

| Paramètre | Valeur |
|---|---|
| Température de l'environnement (°C) | 25 |
| Pression de l'environnement (bar) | 1 |
| Température de gaz d'exhaure (°C) | 350 |
| Débit de gaz d'exhaure (kg/s) | 48.34 |
| Débit de fluide caloporteur (kg/s) | 25 |
| Efficacité isentropique de turbine (%) | 85 |
| Efficacité isentropique de pompe (%) | 70 |

| | |
|---|---|
| Débit massique du fluide caloporteur(kg/s) | 8 |
| Largeur de capteur (m) | 5.76 |
| Longueur du capteur (m) | 12.27 |
| Rayonnement solaire direct ($W/m^2$) | 850 |
| Efficacité du récepteur | 0.765 |
| Emissivité de l'enveloppe | 0.86 |
| Emissivité du tube récepteur | 0.15 |
| Constante de Stefan-Boltzmann ($W.m^{-2}.K^4$) | $5.6703 \times 10^{-8}$ |
| Diamètre intérieur de l'enveloppe (m) | 0.115 |
| Diamètre extérieur de l'enveloppe (m) | 0.121 |
| Diamètre intérieur du tube récepteur (m) | 0.045 |
| Diamètre extérieur du tube récepteur (m) | 0.070 |

### IV.5.1 Effet de la pression d'entrée de la turbine

La figure IV.3 illustre l'effet de la pression d'entrée de la turbine sur l'efficacité exergétique du système ORC utilisant le mélange Toluène/benzène (0.5/0.5). Comme le montre la figure IV.3, il est clair que l'efficacité exergétique du système ORC est influencée par la pression de la turbine : à mesure que cette pression augmente, l'efficacité exergétique a tendance à augmenter également. Ces résultats indiquent que l'augmentation de la pression de la turbine peut généralement contribuer à améliorer l'efficacité globale du système.

La figure IV.4 illustre l'effet de la pression d'entrée de la turbine sur l'impact environnemental du système ORC. Selon les résultats observés, lorsque la pression varie dans la plage de 4 à 14 bar, une augmentation modérée de l'impact environnemental est constatée. Cependant, au-delà de 15 bar, une augmentation significative de l'impact environnemental est remarquée.

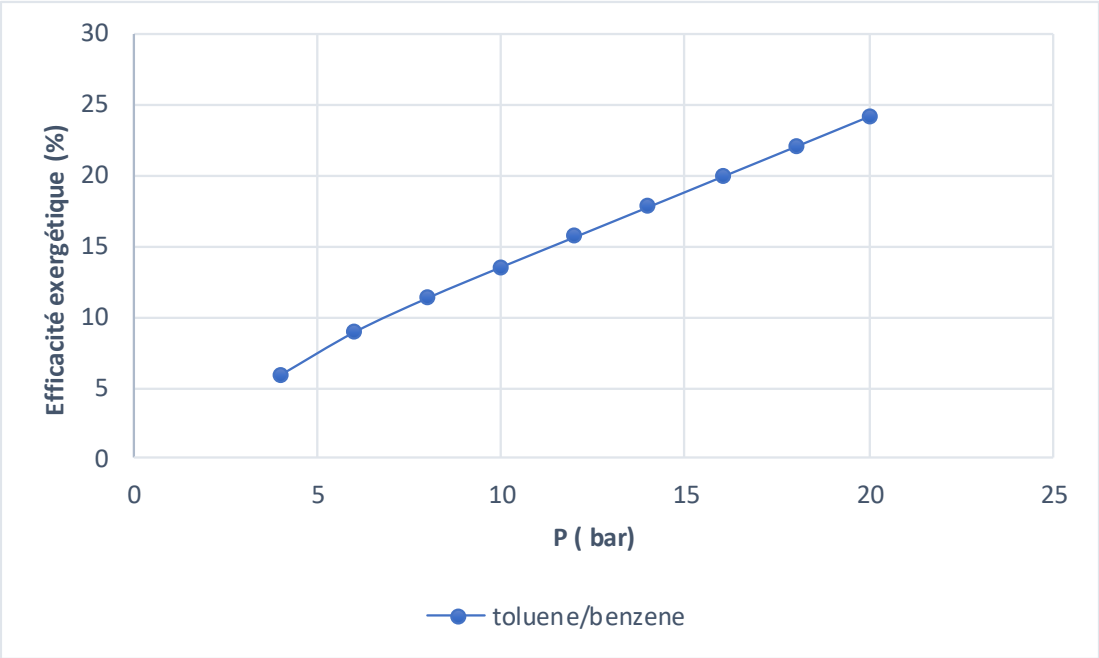



**Figure IV.3 :** Effet de la pression d'entrée de la turbine sur l'efficacité exergetique.

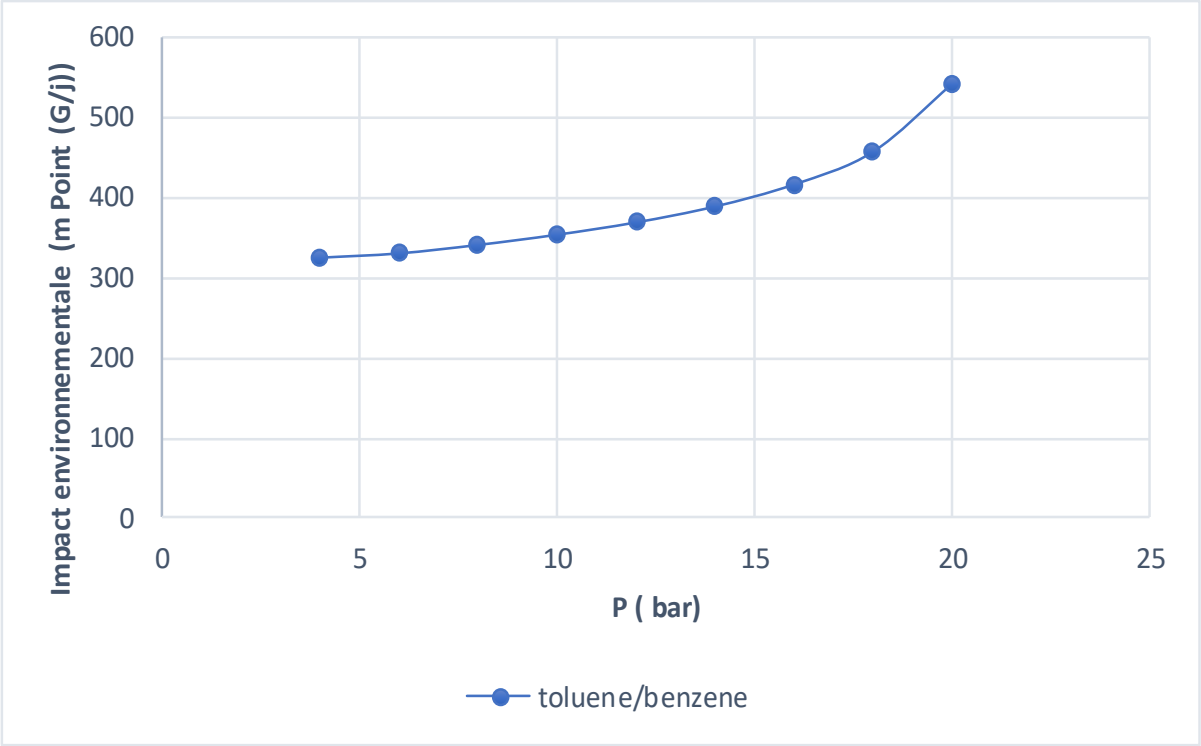



**Figure IV.4:** Effet de la pression d'entrée de turbine sur l'impact environnemental

### IV.5.2 Effet de la température du fluide caloporteur

La figure IV.5 offre une illustration de l'impact de la température du fluide caloporteur sur l'efficacité exergétique du système ORC. Il est notable que lorsque la température du fluide caloporteur augmente, l'efficacité exergétique du système ORC diminue, cette observation met en évidence l'influence significative de la variation de température sur l'efficacité exergétique du système.

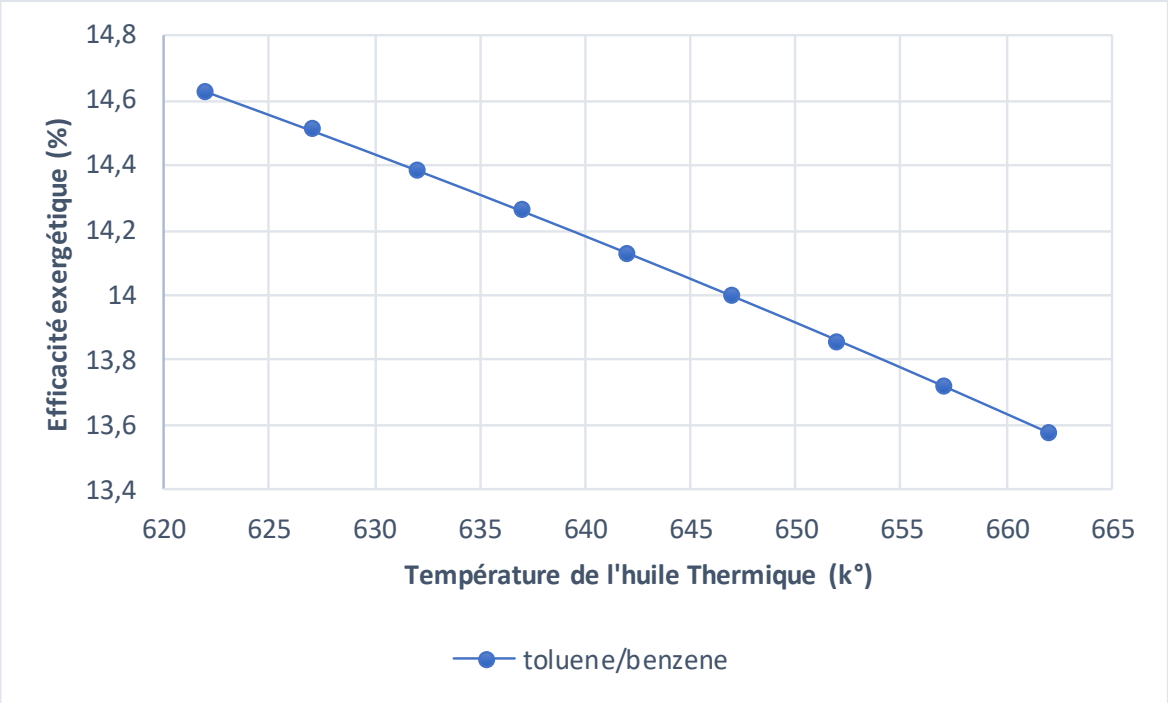



**Figure IV.5 :** Effet de la température du fluide caloporteur sur l'efficacité exergetique.

La figure IV.6 présente l'effet de la température du fluide caloporteur sur l'impact environnemental. Les résultats révèlent l'existence d'une valeur optimale de pression d'entrée de la turbine où l'impact environnemental du système est minimisé.

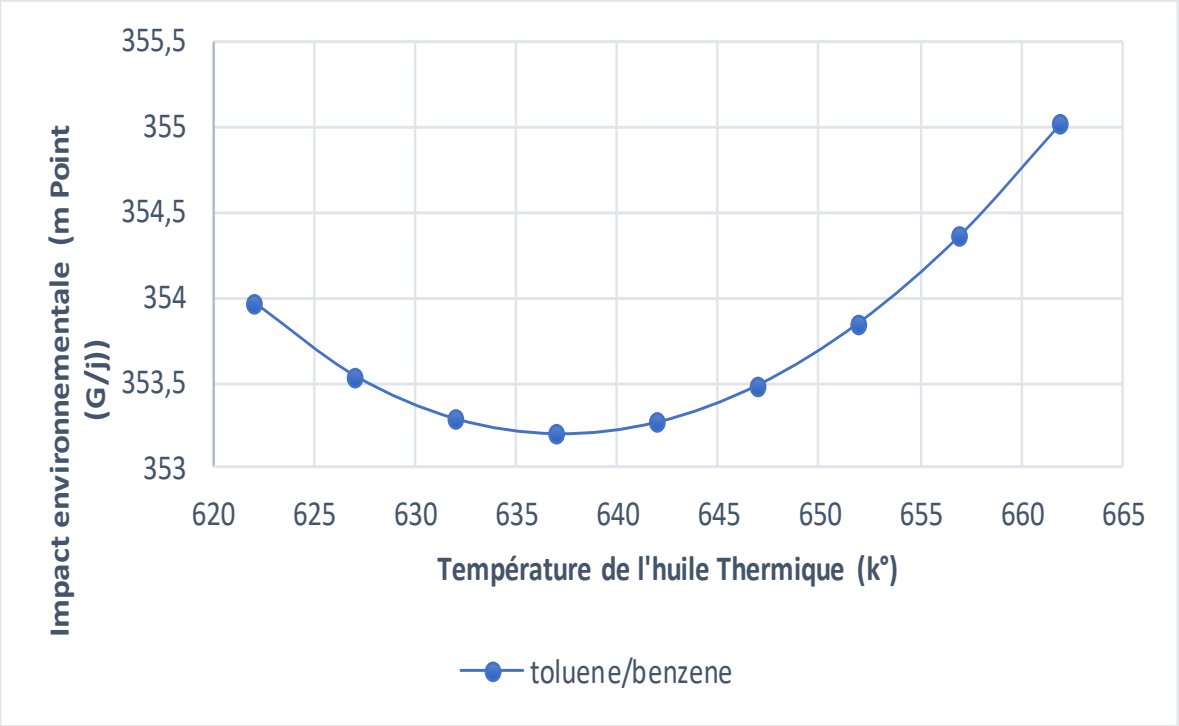



**Figure IV.6 :** Effet de la température du fluide caloporteur sur l'impact environnemental

### IV.5.3. Effet de point de pincement dans le condenseur

La figure IV.7 et IV.8 représentent l'impact de la température de pincement dans le condenseur sur l'efficacité exergétique et l'impact environnemental du système ORC. Aucune variation significative n'est constatée dans les résultats pour différentes températures de pincement, indiquant que ce paramètre n'a pas d'effet notable sur l'efficacité exergétique et l'impact environnemental du système.

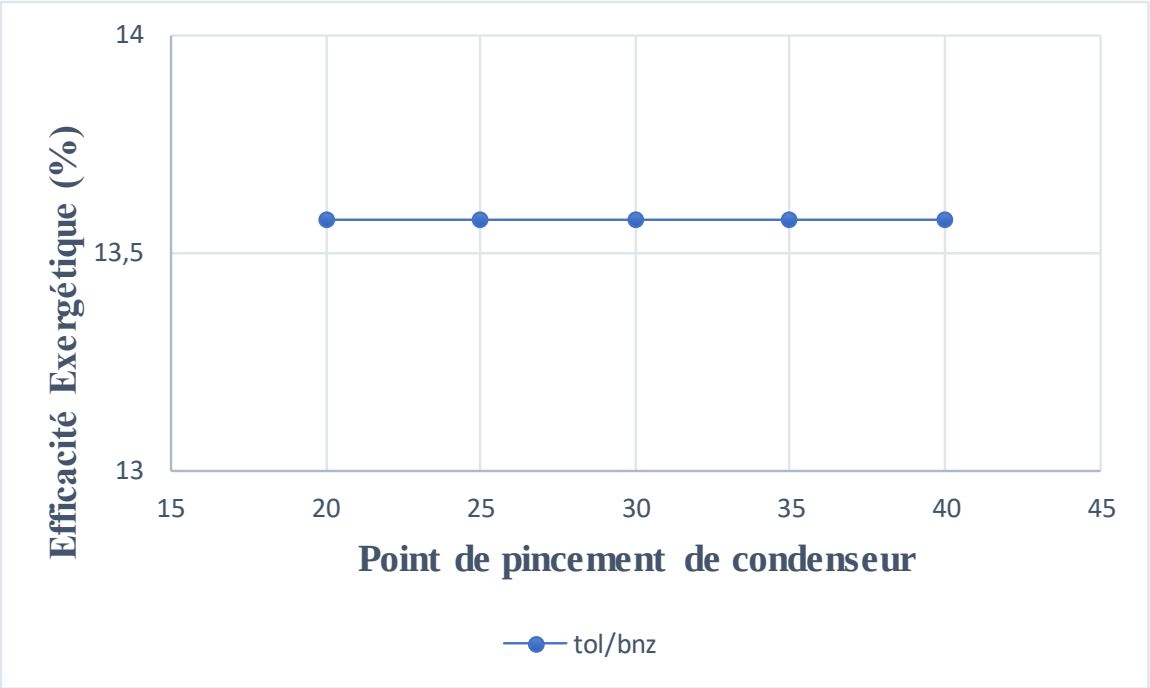



**Figure IV 7 :** Effet de point de pincement dans le condenseur sur l'efficacité exergétique.

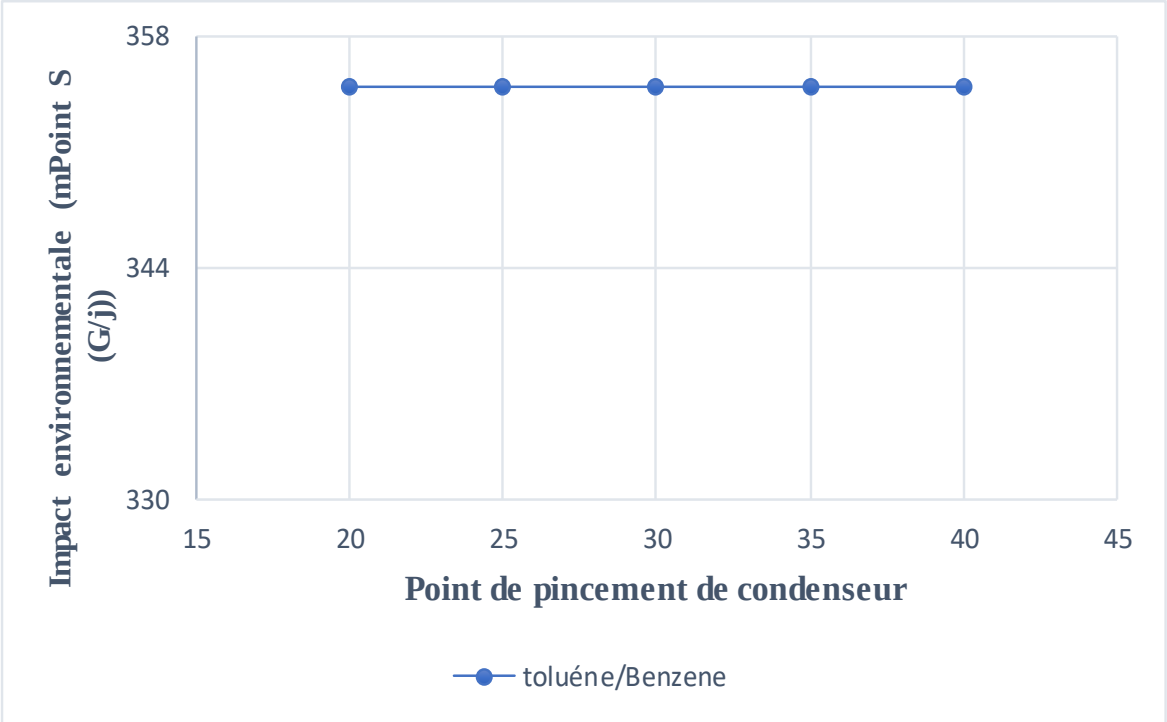



**Figure IV.8 :** Effet de point de pincement dans le condenseur sur l'impact environnemental.

## IV.6 Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif est une approche stratégique utilisée pour trouver des solutions qui équilibrent plusieurs objectifs concurrents ou contradictoires. Plutôt que de rechercher une unique solution optimale, cette méthode vise à identifier un ensemble de solutions, appelé ensemble Pareto optimal, où aucune solution ne peut être améliorée dans un objectif sans détériorer au moins un autre objectif. Cette approche est particulièrement pertinente dans les domaines où les décisions doivent prendre en compte plusieurs critères, souvent antagonistes. Par exemple, dans le cadre de l'étude mentionnée, les objectifs incluent l'efficacité exergétique à maximiser et l'impact environnemental de la puissance nette du système ORC à minimiser.

L'optimisation multi-objectif utilise des méthodes avancées telles que les algorithmes génétiques, les algorithmes évolutionnaires et les métaheuristiques pour explorer efficacement l'espace des solutions. Une fois les solutions Pareto optimales identifiées, le décideur analyse ces solutions en tenant compte des compromis entre les objectifs et des contraintes spécifiques, afin de prendre des décisions éclairées et de sélectionner la solution la plus adaptée à ses besoins et préférences.

### IV.6.1 Fonction objective

La fonction objective représente les critères ou les objectives à optimiser. Les fonctions objectives peuvent être exprimées comme suit :

- **Efficacité exergetique :**

$$\dot{\eta}_{ex} = \frac{\dot{W}_{nette}}{\dot{E}x_{g,e} + Ex_{coll}} \tag{37}$$

- **Impact environnemental de la puissance produite**

$$b_{net,sys} = \frac{\dot{B}_{net}}{\dot{W}_{net}} \tag{38}$$

### IV.6.2 Variables de décision

Les variables de décision représentent les paramètres que nous pouvons ajuster ou modifier dans un problème afin d'atteindre un objectif spécifique. Les variables de décision du système

ORC sont : la pression à l'entrée de la turbine ($P_4$), le point de pincement dans le condenseur $\Delta t_{con}$et la température du fluide caloporteur ($T_{13}$).

### IV.6.3 Résultats de l'optimisation multi-objectif

Dans le contexte de l'optimisation multi-objectif, il est crucial de noter que la résolution d'un problème ne se limite pas à une solution unique, mais englobe plutôt un ensemble de solutions qui représentent des compromis. Ce regroupement est généralement désigné sous le nom d'ensemble des solutions optimales de Pareto, comme illustré dans la figure IV.9 de notre étude. Dans les problèmes d'optimisation multi-objectif, chaque point sur le front de Pareto représente une solution optimale. Chacun de ces points est considéré comme étant acceptable et peut être sélectionné comme point de conception optimal. Dans le cadre de notre recherche, nous avons identifié 17 points optimaux, tous viables, offrant ainsi une diversité de compromis entre les objectifs étudiés.

Il est important de noter que les valeurs optimales obtenues pour l'efficacité exergétique s'échelonnent entre 6.1% et 6.25%, tandis que les valeurs optimales obtenues pour l'impact environnemental varient entre 316 m Pts/GJ et 321 m Pts/GJ.

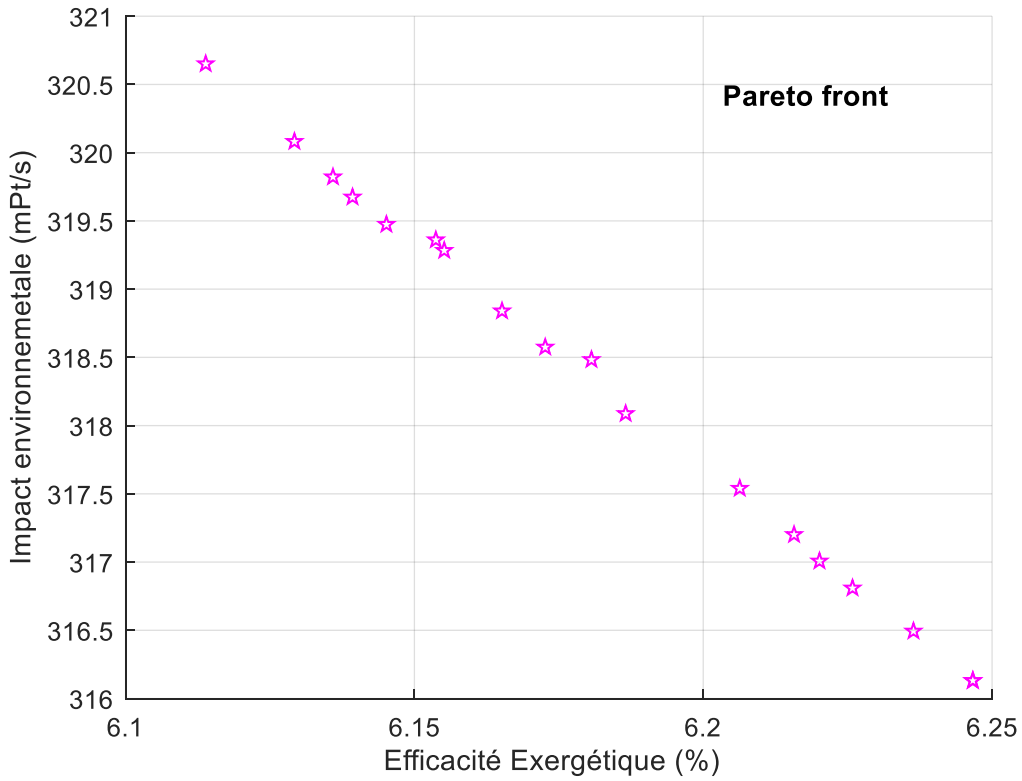



**Figure IV.9 :** Front de Pareto de l'optimisation multi-objectif

### IV.6.4 Sélection de la Solution Optimale du Front de Pareto

Il existe une pluralité de méthodes d'aide à la décision pouvant être mobilisées afin de sélectionner la solution optimale parmi les différents points du front de Pareto. Dans notre étude, nous faisons appel à la méthode FCPRN [63,64] pour extraire le point optimal final, celui représentant le meilleur compromis entre les deux objectifs considérés. Les résultats correspondant à l'optimal final sont indiqués dans le tableau IV.3.

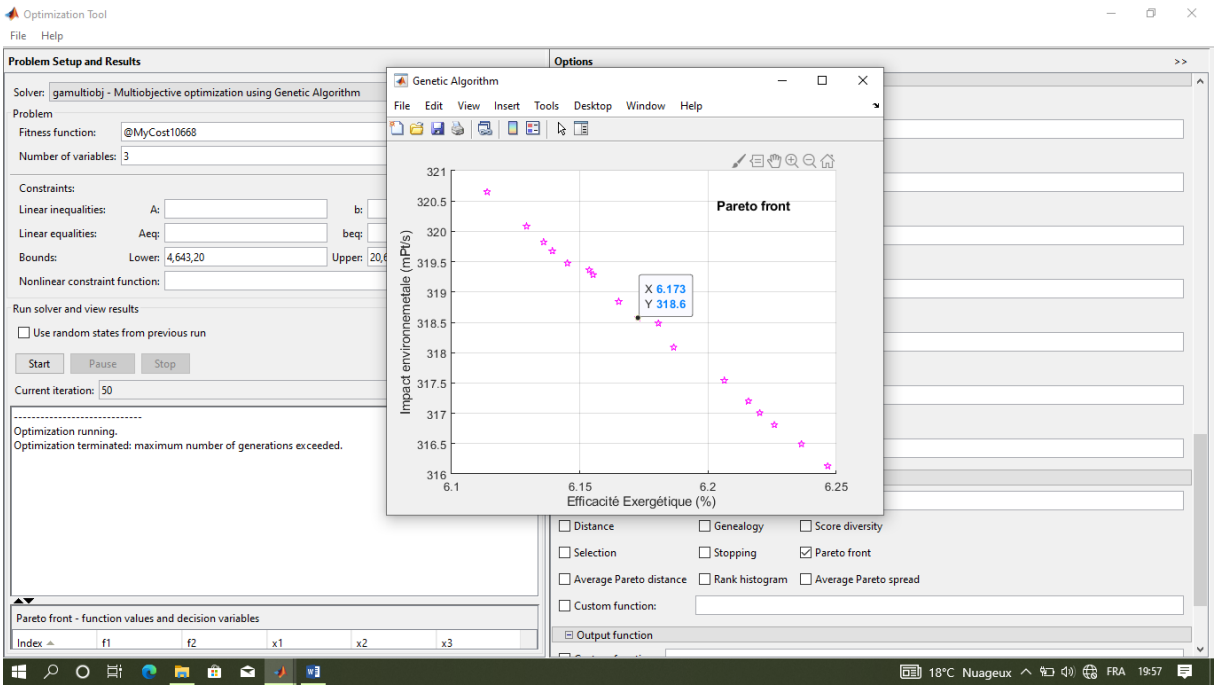



**Figure IV.10 :** Point optimal final du front de Pareto

Dans le cadre de la nouvelle étude portant sur le mélange benzène-toluène, une observation significative émerge quant à l'impact environnemental comparativement aux résultats antérieurs concernant les fluides purs. Alors que les données précédentes révélaient des valeurs d'efficacité exergétique plus élevées pour le benzène pur et le toluène pur, il est intéressant de noter que l'impact environnemental du mélange benzène-toluène est nettement amélioré. Avec un impact environnemental mesuré à 318.6 m Pts/GJ, le mélange présente une alternative plus écologique par rapport aux fluides purs. Cette constatation souligne l'importance de considérer

la composition des mélanges dans l'évaluation de leur performance énergétique et environnementale, et suggère des opportunités pour des solutions plus durables dans les applications industrielles.

**Tableau IV.3** : Valeurs optimales finales de paramètres de conception et des fonctions objectives.

| | Benzène/toluène | Benzène [16] | Toluène [16] |
|---|---|---|---|
| $\dot{\eta}_{ex}$ (%) | 6.18 | 19.09 | 17.54 |
| $b_{net,sys}$ (mPts/GJ) | 318.6 | 404.52 | 385.01 |
| $P_4$ (bar) | 4 | 16.05 | 13.37 |
| $T_{13}$ (°C) | 20.33 | 371.10 | 377.81 |
| $\Delta T_{con}$ (°C) | 374.8 | 29.05 | 29.55 |

## IV.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a traité de la modélisation thermodynamique et environnementale d'un cycle organique de Rankine visant à optimiser une configuration spécifique utilisant un mélange de fluides organiques. Nous avons développé un code MATLAB dédié pour faciliter cette modélisation. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses sur les performances du système et ouvrent la voie à des recherches futures dans le domaine de la récupération thermique et de l'optimisation des processus industriels.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

L'optimisation exergo-environnmentale des cycles organiques de Rankine solaires, utilisant des mélanges de fluides de travail, représente une voie prometteuse pour renforcer l'efficacité énergétique tout en atténuant l'impact environnemental. Cette approche combine une analyse approfondie de l'exergie avec une prise en compte des implications environnementales, permettant ainsi la conception de systèmes plus performants et durables.

En conclusion, notre étude s'est concentrée sur l'optimisation d'un système ORC utilisant un mélange zéotropique de benzène et de toluène (50%/50%) comme fluide de travail. En adoptant une approche d'optimisation multi-objectif, nous avons cherché à maximiser simultanément l'efficacité exergétique et à réduire l'impact environnemental du système.

Les résultats obtenus ont démontré le potentiel prometteur des mélanges zéotropiques dans l'amélioration des performances des cycles ORC, notamment en termes d'efficacité énergétique et d'empreinte environnementale. Plus spécifiquement, notre étude a révélé une nette amélioration de l'impact environnemental par rapport aux fluides purs, mettant ainsi en évidence l'importance de considérer ces mélanges dans la conception de systèmes énergétiques durables.

Cette recherche ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine de l'optimisation des cycles ORC, en mettant en avant l'utilisation des mélanges zéotropiques. En continuant à explorer cette approche, nous pourrons développer des solutions innovantes pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux contemporains, contribuant ainsi à la transition vers des systèmes énergétiques plus efficaces et respectueux de l'environnement.

# *Références bibliographiques*

## Références Bibliographiques

[1] Khennich, Mohammed, Jamel ORFI, and Jean-Sébastien PLANTE. Optimisation de cycles de puissance visant à récupérer et à valoriser les rejets thermiques industriels. Library and Archives Canada, Ottawa, 2012.

[2] Smith, Joseph Mauk. "Introduction to chemical engineering thermodynamics." (1950): 584.

[3] Le, Van Long. Étude de la faisabilité des cycles sous-critiques et supercritiques de Rankine pour la valorisation de rejets thermiques. Diss. Université de Lorraine, 2014.

[4] Bradu, Benjamin. "Réflexions sur la puissance motrice du feu, de Sadi Carnot." Bibnum. Textes fondateurs de la science (2009).

[5] Klein, Sanford, and Gregory Nellis. Thermodynamics. Cambridge University Press, 2011.

[6] Ghosh, Tushar K., and Mark A. Prelas, eds. Energy resources and systems: volume 1: fundamentals and non-renewable resources. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.

[7] Cengel, Yunus A., Michael A. Boles, and Mehmet Kanoğlu. Thermodynamics: an engineering approach. Vol. 5. New York: McGraw-hill, 2011.

[8] Glansdorff, P. Thermodynamique - Thermodynamique technique, Encyclopaedia UniversalisFrance, 1990 http://www.universalisedu.com/encyclopedie/thermodynamiquethermodynamique technique/ consulté le 27janvier 2014.

[9] Feidt, Michel. Energétique: Concepts et applications-Cours et exercices corrigés. Dunod, 2006.

[10] https://direns.minesparistech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-orc.html#:~:text=Les%20cycles%20organiques%20de%20Rankine,%C3%A0%20basse%20ou%20moyenne%20temp%C3%A9rature. (4 avril 2020).

[11] Danel, Quentin. Étude numérique et expérimentale d'un cycle de Rankine-Hirn de faible puissance pour la récupération d'énergie. Diss. Conservatoire national des arts et metiers-CNAM, 2016.

[12] Macchi, Ennio, and Marco Astolfi, eds. Organic rankine cycle (ORC) power systems: technologies and applications. Woodhead Publishing, 2016.

[13] Quoilin, Sylvain, et al. "Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles." Applied thermal engineering 31.14-15 (2011): 2885-2893.

[14] ADEME - Cycle Organique de Rankine ORC: https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/195-cycle-organique-de-rankine-orc.html, (Mars 2024).

[15] Landelle, Arnaud. Experimental and numerical study of transcritical Organic Rankine Cycles for low-grade heat conversion into electricity from various sources. Diss. Université de Lyon, 2017.

[16] Fergani, Zineb. Optimisation paramétrique d'un cycle organique de Rankine pour la récupération énergétique des gaz de rejets d'une cimenterie. Thèse de doctorat, Université de Blida 1, 2016.

[17] Quoilin, Sylvain, et al. "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems." Renewable and sustainable energy reviews 22 (2013): 168-186.

[18] Li, Xinguo, Haijun Huang, and Wenjing Zhao. "A supercritical or transcritical Rankine cycle with ejector using low-grade heat." Energy conversion and management 78 (2014): 551-558.

[19] Marty, Fabien. Optimisation de la structure globale des activités de surface d'une centrale géothermique à cogénération électricité/chaleur. Pau, 2017.

[20] Zhao, Li, and Junjiang Bao. "Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures." Applied energy 130 (2014): 748-756.

[21] Quoilin, S. Sustainable energy conversion through the use of organic Rankine cycles for waste heat recovery and solar applications. Doctoral dissertation, University of Liège, Liège, Belgium. 2011.

[22] Machinda, G. T., et al. "Concentrating solar thermal power technologies: a review." 2011 Annual IEEE India Conference. IEEE, 2011.

[23] Shaaban, S. "Analysis of an integrated solar combined cycle with steam and organic Rankine cycles as bottoming cycles." Energy conversion and management 126 (2016): 1003-1012.

[24] Quoilin, Sylvain, et al. "Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation." Solar energy 85.5 (2011): 955-966.

[25] Ford, Graham. "CSP: bright future for linear fresnel technology?." Renewable Energy Focus 9.5 (2008): 48-51.

[26] Marty, Fabien. Optimisation de la structure globale des activités de surface d'une centrale géothermique à cogénération électricité/chaleur. Thèse de doctorat. Pau, 2017.

[27] Kudakwashe, K &Mourra, A. A. Etude de la Production de Travail à basse température à l'aide d'un Cycle Organique de Rankine. Thèse de Master, Université de Blida 1, 2018.

[28] Quoilin, S., and S. Declaye. "Organic rankine cycle systems: a techno-economic overview." Proceedings of EMC. 2013.

[29] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/thermodynamique-et-energetique-42216210/cycles-organiques-de-rankine-cor-be8048/ ,(23 juin 2021).

[30] C. Marvillet , R. Vidil et J. Marty. Fluide.caloporteurs et fluides énergétiques. Editions TI| Techniques de l'ingénieur, 1993.

[31] https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fluide-frigorigene.html#:~:text=Un%20fluide%20frigorig%C3%A8ne%20(ou%20r%C3%A9frig%C3%A9rant,%C3%A9vaporer%20%C3%A0%20une%20faible%20temp%C3%A9rature (2005).

[32] Wang, Dongxiang, et al. "Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation." Energy 50 (2013): 343-352.

[33] McLinden, Mark O., Eric W. Lemmon, and Marcia L. Huber. "The refprop database for the thermophysical properties of refrigerants." 21st International Congress of Refrigeration. International Institute of Refrigeration, Paris, France, 2003.

[34] Klein, Sanford A., and F. L. Alvarado. "Engineering equation solver." F-Chart Software, Madison, WI 1 (2002).

[35] Bao, Junjiang, and Li Zhao. "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle." Renewable and sustainable energy reviews 24 (2013): 325-342.

[36] Santarossa, S. "Turboden ORC for heat recovery in cement plants: proven solutions for your tomorrow." Global CemPower (2013).

[37] Dijoux, Alexandre, et al. "Influence du choix du fluide de travail sur les performances d'un cycle organique de Rankine appliqué à l'énergie thermique des mers." Congrès français de thermique 2016: Thermique et Multiphysique. 2016.

[38] Dean, John A. Lange's handbook of chemistry. 1999.

[39] Dijoux, Alexandre, et al. "Analyse de sensibilité d'un modèle destiné à la comparaison des fluides de travail utilisés dans les cycles ORC applicables à l'énergie thermique des mers." 25ème congrès français de thermique Thermique mer et océans. 2017.

[40] Radulovic, Jovana, and Nadia I. Beleno Castaneda. "On the potential of zeotropic mixtures in supercritical ORC powered by geothermal energy source." Energy conversion and management 88 (2014): 365-371.

[41] Fang, Yuwen, Fubin Yang, and Hongguang Zhang. "Comparative analysis and multi-objective optimization of organic Rankine cycle (ORC) using pure working fluids and their zeotropic mixtures for diesel engine waste heat recovery." Applied Thermal Engineering 157 (2019): 113704.

[42] Badr, O., S. D. Probert, and P. W. O'callaghan. "Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine." Applied Energy 21.1 (1985): 1-42.

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

[44] Zhang, Jie. "Mixed-Fluid Organic Rankine Cycles for Low Temperature Power Conversion." (2017).

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

[46] P. Lundqvist, Fluides de travail pour le cycle organique de Rankine.(2023).

[47] J., David D. Didion, À la conférence sur la réfrigération ASHRAE/NIST, (6-7 octobre 1997) Atlanta, Ga.

[48] https://www.perplexity.ai/search/tudes-antrieures-de Y7PxpYGmQkOWNosRWVbzdA?s=u. (10 septembre 2020).

[49] Szargut, Jan, David R. Morris, and Frank R. Steward. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Vol. 41. New York: Hemisphere, 1988.

[50] Dahmani, Manel. Analyse 4E (Energétique, Exergétique, Environnementale et Economique) de systèmes de valorisation énergétique de biomasses. Thèse de doctorat. Conservatoire national des arts et metiers-CNAM, 2017.

[51] Morris, David R., Frank R. Steward, and Jan Szargut. "Technological assessment of chemical metallurgical processes." Canadian metallurgical quarterly 33.4 (1994): 289-295.

[52] Himri, Safia. Etude thermodynamique des dégradations d'énergie dans un procédé de l'industrie Agro-alimentaire. Thèse de doctorat. Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, 2014.

[53] Cengel, Yunus A., Michael A. Boles, and Mehmet Kanoğlu. Thermodynamics: an engineering approach. Vol. 5. New York: McGraw-hill, 2011.

[54] Al-Sulaiman, Fahad A. "Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles." Energy Conversion and Management 77 (2014): 441-449.

[55] Li, Ch, et al. "Performance investigation of concentrating solar collectors coupled with a transcritical organic Rankine cycle for power and seawater desalination co-generation." Desalination 318 (2013): 107-117.

[56] Wu, Lijun, et al. "A hybrid Rankine cycle (HyRC) with ambient pressure combustion (APC)." Applied thermal engineering 73.1 (2014): 484-499.

[57] KÜSGEN, Frauke, and Daniel KUESER. "Fresnel csp: a startling technology for solar generation." Power engineering international 17.5 (2009).

[58] Al-Sulaiman, Fahad. "Thermodynamic modeling and thermoeconomic optimization of integrated trigeneration plants using organic Rankine cycles." Thèse de doctorat. (2010).

[59] Wang, Jiangfeng, Yiping Dai, and Lin Gao. "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry." Applied Energy 86.6 (2009): 941-948.

[60] Touil, Djamel, et al. "Modélisation d'un préchauffeur à cyclones d'une cimenterie et analyse des pertes physico-chimiques d'exergie.". Récents Progrès en Génie des Procédés, (2007).

[61] Pierobon, Leonardo, et al. "Multi-objective optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery: Application in an offshore platform." Energy 58 (2013): 538-549.

[62] Chalermchaiarbha, Saksorn, and Weerakorn Ongsakul. "Elitist multi-objective particle swarm optimization with fuzzy multi-attribute decision making for power dispatch." Electric Power Components and Systems 40.14 (2012): 1562-1585.

[63] Abido, Mohammed A. "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms." IEEE transactions on power systems 18.4 (2003): 1529-1537.