



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

Faculté de la Technologie
Département de Génie des Procédés et Pétrochimie

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

Spécialité : Génie Pétrochimique

Présenté par :

- SALEMI Ahmed El Bachir
- OUBIRA Abdenour
- MEHAOUAT Mohammed Saci
- MOSTEFAOUI Omar
- SOUICI Bachir

**Etude de la possibilité d'intégration des cycles ORC au
niveau des industries pétrochimiques**

Soutenue le : 04/06 /2023

Devant le jury composé de :

Dr : CHABIAA Nacer

Président

Dr : FERHAT Mohamed Fouad

Examineur

Dr : REDJEB Youcef

Encadreur

Année académique : 2022/2023

Dédicace

*À nos parents qui sont la lumière de nos
yeux qui nous
comble d'amour.*

*À nos frères et sœurs, pour l'amour,
l'attention, l'aide et
le soutien qu'ils nous ont apportés.
À tous ceux qui ont contribué de près ou
de loin à la
réalisation de ce travail.*

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, on remercie notre Dieu de nous avoir
donné le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Tous nos remerciements à notre promoteur Mr. Redjeb
Youcef qui nous a guidés à réaliser ce mémoire.*

*Sans oublier de remercier tous qui ont contribué de
près ou de loin à notre formation durant tout le cursus
universitaire.*

Abréviations

L'ORC : Cycle Organique de Rankine.

R12:Dichlorodifluoromethane

R113: 1,1,1-Trichlorotrifluoroethane

ODP:Ozone Depletion Potential

GWP:Global Warming Potential

R717:Gaz ammoniac anhydre liquide de qualité réfrigérante

R718: Systèmes de réfrigération à pompe à chaleur à éjecteur à deux étages

R744:carbondioxyde (CO₂)

HC:Hydrocarbures.

R290:Propane.

R600a :Isobutane

R601a :Isopentane

PFC: Perfluorocarbures.

R116 : another name for hexafluoroethane, a fluorine compound and greenhouse gas

R218:Octafluoropropane

CFC :Chlorofluorocarbures.

R113:1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroéthane

R115:Chloropentafluoroéthane

HFC: Hydrofluorocarbures.

R134a : 1,1,1,2-Tetrafluoroethane

R152a :1,1-difluoroéthane

R236ea :Hexafluoropropane

HCFC:Hydrochlorofluorocarbures.

R22:Chlorodifluorométhane

R141b:1,1-dichloro-1-fluoroéthane

HFE :Éthers et hydrofluoroéthers.

HFE7000:Heptafluoropropyl methyl ether

RE170:Diméthyléther

HFE7100:Methylperfluoroisobutyl ether

MDM :Octaméthyltrisiloxane.

MM: Hexaméthylidisiloxane .

D4: Octaméthylcyclotétrasiloxane.

R500 :Dichlorodifluoromethane/Difluoroethane

R502 :Chlorodifluoromethane, Chloropentafluoroethane

R404 : mélangezéotropique de fluoroéthanes

R407 : mélange zéotropique(azéotrope)

OTEC : conversion d'énergie thermique des océans.

DOE : Selon le département américain de l'énergie DOE.

WHR : Système de récupération de chaleur résiduelle

HRSG :HeatRecoverySteamGenerators

TES :Les systèmes de stockage d'énergie thermique.

TSP:Engrais phosphatés simple

NPK: Engrais complexes binaires et ternaires

SSP:Engraisphosphatés simples

CAN:CalciumAmmoniatrate

NiO: oxyde de nickel

MEA: Mono Ethanol Amine

EES :Engineering Equation Solver

Nomenclature

CO :Monoxyde de Carbone

CO₂ :Dioxide de Carbone

Sommaire

Introduction générale	1
I Cycle Organique de Rankine	2
I.1 Introduction	2
I.2 Historique du cycle organique de Rankine.....	3
I.3 Architecture	6
I.4 Fluides de travail	9
I.5 Modèle Thermodynamique	11
I.5.1 Bilan massique et énergétique du cycle ORC.....	12
I.5.2 Performances du système ORC	14
I.6 Conclusion.....	14
II Valorisation énergétique	15
II.1 Introduction	15
II.2 Rejet thermique au niveaux des industries pétrochimiques	15
II.3 Méthodes de valorisation.....	17
II.3.1 Chaleur fatale à chauffer.....	18
II.3.2 Chaleur résiduelle vers le froid.....	19
II.3.3 Chaleur perdue pour alimenter	19
II.3.4 Utilisation directe comme chaleur	19
II.3.5 Chaleur fatale pour chauffer	19
II.3.6 Récupérer la chaleur en froid.....	20
II.3.7 Chaleur fatale pour alimenter	21
II.4 Utilisations de ORC.....	23
II.4.1 Récupération de chaleur fatale (Perdue).....	24
II.4.2 Récupération de la chaleur perdue au niveau des usines pétrochimiques	27
II.5 Conclusion.....	27
III Etude De Cas	29
III.1 Introduction	29
III.2 Usine Annaba	29
III.3 Production annuelle	29

III.4 Capacité de stockage	30
III.5 Certifications	30
III.6 Sécurité, Qualité et environnement	30
III.6.1 Sécurité	30
III.6.2 Qualité.....	30
III.6.3 Environnement.....	30
III.7 Donnéesutilisées	31
III.8 Rejets thermiques au niveau de l'industriels pétrochimiques	31
III.8.1 Impacts environnementaux	32
III.8.2 Impacts sur la santé humaine	32
III.9 Conclusion.....	32
IV Résultats d'optimisation.....	33
IV.1 Introduction	33
IV.2 Étude de cas	33
IV.3 Présentation de l'EES	34
IV.4 Paramètres d'optimisation	35
IV.5 Sélection des fluides de travail	37
IV.6 Résultats et discussion :.....	38
IV.6.1 Résultats :.....	38
IV.6.2 Discussion.....	40
IV.7 Conclusion.....	41
Conclusion générale.....	42
Références	43
Résumé	48

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma et diagramme T-S d'un ORC typique.	2
Figure I.2: Vue d'ensemble des applications ORC regroupées par source d'énergie, puissance de sortie et température de la source de chaleur[3].	3
Figure I.3: Schéma du cycle organique de Rankine (ORC).....	7
Figure I.4:Diagramme de processus du système ORC.	8
Figure I.5 : Diagram of the basic Rankine cycle.	8
Figure I.6 : Schematic of a geothermal ORC binary power cycle [17].	9
Figure I.7: Trois types de fluides de travail : isentropique, humide et sec.	11
Figure II.1: Répartition globale estimée de la chaleur perdue en 2012 à Peta J [30].	16
Figure II.2: Trois composants essentiels sont nécessaires pour la récupération de la chaleur perdue.	18
Figure II.3: Catégorisation des technologies de récupération de la chaleur fatale [33].	19
Figure II.4: Cycle de compression de vapeur.	21
Figure II.5:Schéma du cycle de base de Rankine.	22
Figure II.6:Diagramme schématique du cycle de Kalina[39].....	23
Figure II.7:Schéma d'un ORC pour la récupération de la chaleur perdue dans l'industrie du ciment [50].	26
Figure III.1: La société de FERTIAL	29
Figure IV.1:Interface du logiciel EES [57].....	35

Liste des Tableaux

Tableau II.1 Sources de chaleur résiduelle et plage de température[31].	17
Tableau III.1 Les données prises à la sortie de la section de décarbonatation.....	31
Tableau IV.1 : Les données prises à la sortie de la section de décarbonatation.	34
Tableau IV.2: Propriétés physiques, impacts environnementaux et données de sécurité des composés sélectionnés.	38
Tableau IV.3: Résultats d'optimisation	39
<i>Tableau IV.4: Classement des fluides par rapport Power cycle ,ODP et GWP.....</i>	<i>40</i>

Introduction générale

Introduction générale

Les cycles organiques de Rankine peuvent être utilisés pour la production d'énergie en combinant les cycles organiques de Rankine avec divers procédés industriels dans le secteur pétrochimique.

Un système Rankine à cycle organique est un type de technologie de production d'énergie qui utilise des fluides organiques pour convertir la chaleur en électricité. Ce système fonctionne en utilisant une source de chaleur pour vaporiser un fluide organique, qui entraîne ensuite une turbine pour générer de l'électricité. Par rapport aux cycles de vapeur traditionnels de Rankine, les cycles organiques de Rankine (ORC) peuvent utiliser des sources de chaleur à basse température, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications d'énergie renouvelable telles que la géothermie, le solaire et la récupération de la chaleur perdue.

L'un des principaux avantages des ORC est leur flexibilité dans la sélection des fluides de travail. Le choix du fluide de travail peut avoir un impact significatif sur les performances du cycle, car il affecte l'efficacité du cycle, la plage de température de travail et l'impact environnemental. Cette flexibilité fait des ORC un sujet de recherche attrayant, car elle offre des possibilités d'explorer et d'optimiser différentes options de fluide de travail.

Dans cette recherche, nous explorerons les fluides de travail utilisés dans les systèmes de Rankine à cycle organique, y compris leurs propriétés thermodynamiques, leur impact environnemental et leurs caractéristiques de performance. Nous passerons également en revue les récents développements de la recherche dans ce domaine et évaluerons le potentiel des progrès futurs dans la sélection des fluides de travail pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes ORC.

L'ORC, caractérisé par sa bonne flexibilité, est actuellement l'une des technologies les plus prometteuses pour l'exploitation des milieux et sources à basse température.

Un ORC typique se compose de quatre composants principaux : un évaporateur, un détendeur, une pompe et un condenseur. Le fluide de travail est pressurisé dans la pompe. Le liquide est ensuite chauffé et évaporé dans un évaporateur, qui convertit le liquide d'un liquide à une vapeur. Plus tard, la vapeur se dilate dans un détendeur qui extrait l'énergie du fluide de travail surchauffé pour générer de l'énergie. Enfin, la vapeur se condense dans le condenseur et change d'état de vapeur à liquide, et le cycle se répète.

Ce projet vise à étudier la possibilité d'intégrer des cours ORC pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone.

Enfin, nous allons expérimenter et étudier une gamme de liquides organiques possibles dont ce système a besoin pour améliorer le rendement énergétique en utilisant un programme EES (Engineering Equation Solver).

Chapitre I :

Cycle organique de Rankine

I Cycle Organique de Rankine

I.1 Introduction

L'ORC (Cycle Organique de Rankine) est un cycle thermodynamique permettant d'utiliser différentes sources d'énergie, telles que la géothermie, l'énergie solaire et les sources de chaleur perdue, particulièrement adaptées aux sources de chaleur à moyenne et basse température. L'ORC diffère du cycle Rankine vapeur traditionnel en utilisant un fluide de travail ayant un point d'ébullition inférieur à celui de la vapeur. Ainsi, des températures élevées ne sont pas nécessaires pour produire de la vapeur, ce qui permet d'alimenter une micro-turbine ou un détendeur.

L'ORC est considéré comme la technologie la plus prometteuse pour l'utilisation de sources de chaleur à moyenne et basse température en raison de sa structure simple, de sa flexibilité, de la disponibilité des composants et des exigences de maintenance minimales. Un ORC typique se compose de quatre parties essentielles : l'évaporateur, la machine de détente, la pompe et le condenseur, qui permettent de transformer le fluide de travail de liquide en vapeur et de produire de l'énergie par détente de la vapeur. Le schéma et le diagramme T-S d'un ORC typique sont représentés dans la figure I.1:

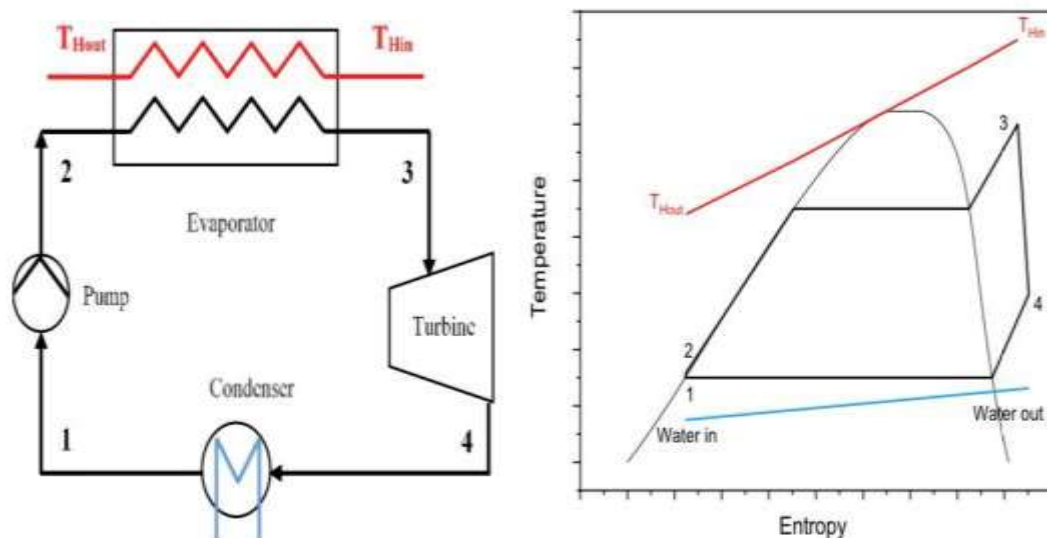


Figure I.1 : Schéma et diagramme T-S d'un ORC typique.

La limite supérieure de température dans les applications ORC est imposée en raison de la stabilité thermique limitée des fluides de travail organiques, qui est couramment fixée à 400°C.

Les systèmes ORC géothermiques et de biomasse sont généralement utilisés pour les applications de grande capacité allant d'un à plusieurs mégawatts, avec des limites de température inférieure de 200°C et moins de 100°C, respectivement. Pour les microsystemes de production combinée de chaleur et d'électricité à une échelle de 0,1 à quelques kW et les applications de récupération de chaleur résiduelle à une échelle de quelques kW à des centaines de kW, la limite inférieure de température globale est comprise entre 200°C et 300°C. Pour les applications d'électricité rurale solaire à la même échelle, la limite inférieure de température est de 150°C. La figure I.2 présente une classification des diverses utilisations ORC en fonction de la source d'énergie, de la puissance de sortie et de la température de la source de chaleur.[1-2].

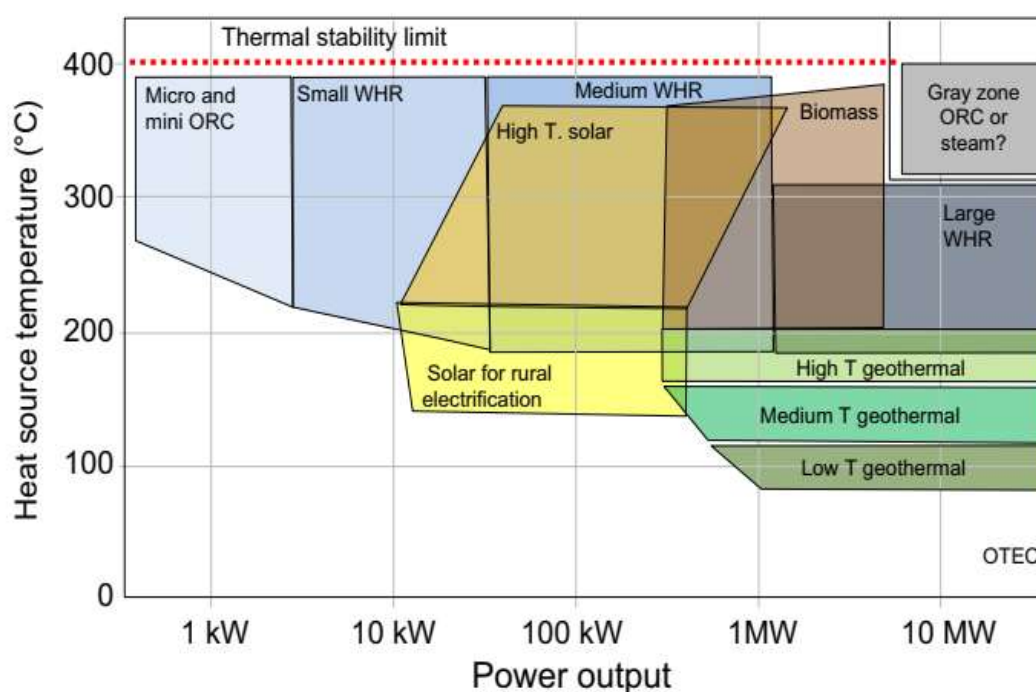


Figure I.2: Vue d'ensemble des applications ORC regroupées par source d'énergie, puissance de sortie et température de la source de chaleur[3].

I.2 Historique du cycle organique de Rankine

L'histoire des systèmes ORC est assez longue, commençant dans la première moitié du 19e siècle, jusqu'à ce que les systèmes d'alimentation ORC deviennent un marché de niche important dans l'industrie de l'électricité du 21e siècle. Un bref historique des cycles ORC a été présenté, citant les événements importants dans le développement de cette technologie. Les points saillants sont décrits ci-dessous :

- 1823 Humphrey Davy a suggéré le cycle ORC comme alternative à la machine à vapeur. Il a suggéré l'utilisation de liquides qui pourraient être vaporisés à une température plus basse dans une chaudière chauffée par un condenseur et utilisant la vapeur produite dans un autre moteur, et pourraient ainsi générer plus de puissance. C'est ce qu'on appelle un cycle de creux [4], [5].
- 1824 Dans son ouvrage publié en 1824, Sadi Carnot proposait déjà l'utilisation d'autres substances pour remplacer l'eau [6].
- 1825 Thomas Howard a breveté le concept d'un moteur utilisant de l'alcool ou de l'éther comme fluide de travail [7].
- 1829 Ainger a suggéré des cycles en cascade de liquides de différents points d'ébullition, la chaudière de chaque liquide fonctionnant comme un condenseur pour le fluide supérieur suivant dans la série, la source de chaleur externe n'étant nécessaire que pour vaporiser le liquide à point d'ébullition le plus élevé [8].
- 1853 L'ingénieur français Du Trembley a créé un moteur thermique binaire avec de la vapeur pour le moteur à haute température et de l'éther pour le moteur à basse température. Après s'être évaporée dans la chaudière et s'être dilatée dans les cylindres, la vapeur a libéré son énergie thermique de condensation vers le deuxième moteur, provoquant l'évaporation et la dilatation de l'éther dans un autre cylindre, produisant plus de travail. Le moteur est ainsi la première application commerciale d'un fluide organique [8].
- 1883 Frank W. Ofeldt a breveté un moteur au naphta, qui était essentiellement un moteur à vapeur à cycle fermé utilisant du naphta au lieu de l'eau comme fluide de travail. Le naphta était utilisé comme fluide de travail, lubrifiant et comme carburant pour l'évaporation du fluide de travail. Le moteur a été développé par la GasEngine and Power Company, qui a annoncé en 1890 qu'elle avait vendu 500 moteurs ORC basés sur la conception d'Ofeldt [9].
- 1904 Willsie a construit deux moteurs solaires ORC utilisant du dioxyde de soufre, l'un de 6 chevaux (4,5 kW) et l'autre de 15 chevaux (11 kW) [8].
- 1907 Shuman a construit un moteur solaire ORC, utilisant un capteur solaire plat de 110 m² pour faire bouillir de l'éther à des températures d'environ 120 °C et entraîner un moteur de 3,5 HP (2,6 kW) [9].
- 1923 En Italie, Romagnoli a utilisé de l'eau à 55 °C pour faire bouillir du chlorure d'éthyle et faire fonctionner un moteur de 1,5 kW [9,10].

- 1935 Luigi D'Amelio, professeur à l'Université de Naples en Italie, a été le premier à utiliser un fluide organique dans un véritable système de turbine. Il a réalisé des études détaillées d'une centrale solaire basée sur un moteur ORC utilisant le monochloroéthane comme fluide de travail. La détente de vapeur était assurée par une turbine à impulsion à un étage, les températures d'évaporation et de condensation étaient respectivement de 40°C et 23°C, avec une puissance de turbine d'environ 4 kW. L'efficacité de conversion thermique estimée était d'environ 3,6 % [11, 9].
- 1939-1940 Les travaux de D'Amelio ont conduit à la réalisation d'un prototype de 2,6 kW pour la conversion de l'énergie géothermique à faible teneur en 1939. Sur la base de ce prototype, il a construit une centrale pilote géothermique ORC de 11 kW sur l'île d'Ischia, en Italie en 1940, utilisant l'éthylène comme fluide de travail. L'usine a fonctionné pendant quelques années et a été déclassée au début des années 1950 [8,9].
- 1952 La première centrale électrique géothermique commercialement exploitée était à Kiabukwa, en République démocratique du Congo, en 1952. La centrale était alimentée en eau chaude à une température de 91°C et un débit massique de 40 kg/s à partir d'une source géothermique. Il présentait une capacité de 200 kW et a fourni de l'électricité à une société minière pendant plusieurs années [9,12].
- 1958- 1961 Tabor et Bronicki ont établi les critères de sélection des fluides organiques appropriés pour optimiser l'efficacité du cycle, dans un projet de petit moteur, dans le cadre d'un programme d'exploitation de l'énergie solaire. Les propriétés physiques du fluide de travail ont été sélectionnées selon des critères liés aux caractéristiques de la source de chaleur et du dissipateur thermique, ainsi qu'à la puissance de sortie [12, 13].
- 1961-1962 Tabor et Bronicki ont conçu, construit et testé plusieurs petites unités solaires ORC de 2 à 10 kW avec du monochlorobenzène comme fluide de travail à 140–150 °C. Certaines de ces centrales auraient fonctionné pendant 12 ans sans réparations [13].
- 1967 La deuxième plus ancienne centrale géothermique ORC a été mise en service à Paratunka dans la péninsule du Kamtchatka en 1967. Il s'agissait d'une centrale pilote exploitant de l'eau géothermique à 80 ° C, d'une puissance nominale de 680 kW et utilisant le réfrigérant R12 comme fluide de travail. Il desservait un petit village et quelques fermes avec de l'électricité et de la chaleur à utiliser dans les serres [9,14].
- 1975 En 1975, Barber a construit un ORC de 1 kW utilisant du R113 couplé à des capteurs solaires plans, les températures d'évaporation et de condensation étaient égales à 93 °C et 35 °C, l'efficacité du module ORC était d'environ 7 % [9].

1976-1978	En 1976, Agelino, Macchi et Gaia ont construit un ORC de 4 kW utilisant du perchloroéthylène comme fluide de travail dans un cycle saturé. Un ORC de moyenne température suivi en 1978 par le même groupe, d'une puissance de 35 kW, la source de chaleur était de l'huile thermique à 280 °C provenant d'une cuve parabolique, le puits froid était de l'eau à (25-32 °C), en récupération cycle [8].
1979	En 1979, McCabe a construit un ORC commercial de 12,5 MW utilisant un cycle à double fluide dans lequel deux fluides de travail différents (isopentane et isobutène) ont été utilisés sur deux centrales électriques ORC interconnectées, l'une à cycle sous-critique et l'autre à cycle supercritique [12].
1981	En 1981, il y avait 2150 moteurs Rankine avec 16 fluides de travail différents, construits par environ 20 fabricants de moteurs différents [11].
1985	Barber a construit une centrale géothermique de deux unités de 700 kW utilisant des condenseurs évaporatifs de refroidissement et une turbine de sa conception et fabrication à Susanville. En 2015, l'usine est toujours en activité [8].
Années 1990	Bien que l'histoire ci-dessus de l'ORC ne soit que brève, elle peut nous donner un aperçu de l'histoire du développement du cycle ORC.

I.3 Architecture

La chaleur emmagasinée est transférée à l'évaporateur du cycle ORC à l'aide d'un fluide caloporteur haute température ayant une plage de température considérablement élevée. L'énergie thermique de la source de chaleur est transmise à l'évaporateur, où elle surchauffe et vaporise le fluide organique préalablement mis sous pression par la pompe. La vapeur surchauffée obtenue à la sortie de l'évaporateur entraîne la turbine, qui à son tour alimente un alternateur pour la production d'énergie. La vapeur est ensuite refroidie dans le condenseur à l'aide d'un flux d'eau de refroidissement [15,16].

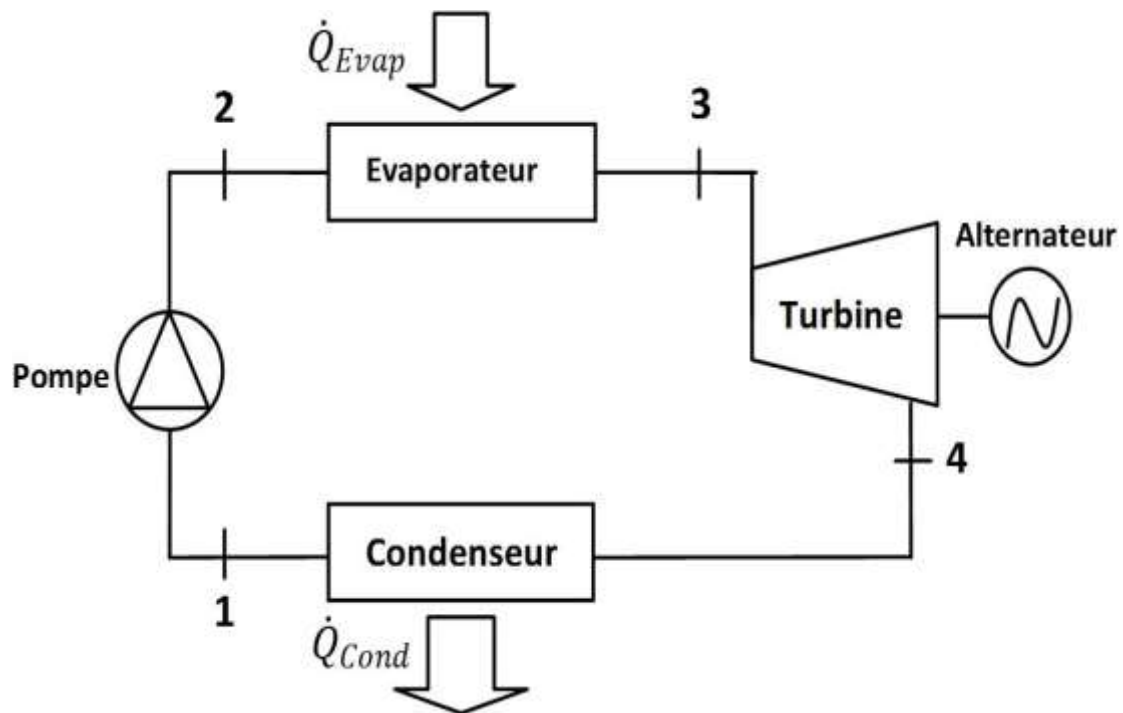


Figure I.3: Schéma du cycle organique de Rankine (ORC).

Les composants principaux du processus de modélisation d'un cycle ORC sont le condenseur, l'évaporateur, le détendeur organique et la pompe à fluide de travail. Le liquide de travail est pompé par la pompe à un état haute pression, où il est chauffé par la source de chaleur perdue dans l'évaporateur. Suite à cette étape, le fluide de travail organique se transforme en vapeur saturée ou surchauffée. Dans le détendeur, la vapeur du fluide de travail produit de l'électricité. Après le travail, les gaz d'échappement entrent dans le condenseur où ils sont comprimés en un liquide saturé par la pompe, puis envoyés dans l'évaporateur pour le cycle suivant. [15,16]

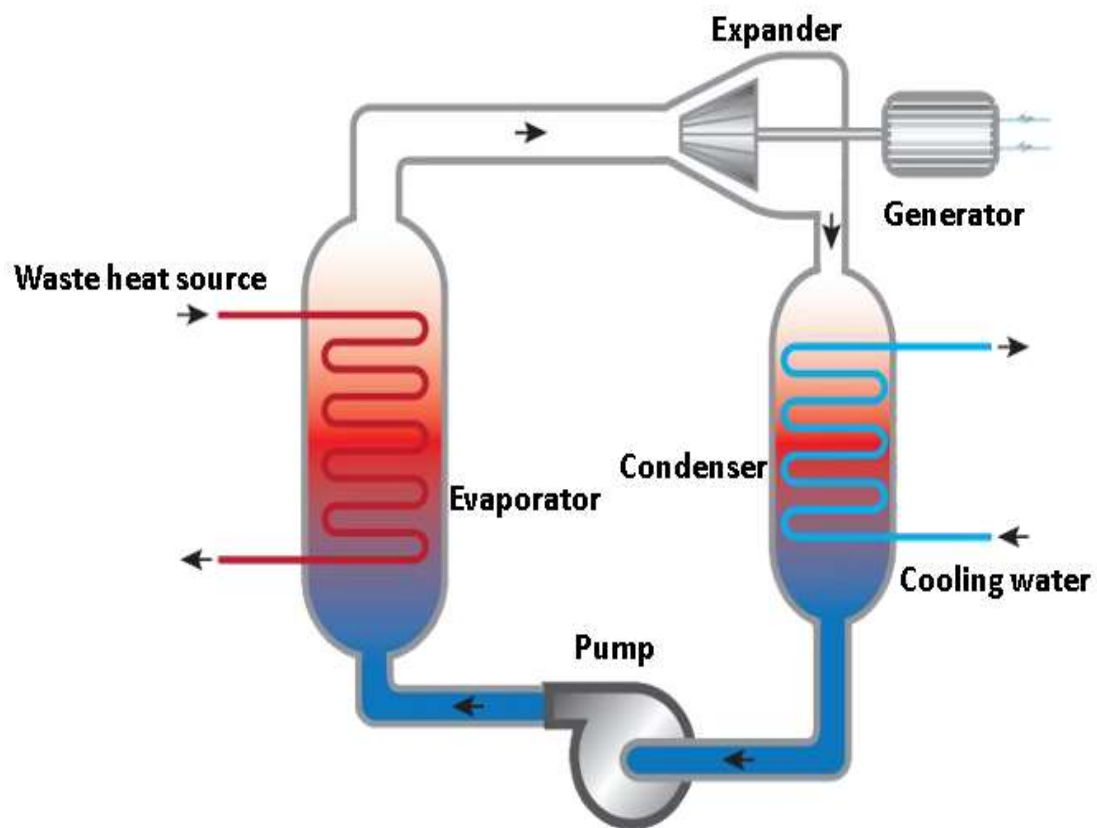


Figure I.4: Diagramme de processus du système ORC.

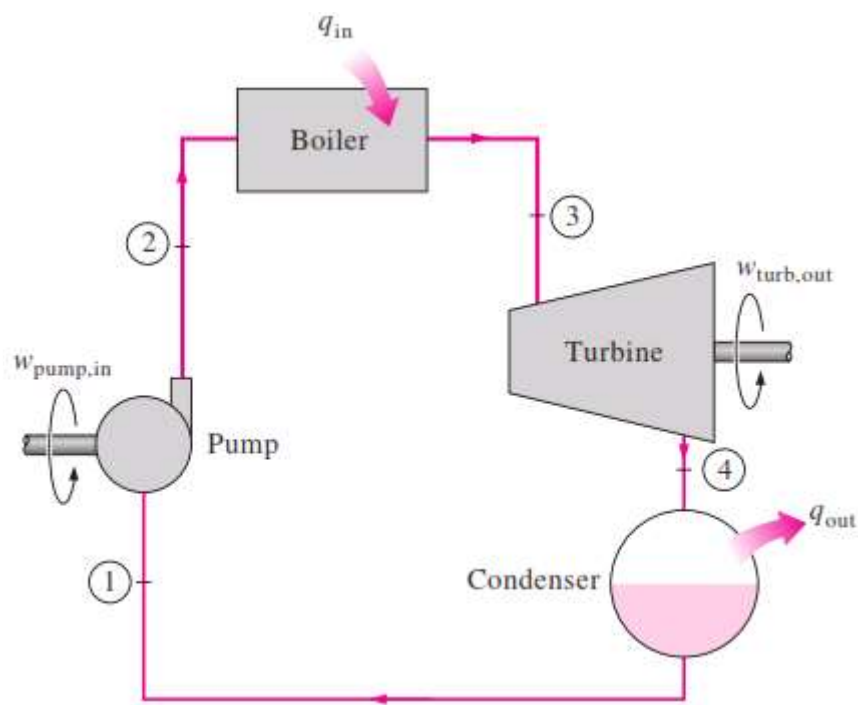


Figure I.5: Diagram of the basic Rankine cycle.

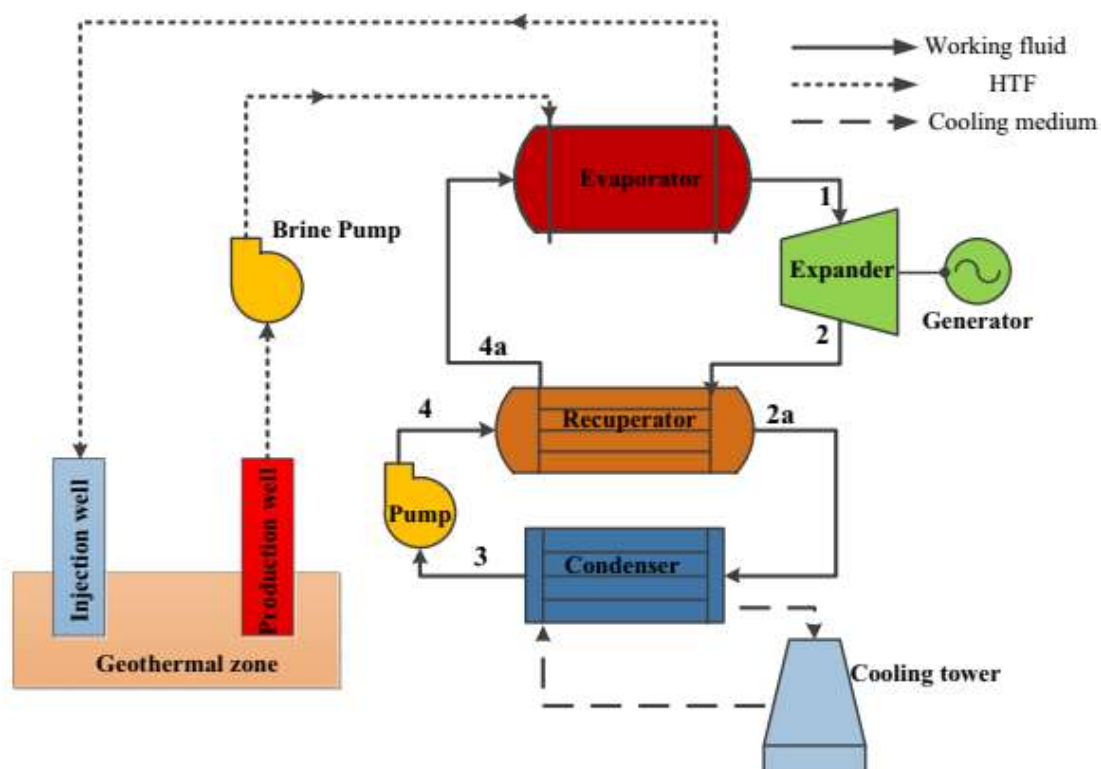


Figure I.6: Schematic of a geothermal ORC binary power cycle [17].

I.4 Fluides de travail

Pour la conception du cycle ORC, l'une des étapes les plus importantes est l'identification du fluide de travail approprié car les propriétés thermo-physiques et de transport des fluides de travail influencent fortement la performance, la taille et la conception du système. Pour le cycle de Rankine en général et le cycle à vapeur d'eau en particulier, l'eau est un fluide de travail parfait avec de bonnes propriétés, c.à.d. elle est abondante, peu chère, chimiquement stable, thermiquement stable, non-toxique, inflammable ; elle a une viscosité faible, zéro ODP, zéro GWP. Cependant, ce fluide ne peut pas être économiquement employé pour la génération d'électricité à partir d'une source de chaleur à basse température en raison de la température (100 °C) de changement de phase à la pression atmosphérique relativement haute. De plus, l'utilisation de l'eau comme fluide de travail présente également quelques inconvénients [18, 19].

Dans les cycles de Rankine, une variété de produits chimiques peut être utilisés comme fluides de travail. Selon la méthode de classification, les fluides de travail du système ORC peuvent être divisés en plusieurs groupes. Les principaux groupes de fluides possibles pour les ORC sont décrits ci-dessous. [24, 25].

- ✚ Alcools : méthanol, éthanol.
- ✚ Fluides inorganiques : Eau (R718), Dioxyde de carbone (R744) et Ammoniac (R717).
- ✚ Hydrocarbures (HC) : substances naturellement inflammables capables de réagir avec les halogènes : Propane (R290), Propyne, Isobutane (R600a), Isopentane (R601a), Benzène, etc.
- ✚ Perfluorocarbures (PFC) : HC entièrement fluorés. Par exemple. R116, R218.
- ✚ Chlorofluorocarbures (CFC) : tous les atomes d'hydrogène d'une molécule d'hydrocarbure sont remplacés par du chlore, du fluor ou du brome. Par exemple. R12, R113, R115.
- ✚ Hydrofluorocarbures (HFC) : HC partiellement halogénés et sans chlore. Par exemple. R134a, R152a, R236ea.
- ✚ Hydrochlorofluorocarbures (HCFC) : hydrocarbures partiellement halogénés. Par exemple. R22, R141b.
- ✚ Éthers et hydrofluoroéthers (HFE) : par ex. HFE7000, RE170, HFE7100.
- ✚ Siloxanes, par ex. Octaméthyltrisiloxane (MDM), Hexaméthylidisiloxane (MM), Octaméthylcyclotétrasiloxane (D4). [20,21].
- ✚ Mélanges :
 - ✓ Mélanges azéotropiques : les mélanges de deux composés ou plus possèdent les mêmes compositions en phase vapeur et liquide à l'équilibre à une pression donnée. Par exemple. R500, R502.
 - ✓ Mélanges zéotropiques : mélanges de deux composés ou plus qui changent de composition volumétrique et de température de saturation à mesure qu'ils bouillent. Par exemple. R404, R407. [22, 23].

L'une des propriétés fondamentales des fluides de travail dans un cycle organique de Rankine (ORC), la courbe de vapeur de saturation dans le diagramme température-entropie T-s, peut être utilisée pour classifier les fluides de travail. Cette propriété est critique pour l'efficacité du cycle, la configuration des équipements associés et l'application des fluides dans les systèmes de production d'énergie.

Selon la pente de la courbe de saturation de vapeur dans le diagramme T-s (voir Figure 3), on distingue trois types de fluides de travail : les fluides secs, isentropiques et humides. Un fluide humide a une pente négative, un fluide sec a une pente positive et un fluide isentropique a une pente presque indéfiniment grande. [24].

Il convient de noter que les fluides humides doivent être préchauffés à haute température avant d'entrer dans la turbine pour éviter tout dommage potentiel aux aubes de la turbine. En effet, lorsque la vapeur saturée pénètre dans la turbine, elle se dilate et traverse la zone de sub-refroidissement (zone du dôme), ce qui peut endommager les aubes de la turbine. [26].

Dans les systèmes à turbine à vapeur, maintenir une fraction de siccité minimale de 95 % à la sortie de la turbine est couramment observé. Bien que les échangeurs de

chaleur à faible coefficient de transfert de chaleur puissent être bénéfiques pour augmenter l'efficacité du système, ils peuvent également contribuer à des problèmes de surchauffe. Les fluides secs et isentropiques sont préférables car ils n'ont pas besoin de surchauffe, ce qui évite les problèmes de dégradation de la turbine. [27].

Si la vapeur est "trop sèche", elle quittera la turbine avec une surchauffe importante, ce qui peut augmenter la charge de refroidissement et entraîner une perte d'énergie. L'utilisation de récupérateurs pour récupérer l'énergie de la vapeur surchauffée peut améliorer l'efficacité du système, mais cela augmente également la complexité et les coûts en capital. Les fluides isentropiques sont souvent préférables pour récupérer la chaleur résiduelle à basse température. Les liquides humides avec des courbes de vapeur saturée raides ont été trouvés pour avoir une meilleure efficacité globale de conversion d'énergie que les fluides secs et isentropiques dans une étude récente sur l'impact de différents types de courbes de vapeur saturée pour un fluide. [28].

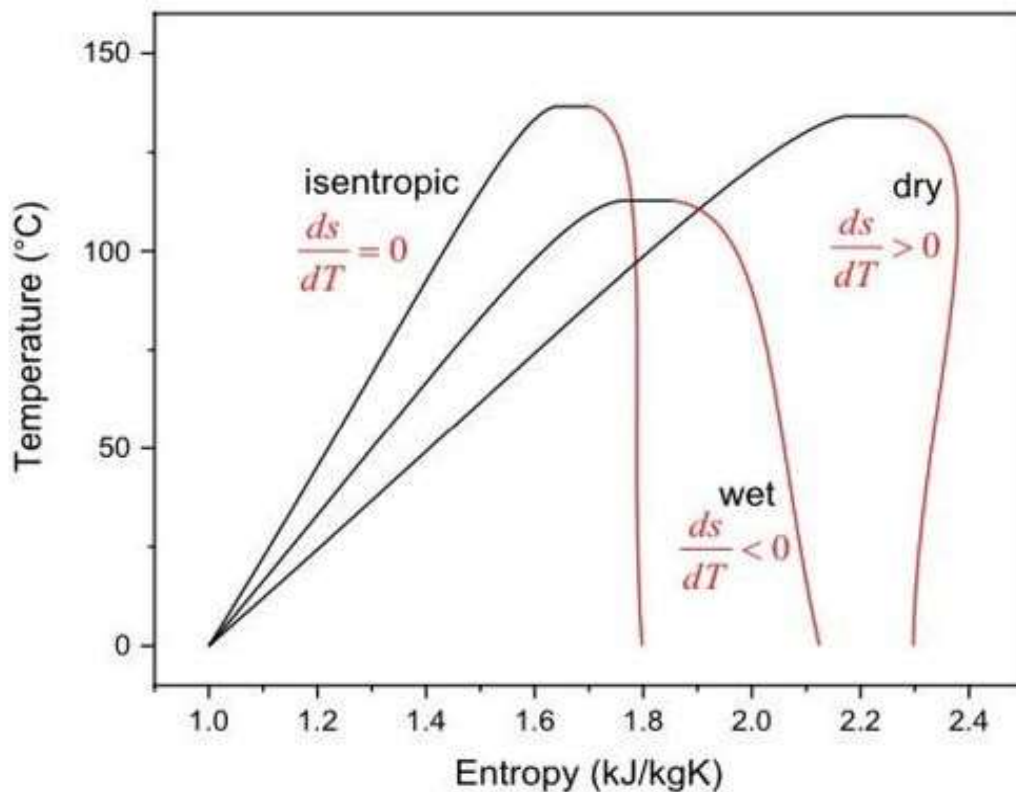


Figure I.7: Trois types de fluides de travail : isentropique, humide et sec.

I.5 Modèle Thermodynamique

L'analyse du cycle organique de Rankine (cycle ORC) est réalisée en utilisant la première loi de la thermodynamique pour la conservation de la masse et de l'énergie pour chaque composant, sous les hypothèses suivantes :

Les altérations énergétiques cinétiques et potentielles sont à peine perceptibles.

C'est un système adiabatique (sans pertes thermiques). Le système est en régime permanent.

I.5.1 Bilan massique et énergétique du cycle ORC

Les débits massiques d'entrée et de sortie sont égaux en régime permanent, on a :

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m \quad (1)$$

m: débit massique

I.5.1.1 Pompe

La pompe de circulation assure le transport du fluide organique du condenseur basse pression vers l'évaporateur à haute pression, ce qui permet de calculer la consommation énergétique de la pompe. L'équation de bilan énergétique de la pompe peut être exprimée de la manière suivante :

$$W_p = m (h_2 - h_1) \quad (2)$$

m: débit massique

h_2 et h_1 : Enthalpie ponctuelle (2 et 1)

Le travail spécifique consommé par la pompe pour comprimer le fluide s'écrit :

$$W_p = (h_2 - h_1) = v(P_2 - P_1) \quad (3)$$

h_2 et h_1 : Enthalpie ponctuelle (2 et 1)

$P_2 - P_1$: Pression avant et après pompage

Pour une compression adiabatique irréversible, le rendement mécanique de la pompe est introduit comme suit :

$$\eta_{pis} = W_{p\text{rév}} / W_{p\text{irrév}} = W_{p\text{is}} / W_p = (h_{2is} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (4)$$

η_{pis} : Efficacité de fonctionnement de la pompe si le processus est isotherme

$W_{p\text{irrév}}$: La puissance mécanique de pompe irréversible (KW)

$W_{p\text{rév}}$: La puissance mécanique de pompe réversible (KW)

W_p : La puissance mécanique de pompe (KW)

$W_{p\text{is}}$: La puissance mécanique de pompe si le processus est isotherme (KW)

h_2 et h_1 : Enthalpie ponctuelle (2 et 1)

h_{2is} : L'enthalpie de la turbine si le processus est isotherme

I.5.1.2 Évaporateur

En entrant dans l'évaporateur, le fluide de travail se trouve dans un état liquide. À pression constante P2, il est chauffé jusqu'à la température d'évaporation, où il s'évapore ensuite à pression et température constantes. Le bilan énergétique de l'évaporateur peut être exprimé de la manière suivante :

$$Q_{\text{Evap}} = m(h_3 - h_2) \quad (5)$$

Q_{Evap} : Le taux de transfert de chaleur vers ou depuis le système

m : débit massique

h_3, h_2 : Enthalpie ponctuelle (3 et 2)

I.5.1.3 Turbine

La détente dans la turbine est considérée comme adiabatique et irréversible avec un rendement isentropique constant qui se définit comme suit :

$$\eta_{\text{Tis}} = W_{\text{T irrév}} / W_{\text{T rév}} = W_{\text{T}} / W_{\text{T is}} = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4\text{is}}) \quad (6)$$

η_{Tis} : Efficacité de fonctionnement de la turbine si le processus est isotherme

$W_{\text{T irrév}}$: La puissance mécanique de turbine irréversible(KW)

$W_{\text{T rév}}$: La puissance mécanique de turbine réversible(KW)

W_{T} : La puissance mécanique de turbine (KW)

$W_{\text{T is}}$: La puissance mécanique de turbine si le processus est isotherme(KW)

h_4, h_3 : Enthalpie ponctuelle (4 et 3)

$h_{4\text{is}}$: L'enthalpie de la turbine si le processus est isotherme

Le bilan énergétique de la turbine s'écrit comme suit :

$$W_{\text{T}} = m(h_3 - h_4) = m(h_3 - h_{4\text{is}})\eta_{\text{T.méc}} \quad (7)$$

W_{T} : La puissance mécanique de turbine (KW)

m : débit massique

h_4, h_3 : Enthalpie ponctuelle (4 et 3)

$h_{4\text{is}}$: L'enthalpie de la turbine si le processus est isotherme

$\eta_{\text{T.méc}}$: Efficacité de fonctionnement de la turbine

La puissance électrique de la turbine est donnée par :

$$W_{\text{T. ORC}}^{\text{elec}} = \eta_{\text{gen}} * W_{\text{T. ORC}} \quad (8)$$

η_{gen} : efficacité générale du processus

$W_{T. \text{ORC}}$: La puissance mécanique de turbine par le système(KW)

I.5.1.4 Condenseur

En appliquant le principe de conservation de la masse et de l'énergie de la thermodynamique, le bilan énergétique du condenseur peut être exprimé de la manière suivante : Le fluide de travail, qui est sous forme de vapeur, entre dans le condenseur et y subit une condensation à température et pression constantes. Cette condensation se traduit par une libération de chaleur qui est transférée à un fluide de refroidissement externe. À la sortie du condenseur, le fluide de travail est à l'état liquide et a cédé une quantité de chaleur spécifique :

$$Q_{\text{Cond}} = m(h_4 - h_1) \quad (9)$$

Q_{Cond} : Transfert de chaleur vers ou depuis le système (unité d'énergie par unité de temps(KW))

m : débit massique

h_4 et h_1 : Enthalpie ponctuelle (4 et 1)

I.5.2 Performances du système ORC

L'efficacité thermique du cycle de Rankine organique est définie comme :

$$\eta_{\text{Th}} = W_{\text{net. ORC}} / Q_{\text{Evap. ORC}} \quad (10)$$

$Q_{\text{Evap. ORC}}$: Le taux de transfert de chaleur vers ou depuis le système (KW)

$$W_{\text{net. ORC}} = W_T - W_P \quad (11)$$

$W_{\text{net. ORC}}$: La puissance mécanique consommée par le système(KW)

W_P : La puissance mécanique de pompe (KW)

W_T : La puissance mécanique de turbine (KW)

I.6 Conclusion

Cette étude porte sur la recherche d'un Cycle Organique de Rankine (ORC) pour la production d'électricité en utilisant un fluide organique. Le fluide organique optimal est le toluène, car il a la plus grande puissance mécanique nette et une performance thermodynamique élevée, telle que déterminée par l'analyse paramétrique du cycle de Rankine organique. L'efficacité du cycle s'améliore avec une augmentation de la température d'évaporation, en particulier pour le fluide toluène, où l'efficacité énergétique augmente de 10,5% à 21,45% sur une plage de température de 80 °C à 150 °C au cours de l'expérience.

Chapitre II :

Valorisation énergétique

II Valorisation énergétique

II.1 Introduction

En raison de l'augmentation de la rigueur des réglementations mondiales sur les émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de l'efficacité énergétique est devenue l'un des moteurs les plus critiques dans l'industrie de traitement des hydrocarbures. En outre, l'amélioration de l'efficacité énergétique peut aider à réduire les coûts de carburant et à augmenter la rentabilité. Dans les raffineries de pétrole brut, une quantité considérable de chaleur est actuellement gaspillée par les refroidisseurs d'air et les refroidisseurs d'eau lors du refroidissement des flux de température inférieure à 150 °C. Par exemple, plus de 20 % de la chaleur produite dans le four est gaspillée par une machine de distillation de pétrole brut typique.

Différentes technologies, telles que le cycle organique de Rankine (ORC), le cycle de Kalina, le générateur thermoélectrique et la pompe à chaleur, peuvent être utilisées pour récupérer une partie de cette chaleur et l'utiliser à d'autres fins. Ces technologies peuvent contribuer à améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie de traitement des hydrocarbures. Des études antérieures ont montré leur efficacité (Papadopoulos et al., 2010, Quoilin et al., 2011, Schuster et al., 2009, Véleza et al., 2012, Walsh, 2011).[29].

II.2 Rejet thermique au niveaux des industries pétrochimiques

La chaleur résiduelle industrielle est définie comme l'énergie créée lors des processus industriels, mais qui n'est pas consommée dans le processus, étant gaspillée ou rejetée dans l'environnement. La majorité des processus industriels produisent inévitablement de la chaleur perdue en raison des contraintes thermodynamiques et des inefficacités des équipements, bien que la quantité de chaleur perdue varie considérablement d'un processus à l'autre.

Les caractéristiques des flux de chaleur résiduelle sont la température, le débit et la composition. Le potentiel de récupération de chaleur pour générer de la puissance mécanique doit être évalué en utilisant les mêmes paramètres accessibles du flux de refroidissement. La quantité d'énergie thermique qui peut être récupérée à partir d'une source de chaleur est déterminée par le grade ou la qualité. Les températures de chaleur résiduelle varient considérablement en fonction de la source, tandis que les flux de refroidissement fluctuent généralement moins.

Le potentiel de chaleur perdue a été classé en chaleur élevée, moyenne et basse en fonction de la température du flux de chaleur perdue. La chaleur élevée correspond à des températures supérieures à 480 °C, la chaleur moyenne correspond à des températures comprises entre 240 et 480 °C et la chaleur basse correspond à des températures inférieures à 240 °C. Le potentiel mondial de chaleur perdue a été estimé à 245 PJ par Forman et al. (2017), dont 63 % se situe en dessous de 100 °C et 79 % en dessous de 200 °C. Cela montre que la chaleur perdue à basse température a le

potentiel d'être une source d'énergie importante si elle peut être récupérée efficacement.

Les processus industriels tels que la production d'hydrogène, les incinérateurs de fumée et la fusion des métaux produisent une chaleur résiduelle de qualité élevée, généralement sous forme solide ou gazeuse. Les températures élevées de ces sources de chaleur rendent leur récupération difficile. Les sources de chaleur perdue de qualité moyenne sont les plus courantes dans les applications de production d'électricité utilisant les gaz d'échappement des turbines à vapeur ou à gaz, ainsi que dans les applications de chauffage telles que les fours à ciment, les fours de séchage et les moteurs à combustion interne.

La majorité des sources de chaleur résiduelle facilement accessibles sont considérées comme étant de faible qualité, telles que l'eau de refroidissement des fours ou des cycles électriques, ainsi que les cycles de réfrigération. Les sites de chaleur résiduelle sont répertoriés dans le tableau 1-1 avec des niveaux thermiques correspondants.

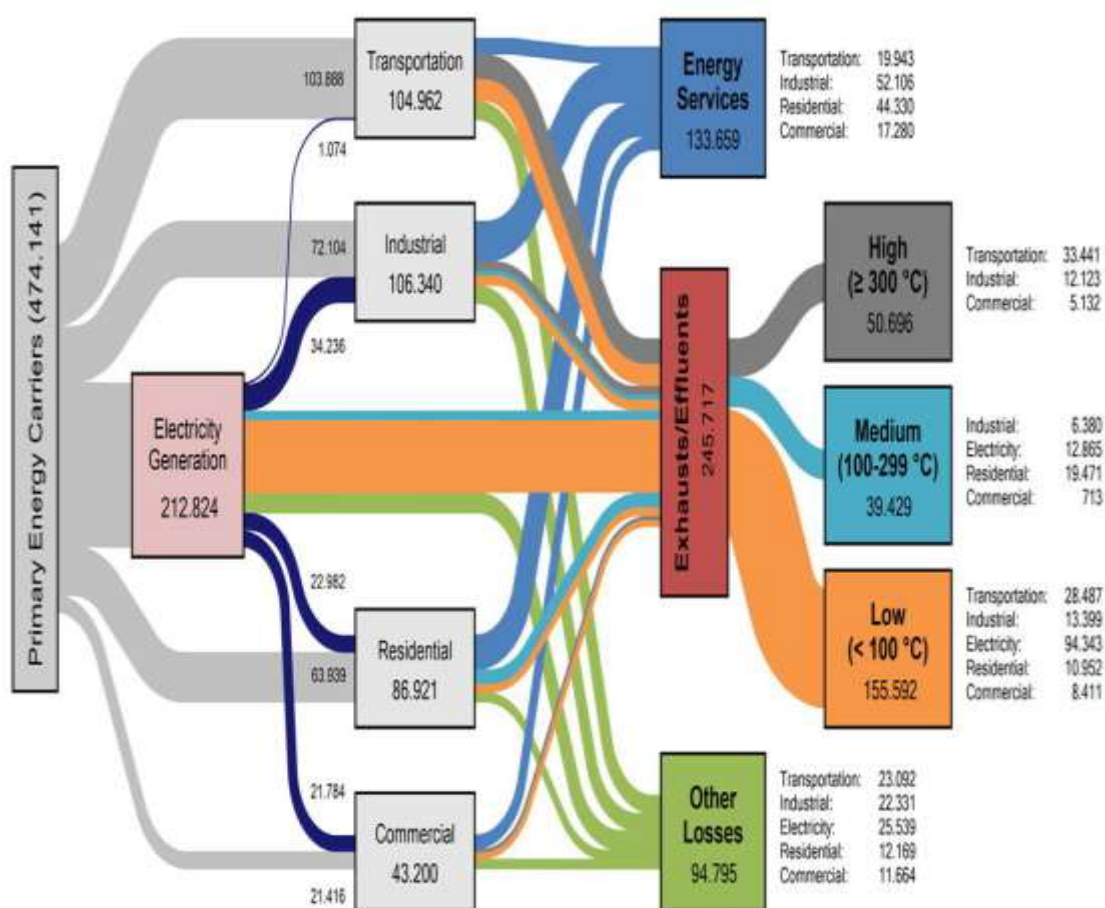


Figure II.1: Répartition globale estimée de la chaleur perdue en 2012 [30].

Tableau II.1 Sources de chaleur résiduelle et plage de température[31].

Catégories	Sources	Température (°C)	Suggested technology
High température (>650°C)	Solide Waste	650-1000	Air preheating Sicam Rankine cycle Steam generation (Heating) Heat exchanger (preheating) Thermoelectric Thermal P V
	Fume incinerators	650-1450	
	Nickel refining furnace	1370-1650	
	Aluminium refining furnace	1000-1550	
	Copper reverberatory furnace	650-160	
	Copper refining furnace	900-1100	
	Zinc refining furnace	760-815	
	Concist kiln	760-110	
	Hydrogen plants	620-730	
		650-1000	
Medium température (230-650°C)	Steam boiler exhaust	230-480	Stream rankine cycle Organic ranking cycle Heat exchangers (preheating process) Air pre-heating Thermoelectric Thermal pv
	Gas turbine exhaust	370-540	
	Drying and boking ovents	230-600	
	Catalytic crackers	425-650	
	Reciprocating engine exhausts	315-600	
	Catalytic crackers	425-650	
	Anncaling furnace cooling systems	425-650	
Low température (>230°C)	Process steam condistant	50-90	Space heating Domestic water heating Heat pump Organic Rankine Cycle Heat exchangers Absorption/adsorption cooling Kalina cycle Piezolztric
	Cooling water from		
	Internal combustion engines	66-120	
	Hot processed liquids and solids	32-232	
	Annealing furnaces	66-230	
	Drying baking and curing overg	93-230	
	Welding and injection molding machines	32-88	
	Bearings	32-88	
	Air compressors	27-50	

II.3 Méthodes de valorisation

La chaleur résiduelle captée et réutilisée est une alternative zéro émission aux carburants ou à l'électricité achetés coûteux. Plusieurs techniques sont disponibles pour transférer la chaleur résiduelle vers une utilisation finale productive. Trois éléments de base (Figure 1.3) sont nécessaires pour la récupération de la chaleur perdue:

-  une source accessible de chaleur perdue,
-  une technologie de récupération
-  l'utilisation de l'énergie récupérée

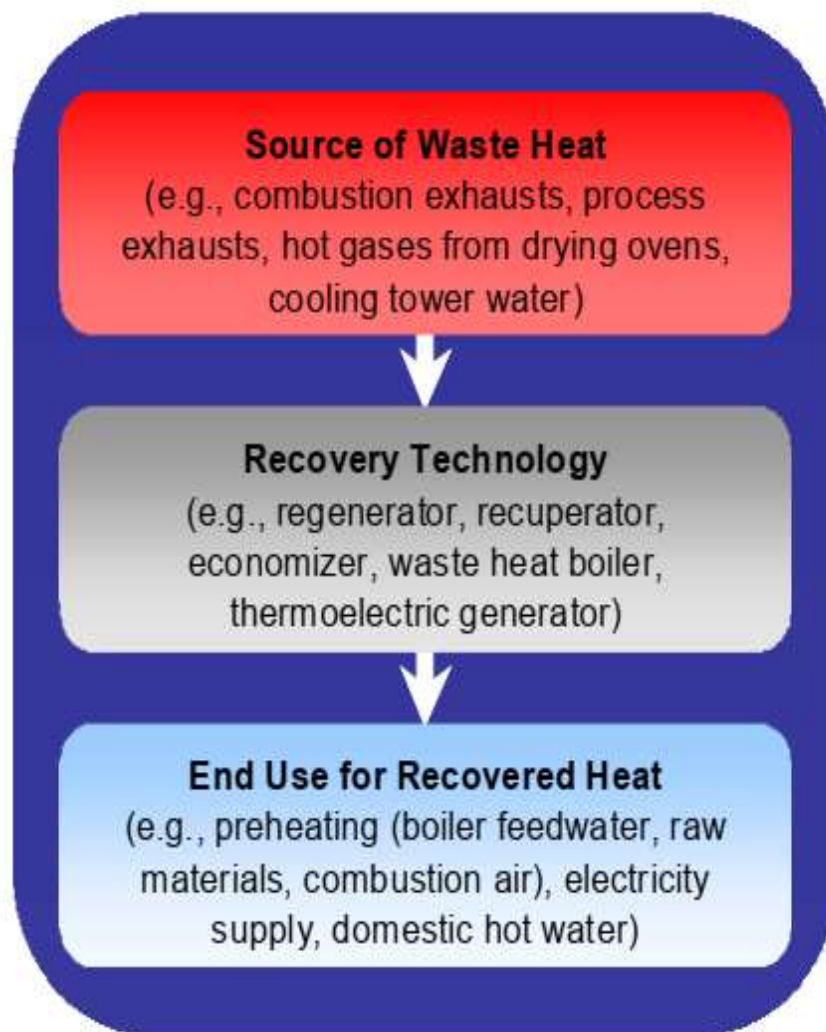


Figure II.2: Trois composants essentiels sont nécessaires pour la récupération de la chaleur perdue.

En fonction de la manière dont elle est réutilisée : la récupération directe, la conversion en une autre forme d'énergie, l'élévation de température et l'utilisation de cycles de Rankine organiques. Ces technologies doivent être adaptées aux propriétés spécifiques de chaque source de chaleur résiduelle afin d'optimiser l'efficacité énergétique et de minimiser les coûts. Par conséquent, il est essentiel de choisir la technologie de récupération de chaleur appropriée pour chaque source de chaleur résiduelle [32].

II.3.1 Chaleur fatale à chauffer

La chaleur fatale récupérée est utilisée pour produire de l'énergie thermique à un niveau de température plus élevé (pompes à chaleur, compression mécanique de vapeur, etc.).

II.3.2 Chaleur résiduelle vers le froid

Technologies qui utilisent la chaleur résiduelle récupérée pour produire de l'énergie de refroidissement (refroidisseur à absorption et à adsorption, etc.).

II.3.3 Chaleur perdue pour alimenter

Technologies qui convertissent la chaleur résiduelle récupérée en électricité (cycles organiques de Rankine (ORC), cycles de Kalina, etc.).

II.3.4 Utilisation directe comme chaleur

La chaleur perdue récupérée est utilisée directement à la même température ou à une température inférieure. Les échangeurs de chaleur sont les technologies dominantes de cette catégorie.

La récupération d'énergie à partir de sources de chaleur de qualité élevée est couramment réalisée directement sous forme de chaleur ou via des cycles de puissance à vapeur, lesquels sont des technologies bien établies et matures. Cependant, l'extraction de chaleur résiduelle de qualité élevée rencontre des obstacles distincts de ceux associés aux sources de chaleur de qualité faible à moyenne, principalement liés aux contraintes liées aux hautes températures. La récupération de chaleur de qualité élevée peut également générer des flux de chaleur de qualité faible et moyenne supplémentaires, qui peuvent être récupérés et utilisés par des techniques décrites ci-dessous, dans une approche en cascade. La Figure 1.4 illustre la classification des technologies de récupération de la chaleur résiduelle en différentes catégories.

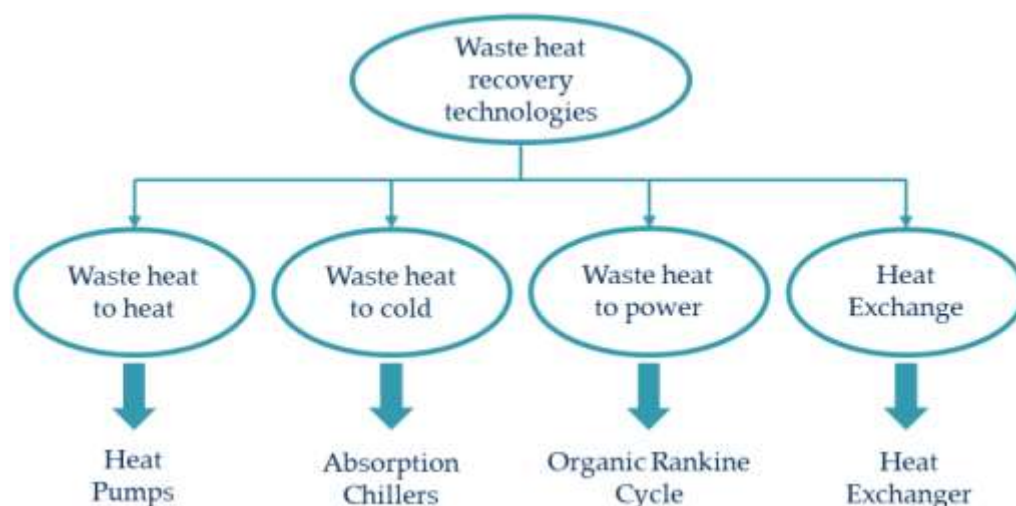


Figure II.3: Catégorisation des technologies de récupération de la chaleur fatale [33].

II.3.5 Chaleur fatale pour chauffer

En cas de demande de chaleur locale où la qualité de la source de chaleur résiduelle disponible est insuffisante pour répondre à la demande, les technologies d'amélioration de la chaleur, telles que les cycles de compression de vapeur ou les pompes à chaleur, peuvent être employées pour utiliser la chaleur résiduelle

disponible et répondre à la demande. Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour récupérer la chaleur d'un milieu de travail, qui passe ensuite par un cycle thermodynamique pour produire un flux de chaleur de qualité supérieure.

Le cycle de compression de vapeur comprend quatre composants principaux, à savoir l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur. Dans ce cycle, le fluide de travail se vaporise dans l'évaporateur en absorbant l'énergie thermique d'une source de chaleur perdue à basse température. Le compresseur augmente la pression du fluide de travail, le transformant en vapeur surchauffée. La chaleur est ensuite rejetée du fluide de travail vers le flux de refroidissement dans le condenseur, à une température plus élevée que celle absorbée par la source de chaleur. La figure 1.5 illustre le cycle de compression de vapeur. Enfin, les pompes à chaleur utilisant des cycles de compression de vapeur sont capables de récupérer et d'améliorer la qualité de la chaleur résiduelle à partir de sources de faible qualité, dans des conditions où la demande de chaleur est nécessaire localement. Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour transférer la chaleur du milieu de travail, qui est ensuite utilisée pour produire un flux de chaleur de qualité supérieure par un cycle thermodynamique.

Le cycle de compression de vapeur est composé de quatre composants principaux : l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur. Ce cycle est capable de fournir des élévations de température de 20 à 50°C et est souvent utilisé pour fournir de l'eau chaude sanitaire dans les industries de transformation telles que la chimie, le raffinage du pétrole, les pâtes et papiers et la transformation des aliments [31].

II.3.6 Récupérer la chaleur en froid

Les systèmes d'absorption et d'adsorption sont des alternatives au cycle de compression de vapeur, dans lesquels la compression mécanique est remplacée par un processus chimique. Dans le cycle d'absorption, un liquide absorbant est utilisé, tandis que le cycle d'adsorption utilise un milieu solide pour l'étape de compression, comme illustré dans la Figure 1.5.

Les cycles d'absorption et d'adsorption nécessitent des sources et des dissipateurs de chaleur supplémentaires, ce qui offre de nombreuses configurations possibles en utilisant diverses sources de chaleur telles que les hydrocarbures, l'énergie solaire, l'énergie géothermique, le réseau de chauffage urbain ou la chaleur résiduelle [34].

Bien que complexes, ces cycles présentent plusieurs avantages par rapport aux cycles de compression mécaniques, notamment l'absence de pièces mobiles et mécaniques, l'utilisation de réfrigérants respectueux de l'environnement comme fluides de travail et la possibilité d'utiliser des sources de chaleur à haute température. Ces systèmes sont disponibles dans le commerce.

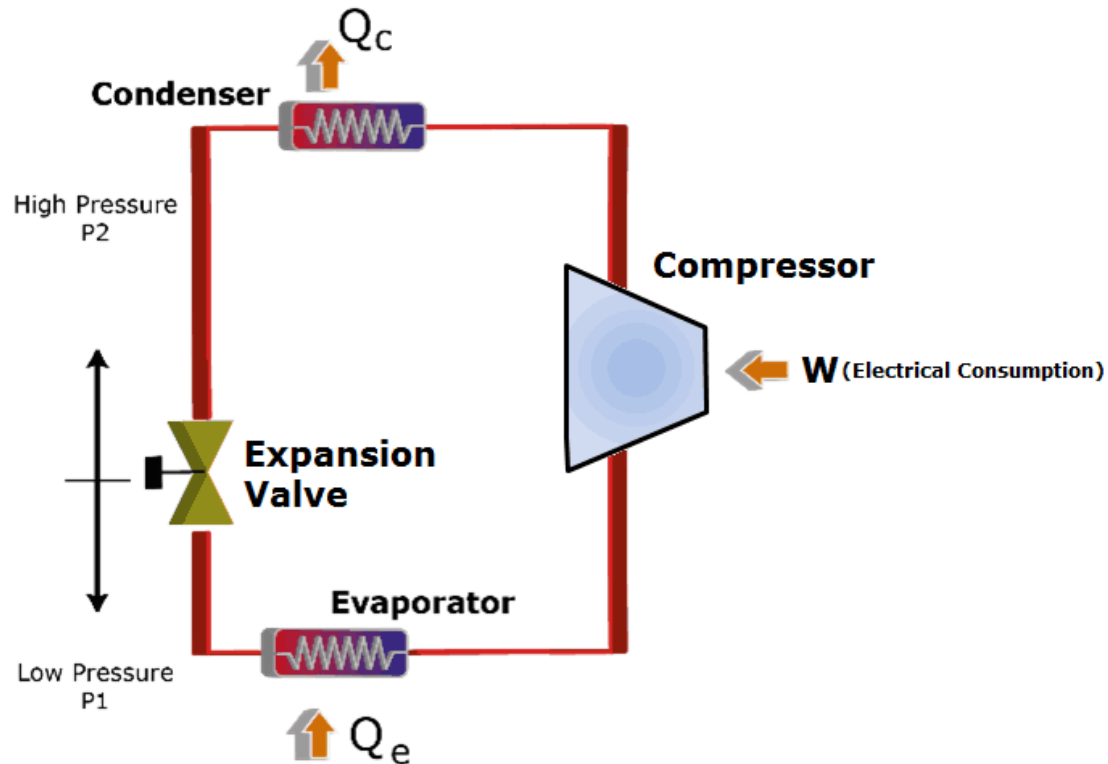


Figure II.4: Cycle de compression de vapeur.

II.3.7 Chaleur fatale pour alimenter

Les méthodes les plus courantes de récupération de la chaleur perdue consistent à convertir l'énergie thermique en travail mécanique, qui peut ensuite être utilisé ou transformé en électricité au moyen d'un générateur. Les technologies utilisées à cet effet incluent les cycles thermodynamiques et la production d'énergie thermoélectrique. Les cycles thermodynamiques permettent la conversion de l'énergie thermique en travail mécanique. Dans les cycles binaires, la chaleur est récupérée depuis la source de chaleur à l'aide d'un échangeur de chaleur et transférée à un fluide secondaire, appelé fluide de travail. Il existe plusieurs types de cycles thermodynamiques produisant du travail mécanique, mais les cycles de Rankine et Kalina sont les plus couramment utilisés dans les technologies de récupération de chaleur perdue [35].

Le cycle de Rankine, qui utilise de l'eau comme fluide de travail, est principalement employé dans les grandes centrales thermiques et est représenté à la figure II.5:

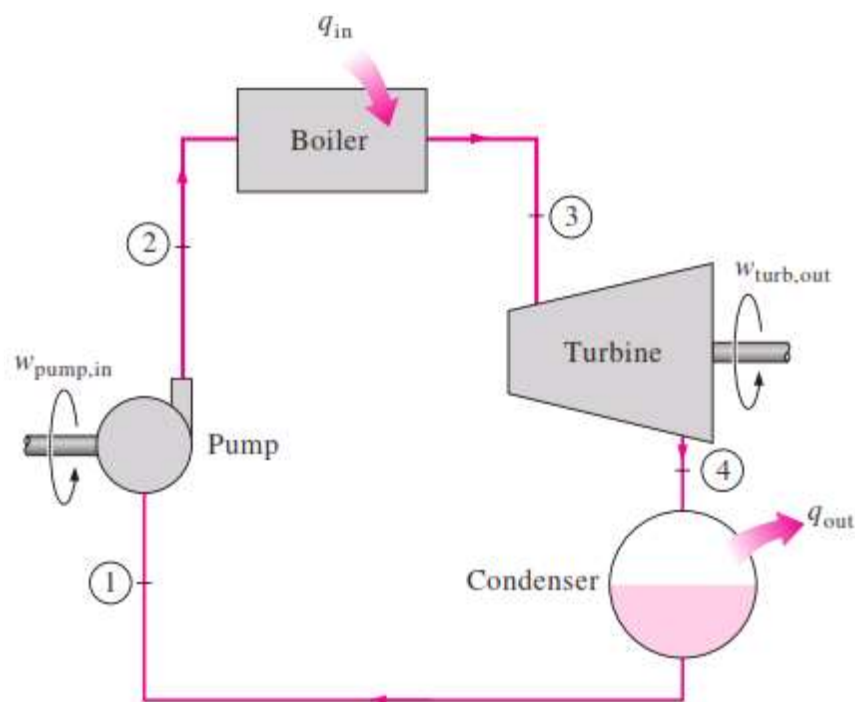


Figure II.5: Schéma du cycle de base de Rankine.

Le cycle de Rankine est un processus dans lequel l'eau, à une pression de condensation, est pompée à une pression plus élevée, ajoutant ainsi un travail isentropique. Ensuite, l'eau est préchauffée, vaporisée et surchauffée par une source de chaleur à pression constante, apportant une chaleur isobare. La vapeur est détendue à travers une turbine pour extraire un travail isentropique, puis elle est condensée en eau à pression constante avant d'entrer à nouveau dans la pompe pour fermer le cycle, rejetant ainsi une chaleur isobare.

La turbine produit le travail qui est utilisé pour entraîner une génératrice. L'eau est un fluide de travail couramment utilisé dans le cycle de Rankine en raison de sa stabilité thermique et chimique élevée, de sa faible viscosité et de sa grande capacité calorifique. De plus, elle est non toxique, ininflammable, peu coûteuse et abondante. Toutefois, l'eau n'est pas appropriée pour une utilisation dans les cycles de Rankine avec des températures de source de chaleur inférieures à 350°C, car la vapeur à basse pression nécessite des échangeurs de chaleur plus grands, ce qui rend le cycle moins efficace. Pour des températures inférieures à 300°C (chaleur de basse et moyenne qualité), l'utilisation de l'ORC [36] ou du cycle de Kalina [37] peut être plus appropriée.

En termes scientifiques, l'ORC (Cycle de Rankine organique) est un cycle thermodynamique qui utilise des fluides de travail organiques à bas point d'ébullition pour récupérer la chaleur à partir de sources de chaleur à basse température. Cette technologie est largement applicable à différentes sources de chaleur en raison de la grande variété de fluides de travail possibles.

Les ORC sont utilisés dans des applications industrielles allant de 0,5 à 20 MW et ont été utilisés depuis au moins 30 ans, avec une croissance attendue dans le domaine de la récupération de la chaleur résiduelle industrielle [38]. Les cycles de Kalina sont des cycles innovants qui utilisent un fluide de travail composé d'au moins deux composants différents, généralement de l'eau et de l'ammoniac, pour produire de l'énergie électrique à partir de sources de chaleur. Ce cycle est plus complexe que le cycle de Rankine, mais les quatre processus clés du cycle de Rankine sont également présents dans le cycle de Kalina, avec l'ajout d'un générateur et d'un absorbeur.

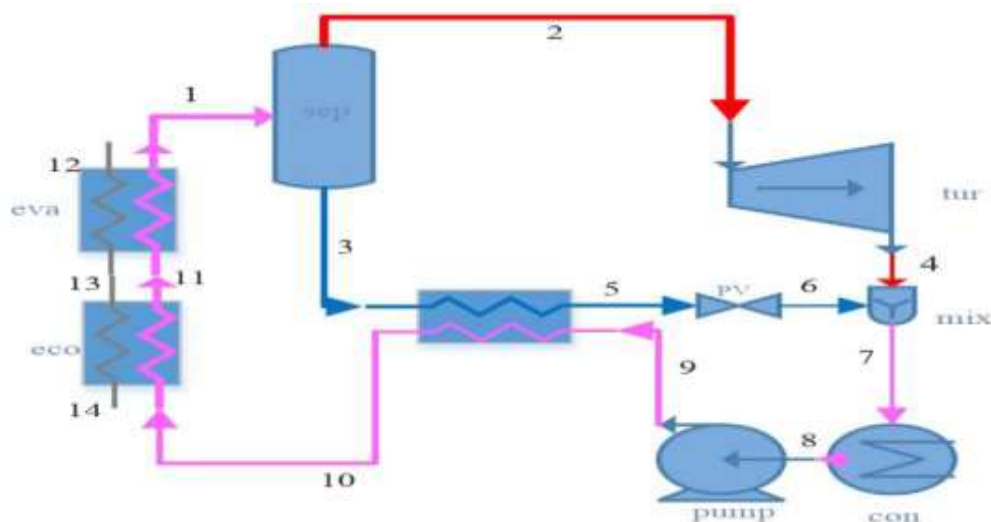


Figure II.6: Diagramme schématisé du cycle de Kalina [39]

II.4 Utilisations de ORC

Les cycles ORC sont capables de générer de l'électricité à partir de sources de chaleur de plus basse température (à partir de 90 °C) et dans des capacités plus petites (à partir de seulement quelques kW) par rapport aux cycles à vapeur [40,41]. Les ORC sont largement utilisés dans divers secteurs, notamment l'énergie géothermique [42], la biomasse [43], l'énergie solaire [44], les moteurs à combustion interne [45], qui permettent de récupérer la chaleur perdue, ainsi que l'énergie thermique des océans grâce à la technologie de conversion d'énergie thermique des océans (OTEC) [46].

L'augmentation de la demande mondiale en énergie, les coûts élevés associés à l'énergie et les problèmes de durabilité ont conduit à la nécessité de récupérer et d'utiliser la chaleur résiduelle. Selon le département américain de l'énergie (DOE), environ 60 % de la chaleur perdue à basse température est produite par les industries manufacturières et les centrales électriques.

Le rejet de gaz d'échappement à des températures supérieures à 350 °C dans l'environnement entraîne une perte considérable d'énergie primaire. Pour remédier à cela, la récupération de la chaleur des gaz d'échappement et son utilisation via le cycle de Rankine organique (ORC) est une méthode efficace et flexible offrant une structure

plus simple, une plus grande sécurité et une réduction des besoins de maintenance par rapport aux méthodes conventionnelles de récupération de chaleur, telles que le cycle de Rankine à vapeur. L'intégration de l'ORC dans un système énergétique tel qu'une centrale électrique, une installation industrielle ou un gros moteur diesel (ou autre moteur principal) permet d'augmenter la puissance de sortie et l'efficacité énergétique du système en utilisant de l'énergie de faible qualité (chaleur perdue). [47].

II.4.1 Récupération de chaleur fatale (Perdue)

Dans de nombreux processus industriels, une grande quantité d'énergie est libérée sous forme de gaz chauds ou de flux liquides. Cependant, cette chaleur est souvent rejetée dans l'environnement, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie et des conséquences environnementales négatives. L'optimisation de l'efficacité énergétique industrielle est devenue une préoccupation majeure dans le contexte de la demande croissante d'énergie et de la nécessité de minimiser l'impact environnemental.

Des études statistiques ont révélé que près de la moitié de l'énergie utilisée pour produire de l'électricité est gaspillée en raison de la limitation des processus de conversion d'énergie et du manque de technologies fiables de récupération d'énergie. La chaleur résiduelle est souvent disponible à des températures comprises entre 60 et 400 °C, avec une capacité croissante à des températures plus basses.

En général, la chaleur perdue à des températures de 300 à 400°C est courante dans des industries telles que le traitement du verre, du fer et de l'acier, des métaux non ferreux, des briques et de la céramique. La chaleur perdue à des températures moyennes, autour de 150 °C, est généralement présente dans des industries telles que l'alimentation, la chimie, le raffinage et les services publics du bâtiment.

Dans la plupart des industries, il est possible de récupérer la chaleur résiduelle à basse température. Selon une étude comparative présentée dans [48], l'ORC est la technologie la plus efficace pour la récupération de chaleur et la production d'électricité en utilisant des sources de chaleur ayant des températures comprises entre 200°C et 400°C. Toutefois, dans la plage de températures de 300-400°C, l'ORC doit rivaliser avec les petits cycles Rankine à vapeur couramment utilisés pour ces applications. D'autres technologies de récupération de chaleur perdue, telles que le moteur Stirling, la thermoélectricité et le cycle inversé de Brighton, ont également été comparées.

Les cimenteries sont des exemples de procédés industriels adaptés pour l'application des cycles organiques de Rankine (ORC), avec certaines installations commerciales déjà en exploitation. Dans un four typique moderne, environ 23 % de l'énergie thermique fournie est perdue sous forme de gaz résiduels, avec l'excès de gaz à température plus basse et par rayonnement sur toute la surface du système [49].

Moreira et al. [50] ont mené une évaluation thermo-économique des systèmes ORC pour la récupération de la chaleur perdue dans les cimenteries, qui ont le

potentiel de produire environ 4 000 à 9 000 kW et ainsi de réduire la production de 221 kgCO₂/an. De plus, ils ont souligné que ces systèmes ORC pour la récupération de la chaleur résiduelle de l'industrie du ciment présentent des avantages environnementaux et sont extrêmement compétitifs en termes de propriétés financières et techniques.

La Figure 2.6 illustre le fonctionnement de l'ORC pour la récupération de la chaleur perdue dans les cimenteries. Le processus ORC (Cycle Organique de Rankine) implique que le fluide de travail absorbe la chaleur des gaz d'échappement dans l'unité d'évaporation à pression constante. Le fluide subit ensuite une expansion isentropique dans la turbine, ce qui permet de convertir une partie de l'énergie thermique en énergie mécanique. Ensuite, la chaleur est transférée du fluide de travail à l'eau de refroidissement dans le condenseur à pression constante. Le fluide de travail subit une compression isentropique dans la pompe, ce qui permet de récupérer l'énergie mécanique. Enfin, le fluide de travail retourne à l'unité d'évaporation pour démarrer un nouveau cycle.

En tant qu'industrie à forte intensité énergétique, la production d'acier en Chine représente environ 15 à 20 % de la consommation totale d'énergie industrielle [51]. La majorité de l'énergie, soit environ 68 %, est perdue sous forme de chaleur résiduelle via les gaz de combustion et la vapeur émis par les différents équipements utilisés dans la production d'acier tels que les hauts fourneaux, les convertisseurs et les fours de réchauffage des machines de frittage [52]. Les gaz de combustion présentent une température comprise entre 200 et 450°C, contenant ainsi une grande quantité d'énergie résiduelle de qualité moyenne à élevée. En outre, l'eau de refroidissement sous pression qui sort du four présente typiquement une température de 90 à 150°C, constituant une autre source de récupération de chaleur appropriée. Cette eau chaude peut être utilisée pour chauffer les bureaux et les bâtiments, ou pour préchauffer d'autres processus si nécessaire. En outre, cette eau chaude à température modérée peut également être utilisée pour produire de l'électricité.

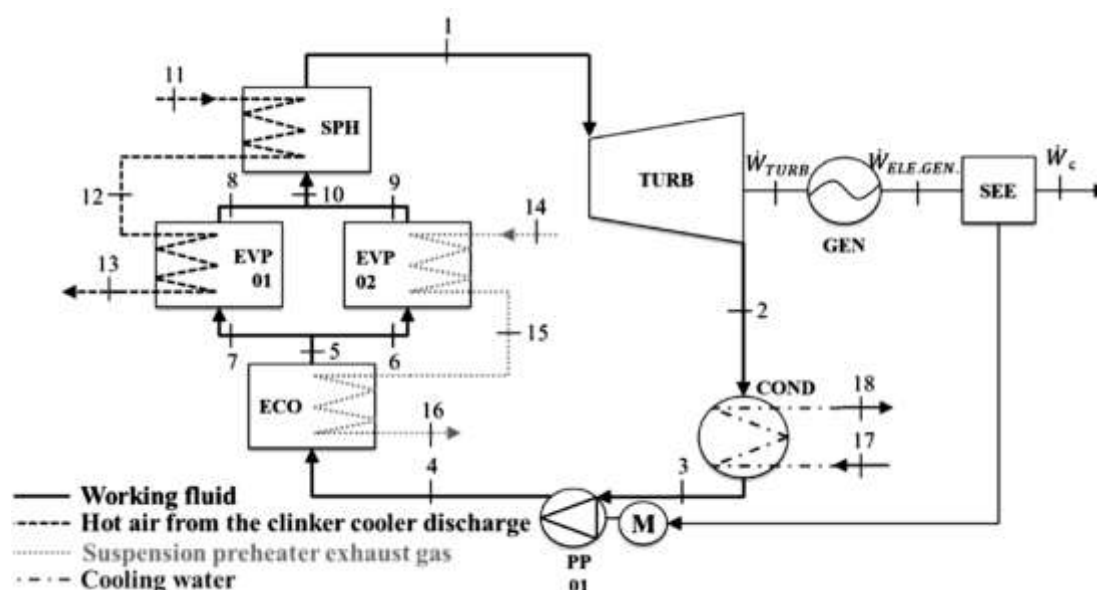


Figure II.7: Schéma d'un ORC pour la récupération de la chaleur perdue dans l'industrie du ciment [50].

De manière générale, environ un tiers de l'énergie produite par la combustion de carburant dans un moteur à combustion interne est gaspillé sous forme de chaleur perdue via les gaz d'échappement. Pour un moteur à essence 2L typique utilisé dans les voitures particulières, l'énergie perdue par l'échappement représente 21% de l'énergie libérée dans des conditions de charge et de vitesse courantes, ce chiffre atteignant 44% à la puissance de crête. L'ajout d'un ORC au moteur à combustion interne est une pratique courante pour améliorer l'efficacité globale du système, avec une augmentation de la puissance de 3% si la chaleur est récupérée de la chemise d'eau et de 10% si la chaleur des gaz de combustion à haute température est utilisée.

En outre, l'industrie du verre pourrait bénéficier de la technologie ORC en utilisant une boucle de transfert de chaleur intermédiaire pour collecter l'énergie thermique du gaz chaud sortant du four qui fond et affine les matières premières. Cette source de chaleur peut être récupérée à des températures de 400 à 500°C jusqu'à 200°C, caractérisée par un profil de température stable et un débit massique constant des gaz d'échappement. En tant qu'industrie à forte intensité énergétique, l'acier est également un domaine d'application potentiel pour l'utilisation de l'ORC. Environ 68% de l'énergie est perdue sous forme de chaleur résiduelle via les gaz de combustion et la vapeur rejetés par les hauts fourneaux, les convertisseurs et les fours de réchauffage des machines de frittage dans la production d'acier.

La température des gaz de combustion varie dans la plage de 200 à 450°C, contenant une grande quantité d'énergie résiduelle de qualité moyenne à élevée. De plus, l'eau de refroidissement sous pression sortant du four est typiquement de 90°C à 150°C, ce qui en fait une autre source appropriée de récupération de chaleur pouvant être utilisée pour chauffer des bureaux et des bâtiments ou pour préchauffer d'autres processus si nécessaire, ou encore pour produire de l'électricité.

II.4.2 Récupération de la chaleur perdue au niveau des usines pétrochimiques

La récupération de la chaleur résiduelle (WHR) est un processus essentiel dans l'industrie pétrochimique, permettant de récupérer la chaleur qui serait autrement perdue au cours de divers processus.

Les systèmes WHR sont largement utilisés dans l'industrie pétrochimique pour récupérer la chaleur des gaz d'échappement à haute température issus des processus de combustion, tels que les chaudières, les fours et les turbines. La chaleur récupérée peut être utilisée pour diverses applications, telles que le préchauffage des matières premières, la génération de vapeur ou la production d'électricité. La WHR peut contribuer à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre des usines pétrochimiques, tout en améliorant leur efficacité et leur rentabilité globales.

Plusieurs types de systèmes WHR sont couramment utilisés dans les industries pétrochimiques, notamment :

🌈 Les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) : ils permettent de récupérer la chaleur des gaz d'échappement générés par les turbines à gaz ou les moteurs à combustion pour produire de la vapeur utilisée à diverses fins, telles que la production d'électricité ou le chauffage.

✓ Les systèmes à cycle organique de Rankine (ORC) : ils utilisent un fluide de travail ayant un point d'ébullition inférieur à celui de l'eau pour produire de l'électricité à partir de sources de chaleur perdue à basse température.

✓ Les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) : ils stockent l'énergie thermique excédentaire générée par les processus pétrochimiques pendant les heures creuses et la libèrent pendant les périodes de pointe.

✓ Les échangeurs de chaleur : ils permettent de transférer la chaleur des fluides à haute température vers des fluides à basse température.

✓ Dans l'ensemble, la récupération de la chaleur perdue est un processus crucial pour les industries pétrochimiques, car elle permet de réduire la consommation d'énergie, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de l'usine dans son ensemble.

II.5 Conclusion

Une grande partie de la chaleur résiduelle est générée comme sous-produit dans les processus industriels. Cependant, la majeure partie de la chaleur résiduelle est de faible qualité. Elle est rejetée directement dans l'environnement sans être utilisée. Cette étude présente l'étude énergétique du cycle organique de Rankine (ORC) en comparant douze liquides organiques.

Où ce dernier est considéré comme un cycle prometteur convertissant la chaleur en énergie mécanique adaptée aux sources de chaleur à basse température.

Ce cycle utilise plus de liquides organiques que d'eau, qui ont généralement des poids moléculaires plus élevés, permettant des pressions de fonctionnement à des températures plus basses que celles trouvées dans un cycle de Rankine conventionnel.

Cette étude est dédiée à l'analyse énergétique du cycle ORC, en tenant compte de l'effet des températures de fonctionnement et de la sélection des fluides organiques sur les performances du cycle.

Chapitre III :

Etude de cas

III Etude De Cas

III.1 Introduction

La société "FERTIAL", également connue sous le nom de "Société des fertilisants d'Algérie", est une entreprise qui a été créée en août 2005 grâce à un partenariat entre le groupe algérien ASMIDAL et le groupe espagnol GRUPO CILLAR MIR. Elle est spécialisée dans la production d'engrais azotés et phosphatés ainsi que d'ammoniac liquide. Elle dispose d'une capacité annuelle de production d'un million de tonnes d'ammoniac, une partie de laquelle est réutilisée pour fabriquer une large gamme d'engrais azotés et phosphatés, tandis que le reste est destiné à l'exportation. Les sites industriels d'Annaba et d'Arzew abritent les installations de cette entreprise.

III.2 Usine Annaba

L'usine est localisée dans la zone industrielle d'Annaba et couvre une superficie de 103 hectares. Elle est exploitée par une main-d'œuvre de 700 individus.



Figure III.1: La société de FERTIAL

III.3 Production annuelle

- ✚ **Ammoniac:** 300.000 tonnes.
- ✚ **Acide nitrique:** 264.000 tonnes.
- ✚ **Engrais phosphatés simple TSP, les engrais complexes binaires et ternaires NPK et le sulfazote à 26M% d'azote:** 270.000 tonnes.
- ✚ **Engrais phosphatés simples SSP poudre:** 280.000 tonnes.

 **Calcium AmmoniatrateCAN:** à 27% d'azote, NA 33.5% d'azote et NA 34.5 soluble à 34.5% d'azote: 330.000 tonnes.

III.4 Capacité de stockage

Fertial possède une capacité de stockage d'engrais d'environ 200 000 tonnes, ce qui équivaut à un an de ventes. En outre, les deux usines disposent d'espaces de stockage, avec l'usine d'Annaba bénéficiant d'une capacité de stockage de 50 000 tonnes. Cette capacité de stockage accrue contribue à améliorer la qualité de service de Fertial et à renforcer la confiance de sa clientèle.

III.5 Certifications

Fertial s'est engagée à respecter les normes internationales de gestion en obtenant les certifications ISO 9001, 14001 et OHSAS 18001, ce qui lui permettra de soutenir son développement en toute confiance, de garantir la conformité aux exigences environnementales, d'assurer la sécurité de ses employés et de fournir régulièrement à ses clients un produit de qualité supérieure répondant aux normes internationales. De plus, Fertial est un membre actif de l'Association internationale des engrais (IFA) et de l'Association des engrais arabes (AFA).

III.6 Sécurité, Qualité et environnement

III.6.1 Sécurité

Fertial s'engage constamment à améliorer les conditions d'hygiène et de sécurité à l'intérieur de ses usines et de ses installations industrielles. Pour garantir la sécurité des biens et des personnes, elle a mis en place deux équipes dédiées à cet effet sur chacun de ses sites industriels et a obtenu la certification OHSAS 18001. Cela démontre l'engagement de l'entreprise à assurer une sécurité optimale à ses employés. Depuis 2005, le nombre d'accidents de travail a été réduit de plus de 80%. L'objectif ultime de l'entreprise est d'atteindre zéro accident de travail.

III.6.2 Qualité

Fertial s'efforce continuellement d'améliorer ses performances afin de se conformer aux exigences de gestion de la qualité. Pour y parvenir, elle procède à la rénovation de ses installations industrielles, à l'augmentation de ses capacités de production, à une maîtrise stricte du processus de production, à la valorisation permanente de son personnel et à l'obtention de la certification ISO 9001.

III.6.3 Environnement

Grâce à son obtention de la certification ISO 14001, Fertial a pris des mesures concrètes et investi dans des technologies pour préserver l'environnement, réduire les émissions de gaz polluants et garantir une production de qualité [53].

III.7 Données utilisées

Tableau III.1 Les données prises à la sortie de la section de décarbonatation

Le paramètre	La valeur	L'unité
Débit massique total	8661.6205	lb/h
Débit massique de la phase gazeuse	6818.4205	lb/h
Débit massique de la phase liquide	1843.2	lb/h
La pression	0.28	bar
La Température	78	°C
Composition $\begin{cases} H_2O \\ H_2 \\ N_2 \\ CO_2 \end{cases}$	$\begin{matrix} 21.28\% \\ 2.00\% \\ 0.00\% \\ 76.72\% \end{matrix}$	

III.8 Rejets thermiques au niveau de l'industriels pétrochimiques

Comme évoqué précédemment, l'industrie pétrochimique joue un rôle essentiel dans l'économie mondiale en produisant une grande variété de produits chimiques de base, comme les matières plastiques, les fibres synthétiques, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques spécialisés, qui sont largement utilisés dans divers secteurs industriels. Cependant, cette production engendre également des rejets thermiques significatifs, qui correspondent aux quantités de chaleur émises dans l'environnement lors des processus de fabrication. Ces rejets peuvent avoir des origines multiples, notamment les processus de combustion, les réactions chimiques exothermiques et les systèmes de refroidissement, et leur impact sur l'environnement, la santé humaine et les ressources en eau peut être néfaste.

Les émissions thermiques dans l'industrie pétrochimique proviennent de diverses sources. Les procédés de combustion utilisés pour produire de l'énergie, tels que la combustion de combustibles fossiles dans des chaudières et des fours, engendrent de grandes quantités de chaleur qui sont rejetées dans l'environnement. De plus, de nombreuses réactions chimiques impliquées dans la production de produits chimiques pétrochimiques sont exothermiques, c'est-à-dire qu'elles génèrent de la chaleur. Par exemple, la polymérisation du propylène pour produire du polypropylène, un plastique largement utilisé, est une réaction exothermique qui peut générer d'importantes quantités de chaleur. En outre, les équipements de refroidissement

utilisés pour maintenir les températures de fonctionnement des procédés pétrochimiques, tels que les tours de refroidissement, peuvent également rejeter de la chaleur dans l'environnement.

Les émissions thermiques des usines pétrochimiques peuvent avoir divers impacts potentiels sur l'environnement et la santé humaine. Voici quelques exemples :

III.8.1 Impacts environnementaux

Les émissions thermiques peuvent augmenter la température de l'eau où elles sont rejetées, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les écosystèmes aquatiques. Les températures plus élevées peuvent diminuer les niveaux d'oxygène dans l'eau, ce qui peut rendre difficile la survie des poissons et d'autres organismes aquatiques. De plus, les émissions thermiques peuvent modifier la composition chimique de l'eau, la rendant plus acide et toxique pour la vie aquatique.

III.8.2 Impacts sur la santé humaine

L'exposition à des températures élevées peut être dangereuse pour les êtres humains, surtout pour les personnes âgées, les enfants et les personnes ayant des problèmes de santé préexistants. Les émissions thermiques peuvent également libérer des produits chimiques nocifs dans l'environnement, tels que des métaux lourds, qui peuvent s'accumuler dans les poissons et autres fruits de mer consommés par les humains. La consommation de fruits de mer contaminés peut avoir des effets néfastes sur la santé, notamment des dommages neurologiques et le cancer.

III.9 Conclusion

Ce chapitre traite de la production chimique d'ammoniac et présente en détail les étapes du processus de fabrication. L'ammoniac est principalement utilisé dans la production d'engrais et de nombreux autres produits dans divers domaines. Il est également utilisé comme gaz réfrigérant dans l'industrie de la réfrigération industrielle, tandis que l'urée granulée est utilisée en agriculture pour fertiliser les sols. Cependant, lors de la synthèse de l'ammoniac, des émissions gazeuses sont générées au niveau de la section de décarbonatation, qui sont directement rejetées dans l'atmosphère sans être traitées.

Chapitre IV :

Résultats d'optimisation

IV Résultats d'optimisation

IV.1 Introduction

Après ce qui a été présenté précédemment dans les chapitres précédents sur l'OCR, la sélection de cas a été étudiée dans le chapitre, où nous avons développé un code logiciel à l'aide du programme ESS qui offre des fonctionnalités d'optimisation permettant aux ingénieurs de trouver des valeurs optimales pour des variables telles que les performances du système, ou la consommation d'énergie, et nous travaillons sur la sélection d'un groupe de fluides selon des normes spécifiques de température et de pression, en les simulant et en discutant des résultats obtenus afin d'atteindre le meilleur liquide pour le cycle.

IV.2 Étude de cas

Ainsi le cas étudié a été traité dans le chapitre précédent et qui a été parlé d'usine Fertial.

La société "FERTIAL", également connue sous le nom de "Société des fertilisants d'Algérie", est une entreprise qui a été créée en août 2005 grâce à un partenariat entre le groupe algérien ASMIDAL et le groupe espagnol GRUPO CILLAR MIR. Elle est spécialisée dans la production d'engrais azotés et phosphatés ainsi que d'ammoniac liquide. L'usine est localisée dans la zone industrielle d'Annaba et couvre une superficie de 103 hectares. Elle est exploitée par une main-d'œuvre de 700 individus.

Grâce à son obtention de la certification ISO 14001, Fertial a pris des mesures concrètes et investi dans des technologies pour préserver l'environnement, réduire les émissions de gaz polluants et garantir une production de qualité

Les données de Cas étudié a été utilisée dans la simulation à travers l'opération d'optimisation étaient comme la suite

Tableau IV.1 :Les données prises à la sortie de la section de décarbonatation.

Le paramètre	La valeur	L'unité
Débit massique total	8661.6205	lb/h
Débit massique de la phase gazeuse	6818.4205	lb/h
Débit massique de la phase liquide	1843.2	lb/h
La pression	0.28	bar
La Température	78	°C
Composition $\begin{cases} H_2O \\ H_2 \\ N_2 \\ CO_2 \end{cases}$	$\begin{matrix} 21.28\% \\ 2.00\% \\ 0.00\% \\ 76.72\% \end{matrix}$	

IV.3 Présentation de l'EES

EES (Engineering Equation Solver) est un logiciel spécialisé conçu pour les ingénieurs afin de résoudre des équations complexes dans divers domaines de l'ingénierie, tels que la thermodynamique, la mécanique des fluides, la thermique, la mécanique, l'électrique, et bien d'autres encore. Il est largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie pour l'analyse numérique, les simulations, la résolution de problèmes de conception et de performance, ainsi que l'optimisation des systèmes.

EES est développé par F-Chart Software, une société spécialisée dans les outils de simulation et d'optimisation pour les ingénieurs. Il offre une interface conviviale et intuitive qui permet aux ingénieurs de modéliser facilement des systèmes complexes en utilisant des équations mathématiques. Le logiciel prend en charge la résolution symbolique et numérique d'équations, la manipulation d'unités, la création de tableaux et de graphiques, ainsi que l'optimisation des paramètres de conception.

EES est disponible en plusieurs langues, y compris le français, et dispose d'une large bibliothèque d'équations et de fonctions intégrées spécifiques à l'ingénierie, ce qui en fait un outil puissant pour les ingénieurs francophones. Le logiciel est utilisé dans divers secteurs de l'ingénierie, tels que l'énergie, l'aérospatiale, l'automobile, et le génie des procédés.

✚ **Fonctionnalités de résolution d'équations** : EES offre une large gamme de fonctionnalités pour la résolution d'équations, y compris la résolution symbolique et numérique d'équations algébriques et différentielles, la résolution de systèmes d'équations, la manipulation d'unités (avec prise en charge de plus de 1500 unités différentes), la possibilité de créer des fonctions utilisateur, et la possibilité de représenter graphiquement les résultats.

✚ **Bibliothèque d'équations intégrées** : EES dispose d'une bibliothèque d'équations intégrées spécifiques à l'ingénierie, couvrant un large éventail de domaines tels que la thermodynamique, la mécanique des fluides, la thermique, la mécanique, l'électricité, la chimie, et bien d'autres encore. Cela permet aux ingénieurs d'avoir accès à un large éventail d'équations prédéfinies pour modéliser et résoudre des problèmes spécifiques à leur domaine d'étude.

✚ **Interface conviviale** : EES dispose d'une interface utilisateur conviviale qui permet aux ingénieurs de modéliser facilement des systèmes complexes en utilisant des équations mathématiques. L'interface graphique permet de créer, modifier et organiser des équations et des variables, de visualiser les résultats sous forme de tableaux et de graphiques, et de gérer les unités de manière intuitive.

✚ **Optimisation** : EES offre également des fonctionnalités d'optimisation qui permettent aux ingénieurs de trouver les valeurs optimales des variables de conception pour maximiser ou minimiser certains objectifs, tels que la performance d'un système, la consommation d'énergie, ou tout autre critère spécifié par l'utilisateur.



Figure IV.1: Interface du logiciel EES [54]

IV.4 Paramètres d'optimisation

Un code a été développé à l'aide du logiciel EES pour optimiser le cycle ORC en optimisant deux paramètres différents : T1 et T2, où T1 fait référence à la température d'évaporation et T2 fait référence à la température de condensation.

Cependant, leurs valeurs minimales et maximales ont été fixées en fonction de la température de la source de chaleur comme suit :

$$T1_{\min} = 45 \text{ °C}, T1_{\max} = 73 \text{ °C},$$

$$T2_{\min} = 15 \text{ °C}, T2_{\max} = 25 \text{ °C}.$$

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

$$M_{\text{hot}} = 1.09 \text{ kg/s}.$$

$$T_{\text{hot,in}} = 78 \text{ °C}.$$

$$T_{\text{hot,out}} = 30 \text{ °C}.$$

$$P_{\text{hot}} = 28 \text{ kPa}.$$

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

```

F$ = 'H2O+H2+CO2'
f2 = 0.02
T_hot,in = 78   T_hot,in = 78   T_hot,out = 30   T_hot,out = 30   p_hot = 28
h_hot,in = - 9644
h_hot,out = - 9709
m_hot = 1.09
eta_turb = 1
eta_pump = 1
x1 = 1

x3 = 0   Power_available = m_hot * [ (h_hot,in - h_hot,out) / 1000 ]
h1 = h (R161 , T= T1 , x= x1 )
s1 = s (R161 , T= T1 , x= x1 )
p1 = P (R161 , T= T1 , x= x1 )
s2 = s1
h2 = h (R161 , s= s2 , T= T2 )
p2 = P (R161 , s= s2 , T= T2 )
T3 = T2
h3 = h (R161 , T= T2 , x= x3 )
s3 = s (R161 , T= T2 , x= x3 )

```

IV.5 Sélection des fluides de travail

Nous avons sélectionné un groupe de composés selon des recherches publiées et sur la base de différents critères, où les fluides dont la température critique est supérieure à la température de la source utilisée pour produire de l'électricité ont été choisis car ils ont une plus grande efficacité pour le cycle.

En plus des fluides qui assurent la protection de l'environnement, puisque leurs GWP sont tous inférieurs à 120 qui représente la quantité de réchauffement climatique causé par un fluide de travail donné par rapport au dioxyde de carbone sur une période de 100 ans, de plus, l'ODP des liquides sélectionnés est presque nul. C'est une mesure de la capacité d'une substance à détruire la couche d'ozone dans l'atmosphère terrestre. Nous tenons également compte de la norme de sécurité selon ASHRAE34, dans laquelle la lettre A signifie toxicité "la plus faible".

Les numéros 1, 2 et 3 indiquent la propagation de la flamme, le numéro 1 signifie aucune propagation de la flamme, le numéro 2 signifie une faible inflammabilité et le numéro 3 signifie une plus grande inflammabilité. Dans certains cas, le groupe 2 est désigné par la lettre L (comme A2L) et ici la lettre L signifie plus difficile à allumer. Le tableau ci-dessous représente le groupe de composés sélectionnés, en plus de certaines propriétés physiques telles que la température, la pression, l'ODP et le potentiel de réchauffement global pour chaque composé, en plus du niveau de sécurité.

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

Fluide	T_c [°C]	P_c [bar]	ODP	GWP	Sécurité
Pentane	196.6	33.7	0	20	A3
Isopentane	187.2	33.8	0	20	A3
R1233zd(E)	165.6	35.7	0.0003	1	A1
Butane	152.0	38.0	0	20	A3
Neopentane	160.6	32.0	0	20	A3
Isobutane	134.7	36.3	0	3	A3
R152a	113.3	45.2	0	120	A2
R161	102.1	50.1	0	12	A3
R1234ze(E)	109.4	36.3	0	<1	A2L
Propylene	91.1	45.6	0	3	A3
Propane	96.7	45.2	0	20	A3
R1234yf	94.7	33.8	0	6	A2L

IV.6 Résultats et discussion :

IV.6.1 Résultats :

Après l'optimisation et la simulation des composés sélectionnée, nous avons trouvé ce qui suit

Tableau IV.3: Résultats d'optimisation

Fluid	Power _{cycle}	Power available	Wt	Wp	P1	P2	P3	s1	s2	s3	s4	T1	T2	T3	T4
n-Pentane	13.61 [kW]	0.07085 [MW]	13.67 [kW]	0.06278 [kW]	306.6 [kPa]	23.53 [kPa]	46.99 [kPa]	1.296 [kJ/kg·K]	1.296 [kJ/kg·K]	-0.08384 [kJ/kg·K]	-0.08384 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.05 [°C]	15.05 [°C]	15.13 [°C]
Isopentane	13.82 [kW]	0.07085 [MW]	13.91 [kW]	0.08255 [kW]	384 [kPa]	31.64 [kPa]	63.78 [kPa]	-0.4577 [kJ/kg·K]	-0.4577 [kJ/kg·K]	-1.765 [kJ/kg·K]	-1.765 [kJ/kg·K]	72.98 [°C]	15.11 [°C]	15.11 [°C]	15.21 [°C]
R1233zd(E)	11.55 [kW]	0.07085 [MW]	11.66 [kW]	0.1079 [kW]	552.3 [kPa]	68.85 [kPa]	89.64 [kPa]	1.768 [kJ/kg·K]	1.768 [kJ/kg·K]	1.066 [kJ/kg·K]	1.066 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.13 [°C]	15.13 [°C]	15.29 [°C]
n-Butane	12.16 [kW]	0.07085 [MW]	12.35 [kW]	0.1859 [kW]	867.5 [kPa]	126.5 [kPa]	176.6 [kPa]	2.466 [kJ/kg·K]	2.466 [kJ/kg·K]	1.126 [kJ/kg·K]	1.126 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.03 [°C]	15.03 [°C]	15.39 [°C]
Neopentane	14.82 [kW]	0.07085 [MW]	14.97 [kW]	0.1513 [kW]	629.3 [kPa]	52.67 [kPa]	123.3 [kPa]	1.23 [kJ/kg·K]	1.23 [kJ/kg·K]	0.0436 [kJ/kg·K]	0.0436 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.07 [°C]	15.07 [°C]	15.28 [°C]
Isobutane	11.99 [kW]	0.07085 [MW]	12.27 [kW]	0.2742 [kW]	1159 [kPa]	189.4 [kPa]	258.9 [kPa]	2.358 [kJ/kg·K]	2.358 [kJ/kg·K]	1.125 [kJ/kg·K]	1.125 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.02 [°C]	15.02 [°C]	15.45 [°C]
R152a	9.971 [kW]	0.07085 [MW]	10.35 [kW]	0.3836 [kW]	2018 [kPa]	443.5 [kPa]	443.5 [kPa]	2.031 [kJ/kg·K]	2.031 [kJ/kg·K]	1.094 [kJ/kg·K]	1.094 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.31 [°C]	15.31 [°C]	16.05 [°C]
R161	9.914 [kW]	0.07085 [MW]	10.48 [kW]	0.5626 [kW]	2853 [kPa]	696.1 [kPa]	696.1 [kPa]	2.222 [kJ/kg·K]	2.222 [kJ/kg·K]	1.116 [kJ/kg·K]	1.116 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.02 [°C]	15.02 [°C]	16.11 [°C]
R1234ze(E)	10.13 [kW]	0.07085 [MW]	10.53 [kW]	0.3932 [kW]	1723 [kPa]	340.2 [kPa]	369.7 [kPa]	1.684 [kJ/kg·K]	1.684 [kJ/kg·K]	1.074 [kJ/kg·K]	1.074 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.31 [°C]	15.31 [°C]	15.94 [°C]
Propylene	9.616 [kW]	0.07085 [MW]	10.49 [kW]	0.8689 [kW]	3270 [kPa]	894.5 [kPa]	894.5 [kPa]	-0.6719 [kJ/kg·K]	-0.6719 [kJ/kg·K]	-1.782 [kJ/kg·K]	-1.782 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.03 [°C]	15.03 [°C]	16.64 [°C]
Propane	9.62 [kW]	0.07085 [MW]	10.34 [kW]	0.7202 [kW]	2742 [kPa]	733.9 [kPa]	733.9 [kPa]	2.301 [kJ/kg·K]	2.301 [kJ/kg·K]	1.137 [kJ/kg·K]	1.137 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.11 [°C]	15.11 [°C]	16.39 [°C]
R1234yf	9.609 [kW]	0.07085 [MW]	10.2 [kW]	0.5887 [kW]	2179 [kPa]	493.4 [kPa]	511.4 [kPa]	1.605 [kJ/kg·K]	1.605 [kJ/kg·K]	1.07 [kJ/kg·K]	1.07 [kJ/kg·K]	73 [°C]	15.08 [°C]	15.08 [°C]	16.01 [°C]

IV.6.2 Discussion

Après avoir compilé les résultats globaux du processus d'optimisation, on constate une amélioration du cycle en utilisant le premier liquide "Pentane". La quantité maximale d'énergie pouvant être produite est 13.61kw lorsque les valeurs de température 196.6 °C et de pression 33.7 bar. D'autre part, la même amélioration a été effectuée sur les liquides "Butane" et "Isobutane" des variations diverses ont été observées dans les résultats, où les résultats obtenus indiquent que la quantité maximale d'énergie est 12.16kw et 11.99kw à des températures 152.0°C et 134.7°C et des pressions 38.0 bar et 36.3 bar successivement.

Lors de la poursuite du processus d'optimisation et en revenant aux liquides "Isopentane", "R1234yf" l'amélioration du cycle a donné des résultats acceptables et variés, de sorte que la quantité d'énergie produite était dans l'ordre de 13.82kw, 9.609kw, à la même pression 33.8bar et températures 187.2°C et 94.7°C successivement. Cette optimisation en utilisant du Neopentane à une température de 160.6°C et une pression de 32.0 bar a montré que la puissance maximale pouvant être produite est de 14.82 kw. De la même manière, nous avons effectué une optimisation de l'anneau à l'aide de "R1233zd" et "R1234ze", et il a montré que l'énergie générée était de 11.5 kw, 10.13kw à une température de 165.6°C, 109.4°C et une pression de 35.7 bar, 36.3 bar successivement.

Et nous constatons que l'optimisation de l'anneau en utilisant des liquides Propylène, Propane et R161, R152a à deux températures de 91.1°C, 96.7°C et 102.1°C, 113.3°C une pression de 45,6 bar, 45.2 bar et 50.1bar, 45.2 bar indique que la puissance maximale pouvant être produite est de 9.616 kw, 9.62kw et 9.914kw, 9.971kw tout de successivement. Une fois que l'optimisation du cycle pour tous les liquides, et grâce à notre étude, nous avons conclu que le meilleur liquide pour le cycle qui peut être utilisé pour obtenir les meilleurs résultats est le Néopentane.

Tableau IV.4: Classement des fluides par rapport Power cycle, ODP et GWP

Classement	Fluides	Power cycle	ODP	GWP
1	Neopentane	14.82[kW]	0	20
2	Isopentane	13.82[kW]	0	20
3	Pentane	13.61[kW]	0	3
4	Butane	12.16[kW]	0	20
5	Isobutane	11.99[kW]	0	3
6	R1233zd (E)	11.55[kW]	0.0003	1
7	R1234ze (E)	10.13[kW]	0	<1
8	R152a	9.971[kW]	0	120
9	R161	9.914[kW]	0	12
10	Propane	9.62[kW]	0	20
11	Propylène	9.616[kW]	0	3
12	R1234yf	9.609[kW]	0	6

D'un autre côté, les résultats obtenus confirment que la récupération de la chaleur résiduelle au sein de cette industrie peut entraîner de nombreux avantages en termes de consommation énergétique et d'impacts environnementaux.

En ce qui concerne la consommation énergétique, la récupération de la chaleur résiduelle permet de réutiliser une ressource qui autrement serait perdue, ce qui réduit la dépendance de l'industrie vis-à-vis des sources d'énergie traditionnelles. En exploitant cette chaleur pour générer de l'électricité, l'industrie peut réduire sa demande en énergie provenant de l'extérieur, ce qui se traduit par des économies significatives sur les coûts énergétiques.

En ce qui concerne les impacts environnementaux, la récupération de la chaleur résiduelle contribue à réduire les émissions de CO₂. Plutôt que de rejeter la chaleur dans l'atmosphère, elle est capturée et utilisée pour produire de l'électricité, évitant ainsi le recours à des sources d'énergie plus polluantes. En réduisant les émissions de CO₂, cette solution contribue à lutter contre le changement climatique et à préserver l'environnement.

De plus, cette solution présente également l'avantage de répondre à la demande quotidienne d'électricité de l'industrie pour ses besoins normaux. En récupérant la chaleur résiduelle de manière efficace, l'industrie peut satisfaire sa propre demande énergétique interne sans avoir à dépendre entièrement du réseau électrique externe. Cela peut améliorer la stabilité de l'approvisionnement en électricité de l'industrie et réduire les risques liés à d'éventuelles pannes de courant.

En résumé, la récupération de la chaleur résiduelle au sein de cette industrie présente de nombreux avantages. Elle permet de réduire la consommation énergétique globale, de réduire les émissions de CO₂ et de répondre à la demande quotidienne d'électricité de l'industrie. Cette approche contribue ainsi à la transition vers des pratiques industrielles plus durables et respectueuses de l'environnement.

IV.7 Conclusion

Grâce à nos études, nous sommes arrivés dans une certaine mesure que le meilleur fluide de cycle qui peut être utilisé pour obtenir une plus grande quantité d'énergie est le Neopentane.

De l'autre côté, les résultats obtenus confirment que l'utilisation du cycle ORC (Cycle de Rankine Organique) pour la récupération de la chaleur résiduelle dans les industries pétrochimiques peut apporter des avantages importants, notamment du point de vue énergétique et environnemental. Cependant, une analyse économique est nécessaire pour valider cette hypothèse.

Conclusion générale

Conclusion générale

Il s'agit d'une technologie de production d'énergie qui utilise des liquides organiques pour convertir la chaleur en électricité. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, y compris l'industrie pétrochimique. Ils sont utilisés dans l'industrie pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone. Ceci peut être réalisé en intégrant des cycles ORC avec une variété de processus industriels différents.

Où il est possible de déterminer les fluides de travail appropriés qui améliorent l'efficacité du cycle et réduisent son impact sur l'environnement. Cette flexibilité est un sujet de recherche attrayant où différentes options de fluides de travail peuvent être explorées et optimisées.

Cette étude vise à explorer la possibilité d'intégrer des cycles ORC pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone dans l'industrie pétrochimique. Cette étude comprend un examen des propriétés thermiques, environnementales et de performance des fluides de travail utilisés dans les cycles organiques de Rankine. Les développements récents dans ce domaine seront également examinés et le potentiel de développements futurs dans la sélection des fluides de travail pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes ORC sera évalué.

Cette étude vise également à expérimenter et à étudier une variété de liquides organiques pouvant être utilisés dans ces cycles, de sorte que le programme EES (Engineering Equation Solver) a été utilisé pour analyser les données et obtenir la préférence des liquides.

Les résultats obtenus valident l'idée selon laquelle l'application du cycle ORC (Cycle de Rankine Organique) pour la récupération de la chaleur résiduelle dans les industries pétrochimiques peut générer des avantages considérables, notamment sur le plan énergétique et environnemental. Toutefois, il est essentiel de réaliser une analyse économique pour confirmer cette hypothèse.

Enfin, nous concluons que le choix judicieux des fluides de travail pour les ORC est crucial pour améliorer l'efficacité énergétique et minimiser l'impact environnemental. Nous espérons que cette étude contribuera à l'optimisation des cycles ORC dans les industries pétrochimiques et à la promotion de l'utilisation des sources d'énergie perdu.

Références

- [1] Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy* 2010;35:112–21. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.023>.
- [2] Tchanche BF, Papadakis G, Lambrinos G, Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering* 2009;29:2468–76. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>.
- [3] Moreira JR. Global Biomass Energy Potential. *MitigAdaptStratGlob Change* 2006;11:313–42. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9003-8>.
- [4] Le VL. Étude de la faisabilité des cycles sous-critiques et supercritiques de Rankine pour la valorisation de rejets thermiques. Université de Lorraine, 2014.
- [5] Ether Engines. n.d. <http://douglas-self.com/MUSEUM/POWER/ether/ether.htm> (accessed February 14, 2022).
- [6] Carnot S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Vrin; 1978.
- [7] Galloway E. *History and progress of the steam engine: with a practical investigation of its structure and application*. Thomas Kelly; 1832.
- [8] Macchi E, Astolfi M. *Organic rankine cycle (ORC) power systems: technologies and applications*. WoodheadPublishing; 2016.
- [9] Colonna P, Casati E, Trapp C, Mathijssen T, Larjola J, Turunen-Saaresti T, et al. Organic Rankine cycle power systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2015;137.
- [10] Spencer LC. A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part I. A history of solar-powered devices up to 1950. *Solar Energy* 1989;43:191–6.
- [11] Invernizzi CM. Closed power cycles. *Lecture Notes in Energy* 2013;11.
- [12] Colonna P, Casati E, Trapp C, Mathijssen T, Larjola J, Turunen-Saaresti T, et al. Organic Rankine cycle power systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2015;137.
- [13] El-Wakil MM. *Powerplant technology* 1984.
- [14] Guo T, Wang HX, Zhang SJ. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources. *Energy* 2011;36:2639–49. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.005>.

Références

- [15] Rabah Touaibi¹ Hasan Kote² Ozlem Boydak²: An Energy Investigation of An Organic Rankine Cycle Utilizing Three Organic Fluids :Hittite Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (1) 41–44.
- [16] Process of diagram from:Qian Ma 1, *, Yongzhen Chen 2, Anqi Liu 3, Qingzhe Jiang 1, 4 :Benefit analysis of organic Rankine cycle power generation by using waste heat recovery in Refinery:E3S Web of Conferences **352**, 02014 (2022).
- [17] Breeze PA. Power generation technologies.Thirdedition.Kidlington, Oxford, United Kingdom ; Cambridge, MA, United States: Newnes, an imprint of Elsevier; 2019.
- [18] Rayegan R, Tao Y.X. : A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs): Renewable Energy.
- [19] Hung TC, Shai TY, Wang SK. A review of organic Rankine cycles for the recovery of low-grade waste heat. Energy 1997;22:661–7
- [20] Liu Bo-Tau, Chien K-H, Wang C-C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. Energy 2004;29:1207–17.
- [21] REFPROP (9.0). National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg; 2010.
- [22] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14:3059–67. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.
- [23] Badr O, Probert SD, O’callaghan PW. Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine. Applied Energy 1985;21:1–42.rgy 2011;88:2802–8.
- [24] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14:3059–67. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.
- [25] Tchanche BF, Papadakis G, Lambrinos G, Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering 2009;29:2468–76. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>.
- [26] Lakew AA, Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source. Applied Thermal Engineering 2010;30:1262–8.
- [27] Hung T-C, Shai TY, Wang SK.A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. Energy 1997;22:661–7.

Références

- [28] Mikielwicz D, Mikielwicz J. A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP. *Applied Thermal Engineering* 2010;30:2357–62.
- [29] Varga Z., Rabi I. and Farkas C., (2012), Waste heat recovery with Organic Rankine Cycle in the petroleum industry, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 301-306.
- [30] Wolf V, Bertrand A, Leyer S. Analysis of the thermodynamic performance of transcritical CO₂ power cycle configurations for low grade waste heat recovery. *Energy Reports* 2022;8:4196–208. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.040>.
- [31] Forman C, Muritala IK, Pardemann R, Meyer B. Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;57:1568–79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [32] Johnson I, Choate WT, Davidson A. Waste heat recovery. Technology and opportunities in US industry. BCS, Inc., Laurel, MD (United States); 2008.
- [33] Brückner S, Liu S, Miró L, Radspieler M, Cabeza LF, Lävemann E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy* 2015;151:157–67. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>.
- [34] Benedetti M, Dadi D, Giordano L, Introna V, Lapenna PE, Santolamazza A. Design of a Database of Case Studies and Technologies to Increase the Diffusion of Low-Temperature Waste Heat Recovery in the Industrial Sector. *Sustainability* 2021;13:5223. <https://doi.org/10.3390/su13095223>.
- [35] Wu W, Wang B, Shi W, Li X. Absorption heating technologies: A review and perspective. *Applied Energy* 2014;130:51–71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.027>.
- [36] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:3059–67. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.
- [37] Hung T-C, Shai TY, Wang SK. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy* 1997;22:661–7.
- [38] F. Tchanche B, Pétrissans M, Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;39:1185–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.139>.

Références

- [39] Dincer I, Demir ME. 4.8 Steam and Organic Rankine Cycles. In: Dincer I, editor. *Comprehensive Energy Systems*, Oxford: Elsevier; 2018, p. 264–311. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00410-7>.
- [40] Bahrampoury R, Behbahaninia A. Thermodynamic optimization and thermoeconomic analysis of four double pressure Kalina cycles driven from Kalina cycle system 11. *Energy Conversion and Management* 2017;152:110–23. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.046>.
- [41] Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:4175–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>.
- [42] Shengjun Z, Huaixin W, Tao G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation. *Applied Energy* 2011;88:2740–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.034>.
- [43] Vaja I, Gambarotta A. Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy* 2010;35:1084–93. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.001>.
- [44] Tchanche BF, Papadakis G, Lambrinos G, Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering* 2009;29:2468–76. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>.
- [45] Uehara H, Ikegami Y. Optimization of a Closed-Cycle OTEC System. *Journal of Solar Energy Engineering* 1990;112:247–56. <https://doi.org/10.1115/1.2929931>.
- [46] Soltani M, Kashkooli F, Dehghani-Sani AR, Kazemi AR, Bordbar N, Farshchi MJ, et al. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society* 2019;44:793–818. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.036>.
- [47] Sternlicht, B. Waste energy recovery: an excellent investment opportunity. *Energy Convers. Manag.* 1982, 22, 361–373.
- [48] Moreira LF, Arrieta FRP. Thermal and economic assessment of organic Rankine cycles for waste heat recovery in cement plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;114:109315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109315>.
- [49] Ma G, Cai J, Zeng W, Dong H. Analytical Research on Waste Heat Recovery and Utilization of China's Iron & Steel Industry. *Energy Procedia* 2012;14:1022–8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1049>.

Références

- [50] Zhang L, Wu L, Zhang X, Ju G. Comparison and Optimization of Mid-low Temperature Cogeneration Systems for Flue Gas in Iron and Steel Plants. *J Iron Steel Res Int* 2013;20:33–40. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60193-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60193-4).
- [51] Tian H, Shu G, Wei H, Liang X, Liu L. Fluids and parameters optimization for the organic Rankine cycles (ORCs) used in exhaust heat recovery of Internal Combustion Engine (ICE). *Energy* 2012;47:125–36. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.021>.
- [52] Astolfi M. An innovative approach for the techno-economic optimization of organic Rankine cycles 2014
- [53] Youcef Redjeb , Rahmi Fella RECUPERATION DE CO2 AU NIVEAU D'USINE FERTIAL ANNABA Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Génie de l'environnement/Procédés Pharmaceutiques école nationale polytechnique de Constantine Département: Génie des Procédés.
- [54] EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software : Engineering Software. (n.d.). Retrieved May 20, 2023, from <https://fchartsoftware.com/ees/>

Résumé

Le cycle organique de Rankine (ORC) est un processus thermodynamique qui convertit la chaleur en travail mécanique en utilisant des fluides de travail organiques dans un système en boucle fermée. Le cycle fonctionne sur les mêmes principes que le cycle de Rankine, mais utilise des fluides organiques au lieu de l'eau comme fluide de travail.

L'ORC se compose généralement de quatre composants principaux : une source de chaleur, une pompe, une turbine et un condenseur. Le fluide de travail est pompé vers la source de chaleur, où il est vaporisé puis détendu à travers une turbine, produisant un travail mécanique. La vapeur s'écoule ensuite vers un condenseur, où elle est refroidie et condensée à nouveau à l'état liquide. Le liquide est ensuite pompé vers la source de chaleur pour répéter le cycle.

Les fluides de travail organiques utilisés dans l'ORC sont généralement choisis pour leurs points d'ébullition bas.

Certains fluides de travail organiques couramment utilisés comprennent le Neopentane, le R152a et l'isopentane, entre autres.

Dans l'ensemble, l'ORC est une technologie prometteuse pour générer de l'électricité à partir de sources de chaleur de faible qualité, et son efficacité et ses performances dépendent grandement de la sélection du fluide de travail organique approprié.

Et finalement, Grâce à notre étude, il a été conclu dans une certaine mesure que le meilleur liquide organique à utiliser pour obtenir les meilleurs résultats est : Neopentane.

الملخص:

دورة رانكين العضوية (ORC) هي عملية ديناميكية حرارية تحول الحرارة إلى عمل ميكانيكي باستخدام سوائل عمل عضوية في نظام الحلقة المغلقة. تعمل الدورة على نفس مبادئ دورة رانكين ، ولكنها تستخدم السوائل العضوية بدلاً من الماء كسائل العمل.

يتكون ORC بشكل عام من أربعة مكونات رئيسية: مصدر حرارة ومضخة وتوربين ومكثف. يتم ضخ سائل العمل إلى مصدر الحرارة ، حيث يتم تبخيره ثم تمدده من خلال التوربين ، مما ينتج عنه عمل ميكانيكي. يتدفق البخار بعد ذلك إلى المكثف ، حيث يتم تبريده وتكثيفه مرة أخرى إلى الحالة السائلة. ثم يتم ضخ السائل إلى مصدر الحرارة لتكرار الدورة.

يتم اختيار سوائل العمل العضوية المستخدمة في ORC بشكل عام لنقاط غليانها المنخفضة ، مما يسمح لها بالتبخر في درجات حرارة أقل من الماء. بعض سوائل العمل العضوية شائعة الاستخدام تشمل Neopentane و R152a و isopentane وغيرها.

بشكل عام ، تعد ORC تقنية واعدة لتوليد الكهرباء من مصادر الحرارة منخفضة الدرجة ، وتعتمد كفاءتها وأدائها بشكل كبير على اختيار سائل العمل العضوي المناسب.

وأخيراً من خلال دراستنا ، توصلنا إلى حد ما أن أفضل سائل للدورة يمكن استخدامه للحصول على أفضل النتائج هو: Neopentane.