

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Énergétiques et Turbomachines

Par :

**Fatah-Said KACED**

**Salim TATAH**

**Thème**

---

**Analyse énergétique et exérgétique du cycle combiné**

**BRAYTON RANKINE-COR**

---

Soutenu le : 18/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. A.DJERRADA	Président
Mr. N.BOUTALBI	Rapporteur
Mr. M.HAMDI	Examineur

**Année Universitaire 2022-2023**



## Remerciements

Nous remercions en premier lieu DIEU, le tout puissant, qui nous a permis d'arriver à ce but.

On adresse nos remerciements à notre promoteur Mr BOUTALBI d'avoir dirigé ce travail

Aux enseignants qui nous ont suivis tout au long de notre cursus universitaire

A tous les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail

On tient à témoigner notre gratitude à nos parents et à toute personne ayant contribué et soutenu ce travail de près ou de loin,

Enfin, on remercie les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de siéger, espérant qu'ils trouveront l'expression de nos profonds respects et croire à notre sincère gratitude



## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chères parentes qui m'ont beaucoup aider et veiller sur moi car sans eux je ne sait pas ce que je serais aujourd'hui .

À ma grande-mère : Tayakout

À mes Frères et Sœurs : Adlen, Yasmine, et Lilia

À mes Oncles et Tantes et membre de la famille :

FARID, BILLEL , MALIKA , DIDA qui m'ont beaucoup soutenu durant mes études ainsi qu'à leurs conjoints,

À mes cousins et cousines,

À mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu sans oublier mon binôme Salim

*Fatah-Said*



## **Dédicaces**

À mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours académique,

Mes frères et sœurs,

Mes collègues, enseignants et étudiants,

Mes chers amis.

Salim

# Sommaire

Remerciements .....	
Dédicaces.....	
Sommaire .....	
Liste des Figures .....	
Liste des tableaux .....	
Nomenclature.....	
Introduction Générale.....	1

## Chapitre I : Analyse bibliographique

I.1. Introduction.....	3
I.2. Conversion d'énergie.....	3
I.3. Turbine à gaz .....	4
I.3.1. Définition .....	4
I.3.2. Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz .....	5
I.3.3. Eléments principaux d'une turbine à gaz.....	5
I.3.4. Domaines d'application.....	6
I.3.5. Avantages et les inconvénients.....	6
I.3.6 Rendement.....	7
I.4. Cycle de turbine à gaz .....	8
I.4.1. Cycle de Joule – Baryton .....	8
I.4.2. Etapes du cycle de Brayton réversibles.....	8
I.4.3. Cycle de Baryton ouvert.....	9
I.4.4. Cycle de Brayton fermé.....	10
I.5. Turbine à vapeur.....	12

I.5.1 Définition.....	12
I.5.2 Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur.....	13
I.5.3 Eléments principaux d'une turbine à vapeur .....	14
I.5.4. Domaines d'application.....	14
I.5.5. Avantages et les inconvénients.....	15
I.5.6. Rendement.....	16
I.6. Cycle de Rankine.....	17
I.6.1. Etapes cycle de Rankine.....	17
I.6.2.Cycle de Hirn.....	17
I.7. Cycle organique Rankine (ORC).....	19
I.7.1. Définition .....	19
I.7.2. Système ORC : principe de fonctionnement.....	19
I.7.3. Applications des cycles à système ORC.....	19
I.7.4. Fluides pour cycles à système ORC Fluide organique.....	20
I.7.5. Rendement.....	23
I.8. Récupération d'énergie pour le cycle organique de RANKINE.....	23
I.9. Cycles combinés : turbine à gaz- turbine à vapeur.....	24
I.9.1 Définition .....	24
I.9.2. Principe de fonctionnement.....	24
I.10. Cycle combiné Brayton-Rankine organique (CCBRO).....	26
I.10.1. Avantage du cycle CCBRO, .....	26
I.10.2. Inconvénients du cycle CCBRO .....	26
. Conclusion.....	27

## **Chapitre II : Modélisation thermodynamique de l'installation**

II.1 Introduction.....	28
II.2. Engineering Equation Solver (EES).....	28
II.3. Formulation du problème.....	29
II.4. Rappelle théorique.....	31
II.4.1 Premier principe.....	31
II.4.2 Le second principe.....	32
II.4.3 Donnée de l'étude.....	32
II.4.4 Hypothèses.....	33
II.5. Modélisation thermodynamique de l'installation.....	34
II.5.1 Analyse énergétique.....	34
II.5.2 Bilan énergétique.....	34
II.5.3. Analyse exergetique.....	39
II.5.4. Bilan exergetique.....	40
Conclusion.....	44

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1. Introduction.....	45
III.2. Energétique .....	45
III.3. Exergie.....	49
Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52

**Reference bibliographique**

**Résumé/Abstract**

# Listes des figures

<b>Figure I.1</b> : Turbine à gaz simple.....	4
<b>Figure I.2</b> : Schéma d'une turbine à gaz, à un seul arbre, fonctionnant en circuit ouvert.....	9
<b>Figure I.3</b> : Cycle ouvert de Joule - Brayton dans le diagramme (T, s).....	9
<b>Figure I.4</b> : Schéma d'une turbine à gaz, à un seul arbre, fonctionnant en circuit fermé.....	11
<b>Figure I.5</b> : fonctionnement en cycle fermé.....	11
<b>Figure I.6</b> : Turbine à vapeur.....	13
<b>Figure I.7</b> : Cycle de Rankine sur le diagramme (T, s).....	17
<b>Figure I.8</b> : cycle de Hirn dans Diagramme(P-V).....	18
<b>Figure I.9</b> : cycle de Hirn dans Diagramme(T-S).....	18
<b>Figure I.10</b> : Récupérer la chaleur industrielle.....	24
<b>Figure I.11</b> : Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné : turbine à gaz – turbine à vapeur.....	25
<b>Figure II.1</b> : Cycle combiné B-COR .....	30
<b>Figure II.2</b> : Bilan énergétique.....	34
<b>Figure II.3</b> : Bilan exergétique.....	40
<b>Figure III.1</b> : variations de rendement énergétique en fonction de température T8.....	46
<b>Figure III.2</b> : Variations de travail net du cycle en fonction de température T8.....	47

**Figure III.3 :** variations de rendement énergétique en fonction de taux de compression.....47

**Figure III.4 :** Variations de travail net en fonction de taux de compression.....48

**Figure III.5 :** Proportion de destruction d'exergie par composante du cycle proposé.....50

## **Listes des tableaux :**

**Tableau II.1:** données turbine à gaz simple .....33

**Tableau II.2:** données pour cycle organique de Rankine .....33

**Tableau III.1:** Résultats des points thermodynamiques du cycle combiné B-COR obtenue durant la simulation du programme dans l'EES.....45

**Tableau III.2:** Résultats des Pertes exergétique de chaque composant.....49

# Nomenclature

symboles	Definition	Unité [SI]
$\dot{m}$	Débit massique	[kg/s]
P	Pression	[Pa]
T	Température	[K]
S	Entropie massique	[J/kg.K]
K	Coenthalpie	[J/kg]
h	Enthalpie massique	[J/kg.K]
$\eta_{th}$	Rendement thermique de l'installation	[%]
$\eta_{ex}$	Rendement exergetique de système	[%]
$r_p$	Taux de compression	
$\dot{E}_c^+$	Puissance de travail consommée	[W]
$\dot{E}_w^-$	Copuissance-transformation fournie	[W]
$\dot{L}_c$	Perte exergetique	[W]
$\dot{W}$	Puissance	[W]
W	Travail massique	[J/kg]
$\dot{Q}_{cc}$	Puissance consommée à la source chaude	[W]
$Q_c$	Chaleur massique consommé à la source chaude	[J/kg]
$Q_f$	Chaleur consommé à la source froide	[J/kg]

## Indice

$E_c$	Energie cenitique
$E_p$	Energie potentiel

TV	Turbine a vaeur
TG	Turbine a gas
Evp	Evaporateur
reg	Regenerateur
EES	Engineering Equation Solver
cc	Chambre de cambution
pp	Pompe
In	Entrée
Net	Nette
ORC	Organique Rankine Cycle
CCBRO	Cycle combinee brayton Rankine organique

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

Les pays en développement sont confrontés à des défis multiples et complexes dans leurs efforts pour assurer un approvisionnement énergétique fiable et abordable afin de soutenir un développement économique durable. Ces défis peuvent être relevés en augmentant l'utilisation d'infrastructures énergétiques modernes, en améliorant la sécurité énergétique grâce à la diversification énergétique. La production d'énergie est un enjeu majeur de notre société, et la recherche de solutions efficaces et durables est essentielle pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en réduisant notre empreinte carbone. Dans cette optique, l'analyse énergétique et exergetique des systèmes énergétiques revêt une importance particulière.

Le présent mémoire se concentre sur l'analyse énergétique et exergetique d'un cycle combiné Brayton-Rankine organique. Ce cycle combine deux cycles thermodynamiques bien connus pour leur efficacité énergétique : le cycle Brayton, basé sur le principe de la compression et de l'expansion d'un gaz, et le cycle Rankine, utilisé dans les centrales électriques traditionnelles pour convertir la chaleur en électricité.

L'une des particularités du cycle combiné Brayton-Rankine organique réside dans l'utilisation d'un fluide organique comme fluide de travail. Les fluides organiques présentent des caractéristiques uniques qui leur confèrent des avantages potentiels, tels qu'une meilleure capacité d'absorption de chaleur et une plus grande stabilité à des températures élevées. Ces propriétés permettent d'optimiser la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique ou électrique, contribuant ainsi à une meilleure efficacité globale du système.

L'objectif principal de ce mémoire est d'effectuer une analyse approfondie de l'efficacité énergétique et exergetique du cycle combiné Brayton-Rankine organique. L'analyse énergétique consistera à évaluer les flux d'énergie à travers les différentes composantes du système, en tenant compte des rendements de chaque étape, des pertes de chaleur et des irréversibilités associées. L'analyse exergetique, quant à elle, permettra d'analyser les pertes d'exergie et d'identifier les points où des améliorations peuvent être apportées pour augmenter l'efficacité globale du cycle.

Une telle analyse revêt une importance cruciale pour l'optimisation des performances du cycle combiné Brayton-Rankine organique. En comprenant les mécanismes sous-jacents et les sources de pertes d'énergie et d'exergie, il devient possible de proposer des améliorations et des stratégies pour maximiser l'efficacité énergétique du système. Ces résultats peuvent également

contribuer à la conception de futurs cycles combinés plus performants et durables, participant ainsi à la préservation de l'environnement.

La structure de ce mémoire se compose de plusieurs parties : tout d'abord, les principes fondamentaux du cycle combiné Brayton-Rankine organique seront présentés, en mettant en évidence les différentes étapes du processus et les propriétés du fluide organique utilisé. Ensuite, une analyse énergétique détaillée sera effectuée, suivie d'une analyse exergetique. Les résultats obtenus seront ensuite discutés, et des recommandations seront formulées.

# **Chapitre I**

## **Recherches bibliographiques**

## I.1. Introduction

Au xvii<sup>e</sup> siècle, Denis Papin et Thomas Savery ont inventé la machine à vapeur, une machine qui transforme de la chaleur en travail. Améliorée par Thomas Newcomen et James Watt au cours du xviii<sup>e</sup> siècle, la machine à vapeur est à l'origine de la révolution industrielle. C'est ainsi que la science de la thermodynamique (de thermo, « chaleur », et de dynamique, « mouvement ») est née de la volonté de comprendre et de prédire le comportement de la chaleur avec les autres formes d'énergie. Elle a pris son essor au xix<sup>e</sup> siècle grâce aux travaux précurseurs de scientifiques tels que Sadi Carnot, William Rankine, Rudolf Clausius et William Thompson. Aujourd'hui, la thermodynamique est devenue la science fondamentale de l'énergie.

Premièrement, comment définissons-nous simplement l'énergie ? L'énergie est la capacité de produire du travail, tout comme l'argent est la capacité de le dépenser.

Aujourd'hui, la thermodynamique est devenue un sujet de recherche important dans ce domaine des sciences naturelles et appliquées. Aucun phénomène naturel, procédé industriel, installation, machine ou le système n'échappe pas à ses lois fondamentales.

## I.2. Conversion d'énergie

La conversion d'énergie est le processus qui consiste à transformer une forme d'énergie en une autre. L'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais elle peut être convertie d'une forme à une autre. Par exemple, la conversion d'énergie peut impliquer la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique pour faire fonctionner une machine, ou la transformation d'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de panneaux solaires.

Il existe de nombreuses formes d'énergie, notamment l'énergie thermique, l'énergie cinétique, l'énergie potentielle, l'énergie électrique, et l'énergie chimique.

Voici des exemples de conversions d'énergie :

Conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse dans une ampoule.

Conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique lors de la chute d'un objet.

Conversion de l'énergie chimique en énergie électrique dans une batterie.

Conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique dans une turbine à vapeur.

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

Le principe de conservation d'énergie peut être formulé ainsi : la variation (l'augmentation ou la diminution) de l'énergie totale d'un système au cours d'une évolution est égale à la différence entre l'énergie qui entre et celle qui sort du système pendant cette même évolution. Ainsi a

Énergie totale entrante - Énergie totale sortante = Variation de l'énergie totale du système b soit

$$E_{en} - E_{sor} = \Delta E_{système}$$

Cette relation, appelée le bilan d'énergie, peut être appliquée à tous les systèmes et à toutes les évolutions.

La conversion de l'énergie est un processus crucial et qui nous permet d'utiliser l'énergie sous différentes formes et à des fins différentes. C'est un élément essentiel de la société moderne et contribue à alimenter nos maisons nos entreprises et nos systèmes de transport [1].

### I.3. Turbine à gaz

#### I.3.1. Définition

Une turbine à gaz est une machine thermique qui utilise l'énergie cinétique de l'écoulement d'un gaz pour produire un travail mécanique. Elle se compose généralement d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. L'air ambiant est aspiré par le compresseur, comprimé et chauffé dans la chambre de combustion en y ajoutant un combustible, puis l'air chaud sous pression résultant est ensuite détendu à travers la turbine, qui entraîne un arbre de transmission et produit de l'énergie mécanique ou de l'électricité [2].

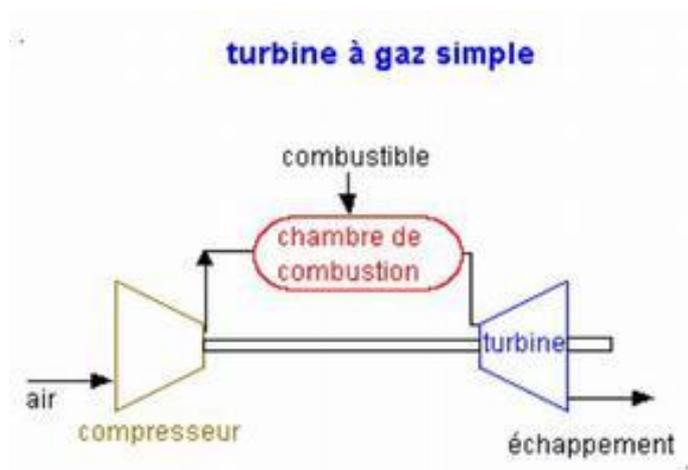


Figure I.1 : Turbine à gaz simple.

### I.3.2 Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

1. Compression de l'air : L'air ambiant est aspiré par le compresseur de la turbine à gaz, où il est comprimé pour augmenter sa pression et sa température.
2. Injection de combustible : Une fois que l'air est comprimé, il est envoyé dans la chambre de combustion où il est mélangé avec du combustible (gaz naturel, kérosène, diesel, etc.) et enflammé.
3. Expansion des gaz : L'énergie thermique produite par la combustion du carburant chauffe les gaz, qui se dilatent et augmentent leur vitesse. Les gaz chauds et sous pression sont alors dirigés vers la turbine.
4. Rotation de la turbine : Les gaz chauds passent à travers la turbine, qui est équipée de pales en forme de cuillère. Ces pales sont disposées de manière à former une roue, et leur forme est conçue pour exploiter l'énergie cinétique des gaz en les dirigeant vers la sortie de la turbine. Cela fait tourner la turbine à haute vitesse.
5. Production d'énergie : La turbine à gaz est connectée à un générateur, qui transforme l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique. L'énergie électrique produite peut alors être distribuée à travers le réseau électrique pour alimenter des bâtiments, des villes et des industries.
6. Évacuation des gaz : Les gaz d'échappement sortent de la turbine à haute température et sous pression. Ils peuvent être récupérés et utilisés pour produire de la vapeur qui peut être utilisée pour alimenter une turbine à vapeur, créant ainsi une centrale à cycle combiné qui offre un rendement énergétique plus élevé.

Le processus de fonctionnement de la turbine à gaz est contrôlé par un système de régulation et de commande pour maintenir la stabilité de l'ensemble du système et garantir une production d'énergie stable et fiable [2].

### I.3.3. Eléments principaux d'une turbine à gaz

1. Le compresseur : il est chargé d'aspirer l'air ambiant et de le comprimer pour augmenter sa pression et sa température avant de le faire entrer dans la chambre de combustion.
2. La chambre de combustion : c'est l'endroit où le carburant est injecté dans l'air comprimé et enflammé pour produire de l'énergie thermique.
3. La turbine : c'est la partie de la turbine à gaz qui transforme l'énergie thermique en énergie mécanique. Elle se compose d'une série de pales montées sur un arbre qui est tourné par l'écoulement des gaz d'échappement de la chambre de combustion [2].

### I.3.4. Domaines d'application

Les turbines à gaz sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment pour la production d'électricité dans les centrales électriques, la propulsion des avions, des bateaux et des trains à grande vitesse, ainsi que dans les industries pétrochimiques et de transformation du gaz naturel.

1. Production d'électricité : Les turbines à gaz sont largement utilisées dans les centrales électriques pour produire de l'électricité. Elles peuvent fonctionner à l'aide de différents types de combustibles, tels que le gaz naturel, le pétrole, le biogaz ou le diesel.
2. Industrie pétrochimique : Les turbines à gaz sont utilisées dans les raffineries de pétrole pour alimenter les compresseurs qui pompent le pétrole et le gaz dans les pipelines.
3. Aviation : Les turbines à gaz sont utilisées pour propulser les avions commerciaux et militaires. Elles sont également utilisées dans les hélicoptères et les drones.
4. Marine : Les turbines à gaz sont utilisées pour propulser les navires de guerre et les navires marchands. Elles sont également utilisées pour produire de l'énergie électrique à bord des navires.
5. Production d'énergie de secours : Les turbines à gaz sont utilisées comme source d'énergie de secours dans les hôpitaux, les centres de données, les centres de communication et les installations militaires.

En somme, les turbines à gaz sont largement utilisées dans les domaines où une source d'énergie fiable, efficace et peu coûteuse est nécessaire [2].

### I.3.5. Avantages et inconvénients

#### ➤ a. Les avantages

1. Efficacité énergétique élevée : Les turbines à gaz sont très efficaces dans la conversion de l'énergie en électricité ou en mouvement mécanique. Elles ont un taux de conversion élevé, ce qui les rend plus rentables que d'autres types de générateurs d'énergie.
2. Temps de réponse rapide : Les turbines à gaz peuvent atteindre leur pleine capacité de production en quelques minutes seulement, ce qui en fait une source d'énergie idéale pour les situations d'urgence ou les périodes de pointe.

3. Flexibilité de carburant : Les turbines à gaz peuvent fonctionner avec une grande variété de carburants, tels que le gaz naturel, le pétrole, le biogaz, le diesel, etc. Ce qui permet de réduire les coûts et d'augmenter la fiabilité de l'approvisionnement en carburant.
4. Faibles émissions : Les turbines à gaz ont des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques relativement faibles par rapport à d'autres sources d'énergie fossile.
5. Faible entretien : Les turbines à gaz ont peu de pièces mobiles et nécessitent donc peu d'entretien par rapport à d'autres types de générateurs d'énergie.

### ➤ **b. Les inconvénients**

1. Coût initial élevé : Les turbines à gaz ont un coût initial élevé par rapport à d'autres types de générateurs d'énergie.
2. Dépendance aux combustibles fossiles : Les turbines à gaz sont alimentées par des combustibles fossiles, ce qui peut les rendre vulnérables aux fluctuations de prix et à la disponibilité des combustibles.
3. Bruit et vibrations : Les turbines à gaz peuvent être bruyantes et vibrantes, ce qui peut être un problème dans les zones résidentielles.
4. Consommation d'eau : Les turbines à gaz ont besoin d'eau pour refroidir la chambre de combustion et les aubes de la turbine, ce qui peut être un problème dans les régions où l'eau est rare.
5. Risques de sécurité : Les turbines à gaz ont des risques de sécurité, notamment liés à la combustion du carburant, au fonctionnement des turbines et aux émissions de gaz [3].

### **I.3.6 Rendement**

Le rendement d'une turbine à gaz dépend de plusieurs facteurs, notamment de la conception de la turbine, de la qualité du combustible utilisé, de la température et de la pression de l'air entrant dans la turbine, et de la charge électrique ou mécanique appliquée à la turbine.

En général, le rendement d'une turbine à gaz se situe entre 25 % et 40 %, ce qui signifie que 25 % à 40 % de l'énergie contenue dans le combustible est convertie en énergie électrique ou en mouvement mécanique, tandis que le reste est dissipé sous forme de chaleur.

Cependant, le rendement peut être amélioré par l'utilisation de technologies telles que la récupération de chaleur, qui permet de récupérer la chaleur perdue lors de la production d'énergie, ou la cogénération, qui permet d'utiliser la chaleur résiduelle pour produire de l'énergie supplémentaire. De plus, la recherche continue sur les améliorations de la conception de la turbine et des techniques de combustion peut également contribuer à améliorer le rendement de la turbine à gaz [3].

### **I.4. Cycle de turbine à gaz**

#### **I.4.1. Cycle de Joule – Baryton**

Le cycle de Brayton est un cycle thermodynamique utilisé dans les turbines à gaz et les moteurs à réaction. Il est également connu sous le nom de cycle de Joule. Le cycle de Brayton est un cycle à combustion externe, ce qui signifie que la combustion se produit en dehors du cycle.

#### **I.4.2. Les étapes du cycle de Brayton**

1. Compression isentropique : l'air est comprimé de manière isentropique dans un compresseur pour augmenter la pression.
2. Chauffage isobare : le gaz comprimé est ensuite chauffé à pression constante dans une chambre de combustion en brûlant du carburant.
3. Expansion isentropique : le gaz chauffé est étendu de manière isentropique dans une turbine pour produire de l'énergie.
4. Refroidissement isobare : enfin, le gaz épuisé est refroidi à pression constante dans un échangeur de chaleur avant de recommencer le cycle.

Le cycle de Brayton est très efficace pour la production d'énergie à partir de gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles. Les turbines à gaz peuvent produire de l'électricité pour les centrales électriques et les moteurs à réaction utilisent le cycle de Brayton pour produire de la poussée pour les avions et les missiles.

Cependant, le cycle de Brayton présente également certains inconvénients, tels que la production de gaz d'échappement chauds, qui peuvent causer des problèmes environnementaux tels que le réchauffement climatique. Les moteurs à combustion interne utilisent également un cycle de Brayton simplifié, mais ils sont généralement moins efficaces que les turbines à gaz en raison des pertes de chaleur et de l'inefficacité des compresseurs utilisés [3].

### I.4.3. Cycle de Baryton ouvert

Le cycle de Brayton ouvert est une variante du cycle de Brayton qui est utilisée dans les turbines à gaz à flux continu, également connues sous le nom de turbines à combustion externe. Dans un cycle de Brayton ouvert, l'air ambiant est comprimé par un compresseur, puis chauffé dans une chambre de combustion à pression constante avant d'être éjecté à travers une turbine.

Contrairement au cycle de Brayton fermé, le gaz chaud n'est pas recirculé dans le cycle, mais est plutôt éjecté dans l'atmosphère à la sortie de la turbine. Le gaz d'échappement peut être utilisé pour générer de la poussée pour les avions ou pour produire de l'énergie électrique dans les centrales électriques.

Le cycle de Brayton ouvert présente certains avantages par rapport au cycle de Brayton fermé, notamment une plus grande simplicité et une plus grande souplesse dans la conception. Cependant, il a également des inconvénients, notamment une moins grande efficacité énergétique en raison des pertes de chaleur dans le gaz d'échappement et de la limitation de la température de fonctionnement maximale de la turbine.

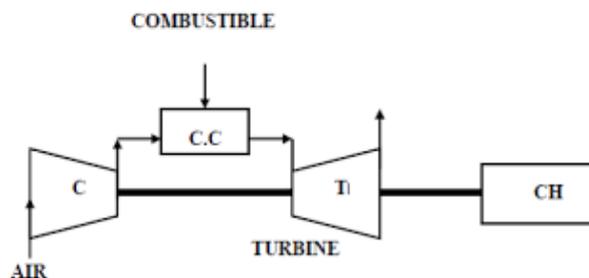


Figure I.2 : Schéma d'une turbine à gaz, à un seul arbre, fonctionnant en circuit ouvert.

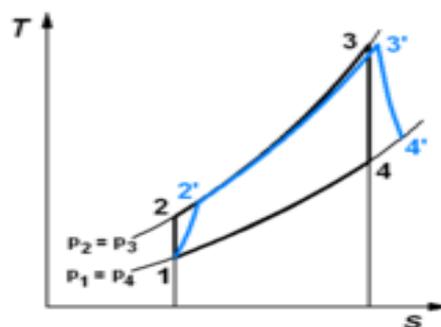


Figure I.3 : Cycle ouvert de Joule - Brayton dans le diagramme (T, s).

Une turbine à gaz est un moteur thermique dans lequel le fluide moteur subit les transformations suivantes :

- Une certaine masse d'air prise à l'atmosphère ambiante subit d'abord une compression isentropique dans un compresseur (K) (Transformation : 1-2).
- De la chaleur ( $Q_c$ ) est apportée à cet air, à pression constante, grâce à une réaction de combustion, source chaude, (Transformation : 2-3).
- Les gaz brûlés sont ensuite détendus dans une turbine (T) en fonctionnement isentropique, chargée d'entraîner le compresseur tout en laissant un excédent de puissance sur l'arbre afin d'entraîner une charge (Transformation : 3-4).
- Les gaz s'échappent enfin vers l'atmosphère avec laquelle ils se mettent en équilibre, en y évacuant une quantité de chaleur ( $Q_f$ ) (source froide) [3].

### **I.4.4. Cycle de Brayton fermé**

Le cycle de Brayton fermé est un cycle thermodynamique utilisé dans les turbines à gaz à cycle combiné et les centrales électriques à cycle combiné. Il est également appelé cycle de Brayton à récupération de chaleur.

Dans un cycle de Brayton fermé, l'air ambiant est comprimé dans un compresseur avant d'être chauffé à une pression constante dans une chambre de combustion en brûlant du combustible. Le gaz chaud à haute pression résultant est ensuite envoyé dans une turbine où il se dilate pour produire de l'énergie mécanique. Ensuite, le gaz est refroidi à une pression constante dans un échangeur de chaleur avant d'être ramené au compresseur pour recommencer le cycle.

L'efficacité du cycle de Brayton fermé peut être améliorée en ajoutant un deuxième cycle de Rankine à vapeur. Dans ce type de centrale électrique à cycle combiné, l'énergie thermique perdue par les gaz d'échappement de la turbine à gaz est récupérée pour produire de la vapeur, qui est utilisée pour faire tourner une deuxième turbine.

Le cycle de Brayton fermé présente de nombreux avantages, notamment une grande efficacité énergétique et une faible émission de gaz à effet de serre. Cependant, il est plus coûteux et complexe que le cycle de Brayton ouvert en raison de la nécessité d'utiliser des échangeurs de chaleur supplémentaires et des turbocompresseurs pour recirculer les gaz chauds.

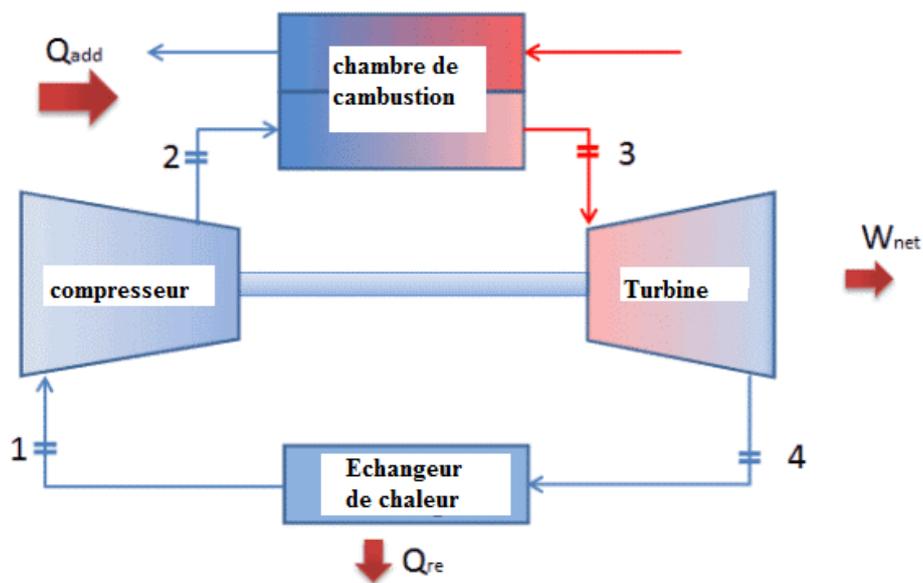


Figure I.4 : Schéma d'une turbine à gaz, à un seul arbre, fonctionnant en circuit fermé.

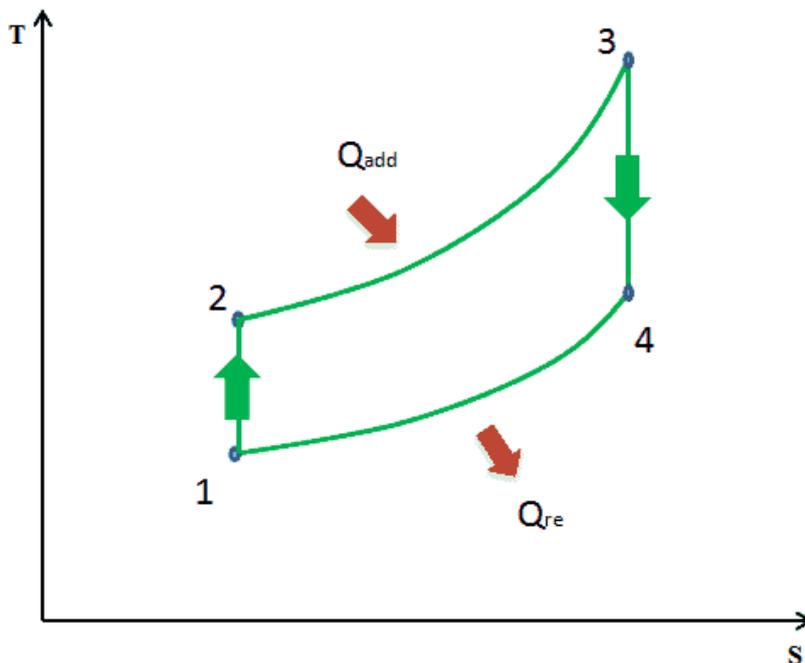


Figure I.5 : fonctionnement en cycle fermé.

Depuis l'avènement des réacteurs nucléaires, la turbine à gaz à cycle fermé est devenue d'un grand emploi.

De la chaleur ( $Q_c$ ) est transmise, soit directement soit par l'intermédiaire d'un fluide secondaire, du combustible nucléaire au fluide moteur évoluant dans la turbine à gaz. Cette opération a lieu dans un échangeur de chaleur.

De la chaleur ( $Q_f$ ) est cédée ensuite par le fluide moteur à un fluide de refroidissement au sein d'un second échangeur de chaleur (source froide).

En fin de compte, le choix entre un cycle de Brayton fermé et un cycle de Brayton ouvert dépend des besoins spécifiques de l'application et des compromis entre efficacité, coût et flexibilité de la conception [3].

### **I.5. Turbine à vapeur**

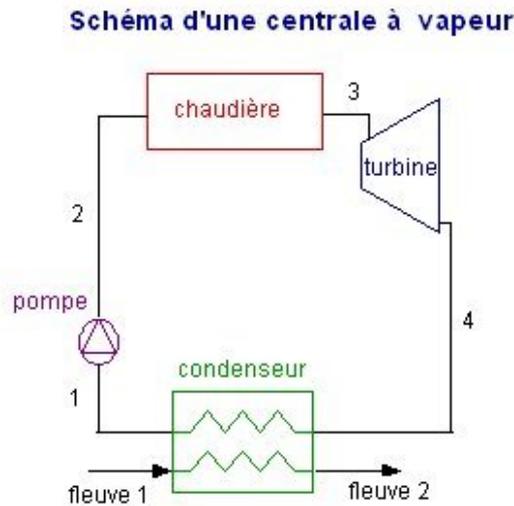
#### **I.5.1 Définition**

Une turbine à vapeur est une machine thermique qui utilise la vapeur d'eau pour produire de l'énergie mécanique. Elle fonctionne selon le principe de la transformation de l'énergie thermique en énergie cinétique.

La vapeur d'eau est produite dans une chaudière à partir de l'eau chauffée par une source d'énergie telle que du charbon, du gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La vapeur ainsi produite est ensuite acheminée vers la turbine, où elle est introduite à haute pression et haute température. La vapeur agit sur les aubes de la turbine, entraînant la rotation de l'arbre de la turbine, qui est relié à un générateur électrique ou à une machine mécanique telle qu'une pompe ou un compresseur.

La vapeur sortante est ensuite refroidie et condensée en utilisant de l'eau froide, puis renvoyée vers la chaudière pour être à nouveau chauffée et convertie en vapeur.

Les turbines à vapeur sont utilisées pour la production d'électricité dans les centrales électriques, ainsi que dans les industries pour l'alimentation de machines mécaniques telles que des pompes, des compresseurs, des ventilateurs et des générateurs [4].



**Figure I.6 :** Turbine à vapeur.

### I.5.2 Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

1. Production de la vapeur : La vapeur est produite dans une chaudière en chauffant de l'eau à haute pression et haute température. La source de chaleur peut provenir de combustibles tels que le charbon, le gaz naturel, le pétrole ou l'énergie nucléaire.
2. Admission de la vapeur : La vapeur produite dans la chaudière est acheminée vers la turbine à travers des tuyaux. La vapeur entre dans la turbine à haute pression et haute température.
3. Conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique : La vapeur en entrant dans la turbine rencontre les aubes fixes, appelées aubes directrices, qui orientent le flux de vapeur vers les aubes mobiles de la turbine. En passant à travers les aubes mobiles, la vapeur perd de la pression et de la température et acquiert une énergie cinétique qui entraîne la rotation de la turbine.
4. Production d'énergie mécanique : L'arbre de la turbine est relié à un générateur électrique ou à une machine mécanique telle qu'une pompe ou un compresseur. Lorsque la turbine tourne, l'arbre entraîne également la rotation de la machine connectée à la turbine, ce qui produit de l'énergie mécanique.
5. Refroidissement et condensation de la vapeur : La vapeur sortant de la turbine est refroidie et condensée en utilisant de l'eau froide, puis renvoyée vers la chaudière pour être à nouveau chauffée et convertie en vapeur.

Ce cycle de production de vapeur, de conversion d'énergie thermique en énergie cinétique, de production d'énergie mécanique et de condensation de la vapeur se répète en continu, ce qui permet à la turbine à vapeur de fonctionner de manière continue et efficace [4].

### I.5.3 Eléments principaux d'une turbine à vapeur

1. La pompe : utilisée pour acheminer l'eau de la chaudière vers la turbine, l'eau est nécessaire pour produire de la vapeur dans la chaudière et pour refroidir la vapeur en sortie de turbine dans le condenseur, est également utilisée pour augmenter la pression de l'eau avant qu'elle n'entre dans la chaudière. Cela permet de s'assurer que l'eau est à une pression suffisante pour être vaporisée dans la chaudière, en plus d'acheminer l'eau vers la chaudière, la pompe peut également être utilisée pour maintenir une circulation d'eau dans le système de refroidissement et de condensation.
2. La chaudière : C'est le dispositif qui produit la vapeur à haute pression et haute température. Elle est alimentée en eau et en combustible (gaz, charbon, fioul, etc.) pour produire de la vapeur.
3. La turbine : C'est l'élément central de la machine, qui convertit l'énergie cinétique de la vapeur en énergie mécanique. La turbine est constituée d'un rotor équipé de pales qui tourne autour d'un axe. Les pales sont divisées en deux types : les aubes directrices, qui dirigent le flux de vapeur vers les pales mobiles, et les aubes mobiles, qui tournent sous l'effet de la vapeur.
4. Le condenseur : C'est l'élément qui récupère la vapeur en sortie de turbine et la refroidit pour la transformer à nouveau en eau. Le condenseur est alimenté en eau froide pour absorber la chaleur de la vapeur et la transformer en eau [5].

### I.5.4 Domaines d'application

Une turbine à vapeur est une machine qui utilise la pression de la vapeur pour produire de l'énergie mécanique. Elle est utilisée dans plusieurs domaines, notamment :

Production d'électricité : Les turbines à vapeur sont couramment utilisées dans les centrales électriques pour produire de l'électricité. La vapeur est produite en chauffant de l'eau à haute pression dans une chaudière, puis elle est utilisée pour faire tourner une turbine qui génère de l'électricité.

Production d'énergie mécanique : Les turbines à vapeur peuvent également être utilisées pour produire de l'énergie mécanique dans diverses applications industrielles, telles que l'industrie pétrolière, les usines de papier et de pâte à papier, ainsi que dans la production d'acier.

Production de chaleur : Les turbines à vapeur peuvent également être utilisées pour produire de la chaleur dans les installations industrielles, telles que les usines de traitement des déchets, les usines de traitement chimique et les centrales thermiques.

Propulsion marine : Les turbines à vapeur sont souvent utilisées pour propulser les navires, en utilisant la vapeur pour faire tourner une hélice.

Propulsion aéronautique : Les turbines à vapeur sont également utilisées dans les avions à réaction pour produire de la poussée. Ces turbines sont appelées des turbines à gaz et sont alimentées par le carburant de l'avion [5].

### **I.5.5. Avantages et inconvénients**

#### **➤ a. Avantage**

1. Efficacité énergétique élevée : Les turbines à vapeur ont une efficacité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent convertir une grande partie de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique.
2. Grande puissance de sortie : Les turbines à vapeur peuvent produire une grande puissance de sortie, ce qui les rend idéales pour la production d'électricité et l'industrie lourde.
3. Longue durée de vie : Les turbines à vapeur sont généralement construites pour durer longtemps, ce qui signifie qu'elles peuvent fonctionner pendant des décennies sans nécessiter beaucoup de maintenance.
4. Polyvalence : Les turbines à vapeur peuvent être utilisées dans une variété d'applications industrielles et de production d'énergie, ce qui les rend très polyvalentes.
5. Faibles coûts d'exploitation : Les turbines à vapeur peuvent fonctionner avec une grande variété de carburants, ce qui peut réduire les coûts d'exploitation.

### ➤ b. Inconvénients

1. Temps de démarrage long : Les turbines à vapeur peuvent prendre du temps pour atteindre leur vitesse de fonctionnement maximale, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.
2. Coûts élevés : Les turbines à vapeur sont généralement coûteuses à construire et à entretenir, ce qui peut rendre leur utilisation moins attrayante pour certaines entreprises.
3. Risques de sécurité : Les turbines à vapeur peuvent être dangereuses si elles ne sont pas entretenues correctement, en particulier en raison de la pression élevée de la vapeur qu'elles utilisent.
4. Dépendance aux combustibles fossiles : Les turbines à vapeur peuvent être alimentées par une variété de carburants, mais leur utilisation intensive peut contribuer à la dépendance aux combustibles fossiles et à la pollution environnementale.

### I.5.6. Rendement

Le rendement d'une turbine à vapeur dépend de plusieurs facteurs, tels que la conception de la turbine, la qualité de la vapeur utilisée, la température et la pression de la vapeur, ainsi que le niveau de charge de la turbine.

En général, le rendement d'une turbine à vapeur varie de 30 % à 50 %. Cela signifie que seulement une partie de l'énergie contenue dans la vapeur est convertie en énergie mécanique, et que le reste est perdu sous forme de chaleur.

Cependant, il est possible d'améliorer le rendement d'une turbine à vapeur en utilisant des techniques telles que la régulation de la pression de la vapeur, l'amélioration de la conception de la turbine, l'utilisation de l'énergie récupérée à partir de la vapeur d'échappement, et l'utilisation de la cogénération pour produire simultanément de l'électricité et de la chaleur.

Il est important de noter que le rendement d'une turbine à vapeur ne doit pas être confondu avec l'efficacité énergétique globale d'un système de production d'énergie, qui prend également en compte les pertes d'énergie dans le processus de production et de distribution de l'électricité [6].

### I.6. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique utilisé dans les centrales électriques pour générer de l'électricité à partir d'énergie thermique. Le cycle de Rankine utilise de la vapeur d'eau pour entraîner une turbine, qui fait tourner un générateur pour produire de l'électricité.

#### I.6.1. les étapes du cycle de Rankine

- **Compression** : L'eau est pompée dans une chaudière où elle est chauffée à haute pression pour créer de la vapeur.
- **Détente** : La vapeur produite dans la chaudière est ensuite utilisée pour entraîner une turbine qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique.
- **Condensation** : La vapeur traversant la turbine est refroidie et condensée en eau, généralement à l'aide d'eau de refroidissement.
- **Eau d'alimentation de la chaudière** : L'eau condensée retourne ensuite à la chaudière pour être réchauffée et le cycle recommence.

Ce cycle est appelé cycle de Rankine en l'honneur de son inventeur, William John Macquorn Rankine. Il est utilisé dans de nombreuses centrales électriques à vapeur dans le monde entier en raison de son efficacité et de sa fiabilité [7].

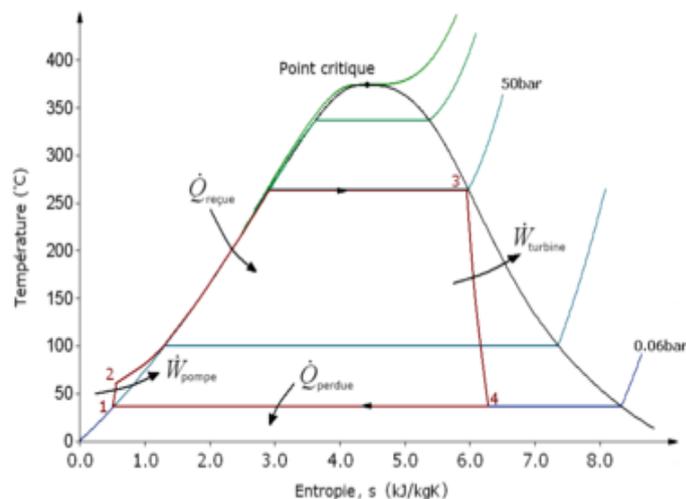


Figure I.7 : Cycle de Rankine sur le diagramme (T, s).

#### I.6.2. Cycle de Hirn

Le cycle de Hirn est un cycle thermodynamique utilisé pour produire de l'énergie électrique à partir de la vapeur d'eau. Il est similaire au cycle de Rankine, mais comporte une étape

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

supplémentaire de surchauffe de la vapeur. Le cycle de Hirn a été développé par l'ingénieur français Auguste Rateau, également connu sous le nom de Hirn, d'où son nom. [8].

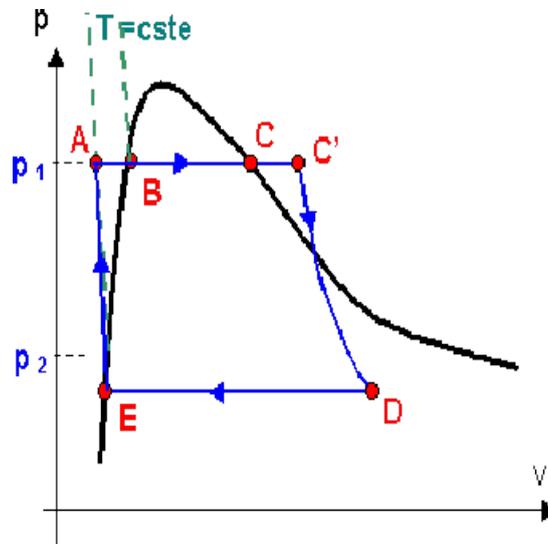


Figure I.8 : cycle de Hirn dans Diagramme(P-V).

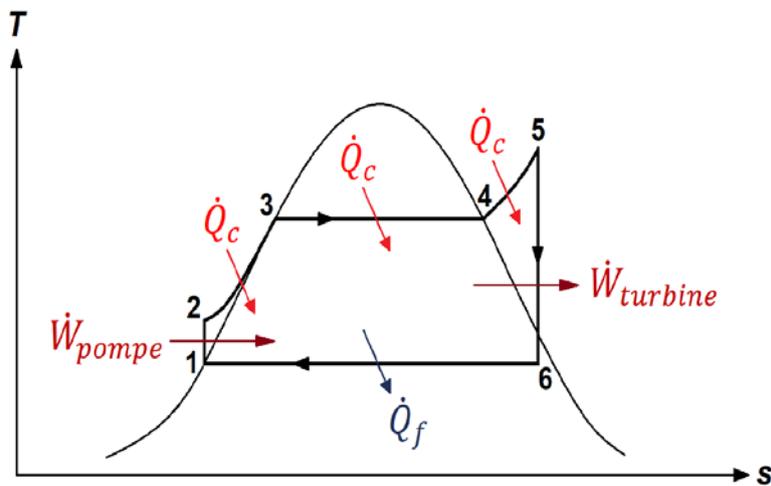


Figure I.9 : cycle de Hirn dans diagramme (T-S).

- L'eau liquide est mise en pression par une pompe (1-2) et envoyée vers la chaudière.
- L'eau est chauffée (2-3), vaporisée (3-4) et surchauffée (4-5).
- La vapeur se détend et se refroidit dans la turbine (5-6) en fournissant de l'énergie mécanique.

-La vapeur détendue est condensée (6-1) au contact de la source froide sous vide partiel.

### **I.7. Cycle organique Rankine (ORC)**

#### **I.7.1. Définition**

Aujourd'hui, l'utilisation de la chaleur à basse température pour produire de l'électricité propre est l'un des moyens les plus efficaces pour les entreprises d'améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité globale. Le transfert de chaleur à partir de liquides ou de gaz peut être réalisé en utilisant le processus éprouvé du cycle organique de Rankine (ORC) pour produire efficacement de l'énergie neutre en carbone. Cela est vrai que la chaleur provienne d'une source géothermique ou de la chaleur résiduelle industrielle ou commerciale.

Quelle que soit la source de chaleur, le choix du bon échangeur de chaleur est essentiel pour maximiser l'efficacité et la durabilité de votre solution [8].

#### **I.7.2. Système ORC : principe de fonctionnement**

Le principe de base d'un système ORC peut être considéré comme l'opposé d'une pompe à chaleur. Les pompes à chaleur utilisent l'électricité pour produire de la chaleur à diverses fins, tandis que les systèmes ORC utilisent la chaleur pour produire de l'électricité.

Dans une conception ORC typique, une source d'énergie thermique alimente un évaporateur pour entraîner un détendeur ou « compresseur inversé », qui à son tour génère de l'électricité.

Les échangeurs de chaleur sont une partie importante du système ORC et sont utilisés à plusieurs étapes du cycle. Ils fonctionnent comme évaporateurs, condenseurs et régénérateurs ou économiseurs. L'utilisation de la technologie d'échangeur de chaleur à plaques la plus adaptée à l'application garantit que le système fournira la production d'énergie la plus fiable, la plus efficace et la plus durable [9].

#### **I.7.3. Applications des cycles à système ORC**

Les cycles ORC suscitent un intérêt croissant dans le monde depuis la fin des années 1980, pour trois principales classes d'applications, qui représentent l'essentiel des réalisations, en terme de puissance installée et de nombre d'installations :

- les centrales géothermiques.

- les installations de combustion de biomasse.
- la récupération de chaleur sur des effluents [10].

### I.7.4. Fluides de travail pour cycles à système ORC Fluide organique

Un fluide organique est un liquide qui est utilisé comme fluide de travail dans le cycle organique de Rankine (ORC). Les fluides organiques ont des points d'ébullition plus bas que l'eau, ce qui les rend particulièrement adaptés pour extraire de l'énergie à partir de sources de chaleur à basse température.

Les fluides organiques peuvent être de différents types, mais ils doivent être choisis en fonction de leur stabilité thermique, de leur capacité à transférer la chaleur, de leur pression de vapeur, de leur toxicité et de leur impact environnemental. Les fluides organiques couramment utilisés dans le cycle ORC comprennent :

- Les hydrocarbures tels que le pentane, l'hexane et l'heptane.
  - Les chlorofluorocarbones (CFC) tels que le R-11 et le R-12, mais ils ne sont plus utilisés en raison de leur impact sur la couche d'ozone.
  - Les hydro chlorofluorocarbones (HCFC) tels que le R-22, mais ils sont également en train d'être éliminés en raison de leur impact sur l'environnement.
  - Les hydrofluorocarbures (HFC) tels que le R-134a et le R-245fa, qui sont plus écologiques que les CFC et les HCFC.
  - Les hydrocarbures fluorés tels que le propane(R290), le butane (R600) et l'isobutane sont utilisés comme fluides frigorigènes organiques en raison de leurs propriétés thermodynamiques favorables et de leur faible potentiel de réchauffement climatique. Ils sont principalement utilisés dans les systèmes de réfrigération domestiques et commerciaux de petite taille.
  - Les fluides frigorigènes à base de fluorocarbures, tels que le R744 (dioxyde de carbone) et le R717 (ammoniac), sont également considérés comme des fluides organiques. Ils présentent des avantages environnementaux, notamment une faible contribution au réchauffement climatique et une absence d'impact sur la couche d'ozone
- **Le R717 (ammoniac) présente plusieurs avantages en tant que réfrigérant. Voici quelques-uns des principaux avantages du R717**

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

---

- Efficacité énergétique : L'ammoniac a d'excellentes propriétés de transfert de chaleur, ce qui le rend très efficace en termes de consommation d'énergie. Il permet d'obtenir un refroidissement efficace avec une consommation d'énergie relativement faible.
  - Large plage de température : L'ammoniac peut être utilisé dans une large gamme d'applications, des températures très basses aux températures élevées. Il est adapté aux applications de réfrigération industrielle à basse température, ainsi qu'aux applications de climatisation et de pompe à chaleur à haute température.
  - Respectueux de l'environnement : L'ammoniac est considéré comme un réfrigérant naturel, car il n'a pas d'impact sur la couche d'ozone et a un faible potentiel de réchauffement global (PRG) de 0. Il est donc une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport aux réfrigérants synthétiques qui ont un fort impact sur le réchauffement climatique.
  - Disponibilité et coût : L'ammoniac est largement disponible et son coût est généralement inférieur à celui de nombreux autres réfrigérants. Cela en fait un choix économiquement viable pour de nombreuses applications de réfrigération.
  - Durabilité : L'ammoniac est un réfrigérant durable et stable. Il a une faible tendance à se dégrader chimiquement et a une longue durée de vie utile, ce qui réduit les besoins de remplacement fréquent.
  - Performances élevées : L'ammoniac offre de bonnes performances de refroidissement et de congélation, ce qui en fait un choix populaire pour les applications industrielles nécessitant des températures extrêmement basses.
- **Bien que le R717 (ammoniac) présente de nombreux avantages en tant que réfrigérant, il existe également quelques inconvénients et limitations à prendre en compte**
- Toxicité : L'ammoniac est toxique et peut causer des irritations, des brûlures ou des dommages aux voies respiratoires et aux yeux à des concentrations élevées. Une exposition prolongée ou une inhalation excessive d'ammoniac peut être dangereuse pour la santé. Par conséquent, une manipulation et une utilisation appropriées avec des équipements de protection individuelle sont nécessaires.

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

---

- **Inflammabilité** : Bien que l'ammoniac ne soit pas facilement inflammable, il peut former un mélange inflammable avec l'air dans certaines conditions spécifiques, ce qui peut entraîner un risque d'incendie ou d'explosion. Des mesures de sécurité adéquates doivent être mises en place pour prévenir les risques d'incendie.
- **Odeur forte et irritante** : L'ammoniac a une odeur piquante, forte et irritante, ce qui peut être désagréable lorsqu'il est présent à des concentrations élevées. Cela peut nécessiter des précautions supplémentaires pour la manipulation et la gestion des fuites potentielles.
- **Matériaux de construction** : L'ammoniac peut être corrosif pour certains matériaux, notamment l'acier doux, le cuivre et certains plastiques. Par conséquent, les composants des systèmes de réfrigération utilisant l'ammoniac doivent être spécifiquement conçus pour résister à son action corrosive.
- **Complexité et expertise requises** : L'utilisation de l'ammoniac en tant que réfrigérant nécessite une expertise technique spécifique pour la conception, l'installation et la maintenance des systèmes de réfrigération. Des connaissances approfondies sont nécessaires pour assurer la sécurité, la performance et le bon fonctionnement des installations à l'ammoniac.
- Il est essentiel de respecter les normes de sécurité appropriées et de suivre les réglementations en vigueur lors de l'utilisation de l'ammoniac comme réfrigérant afin de minimiser les risques potentiels et de garantir une utilisation sûre et efficace.

Le choix du fluide organique dépend des conditions spécifiques de chaque application, telles que la température de la source de chaleur, la température de condensation, la pression de vapeur, la compatibilité avec les matériaux et l'impact environnemental. Les fluides organiques doivent être manipulés avec précaution, car certains d'entre eux peuvent être toxiques ou inflammables. Il est donc important de prendre des mesures de sécurité appropriées lors de la manipulation de ces fluides.

En résumé, les fluides organiques utilisés dans le cycle Rankine organique choisi pour ses propriétés thermiques, sont utilisés comme alternatives plus respectueuses de l'environnement dans les systèmes de réfrigération et de climatisation. Leur faible potentiel de réchauffement climatique et leur impact réduit sur la couche d'ozone en font des options attractives pour réduire l'empreinte environnementale des installations frigorifiques [10].

### **I.7.5. Rendement**

Pour atteindre le rendement le plus élevé possible pour un cycle de Rankine organique (ORC), il est important de considérer plusieurs facteurs clés tels que :

- ✓ Choix du fluide organique.
- ✓ Température de la source de chaleur.
- ✓ Température de condensation.
- ✓ Cycle de régénération interne.
- ✓ Amélioration de la récupération de chaleur.

il est important de sélectionner un fluide organique approprié, d'optimiser la différence de température entre la source de chaleur et le fluide organique, de minimiser les pertes de chaleur et d'utiliser des cycles de régénération interne si possible.

### **I.8. Récupération d'énergie pour le cycle organique de RANKINE**

La récupération d'énergie organique de Rankine (ORC), est un processus de conversion d'énergie utilisant des fluides organiques comme moyen de transfert de chaleur pour récupérer la chaleur résiduelle ou basse température et la convertir en énergie utilisable, généralement sous forme d'électricité.

Il est possible de récupérer la chaleur avec un fluide organique en utilisant un système de récupération de chaleur à double circuit. Dans ce système, le fluide organique circule dans un circuit fermé qui est chauffé par la source de chaleur, comme un système de chauffage central ou un radiateur. Le fluide organique est alors pompé vers un échangeur de chaleur où il transfère sa chaleur à un autre circuit de fluide, comme de l'eau, qui est utilisé pour chauffer l'espace ou l'eau chaude sanitaire. Le fluide organique est ensuite pompé de retour vers le circuit de chauffage pour être réchauffé à nouveau. Ce processus permet de récupérer la chaleur qui serait autrement perdue et de l'utiliser de manière plus efficace et plus durable [11].

Le cycle de Rankine organique est similaire au cycle de Rankine conventionnel utilisé avec de la vapeur d'eau, mais il utilise des fluides organiques à la place. Les fluides organiques ont des températures d'ébullition plus basses que l'eau, ce qui leur permet de fonctionner efficacement à des températures de source de chaleur relativement basses.

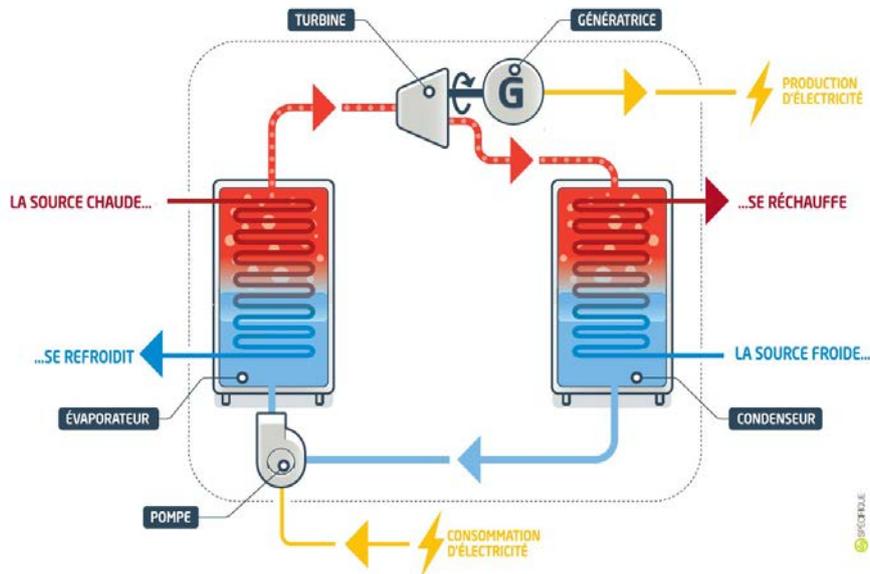


Figure I.10 : Récupération de la chaleur industrielle.

### I.9. Cycles combinés : turbine à gaz- turbine à vapeur

#### I.9.1 Définition

Un cycle combiné est un système de production d'électricité qui utilise à la fois un cycle thermique à combustion et un cycle thermique à vapeur pour produire de l'électricité. Il s'agit d'un processus efficace de conversion d'énergie, qui permet d'obtenir un rendement élevé de l'énergie consommée.

Dans un cycle combiné, le combustible (généralement du gaz naturel ou du pétrole) est brûlé dans une turbine à gaz, qui produit de l'énergie cinétique pour faire tourner une génératrice. Les gaz d'échappement chauds sont ensuite utilisés pour produire de la vapeur dans un échangeur de chaleur, qui est ensuite utilisée pour alimenter une turbine à vapeur supplémentaire pour produire encore plus d'énergie.

Le cycle combiné permet d'obtenir des rendements d'environ 50%, ce qui en fait l'un des processus de production d'énergie les plus efficaces. Il est couramment utilisé dans les centrales électriques pour produire de grandes quantités d'électricité de manière efficace et rentable [12].

#### I.9.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un cycle combiné est basé sur l'utilisation simultanée de deux cycles thermodynamiques pour produire de l'électricité. Le cycle combiné combine

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

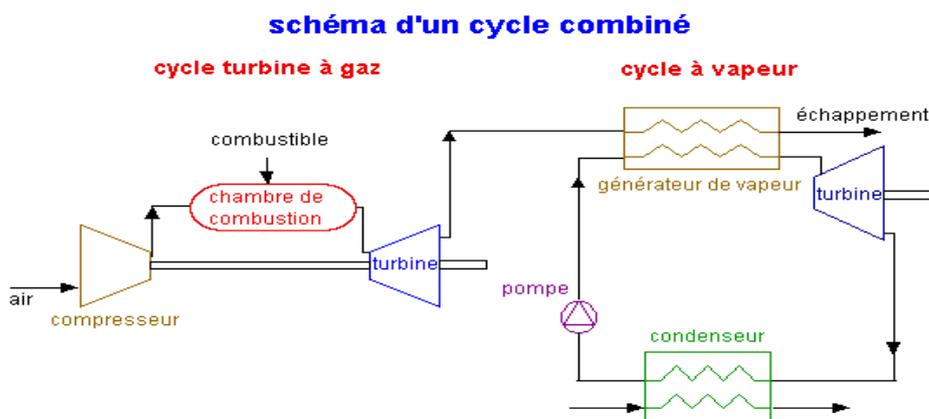
généralement un cycle thermique à gaz (cycle de Brayton) et un cycle thermique à vapeur (cycle de Rankine) en une seule installation.

Le cycle de Brayton est utilisé pour produire de l'énergie cinétique à partir de la combustion du combustible (gaz naturel, pétrole, etc.) dans une turbine à gaz. L'air est comprimé et mélangé avec le combustible, puis brûlé dans la chambre de combustion. La chaleur produite par la combustion est utilisée pour faire tourner la turbine, qui entraîne un générateur pour produire de l'électricité.

Les gaz d'échappement chauds produits par la turbine à gaz sont ensuite utilisés pour chauffer de l'eau dans un échangeur de chaleur, produisant ainsi de la vapeur qui alimente une turbine à vapeur du cycle de Rankine. La vapeur pénètre dans la turbine à vapeur et fait tourner un deuxième générateur pour produire de l'électricité supplémentaire.

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique à vapeur qui utilise de l'eau pour produire de l'énergie électrique. Dans le cycle de Rankine, la vapeur est produite en chauffant de l'eau à haute pression et haute température. La vapeur chaude fait ensuite tourner une turbine, produisant ainsi de l'électricité [12].

En résumé, le cycle combiné utilise la chaleur résiduelle des gaz d'échappement de la turbine à gaz pour produire de la vapeur et alimenter une turbine à vapeur. Cela permet d'augmenter le rendement thermique global du système et de produire plus d'électricité à partir d'une quantité donnée de combustible. Le cycle combiné est donc un moyen efficace et économique de produire de l'électricité à partir de combustibles fossiles [12].



**Figure I.11** : Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné : turbine à gaz – turbine à vapeur.

### **I.10. Cycle combiné Brayton-Rankine organique (CCBRO)**

Le cycle combiné Brayton-Rankine organique (CCBRO) est un système énergétique qui combine les principes du cycle de Brayton (cycle à gaz) et du cycle de Rankine (cycle à vapeur) en utilisant des fluides organiques comme agent de travail. Dans ce type de cycle, un fluide organique est utilisé dans le cycle de Brayton pour générer de l'électricité, et la chaleur résiduelle du cycle de Brayton est ensuite utilisée pour produire de la vapeur dans le cycle de Rankine, qui alimente une turbine supplémentaire pour générer de l'électricité supplémentaire.

L'utilisation de fluides organiques dans le cycle de Brayton présente plusieurs avantages. Les fluides organiques, tels que les hydrocarbures fluorés, ont des points d'ébullition plus bas que l'eau, ce qui permet d'exploiter la chaleur résiduelle à des températures plus basses.

Cela augmente l'efficacité globale du cycle en récupérant davantage de chaleur et en convertissant une plus grande quantité d'énergie thermique en électricité. [13]

#### **I.10.1. Avantages des CCBRO**

1. Efficacité accrue : En combinant les cycles de Brayton et de Rankine, les CCBRO permettent d'atteindre des rendements globaux plus élevés par rapport aux systèmes conventionnels. L'utilisation de la chaleur résiduelle pour produire de la vapeur supplémentaire permet d'exploiter plus efficacement l'énergie thermique disponible.
2. Flexibilité des sources de chaleur : Les CCBRO peuvent être alimentés par différentes sources de chaleur, telles que les gaz d'échappement industriels, l'énergie solaire concentrée, la géothermie, les combustibles fossiles, etc. Cette flexibilité permet d'utiliser efficacement différentes sources d'énergie pour la production d'électricité.
3. Réduction des émissions : Les CCBRO peuvent contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en maximisant l'utilisation de l'énergie thermique disponible et en améliorant l'efficacité énergétique globale.

#### **I.10.2. Inconvénients des CCBRO**

1. Dépendance au gaz naturel : Les centrales à cycle combiné sont dépendantes de l'approvisionnement en gaz naturel, ce qui peut les rendre vulnérables à des fluctuations des prix et des approvisionnements en gaz.

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

---

2. Coûts initiaux élevés : Les coûts initiaux de construction et d'installation d'une centrale à cycle combiné sont plus élevés que ceux des centrales électriques conventionnelles à combustibles fossiles.
3. Impact environnemental : Bien que les émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> soient réduites par rapport aux centrales électriques conventionnelles, les centrales à cycle combiné produisent toujours des émissions de gaz à effet de serre, qui ont un impact sur l'environnement.
4. Nécessité de refroidissement : Les centrales à cycle combiné nécessitent un système de refroidissement efficace pour dissiper la chaleur produite, ce qui peut avoir un impact sur les ressources en eau et l'environnement [13].

### **Conclusion**

Enfin, ce chapitre sur les généralités nous a offert une vue d'ensemble des centrales à cycle combinée brayton Rankine organique, en nous donnant un aperçu des domaines d'application, des tendances actuelles et des perspectives futures. Cela nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie des concepts fondamentaux liés au sujet étudié pour poursuivre notre étude de manière approfondie et informée.

# **Chapitre II**

## **Modélisation thermodynamique de l'installation**

### II.1 Introduction

Ce présent chapitre se concentre sur l'analyse énergétique et exergetique du cycle combiné Brayton-Rankine organique (CCBRO).

Nous commencerons par les principes fondamentaux, ainsi que leur application spécifique au CCBRO, et présenter les concepts clés de l'énergie et de l'exergie. Nous discuterons également des principaux principes et méthodologies de l'analyse énergétique et exergetique, tels que les bilans énergétiques, bilans exergetiques, les rendements énergétiques, et les pertes exergetique.

Ensuite, nous examinerons en détail chaque composant du CCBRO, y compris la turbine à gaz, l'évaporateur, la turbine à vapeur, le condenseur et la pompe. Pour chaque composant, nous appliquerons les principes de l'analyse exergetique et énergétique pour évaluer les performances individuelles et identifier les sources de pertes et d'inefficacités exergetiques.

Pour ce faire, il y'a lieu de formuler convenablement le problème et de lancer une simulation numérique à l'aide de logiciel EES (Engineering Equation Solver).

### II.2. Engineering Equation Solver (EES)

C'est un progiciel commercial utilisé pour la résolution de systèmes d'équations non linéaires simultanées. Il fournit de nombreuses fonctions et équations spécialisées utiles pour la solution des problèmes de thermodynamique et de transfert de chaleur, ce qui en fait un programme utile et largement utilisé pour les ingénieurs mécaniciens travaillant dans ces domaines. EES stocke les propriétés thermodynamiques, ce qui élimine la résolution itérative de problèmes à la main grâce à l'utilisation d'un code qui appelle les propriétés aux propriétés thermodynamiques spécifiées. EES effectue la résolution itérative, éliminant la tâche fastidieuse et fastidieuse d'acquérir des propriétés thermodynamiques avec ses fonctions intégrées.

EES comprend également des tables paramétriques qui permettent à l'utilisateur de comparer un certain nombre de variables à la fois. Les tables paramétriques peuvent également être utilisées pour générer des tracés. EES peut également s'intégrer, à la fois en tant que commande dans le code et dans les tables. EES fournit également des outils d'optimisation qui minimisent ou maximisent une variable choisie en faisant varier un certain nombre d'autres variables.

Les utilisateurs peuvent également spécifier des valeurs approximatives et des limites de variables pour faciliter le processus de résolution itératif et aider EES à trouver rapidement et avec succès une solution.

Le programme a été développé par F-Chart Software, une spin-off commerciale du professeur Sanford A Klein du Département de génie mécanique de l'Université du Wisconsin-Madison .

### II.3. Formulation du problème

Le but principal de la simulation numérique est de reproduire le plus Aspect approximatif possible de la réalité concrète. Dans notre exemple, la simulation Le cycle combiné numérique se concentrera sur la prédiction de performance et bien sûr performance globale. Cela commence par un certain nombre de paramètres opérationnels variables et dépendent du modèle et des données du cycle thermodynamique Fourni par diverses références. Le but ultime est de maximiser les revenus. Parce qu'en fin de compte, une efficacité accrue signifie des économies de carburant d'une part, réduire les émissions polluantes.

A cet effet, nous proposons de réaliser des études et des simulations numériques de cycles mélanger avec de la vapeur de gaz. Pour cela, nous menons cette étude à l'aide d'une simple turbine à gaz couplée à une turbine à vapeur, en introduisant un fluide organique qui est le R717 dans le système Rankine cycle organique.

Pour faire varier la pression de saturation et la température de sortie de la vapeur produite, échangez des gaz pour prédire leur impact sur les performances et l'efficacité globale cycle. Cela permet de trouver la température critique de sortie du gaz et de l'analyser Effet sur les performances de récupération de chaleur. Le rendement élevé du cycle combiné est intrinsèquement lié à la conversion et à la récupération de l'énergie thermique des gaz d'échappement dans les chaudières.

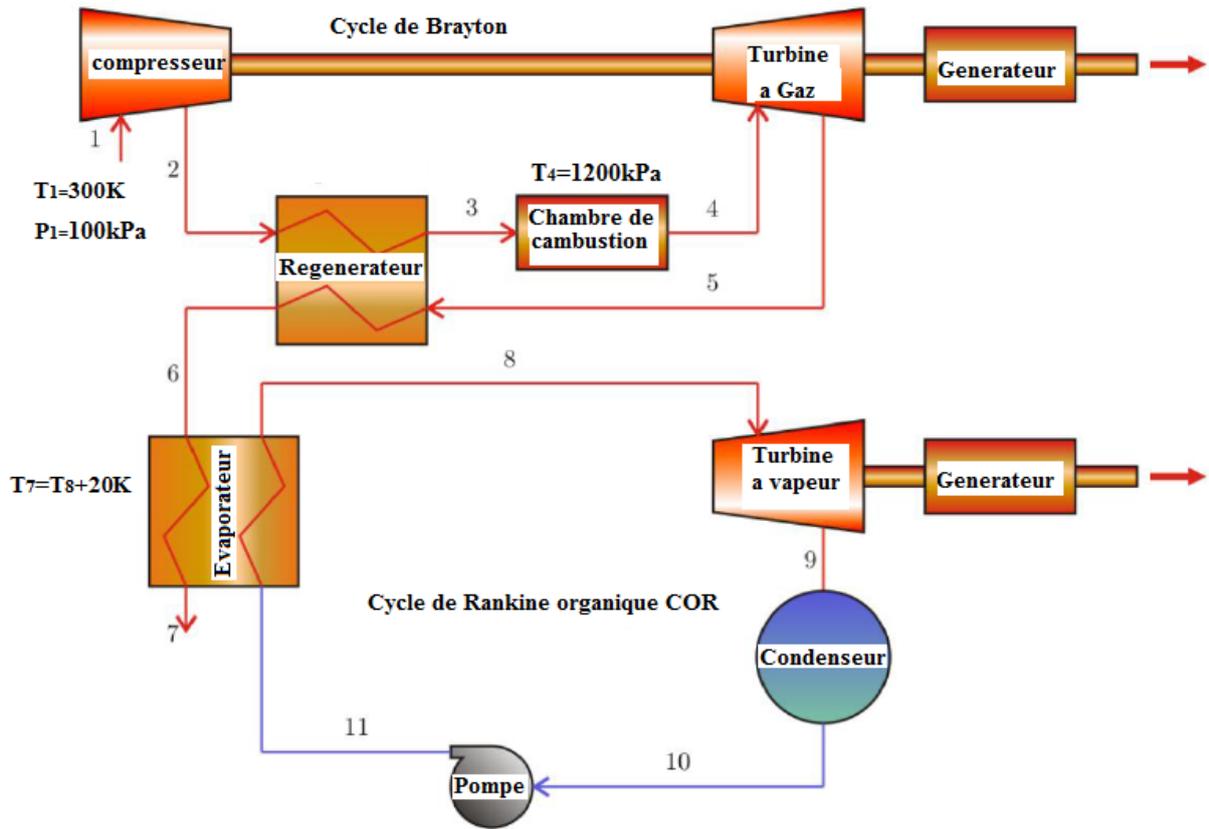


Figure II-1 : Cycle combiné B-COR.

Considérant le bilan énergétique et massique de chaque processus thermodynamique du cycle, qui sont :

- Compression 1-2 à travers le compresseur.
- 2-3 Courant froid traversant le régénérateur.
- 3-4 Apport de chaleur par la chambre de combustion.
- 4-5 Détente isentropique à travers la turbine à gaz.
- 5-6 Courant chaud traversant le régénérateur.
- 7- Rejet de gaz brûlé dans l'environnement.
- 8-9 Détente à travers la turbine à vapeur.
- 9-10 Rejet de chaleur à travers le condenseur.
- 11-8 Flux froid traversant l'évaporateur.

### II.4. Rappelle théorique

La thermodynamique est la science qui englobe l'étude des propriétés des corps ainsi que celle de tous les phénomènes faisant intervenir le travail, la chaleur et l'énergie en général.

En particulier, la thermodynamique comprend l'étude des corps en tenant compte de l'influence de la température sur leurs caractéristiques.

Elle examine aussi la transformation d'une énergie existante sous une certaine forme en une énergie se présentant sous une autre forme (énergies mécaniques, thermiques, chimiques ou électriques).

Elle s'occupe également de la configuration et du mode de fonctionnement des machines thermiques.

La thermodynamique repose sur deux principes essentiels :

- le Premier Principe ou principe d'équivalence, qui concerne le caractère conservatif de l'énergie
- le Deuxième Principe ou principe de Carnot, qui concerne la notion d'irréversibilité et le concept d'entropie

#### II.4.1 Premier principe

En mécanique, le travail fondamental d'une force est défini comme le produit du scalaire de cette force et le déplacement fondamental de son point d'application. Puisque la définition de la force n'implique pas de concepts thermodynamiques, On se réfère à la mécanique classique.

La première loi de la thermodynamique s'énonce comme suit :

Passer le système thermodynamique adiabatique à travers et fermer l'état Certainement 1 à un autre 2 qui doit travailler avec l'environnement externe est indépendant.

Les premiers principes sont des règles empiriques établies par des observations expérimentales.

L'énoncé général des premiers principes de l'énergie est le suivant :

L'augmentation de l'énergie interne totale de tout système est égale à la somme d'Énergie fonctionnelle et thermique reçue par le système et enthalpie totale système d'importation

Le premier principe s'écrit :

$$\delta W + \delta Q = dU + dE_c + dE_p \quad (\text{II.1})$$

### II.4.2 Le second principe

Le premier principe qui stipule la conservation de l'énergie n'explique pas l'irréversibilité de certaines transformations spontanées ou naturelles. Il faut donc introduire un second principe dit aussi principe d'évolution déduit des faits expérimentaux, qui permettra de prévoir les évolutions des systèmes et qui permet donc de préciser la nature d'une transformation (réversible, irréversible), à travers une nouvelle fonction d'état dite entropie (S).

Entropie : S est une fonction d'état en  $\text{kJ/kg.k}$  la variation d'entropie au cours des transformations peut être décomposée en deux termes.

— Entropie échangée avec le milieu extérieur.

— L'expression très synthétique du second principe, relatif à la variation d'entropie dans une transformation quelconque est :

$$ds = \delta es + \delta is \quad (\text{II.2})$$

$\delta es$  : représente la variation d'entropie résultant d'apports de chaleur extérieurs

$\delta is$  : représente l'entropie produite à l'intérieur du système du fait des phénomènes irréversibles qui s'y déroulent.

Le second principe s'exprime aussi sous la forme suivante :  $\delta is \geq 0$  Où le signe égal ne s'applique que dans le cas d'une transformation réversible Le terme  $\delta se$  peut, suivant l'évolution considérée, être positif, négatif ou égal à zéro.  $\delta es = \frac{\delta Q}{T}$

### II.4.3. Donnée de l'étude

Les données utilisées dans le cadre de cette étude ont été choisies. Concernant la température de pincement et la température d'approche, des valeurs moyennes de pincement et approche sont utilisées pour les calculs. Les tables 1 et 2 contiennent les valeurs fournies par des références bibliographiques et exploitées pour les calculs de cycle de Rankine.

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

**Tableau II.1** : données turbine à gaz simple

Composant	Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Compresseur	Température à l'entrée	$T_1$	[K]	300
	Pression à l'entrée	$P_1$	Pa	100
	Rendement	$\eta_c$	%	0.85
Régénérateur	Efficacité	$\eta_{reg}$	%	0.80
Combustion	Température à la sortie	$T_4$	[K]	1200
Turbine à gaz	Rendement	$\eta_{TAG}$	%	0.85
Générateur	Efficacité	$\eta_{gen}$	%	0.95

**Tableau II.2** : données pour cycle organique de Rankine

Composant	Paramètre	symbole	Unité	Valeur
Evaporateur	Pression à la sortie	$P_7$	Pa	100
Turbine à vapeur	Rendement	$\eta_{TAV}$	%	0.85
Générateur	Efficacité	$\eta_{gen}$	%	0.95
Pompe	Rendement	$\eta_p$	%	0.85

### II.4.4. Hypothèses

La modélisation énergétique et exergetique d'un cycle de puissance à vapeur peut être effectuée en combinant l'analyse de chaque sous-système. Donc, l'introduction de quelques hypothèses s'avère d'une importance majeure pour la mise en œuvre des modèles mathématiques.

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

Les hypothèses suivantes sont apportées dans notre étude :

- Chaque composant du système est considéré comme un système adiabatique, ouvert avec écoulement en régime permanent.
- Les énergies cinétiques et potentielles sont négligées au long du cycle.
- Les propriétés des fluides du cycle (l'eau-vapeur) comme : la masse volumique, la chaleur spécifique, l'enthalpie et l'entropie sont des fonctions de température et de pression.

### II.5. Modélisation thermodynamique de l'installation

#### II.5.1 Analyse énergétique

L'analyse énergétique est une approche utilisée pour évaluer les flux d'énergie à travers un système thermodynamique et comprendre comment l'énergie est utilisée, transférée et perdue. Elle permet de quantifier les quantités d'énergie entrantes et sortantes, ainsi que les pertes énergétiques.

#### II.5.2 Bilan énergétique

Le bilan énergétique est une évaluation de la quantité d'énergie entrant et sortant d'un système. Il est généralement exprimé en termes d'énergie totale consommée, produite et perdue sous forme de chaleur ou de travail. Un bilan énergétique positif indique que le système consomme plus d'énergie qu'il n'en produit, tandis qu'un bilan énergétique négatif indique que le système produit plus d'énergie qu'il n'en consomme

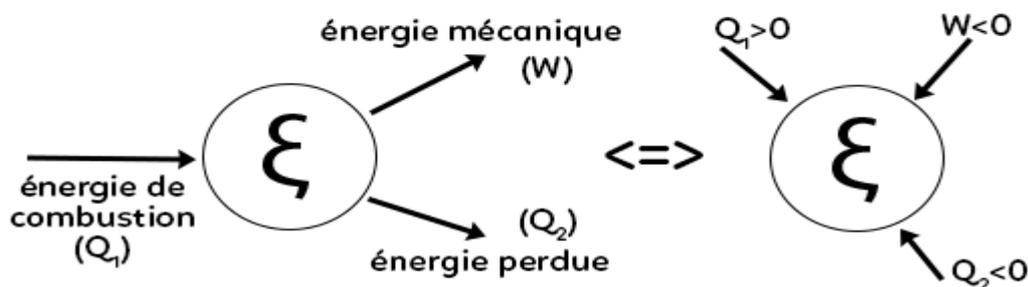
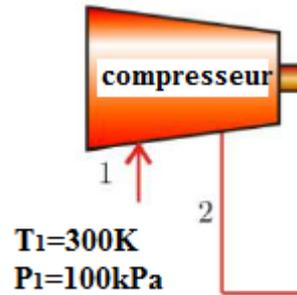


Figure II-2 : Bilan énergétique.

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

On va effectuer l'analyse énergétique à la fois pour la turbine à gaz simple et pour le cycle de Rankine organique de la turbine à gaz régénérée combinée.

### ➤ Compresseur :



Le processus de compression d'air représenté par les segments (1-2) pour le cas isentropique et (5-6) pour le cas réel, est accompli par le compresseur et modélisé par le rendement isentropique de compression [2].

On a le rendement de compresseur est donné par :

$$W_c = h_2 - h_1 \quad (\text{II.3})$$

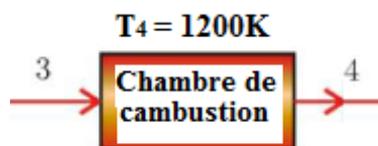
$$\eta_c = \frac{W_{c, \text{ise}}}{W_c} \quad (\text{II.4})$$

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{II.5})$$

$$rp = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{II.6})$$

Avec  $rp$  : le taux de compression.

### ➤ Chambre de combustion :



$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_g \cdot Q_{cc} \quad (\text{II.7})$$

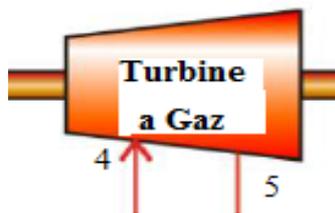
Où

$$Q_{cc} = h_4 - h_3 \quad (\text{II.8})$$

$\dot{m}_g$  : Le débit des gaz traversant la turbine.

La plupart des turbines à gaz à cycle combiné fonctionnent généralement au gaz naturel comme carburant. Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel dépend de la composition chimique du gaz.

➤ **Turbine de la détente à gaz :**



Le processus de détente effectué dans une turbine à gaz est représenté dans la Figure II-1 comme Segments (4-5s) dans le cas isentropique et (4-5) dans le cas réel.

Le travail de la turbine de détente est donné par :

$$W_{TG} = h_4 - h_5 \quad (\text{II.9})$$

$$\eta_{TG} = \frac{W_{TG}}{W_{TG, isn}} \quad (\text{II.10})$$

$$\eta_{TG} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_{5s})} \quad (\text{II.11})$$

Donc :

$$h_5 = h_4 - \eta_{TG}(h_4 - h_{5s}) \quad (\text{II.12})$$

$h_{5s}$  est déterminé en fonction par l'EES en fonction  $S_{5s}$  et  $P_5$ .

On a :

$$S_{5s} = S_4 \quad (\text{II.13})$$

Car la détente de la turbine est isentropique.

$P_5$  est déterminé par le taux de détente de la turbine.

$$rp = \frac{P_4}{P_5} \quad (\text{II.14})$$

Donc :  $P_5 = rp \cdot P_4$

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

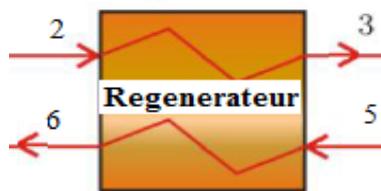
La puissance nette délivrée par la turbine à gaz est :

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}_g \cdot (W_{TaG} - W_c) \quad (II.15)$$

L'efficacité d'une turbine à gaz est directement liée à la quantité de chaleur produite la chambre de combustion est définie par la relation :

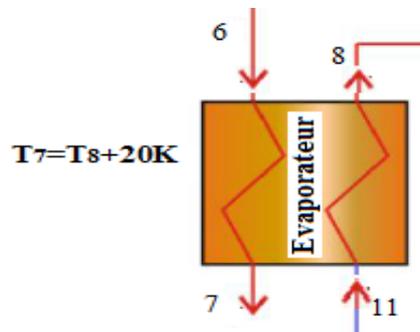
$$\eta_{th(TaG)} = \frac{W_{net}}{Q_{cc}} \quad (II.16)$$

➤ **Régénérateur :**



$$\dot{m}_g \cdot [(h_3 - h_2) = \dot{m}_g (h_6 - h_5)] \quad (II.17)$$

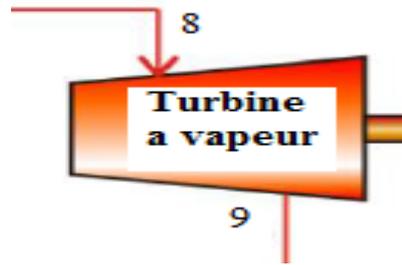
➤ **Evaporateur :**



$$\dot{m}_g \cdot (h_7 - h_6) = \dot{m}_v \cdot (h_8 - h_{11}) \quad (II.18)$$

$\dot{m}_v$  : Le débit de vapeur généré dans l'évaporateur.

➤ Turbine de détente à vapeur :



La puissance des turbines est directement liée à la récupération et à la conversion chaleur dans l'échangeur de chaleur. Le processus de détente de la turbine à vapeur est comme le montre sur la figure II.1 par le segment (8 – 9s) pour le cas isentropique et (8 – 9) pour le cas réel.

Le travail de la turbine à vapeur est donné par :

$$W_{TAV} = h_8 - h_9 \quad (\text{II.19})$$

Le rendement isentropique de la turbine est donnée par :

$$\eta_{TAV} = \frac{W_{TAV}}{W_{TAV, isn}} \quad (\text{II.20})$$

$$\eta_{TAV} = \frac{(h_8 - h_9)}{(h_8 - h_{9s})} \quad (\text{II.21})$$

$h_{9s}$  Est déterminé par l'EES en fonction de  $S_{9s}$  et  $P_9$ . Savoir que  $S_{9s} = S_8$

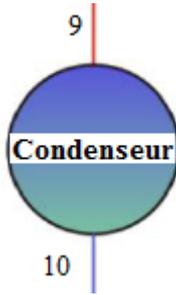
Donc :

$$h_9 = h_8 - \eta_{TAV}(h_8 - h_{9s}) \quad (\text{II.22})$$

La puissance de la turbine est donnée par :

$$\dot{W}_{TAV} = \dot{m}_V \cdot W_{TAV} \quad (\text{II.23})$$

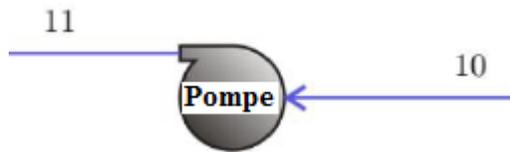
➤ **Condenseur :**



Le bilan énergétique dans le condenseur est exprimé par comme :

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_V \cdot (h_{10} - h_9) \quad (\text{II.24})$$

➤ **Pompe d'alimentation :**



Le processus (10– 11) sur la figure II.1, représente le travail de la pompe d'alimentation.

Le travail de la pompe est donné par :

$$W_{pp} = h_{11} - h_{10} \quad (\text{II.25})$$

Le rendement isentropique de la pompe est donnée par :

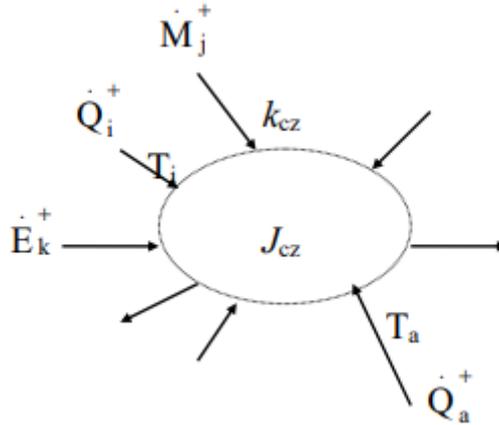
$$\eta_{pp} = \frac{(h_{11s} - h_{10})}{(h_{11} - h_{10})} \quad (\text{II.26})$$

### II.5.3. Analyse exergetique

L'analyse exergetique est une approche qui permet d'évaluer la qualité de l'énergie utilisée dans un système thermodynamique et d'identifier les sources de pertes d'exergie. Contrairement à l'analyse énergétique qui se concentre sur les flux d'énergie, l'analyse exergetique prend en compte à la fois les flux d'énergie et les flux d'entropie.

### II.5.4. Bilan exergetique

Le bilan exergetique permet de faire une évaluation quantitative de la dégradation énergétique, c'est-à-dire de calculer les conséquences des irréversibilités thermodynamique, le bilan d'exergie autour d'un système en régime permanent.



**Figure II.3 :** Bilan exergetique.

➤ **Compresseur :**

La puissance de travail consommée par le compresseur :

$$\dot{E}_c^+ = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (\text{II.27})$$

$$\dot{E}_c^+ = \dot{m}_1 C_p (T_2 - T_1) \quad (\text{II.28})$$

$$C_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \quad (\text{II.29})$$

La copuissance-transformation fournie à l'air :

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_1 (K_2 - K_1) \quad (\text{II.30})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_1 [(h_2 - h_1) - T_a (S_2 - S_1)] \quad (\text{II.31})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_1 [C_p (T_2 - T_1) - T_a (C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - r \ln \frac{P_2}{P_1})] \quad (\text{II.32})$$

La perte exergetique est :

1<sup>er</sup> méthode :

$$\dot{L}_c = \dot{E}_c^+ - \dot{E}_w^- \quad (\text{II.33})$$

2<sup>ème</sup> méthode :

$$\dot{L}_c = \dot{m}_1 \times T_a \times (S_2 - S_1) \quad (\text{II.34})$$

$$\dot{L}_c = \dot{m}_1 \times T_a \times \left( C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - r \ln \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{II.35})$$

➤ **Chambre de combustion :**

Calcul de la copuissance-transformation reçue par la chambre de combustion :

$$\dot{m}_{3'} = \dot{m}_B + \dot{m}_3 \quad (\text{II.36})$$

$$\dot{E}_{WB}^+ = \dot{m}_{GN} \times P_{ex,B} = \dot{m}_B \times \Delta k_{0,GN} \quad (\text{II.37})$$

$$\dot{E}_{WB}^+ = \dot{m}_B \times \Delta k_{0,GN} \quad (\text{II.38})$$

Calcul de la copuissance-transformation reçue par les gaz de combustion :

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{3'} (K_4 - K_3) \quad (\text{II.39})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{3'} [(h_4 - h_3) - T_a (S_4 - S_3)] \quad (\text{II.40})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{3'} [C_p (T_4 - T_3) - T_a \left( C_p \ln \frac{T_4}{T_3} - r \ln \frac{P_4}{P_3} \right)] \quad (\text{II.41})$$

La perte exergetique est :

$$\dot{L}_{CC} = \dot{E}_{WB}^+ - \dot{E}_w^- \quad (\text{II.42})$$

➤ **Turbine de la détente à gaz :**

Calcul de la copuissance-transformation reçue par la turbine au niveau des gaz :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_4 (K_4 - K_5) \quad (\text{II.43})$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_4 [(h_4 - h_5) - T_a (S_4 - S_5)] \quad (\text{II.44})$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_4 [C_p (T_4 - T_5) - T_a \left( C_p \ln \frac{T_4}{T_5} - r \ln \frac{P_4}{P_5} \right)] \quad (\text{II.45})$$

Calcul de la puissance-travail donnée par la turbine au niveau du rotor est :

$$\dot{E}_t^- = \dot{m}_4 C_p (T_4 - T_5) \quad (\text{II.46})$$

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

La perte exergetique est :

1<sup>er</sup> méthode :

$$\dot{L}_{TG} = \dot{E}_W^+ - \dot{E}_t^- \quad (\text{II.47})$$

2<sup>eme</sup> méthode :

$$\dot{L}_{TG} = \dot{m}_4 \times T_a \times (S_4 - S_5) \quad (\text{II.48})$$

$$\dot{L}_{TG} = \dot{m}_4 \times T_a \times \left( C_p \ln \frac{T_4}{T_3} - r \ln \frac{P_4}{P_3} \right) \quad (\text{II.49})$$

### ➤ Régénérateur :

Calcul de la copuissance-transformation reçu par l'air :

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_2 (K_2 - K_3) \quad (\text{II.50})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_2 [(h_2 - h_3) - T_a (S_2 - S_3)] \quad (\text{II.51})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_2 [C_p (T_2 - T_3) - T_a \left( C_p \ln \frac{T_2}{T_3} - r \ln \frac{P_2}{P_3} \right)] \quad (\text{II.52})$$

Calcul de la copuissance-transformation donné par les gaz brulés :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_5 (K_6 - K_5) \quad (\text{II.53})$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_5 [(h_6 - h_5) - T_a (S_6 - S_5)] \quad (\text{II.54})$$

La perte exergetique est :

$$\dot{L}_{reg} = \dot{E}_W^+ - \dot{E}_W^- \quad (\text{II.55})$$

### ➤ Evaporateur :

Calcul de la copuissance-transformation donné par le circuit gaz brulés :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_6 (K_6 - K_7) \quad (\text{II.56})$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_6 [(h_6 - h_7) - T_a (S_6 - S_7)] \quad (\text{II.57})$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_6 [C_p (T_6 - T_7) - T_a \left( C_p \ln \frac{T_6}{T_7} - r \ln \frac{P_6}{P_7} \right)] \quad (\text{II.58})$$

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

Calcul de la copuissance-transformation reçue par le circuit vapeur :

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{10}(K_8 - K_{11}) \quad (\text{II.59})$$

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{10}[(h_8 - h_{11}) - T_a(S_8 - S_{11})] \quad (\text{II.60})$$

La perte exergétique est :

$$\dot{L}_{\text{evp}} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}_w^- \quad (\text{II.61})$$

### ➤ Turbine de détente à vapeur :

La copuissance-transformation reçue par la turbine au niveau de la vapeur :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_8(K_8 - K_9) \quad (\text{II.62})$$

$$K_8 = h_8 - T_a \times S_8 \quad (\text{II.63})$$

$$K_9 = h_9 - T_a \times S_9 \quad (\text{II.64})$$

La puissance travail donnée par la turbine à vapeur :

$$\dot{E}_{TV}^- = \dot{m}_8(h_8 - h_9) \quad (\text{II.65})$$

La perte exergétique est :

$$\dot{L}_{TV} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}_{TV}^- \quad (\text{II.66})$$

### ➤ Condenseur :

La perte exergétique est :

$$\dot{L}_{\text{cd}} = Q_m(K_9 - K_{10}) \quad (\text{II.67})$$

### ➤ Pompe d'alimentation :

La puissance-transformation reçue par la pompe :

$$\dot{E}_p^+ = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10}) \quad (\text{II.68})$$

La copuissance-transformation acquise par l'eau en quittant la pompe est :

$$\dot{E}_w^- = \dot{m}_{10}(K_{11} - K_{10}) \quad (\text{II.69})$$

La perte exergétique est :

$$\dot{L}_p = \dot{E}_p^+ - \dot{E}_w^- \quad (\text{II.70})$$

## CHAPITRE II : Modélisation thermodynamique de l'installation

---

La perte exérgétique globale est :

$$\dot{L}_G = \dot{L}_c + \dot{L}_{cc} + \dot{L}_{TG} + \dot{L}_{reg} + \dot{L}_{evp} + \dot{L}_{TV} + \dot{L}_{cd} + \dot{L}_p$$

### Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons examiné en détail les aspects thermodynamiques et les performances de ce système énergétique. Nous avons étudié les deux cycles composant le CCBRO, à savoir le cycle de Brayton (cycle à gaz) et le cycle de Rankine (cycle à vapeur) en utilisant des fluides organiques comme agents de travail.

L'analyse énergétique nous a permis de quantifier l'efficacité globale du CCBRO en termes de conversion d'énergie thermique en électricité. Nous avons évalué le rendement énergétique, en tenant compte des pertes et des inefficiences associées aux processus de compression, de combustion, de détente et de chaleur résiduelle.

En ce qui concerne l'analyse exérgétique, nous avons étudié la destruction d'exergie tout au long du CCBRO. Nous avons identifié les sources principales de pertes exérgétiques, telles que les irréversibilités internes et externes associées aux processus thermodynamiques du cycle. L'analyse exérgétique nous a permis de déterminer les inefficiences et les améliorations potentielles du CCBRO.

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussions**

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

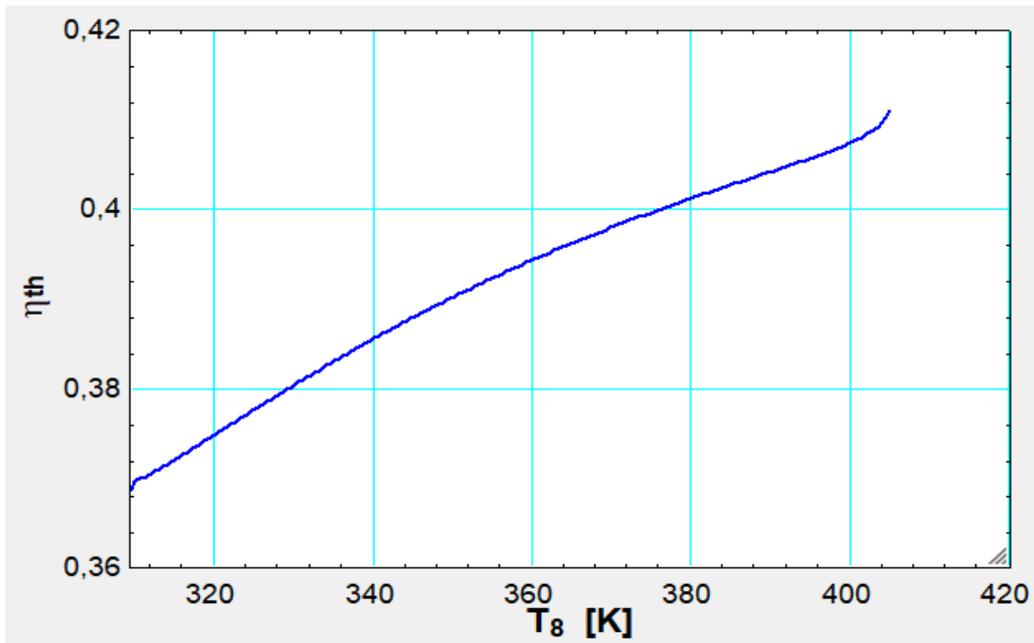
### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous souhaitons présenter et examiner les résultats de notre étude, en mettant l'accent sur certains paramètres, les performances énergétiques et exergetiques des cycles examinés. Dans le présent chapitre, les principaux résultats obtenus à partir de la simulation numérique dans l' EES. Ces schémas permettront de présenter et de discuter les valeurs obtenues à chaque point du cycle pour chaque composant du système, ainsi que pour chaque configuration.

### III.2. Energétique

Points	T [K]	P [Pa]	h [J/kg]	S [J/kg. K]
1	300	100	300.4	5.705
2	532.9	600	537.4	5.774
3	772	600	791.5	6.168
4	1200	600	1278	6.667
5	761.8	100	855.1	6.761
6	593.9	100	600.9	6.401
7	405.4	100	406.8	6.009
8	385.4	7886	1396	4.325
9	298	998.9	1218	4.43
10	298	998.9	316.9	1.406
11	300.2	7886	330.3	1.413

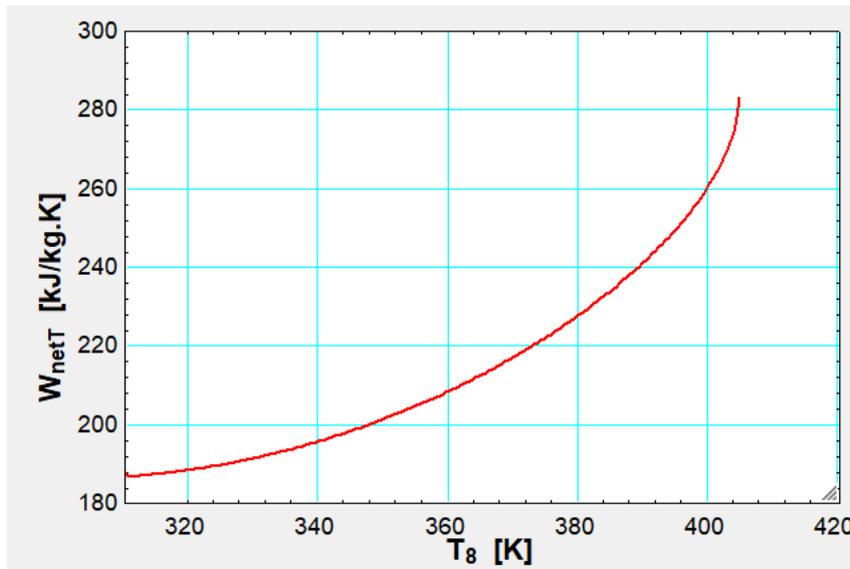
Tableau **III.1** : Résultats des points thermodynamiques du cycle combiné brayton-COR obtenue durant la simulation du programme dans l'EES.



**Figure. III.1** : variations du rendement énergétique en fonction de la température d'évaporation  $T_8$ .

D'après la figure **III.1** on observe que lorsque la température d'évaporation  $T_8$  est inférieure à 320K le rendement énergétique est équivalent à 0.37%, mais on augmentant le  $T_8$  le rendement augmente vu que quand le fluide de travail atteint une température d'évaporation 408K le rendement énergétique fourni 41.6%. L'efficacité thermique du cycle augmente avec l'augmentation de la température d'évaporation pour les conditions de chaleur résiduelle spécifiée.

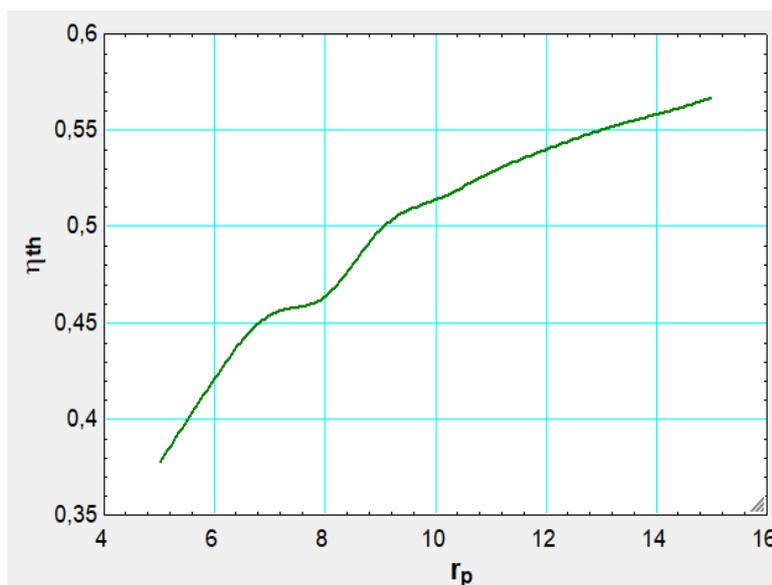
Donc on constate que la température d'évaporation contribue sensiblement pour obtenir un meilleur rendement thermique du cycle.



**Figure. III.2 :** Variations du travail net du cycle en fonction de la température d'évaporation  $T_8$ .

Le graphe au-dessus représente, la variation du travail net (kJ/kg.K) du cycle en fonction de la température d'évaporation  $T_8$  [K].

Nous observons un accroissement du travail du cycle à chaque montée de la température d'évaporation. Lorsque la température  $T_8$  est inférieure à 320 [K] le travail net du cycle est égal à 189 [kJ/kg.K] et à chaque montée de la température d'évaporation, le travail net du cycle augmente comme on voit que quand il atteint 285 [kJ/kg.k], la température d'évaporation est passée à 407 [k].



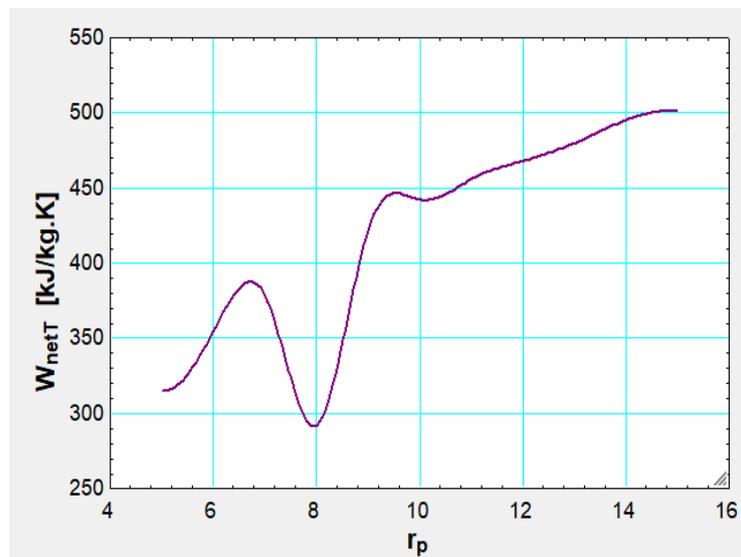
**Figure. III.3 :** variations du rendement énergétique en fonction du taux de compression.

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

Le graphe dans la figure III.3 représente, la variation du rendement énergétique du cycle en fonction du taux de compression  $r_p$ .

Nous observons un accroissement du rendement énergétique à chaque montée d taux de compression. La figure III révèle une augmentation plus nette du rendement énergétique dans un premier temps Avec l'augmentation du taux de compression, l'augmentation du rendement énergétique devient légère partir d'un taux de compression de 7 mais continue d'augmente.

On déduit que Le taux de compression, est un paramètre important dans la conception des turbines.



**Figure III.4 :** Variations du travail net en fonction du taux de compression.

Le graphe au-dessus représente, la variation du travail net du cycle en fonction du taux de compression  $r_p$ .

Nous observons que la variation de travail net en fonction du taux de compression n'est pas stable. Le graphe évolue en un accroissement au premier temps dans un travail de 310 à 340 [kJ/kg.k] dans l'intervalle d'un taux de compression de 5 à 7 puis une diminution du travail net jusque en 290[kJ/kg.k], puis une augmentation net a presque 450 [kJ/kg.k] durant l'augmentation de taux de compression de 8 à 9 puis une légère diminution après une augmentation.

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

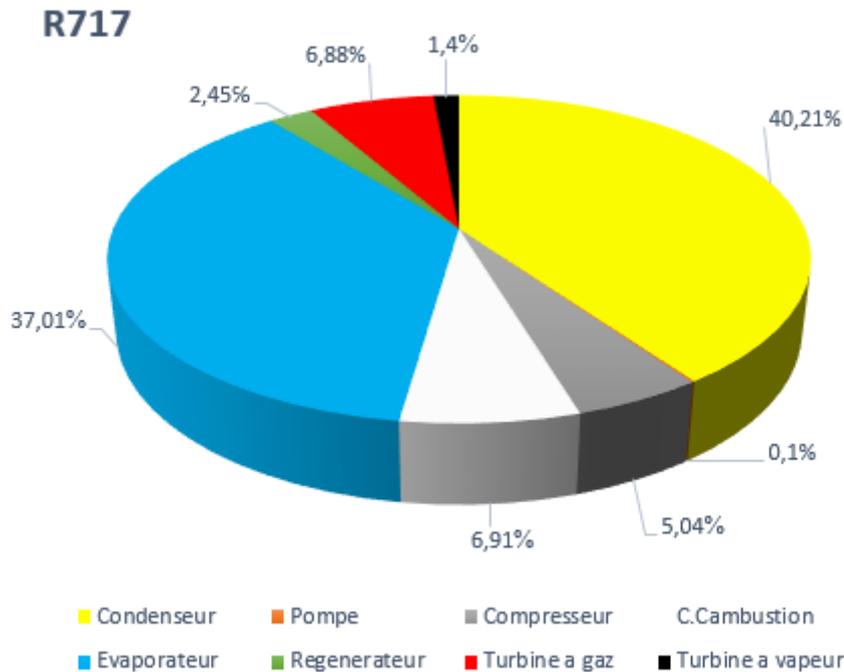
### III.2 EXERGIE

Basée sur la deuxième loi de la thermodynamique, l'analyse exergetique est un outil permettant de localiser et d'évaluer, Une analyse plus complète au niveau thermodynamique est obtenue en quantifiant les irréversibilités du système. La destruction par exergie de chaque composant dans le cycle combiné est l'endroit où des données plus précises peuvent être obtenues.

Ces données sont plus proches de la vraie représentation et révèlent les capacités actuelles qui sont souvent négligées.

composant	Symbole	Pertes exergetique [KW]	Pertes exergetique global [KW]
Condenseur	$\dot{L}_{cd}$	92.603	$\dot{L}_G = 230.3$
Pompe	$\dot{L}_p$	0.2058	
Compresseur	$\dot{L}_c$	11.61	
C.Cambustion	$\dot{L}_{cc}$	15.93	
Evaporateur	$\dot{L}_{evp}$	85.24	
Régénérateur	$\dot{L}_{reg}$	5.638	
Turbine à gaz	$\dot{L}_{TG}$	15.83	
Turbine à vapeur	$\dot{L}_{TV}$	3.235	

Tableau III.2: Résultats des Pertes exergetique de chaque composant.



**Figure III.5 :** Proportion de destruction d'exergie par composante du cycle proposé.

Suit à la figure III.5 qui représente les Proportions de destruction d'exergie par composante du cycle proposé on observe que, le condenseur ainsi que et l'évaporateur sont les composants qui présentent le plus grand impact sur la destruction de l'exergie avec un pourcentage de 40.21%, 37.01%. Avec une faible irréversibilité dans la turbine à gaz, présentant une destruction d'exergie de 6,88% et 1,4 %.

Il est possible de vérifier que le principal responsable de l'irréversibilité de l'usine est le condenseur suivi de l'évaporateur, du compresseur et de la turbine à gaz et de la chambre de combustion. Il est intéressant de noter que les principaux responsables de l'irréversibilité de la se trouvent dans les composants de la turbine à gaz.

Il est possible d'observer qu'il y a une amélioration de l'efficacité du cycle de Brayton avec l'ajout du refroidissement à travers le fluide du travail, qui conduit à une amélioration du cycle combiné. Le cycle de Rankine observe si cela présente une aggravation, puisque les gaz entrent avec une température plus petite. Dans la combinaison, le résultat est positif puisque la turbine à gaz est responsable de la plus grande capacité des plantes.

Comme le vérifie la figure III.5 les composants de la turbine à gaz sont les le plus responsable de la destruction de l'exergie de la plante, donc, en séparant les rendements par cycle, on en conclut que le cycle de Brayton est celui avec le rendement exergetique le plus élevé. Cela se

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

---

produit principalement par le processus de combustion qui s'effectue dans la turbine à gaz, puisque la destruction d'exergie est une caractéristique de ce processus, cela a également été observé dans les études de Gomes (2001) et White (2005).

Ces résultats sont attribuables à la réaction chimique et au transfert de chaleur par les grandes différences de température du milieu extérieur qui influent sur l'échange de la chaleur du fluide de travail, rendant le processus irréversible.

### **Conclusion**

L'utilisation d'un fluide de travail organique dans le cycle combiné présente des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique.

L'analyse énergétique a révélé que l'intégration de la chaleur résiduelle du cycle Brayton dans le cycle Rankine permet d'exploiter plus efficacement l'énergie disponible, ce qui se traduit par une augmentation de la production d'électricité et une amélioration de l'efficacité énergétique globale du système. L'analyse exergetique a identifié les principaux points de pertes d'exergie dans le système.

En conclusion, les résultats de cette analyse organique fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation de systèmes de production d'énergie plus efficaces. Ces conclusions peuvent servir de base pour de futures études et aider à guider le développement de technologies énergétiques plus propres et plus efficaces.

# **Conclusion Générale**

# Conclusion générale

L'analyse énergétique et exergetique du cycle combiné Brayton-Rankine organique a permis de mettre en évidence plusieurs aspects importants de ce système. L'étude a révélé que l'utilisation d'un fluide de travail organique dans le cycle combiné présente des avantages significatifs par rapport aux cycles conventionnels à vapeur.

L'utilisation du fluide R717 est suffisante dans la récupération de chaleur dans de basse température et sources géothermiques. Cependant, si d'une part, le cycle combiné avec fluides n'est pas aussi efficace, avec le cycle de Rankine avec fluides, il convient à l'utilisation provenant d'autres sources de chaleur à des températures plus basses. Pour le cycle de Rankine, les fluides présentent de nombreux avantages par rapport à l'eau, car avec des fluides le cycle peut atteindre le point critique à basse température et dilatation à sec de la turbine. De plus, dans la réutilisation de la chaleur, le facteur important n'est pas l'efficacité du cycle de Rankine lui-même, mais en augmentant l'efficacité de l'ensemble du système, même s'il s'agit d'un cycle combiné.

L'analyse exergetique est un outil important pour évaluer et quantifier où trouver les plus grandes pertes et irréversibilités du système et de ses composants. Concernant le cycle proposé, le condenseur est le composant qui présente le plus grand impact sur la destruction de l'exergie. L'importance de l'analyse exergetique est notoire, car à travers elle, il est visible d'observer où sont les plus grandes dépenses et les plus grandes inefficacités dans un processus de dans la turbine à gaz, dans la production.

Enfin, l'analyse énergétique et exergetique du cycle combiné Brayton-Rankine organique a démontré son potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique globale des centrales électriques. Cette étude fournit des informations précieuses pour la conception et l'optimisation de systèmes de production d'énergie plus efficaces et plus durables. Les résultats de cette recherche peuvent servir de base pour de futures études et aider à guider le développement de technologies énergétiques plus propres et plus efficaces.

# References bibliographiques

- [1] **MEUNIER Francis**, Thermodynamique. 2018, 304 pages. ISBN : 9782100775897.
- [2] **WOILLEZ Jacques**, *Conversion chaleur-énergie mécanique. Principes et applications industrielles*. 2018, 336 pages. ISBN : 9782746248236.
- [3] **Yunus A. Çengel, Michael A. Boles** Thermodynamique une approche pragmatique: 2e édition.
- [4] **GICQUEL Renaud**, Modéliser et simuler les technologies énergétiques. Conversion thermodynamique de la chaleur. 2017, 236 pages. ISBN : 9782356714718.
- [5] **HERZALLAH, A.**, "Étude thermodynamique Maintenance et Fiabilité d'une turbine.
- [6] **Jean-François Oudkerk**. Modélisation, simulation et contrôle d'un cycle de Rankine organique en régime dynamique .Mémoire de fin d'études Ingénieur. Université de Liege2010.
- [7] **Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, Pierre Desrochers** « Thermodynamique Appliquée », Editions du Renouveau Pédagogique Inc, Montréal (Québec) 1981.
- [8] **G.-A. Hirn**, "Mémoire sur la théorie de la surchauffe dans les machines à vapeur," Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse, vol. 28, pp. 5-106, 1857.
- [9] **S. Quoilin**: An introduction to thermodynamics applied to Organic Rankine Cycles. (November), 2008
- [10] **Nouman J (2012)**, etude comparatifset analuses de feluides de travail pour les cycles organique de rankine these de master of science
- [11] **Macchi E.** (2016), Chapter 1 - Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1
- [12] **AOUDACHE Malika**. Magister.pdf univ-boumerdes.dz.
- [13] **ENNIO Macchi, MARCO**. astolfi Organic Rankine Cycle (ORC) power systems technologie and applications.

[14] **(FUENTE; ROBERGE; GREIG, 2017)**, article Using the forward movement of a container ship navigating in the Arctic to air-cool a marine organic Rankine cycle unit

[15] **S.A. Klein**. Engineering equation solver (EES) software. Version 10.492. Chart software, (2013).

[16] **Lucien Borel , Daniel Favrat** De l'énergie à l'exergie, thermodynamique et énergétique (volume 1)

## **Résumé :**

Ce projet de recherche se concentre sur l'analyse énergétique et exergetique du cycle combiné Brayton Rankine-COR utilisant le fluide R717, également connu sous le nom d'ammoniac.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances thermodynamiques du cycle combiné Brayton Rankine-COR utilisant le fluide R717 en termes d'efficacité énergétique et exergetique. Grâce au programme ESS, il est possible de modéliser ce système et de simuler ses performances en utilisant différentes réfrigérantes, dont le fluide R717.

Utilisation de fluides de travail organiques dans le cycle combiné Brayton-Rankine Présente des avantages significatifs en matière d'efficacité énergétique. L'analyse exergetique à aider à identifier les domaines spécifiques à améliorer réduire les pertes exergetiques et optimiser les performances du système.

**Mots clés :** Cycle combiné Brayton Rankine-COR, analyse énergétique, analyse exergetique, efficacité énergétique, efficacité exergetique, fluide R717, ammoniac, modélisation, Simulation, ESS.

## **Abstract:**

This research project focuses on the energy and exergy analysis of the Brayton Rankine-COR combined cycle using R717 fluid, also known as ammonia.

The main objective of this study is to evaluate the thermodynamic performance of the Brayton Rankine-COR combined cycle using R717 fluid in terms of energy and exergy efficiency. Thanks to the ESS program, it is possible to model this system and simulate its performance using different refrigerants, including the R717 fluid.

Use of organic working fluids in the Brayton-Rankine combined cycle has significant advantages in energy efficiency. Exergy analysis helps identify specific areas for improvement, reduce exergy losses and optimize system performance.

**Keywords:** Brayton Rankine-COR combined cycle, energy analysis, exergy analysis, energy efficiency, exergy efficiency, R717 fluid, ammonia, modeling, Simulation, ESS.