



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

العلمي والبحث العالي التعليم وزارة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie des procédés et énergétique

## MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique et Développement Durable

Présenté par

**IKRAM ZEGUEUR**

# EVALUATION DES PERTES ÉNERGÉTIQUES D'UN CYCLE À GAZ À COMPRESSION ET À DÉTENTE FRACTIONNÉES AU MOYEN D'UN BILAN EXERGÉTIQUE.

Encadré par

**Dr. Nassima Mallem**

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Dr. Naouam BOUDINAR

Président

ENSTI

Dr. Slimane NIOU

Examinateur

ENSTI

## ملخص:

تركز هذه الدراسة على التحليل الاكسيري لدورة الغاز البسيطة، التي تتكون من ضاغط واحد وتوربين واحد، ودورة الغاز المعدلة التي تتضمن ضاغطين وتوربينين، والمعروفة باسم دورة الانضغاط والتوسع المجرأ. تظهر النتائج انخفاضًا كبيرًا في خسائر الاكسيرية في الدورة المعدلة، مما يُظهر فعالية تقنيات الانضغاط والتوسع المجرأ. هذه التحسينات ضرورية لتطوير أنظمة طاقة أكثر كفاءة واستدامة. الكلمات المفتاحية: الدورة الغازية، الضغط الجزئي، ميزان الاكسيري، المردود الاكسيري، خسائر الاكسيري.

## Abstract:

The study carried out in this Master's degree focuses on the exergy analysis of a simple gas cycle, consisting of a single compressor and a single turbine, and a modified gas cycle, including two compressors and two turbines, commonly known as the split compression and expansion cycle. The results show a significant reduction in exergy losses in the modified cycle, demonstrating the effectiveness of split compression and expansion techniques. These improvements are essential for the development of more efficient and sustainable energy systems.

Key words : Gas cycle ,Fractional compression and expansion,Exergy balance ,Exergy losses, Exergy efficiency.

## Résumé:

L'étude effectuée dans ce Master se concentre sur l'analyse exergetique d'un cycle à gaz simple, constitué d'un seul compresseur et d'une seule turbine, et d'un cycle à gaz modifié, incluant deux compresseurs et deux turbines, connu sous le nom de cycle à compression et détente fractionnées. Les résultats montrent une réduction significative des pertes exergetiques dans le cycle modifié, démontrant ainsi l'efficacité des techniques de compression et détente fractionnées. Ces améliorations sont essentielles pour le développement de systèmes énergétiques plus efficaces et durables.

Mots-clés : Cycle à gaz ,Compression et détente fractionnées,Bilan exergetique,Pertes exergetiques,Rendement exergetique .

## Dédicaces

*C'est avec une immense gratitude et une profonde humilité que je prends un moment pour reconnaître ceux qui ont joué un rôle essentiel dans mon parcours académique et personnel. Ce mémoire est le fruit non seulement de mon travail personnel, mais aussi de l'appui inestimable et de la bienveillance de nombreux individus. Je souhaite leur témoignage de ma gratitude et leur dédier cet ouvrage*

*Maman, Tu as été mon premier professeur, mon plus grand soutien et ma motivation constante. Tes encouragements m'ont porté dans les moments de doute, ta sagesse m'a guidé dans les choix difficiles, et ton amour inconditionnel m'a donné la force de persévérer. Ce diplôme est autant le tien que le mien. Il est le fruit de nos efforts conjoints, de tes nuits blanches autant que des miennes, de tes prières et de ton dévouement sans faille.*

*Papa, tu m'as guidé depuis mon enfance. Tu as été mon premier mentor, mon exemple et mon plus fervent supporter. Tes conseils avisés ont éclairé mon chemin. Ce diplôme est le fruit de tes enseignements et de ton dévouement. Chaque ligne de ce travail reflète les valeurs que tu m'as inculquées : l'excellence, la détermination et la rigueur.*

*À mon Cher frère Aymen, mon âme sœur, Complice de toujours et soutien infailible. Depuis notre enfance, tu as été à mes côtés dans chaque aventure, chaque défi. Ta présence a rendu chaque victoire plus douce. Ce diplôme porte l'empreinte de notre complicité.*

*À ma chère petite sœur Hana, Rayon de soleil de ma vie et source inépuisable de joie Nos moments de complicité, nos fous rires et même nos petites disputes ont été des bouffées d'oxygène dans l'intensité de mes études.*

*À mon petit frère Wassim, ma source infinie de tendresse. Nos moments de jeu, tes câlins spontanés ont été des rayons de soleil dans mes journées les plus chargées. Ce diplôme, je l'ai aussi obtenu pour toi, mon petit enfant. Pour te montrer que les rêves se réalisent avec du travail et de la persévérance.*

*Mon parcours académique m'a offert bien plus que des connaissances il m'a présenté des âmes exceptionnelles qui ont enrichi mon existence de manière indélébile. Chacun d'entre vous a laissé une empreinte unique sur mon cœur et mon esprit : Yousra , Rania , Lydia ,Louaa , Reda .*

*À Yousra, ma bien-aimée, dont le soutien indéfectible et l'amour constant ont été mon phare dans cette aventure académique, merci d'avoir cru en moi à chaque instant.*

*À Rania, ma première rencontre dans ce parcours, qui a ouvert la porte à une amitié précieuse et m'a accompagnée dès les premiers pas de cette aventure académique.*

*À Lydia, fidèle compagne de route des trois dernières années, dont l'amitié constante et le soutien inébranlable ont enrichi mon parcours et allégé chaque défi.*

*À Louaa, séparées par la distance mais unies par un lien indestructible, ton soutien constant malgré les kilomètres a été une source inépuisable de force tout au long de ce parcours.*

*À Reda, mon sauveur et pilier depuis cinq ans, dont le soutien moral indéfectible et la présence constante ont été des ancrages essentiels dans mon parcours, ta générosité et ton amitié resteront à jamais gravées.*

*Et comment pourrais-je oublier mes "besties" Vous occupez une place Spéciale dans mon cœur et dans mon histoire : Malak , Rania , Dalia , Ines , Amel .*

*À Malak, ma bestie, complice de chaque instant et miroir de mon âme - ton amitié inconditionnelle a illuminé ce parcours, transformant les défis en aventures.*

*À Rania, étincelle initiale de cette aventure académique, dont l'amitié s'est épanouie en une complicité inestimable - merci d'avoir partagé rires, défis et victoires, faisant de ce voyage une expérience inoubliable à tes côtés.*

*À Dalia, Mon cœur d'amour ton amitié a été un fil d'or tissant joie et soutien à travers toutes les étapes de ce parcours académique.*

*À Ines, ma compagne bien-aimée, pour son soutien moral inébranlable tout au long de mes études. Merci pour ta patience, ton amour et ta foi en moi. Ta présence et ton encouragement ont été essentiels à ma réussite.*

*À Amel, pour son soutien inestimable tout au long de mes études. Ton encouragement, ta compréhension et ta présence constante m'ont permis de surmonter chaque défi.*

*C'est avec une immense joie et une profonde émotion que je dédie ces mots à tous les membres de ma classe EDD. Au cours des trois dernières années, nous avons tissé des liens indélébiles en partageant des moments inoubliables, des rires, des succès et des défis. Cette dédicace célèbre bien plus qu'une simple promotion ; elle rend hommage à une famille choisie, riche de diversité et de talents, qui est devenue une véritable deuxième maison pour chacun de nous.*

## **Remerciement**

Tout d'abord, je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je remercie en premier lieu et profondément ma promotrice, le Professeur Mme MALLEM Nassima, qui n'a jamais cessé de me conseiller, orienter et m'encourager. Merci pour sa disponibilité et sa coopération remarquable. Ses retours constructifs et ses encouragements m'ont permis de surmonter les obstacles et d'approfondir ma recherche.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Doctorante CHEBLI Fatiha pour son rôle crucial dans la réalisation de mon projet de fin d'études. Son expertise, sa générosité intellectuelle et son engagement ont été des éléments clés de ma réussite.

Je tiens à remercier également l'ingénieur du SKS Sonelgaz SKIKDA Mr MELKI Abdelkrim pour ses efforts et ses conseils, je remercie aussi tous les ingénieurs du division pétrochimie « Sonatrach ».

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba.

# Table des matières

## Liste des figures

## Liste des tables

## Liste des abréviations

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Motivation et problématique.	3
1.1.Motivation	4
1.2. Problématique	4
Chapitre 2 : Etat de l'art et recherche bibliographique.	5
2.1. Bilan exergetique et évaluation des pertes exergetiques dans un cycle à gaz simple et modifié avec compression et détente fractionnées	
2.1.1 Cycle à gaz simple	6
2.1.2.Cycle à gaz avec compression et détente fractionnées	6
2.1.3 Comparaison des cycles à gaz simples et modifiés	6
2.2. Travaux de recherche utilisant l'analyse exergetique des cycles à gaz	6
2.3. Conclusion	7
Chapitre 3 : L'exergie et l'analyse exergetique	10
3.1. Concept clé de l'exergie.	11
3.2. Différence entre exergie et énergie:	11
3.3.Les différentes formes d'exergie	11
3.4. Analyse Exergetique: Concepts et Utilisations .	12
3.4.1 Applications de l'analyse exergetique	13
3.4.2 Avantages de l'analyse exergetique	13
3.4.3 Rendement exergetique	13
3.5 Application de l'analyse exergetique aux cycles à gaz simples et modifiés	14
3.6. Le rendement exergetique du cycle à gaz	16
Chapitre 4 : Analyse et discussion des résultats du bilan exergetique.	17
4.1.Cycle à gaz simple	18
4.1.1 Le compresseur	18
4.1.2 La chambre de combustion	19
4.1.3 La turbine à gaz	20
4.1.4 Le rendement exergetique du cycle à gaz	20
4.2. Cycle à gaz à deux compresseurs et deux turbines	20
4.2.1. Le deuxième compresseur	21
4.2.2.La deuxième turbine à gaz	22
4.2.3.Le rendement exergetique du cycle à gaz amélioré .	22
4.3.Interprétation des résultats et conclusion	23

Conclusion Générale	24
Références bibliographiques	27

## Liste des figures

<b>Figure 3.1</b> : Le bilan exergétique du compresseur	14
<b>Figure 3.2</b> : Le bilan exergétique de la chambre de combustion	15
<b>Figure 3.3</b> : Le bilan exergétique de la turbine à gaz	15
<b>Figure 4.1</b> : Schéma du cycle à gaz avec les quatre principaux états	18
<b>Figure 4.2</b> : : Schéma cycle à gaz modifié (à compression et détente fractionnée)	21

## Liste des tables

<b>Table 4.1</b> : Les différentes grandeurs d'états de chaque point dans le cycle à gaz	18
<b>Table 4.2</b> : Les constituants du gaz naturel avec leurs pouvoirs exergétiques	19
<b>Table 4.3</b> : Les différentes grandeurs d'états de chaque point du cycle à gaz modifié	21
<b>Table 4.4</b> : 4 : Résultats de l'analyse exergétique des deux cycles, simple et modifié	23

# Liste des abréviations & Nomenclature :

## 1/Liste des abréviations :

**SKS** : SharikatKahraba Skikda

**HRSG** : Chaudiere de recuperation

**TG** : Turbine à gaz

**TV** : Turbine à vapeur

**TGV** : Turbine gaz vapeur

## 2/Nomenclature :

$\eta$  : Rendement (%)

$\eta_{Ex,c}$  : Rendement Exergetique du compresseur (%)

$\eta_{Ex,TG}$  : Rendement Exergetique de la Turbine à gaz(%)

$\eta_{Ex,cycle\ à\ gaz}$  :Rendement Exergetique du cycle a gaz (%)

$E_{xe}$  :Exergie Entrante (KW)

$E_{xs}$  :Exergie Sortante (KW)

$\dot{W}$  : Puissance mécanique (W)

$\dot{m}$  : Débit massique (kg/s)

$h$  : Enthalpie massique (kJ/kg)

$S$  : Entropie massique (kJ/kg.K)

$T$  : Température de référence (C°)

$W$  : Travail (kJ/kg)

$W_c$  : La puissance absorbée par le compresseur (MW)

$W_{TG}$  : La puissance absorbée par le Turbine (MW)

$W(\text{cycle gaz})$  : travail produit par le cycle à gaz (kJ/kg)

**PCI** : pouvoir calorifique inférieur

$h_0$  : Enthalpie massique de référence (kJ/kg)

$S_0$  : Entropie massique de référence (kJ/kg.K)

**C** : Compresseur

$Ch_c$  : Chambre de combustion

$Q_{in\ cycle\ gaz}$  : : Quantité de chaleur fournie au cycle à gaz (kW)

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

L'exergie est une mesure de la qualité de l'énergie, représentant la quantité maximale de travail utile qu'un système peut produire lorsqu'il est mis en équilibre avec son environnement. Contrairement à l'énergie, qui ne prend en compte que la quantité totale disponible, l'exergie évalue l'utilisabilité de cette énergie, ce qui en fait un outil crucial pour l'analyse des systèmes énergétiques.

Dans le contexte des cycles de puissance à gaz, l'analyse exergetique permet de quantifier les inefficacités et les pertes dans chaque composant, aidant ainsi à identifier les points de faiblesse et à cibler les améliorations possibles. Par exemple, dans un cycle à gaz simple, les principaux composants tels que le compresseur, la chambre de combustion, et la turbine présentent des pertes exergetiques importantes, réduisant ainsi le rendement global du système.

Afin d'optimiser le rendement de ces cycles, des modifications peuvent être apportées. Un travail significatif a été réalisé pour améliorer l'efficacité d'un cycle à gaz simple en fractionnant les phases de compression et de détente. Cette méthode consiste à ajouter un deuxième compresseur et une deuxième turbine, ce qui permet de répartir les travaux de compression et d'expansion sur plusieurs étapes. Cette approche réduit les pertes exergetiques et améliore le rendement global du cycle.

Notre étude se concentre sur l'application de l'analyse exergetique pour évaluer les gains d'efficacité obtenus grâce à ces modifications. En comparant les performances des cycles à gaz simple et modifié, les résultats montrent une réduction significative des pertes exergetiques dans le cycle modifié, démontrant ainsi l'efficacité des techniques de compression et de détente fractionnées. Ces améliorations sont essentielles pour le développement de systèmes énergétiques plus efficaces et plus durables.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, résumés comme suit :

- **Chapitre 1** : Ce chapitre présente une introduction générale à la centrale thermique à cycle combiné de Skikda (SKS). Il décrit ses composants, son fonctionnement, et ses performances globales, tout en exposant la motivation et la problématique du sujet proposé.
- **Chapitre 2** : Ce chapitre commence par définir l'exergie et expliquer l'importance de l'analyse exergetique. Il offre ensuite une revue bibliographique sur l'utilisation de cette analyse pour les cycles à gaz simple et avec compression et détente fractionnées.
- **Chapitre 3** : Le troisième chapitre se concentre sur la théorie de l'analyse exergetique, en mettant en avant les expressions mathématiques utilisées pour calculer le rendement et les pertes exergetiques dans les cycles à gaz simple et ceux à compression et détente fractionnées.
- **Chapitre 4** : Ce dernier chapitre se focalise sur l'application de la méthode décrite au chapitre 3, suivie de l'interprétation des résultats obtenus. Ensuite, il procède à une comparaison des valeurs calculées pour le cycle simple et le cycle modifié.

# **Chapitre 1 :**

## **Motivation et problématique.**

## 1.1 Motivation

L'analyse exergetique est un outil précieux pour l'évaluation des performances des centrales thermiques à gaz, qu'il s'agisse de cycles simples ou de cycles plus complexes avec compression et détente fractionnées. Elle permet d'identifier les sources de pertes d'énergie et de comprendre les limitations d'efficacité du système. [1], [2]

## 1.2 Problématique

Les centrales thermiques à gaz, malgré leur efficacité relativement élevée (environ 30 à 45%), subissent des pertes d'énergie à chaque étape du cycle [3]. Ces pertes peuvent être dues à des facteurs tels que :

- Transferts de chaleur vers l'environnement: Une partie de l'énergie thermique est perdue dans l'environnement par conduction, convection et rayonnement.
- Frottements internes: Les composants rotatifs tels que les turbines et les compresseurs génèrent des frottements qui dissipent de l'énergie sous forme de chaleur.
- Combustion incomplète du combustible: Une partie du combustible n'est pas complètement brûlée, ce qui entraîne une perte d'énergie chimique.
- Sortie des gaz d'échappement à haute température: Les gaz d'échappement quittent la centrale à une température élevée, ce qui représente une perte d'énergie thermique.

L'analyse exergetique permet de:

- Quantifier les pertes d'énergie à chaque étape du cycle en évaluant l'exergie, qui représente la capacité d'un système à produire du travail utile.
- Identifier les principales sources de pertes et comprendre les mécanismes sous-jacents qui les provoquent.
- Évaluer l'impact des modifications du cycle sur l'efficacité exergetique et identifier des stratégies d'optimisation.
- Comparer les performances de différentes configurations de cycle et sélectionner la plus efficace.
- Contribuer à la conception de centrales thermiques plus performantes et plus respectueuses de l'environnement.

En résumé, l'analyse exergetique est un outil essentiel pour l'amélioration des performances des centrales thermiques à gaz, en permettant de réduire les pertes d'énergie, d'augmenter l'efficacité et de minimiser l'impact environnemental.

**Chapitre 2 :**  
**Etat de l'art et recherche**  
**bibliographique.**

## **2.1. Bilan exergetique et évaluation des pertes exergetiques dans un cycle à gaz simple et modifié avec compression et détente fractionnées :**

L'analyse exergetique est un outil précieux pour évaluer les performances et identifier les pertes d'efficacité dans les cycles thermodynamiques, tels que les cycles à gaz utilisés dans les centrales électriques. En comparant l'exergie à l'entrée et à la sortie de chaque composant du cycle, il est possible de quantifier les pertes d'exergie et de proposer des stratégies pour améliorer l'efficacité globale du système.

### **2.1.1. Cycle à gaz simple:**

Dans un cycle à gaz simple, l'air est comprimé, mélangé à du combustible et brûlé dans une chambre de combustion. Les gaz chauds produits par la combustion font ensuite tourner une turbine, produisant du travail utile, avant d'être évacués dans l'atmosphère.

L'analyse exergetique d'un cycle à gaz simple révèle généralement que les pertes d'exergie les plus importantes se produisent dans les étapes suivantes :

- Chambre de combustion:** Une partie importante de l'exergie du combustible n'est pas convertie en travail utile due à l'incomplétude de la combustion et aux gaz d'échappement non expansés.
- Turbine:** Des pertes d'exergie se produisent à cause des frottements internes, des fuites et des transferts de chaleur vers l'environnement.
- Échappement:** Les gaz d'échappement quittent le cycle à une température élevée, ce qui représente une perte d'exergie car cette énergie thermique n'est pas récupérée.

### **2.1.2 Cycle à gaz avec compression et détente fractionnées :**

Les cycles à gaz avec compression et détente fractionnées (modifiés ou améliorés) sont une modification des cycles à gaz simples qui visent à améliorer l'efficacité en divisant les processus de compression et de détente en plusieurs étapes. Cela permet de réduire les pertes de chaleur et d'améliorer l'efficacité de la turbine.

L'analyse exergetique des cycles à gaz modifiés montre généralement que les pertes d'exergie sont réduites par rapport aux cycles à gaz simples, notamment dans les étapes de compression et de détente. Cependant, des pertes d'exergie supplémentaires peuvent survenir dans les échangeurs de chaleur utilisés pour transférer la chaleur entre les étapes de compression et de détente.

### **2.1.3 Comparaison des cycles à gaz simples et modifiés :**

Les turbines à gaz actuelles atteignent un rendement exergetique maximal d'environ 40 %. Cependant, en apportant des modifications au cycle de base de la turbine à gaz, telles que la régénération, le refroidissement intermédiaire et le réchauffage, il est possible d'augmenter significativement la production finale d'énergie d'une centrale électrique [4].

## **2.2. Travaux de recherche utilisant l'analyse exergetique des cycles à gaz :**

L'analyse exergetique est un outil précieux pour évaluer les performances et identifier les pertes d'efficacité dans les cycles à gaz, qu'il s'agisse de cycles simples, combinés ou avec

des configurations plus complexes. De nombreux travaux de recherche ont été menés en utilisant l'analyse exergetique pour étudier les cycles à gaz et proposer des améliorations en vue d'une production d'énergie plus efficace et plus durable.

Voici quelques exemples de travaux de recherche récents qui utilisent l'analyse exergetique dans le cas des cycles à gaz :

- **Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan**

**Auteurs:** Obieda R et al

**Publication:** Case Studies in Thermal Engineering (2022)

Cette étude révèle que le système de chaudière, caractérisé par une réaction chimique et un différentiel de température significatif entre les brûleurs et l'air utilisé comme fluide de travail, constitue la principale cause de destruction d'exergie dans la chambre de combustion. Cette destruction d'exergie est la source principale de la diminution des performances de la centrale.

- **Exergy analysis of combined cycle power plant with carbon capture and utilization**

**Auteurs:** Dyvia Prakash, Onkar Singh

**Publication:** Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (2020)

Dans cette analyse exergetique du cycle combiné considéré, les auteurs calculent l'efficacité exergetique et la destruction d'exergie des principaux composants.

- **Chapter 4 - Exergy analysis**

**Auteur:** Marc A. Rosen

**Publication:** Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems (2021)

Dans cette étude, l'analyse exergetique, puissant outil thermodynamique, est décrite et illustrée. Une procédure d'analyse exergetique est fournie, et les aspects clés des méthodes d'exergie sont présentés.

### **2.3. Conclusion :**

L'analyse exergetique est un outil essentiel pour évaluer les performances et identifier les pertes d'efficacité dans les cycles à gaz, en particulier dans les cycles à gaz complexes avec compression et détente fractionnées. Les résultats de l'analyse exergetique permettent de guider la conception, l'optimisation et l'exploitation de ces cycles pour une production d'électricité plus efficace et plus respectueuse de l'environnement.

# **Chapitre 3 : L'exergie et l'analyse exergétique**

### 3.1. Concept clé de l'exergie:

L'exergie, notée "Ex", représente la capacité d'un système à produire du travail utile. Elle est définie comme la différence entre l'enthalpie (H) d'un système et l'enthalpie de l'environnement à l'équilibre thermodynamique et à la même pression. En d'autres termes, l'exergie représente la partie de l'énergie d'un système qui est disponible pour effectuer un travail utile dans un environnement donné. [4].

### 3.2. Différence entre exergie et énergie :

L'énergie, souvent représentée par "Q" ou "U", est une mesure globale de la capacité d'un système à effectuer un travail ou à produire de la chaleur. Elle ne fait pas de distinction entre l'énergie utilisable et l'énergie non utilisable. En revanche, l'exergie se concentre sur la partie de l'énergie qui peut effectivement être utilisée pour produire du travail utile, compte tenu des limitations thermodynamiques. [4].

### 3.3. Les différentes formes d'exergie :

Il existe trois formes d'exergie à savoir : l'exergie associée au transfert du flux de matière, l'exergie associée au transfert de chaleur et l'exergie associée au transfert de travail. [5], [6], [7]

- **Exergie associée au transfert du flux de matière :**

L'exergie associée à la matière  $Ex_m$  peut être décomposée en quatre termes comme le montre l'équation :

$$Ex_m = Ex_{phy} + Ex_{chim} + Ex_{cin} + Ex_{pot}$$

Avec  $Ex_{phy}$ ,  $Ex_{chim}$ ,  $Ex_{cin}$  et  $Ex_{pot}$  sont l'exergie physique, chimique, cinétique et potentielle respectivement.

- **Exergie physique :**

L'exergie physique  $Ex_{phy}$  est défini comme étant le travail maximal pouvant être récupéré lorsque le flux de matière est porté de son état initial (T, P) à l'état de référence  $(T_0, P_0)$  généralement à  $(T_0 = 298^\circ K, P_0 = 1atm)$ . Elle est donnée par la formule :

$$Ex_{phy} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)]$$

Où  $\dot{m}$  représente le débit massique du fluide caloporteur.

- **Exergie chimique :**

C'est le travail maximal qui peut être récupéré lorsqu'un flux est porté de l'état de référence  $(T_0, P_0)$  à l'état mort, par un processus faisant intervenir seulement un transfert thermique et un échange de matière avec l'environnement.

L'exergie chimique peut être calculée par l'équation :

$$Ex_{chim} = \dot{m} \left[ \sum x_i \cdot Ex_i^{chim} + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \right]$$

- **Exergie cinétique :**

L'énergie cinétique est une forme d'énergie mécanique. Par conséquent, elle peut être entièrement transformée en travail. Donc, l'exergie d'un système est égale à son énergie cinétique. Elle est définie par l'équation :

$$Ex_{cin} = \dot{m} \cdot \frac{V^2}{2}$$

Avec  $\dot{m}$  est le débit massique du fluide,  $V$  est la vitesse du système par rapport au milieu extérieur.

- **Exergie potentielle :**

L'énergie potentielle est aussi une forme d'énergie mécanique. Par conséquent, elle peut être entièrement convertie en travail. L'exergie potentielle d'un système est égale à son énergie potentielle. Elle est donnée par l'équation :

$$Ex_{pot} = \dot{m} g Z$$

Où  $g$  est l'accélération gravitationnelle,  $Z$  est l'élévation du système par rapport au niveau de la mer et  $\dot{m}$  est le débit massique du fluide.

Les énergies cinétique et potentielle sont généralement négligeables. Elles sont des exergies pures, car elles sont entièrement transformables en travail mécanique.

- **Exergie associée au transfert de chaleur :**

L'exergie associée au transfert de chaleur est définie comme étant le travail maximal pouvant être obtenu à partir de la transmission d'une quantité de chaleur  $Q$  dans une source de chaleur à une température absolue  $T$  au milieu extérieur à une température  $T_0$ . Elle est donnée par l'équation :

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q$$

- **Exergie associée au transfert de travail :**

L'exergie est le potentiel à produire du travail utile, elle est donnée par l'équation :

$$Ex_W = W$$

Où  $W$  est le travail produit par le système.

### 3.4 Analyse Exergétique: Concepts et Utilisations :

L'analyse exergétique est une méthode avancée qui combine les principes de la thermodynamique et de la conservation de la masse et de l'énergie pour évaluer l'efficacité des systèmes énergétiques. Contrairement à l'analyse énergétique traditionnelle qui ne considère que la quantité d'énergie, l'analyse exergétique évalue la qualité de l'énergie et les pertes dues aux irréversibilités. [8]

### 3.4.1. Applications de l'analyse exergétique:

L'analyse exergétique trouve de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie, notamment [9]:

- **Évaluation des performances des centrales électriques et des moteurs à combustion:** Elle permet d'identifier les sources de pertes d'énergie et de comprendre les limitations d'efficacité du système.
- **Optimisation des cycles thermodynamiques:** Elle permet de proposer des modifications de conception ou d'exploitation qui améliorent l'efficacité exergétique et réduisent les pertes d'énergie.
- **Comparaison de différentes technologies de conversion d'énergie:** Elle permet de sélectionner la technologie la plus efficace pour une application donnée.
- **Analyse de l'impact environnemental des systèmes énergétiques:** L'amélioration de l'efficacité exergétique d'un système se traduit généralement par une réduction de la consommation de combustible et des émissions polluantes.

### 3.4.2 Avantages de l'analyse exergétique [10]:

- Fournit une mesure plus complète de l'efficacité: Prend en compte les limitations thermodynamiques et identifie les pertes d'énergie non utilisable.
- Permet d'identifier les sources de pertes d'énergie: Aide à comprendre les mécanismes sous-jacents aux pertes d'efficacité.
- Guide l'optimisation des systèmes énergétiques: Permet de proposer des modifications qui améliorent l'efficacité exergétique et réduisent les pertes d'énergie.
- Permet de comparer différentes technologies: Aide à sélectionner la technologie la plus efficace pour une application donnée.
- Évalue l'impact environnemental: liée à la réduction de la consommation de combustible et des émissions polluantes.

### 3.4.3 Rendement exergétique :

Le rendement exergétique ( $\eta_{EX}$ ) mesure l'efficacité avec laquelle un système convertit l'exergie disponible en exergie utile. C'est un indicateur clé pour évaluer les performances d'un système thermodynamique, notamment les cycles à gaz.

Le rendement exergétique est défini comme étant le rapport de l'exergie récupérée à l'exergie fournie [11], et donnée par l'équation suivante :

$$\eta_{EX} = \frac{\text{Exergie récupérée}}{\text{Exergie fournie}}$$

### 3.5. Application de l'analyse exergétique aux cycles à gaz simples et modifiés :

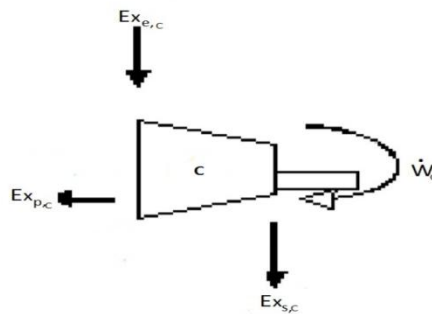
- **Le compresseur :**

Le bilan exergétique du compresseur, illustré à la Figure 4.2, est décrit par l'équation ci-dessous: [9]

$$\sum Ex_{e,c} + \dot{W}_c = \sum Ex_{s,c} + Ex_{p,c}$$

Où :

- $Ex_{e,c}$  : l'exergie entrante au compresseur.
- $Ex_{s,c}$  : l'exergie sortante du compresseur.
- $Ex_{p,c}$  : pertes exergétiques du compresseur.
- $\dot{W}_c$  : puissance mécanique absorbée par le compresseur



**Figure 3.1:** Le bilan exergétique du compresseur

- Les pertes exergétiques du compresseur sont données par l'équation suivante :

$$Ex_{p,c} = \sum Ex_{e,c} + \dot{W}_c - \sum Ex_{s,c}$$

- Le rendement exergétique du compresseur est donné par l'équation suivante [9] :

$$\eta_{Ex,c} = \frac{\sum Ex_{s,c} - \sum Ex_{e,c}}{\dot{W}_c}$$

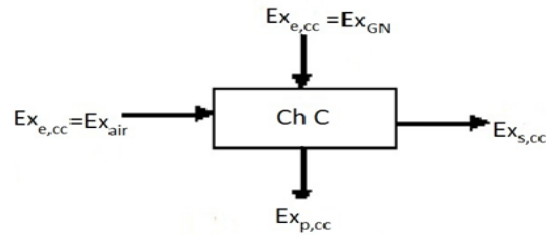
- **Chambre de combustion :**

Le pouvoir calorifique inférieure exergétique du gaz naturel est calculé par l'équation :

$$PCI_{(GN)} = \frac{\%CH_4 \cdot PCI_{Ex}(CH_4) + \%C_2H_6 \cdot PCI_{Ex}(C_2H_6) + \%C_3H_8 \cdot PCI_{Ex}(C_3H_8) + \%C_4H_{10} \cdot PCI_{Ex}(C_4H_{10})}{100}$$

Le bilan exergétique de la chambre de combustion indiqué dans la Figure 3.2 est donné par l'équation suivante [9] illustré par la figure:

$$\sum Ex_{e, ch c} = \sum Ex_{s, ch c} + Ex_{p, ch c}$$



**Figure 3.2 :** Le bilan exergétique de la chambre de combustion

Les pertes exergétiques dans la chambre de combustion sont données par l'équation :

$$Ex_{p, ch c} = \sum Ex_{e, ch c} - \sum Ex_{s, ch c}$$

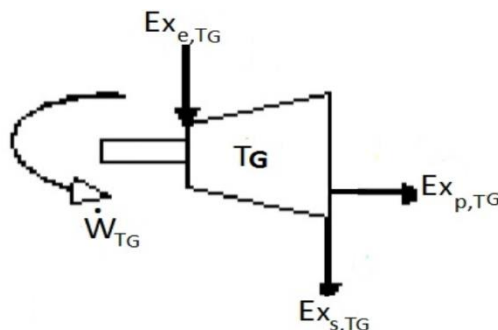
Le rendement exergétique de la chambre de combustion est donné par l'équation :

$$\eta_{Ex, ch c} = \frac{\sum Ex_{s, ch c}}{\sum Ex_{e, ch c}}$$

- **Turbine à gaz :**

Le bilan exergétique de la turbine à gaz illustré par la Figure 3.3 est donné par l'équation suivante [11] :

$$\sum Ex_{e, TG} = \dot{W}_{TG} + \sum Ex_{s, TG} + Ex_{p, TG}$$



**Figure 3.3:** Le bilan exergétique de la turbine à gaz

Les pertes exergétiques dans la turbine à gaz sont données par l'équation :

$$Ex_{p,TG} = \sum Ex_{e,TG} - \dot{W}_{TG} - \sum Ex_{s,TG}$$

Le rendement exergetique de la turbine à gaz est donné par l'équation suivante :

$$\eta_{Ex, ch c} = \frac{\dot{W}_{TG}}{\sum Ex_{e, ch c} - \sum Ex_{s, ch c}}$$

### 3.6. Le rendement exergetique du cycle à gaz :

Il est donné par l'équation :

$$\eta_{Ex, cycle gaz} = \frac{\dot{W}_{TG} - \dot{W}_c}{Ex_{GN}}$$

Où :  $Ex_{GN}$  est l'exergie du combustible qui est égale au produit de son débit massique par son pouvoir calorifique inférieur exergetique [13].

## **Chapitre 4 : Analyse et discussion des résultats du bilan exergetique.**

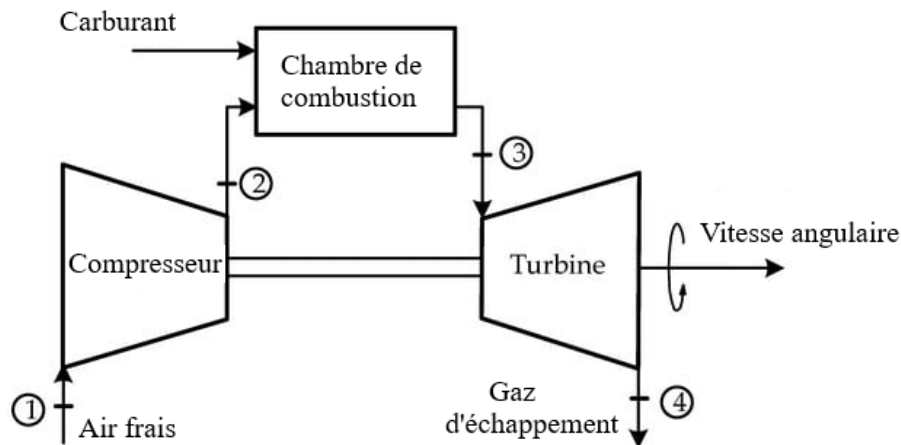
Le bilan exergétique est une méthode d'analyse thermodynamique qui permet d'évaluer l'efficacité et les pertes d'un système énergétique. Contrairement au bilan énergétique classique, il prend en compte non seulement la quantité d'énergie, mais aussi sa qualité ou sa capacité à produire un travail utile.

#### 4.1. Cycle à gaz simple :

Étant donné l'insuffisance des données provenant de la centrale SKS de Skikda, le logiciel Thermoptim a été utilisé pour extraire les paramètres d'état (Tableau 4.1) à chaque étape du cycle à gaz (Figure 4.1).

**Table 4.1:** Les différentes grandeurs d'états de chaque point dans le cycle à gaz

Point	Température (°C)	Pression (Bar)	Débit (kg/s)	Enthalpie (kJ/kg)	Entropie (kJ/kg. °K)	$T_0$	$P_0$	$h_0$	$s_0$
<b>1</b> Entrée d'air	30	1.01	609	2.16	0.152	25	1	0.15	0.148
<b>2</b>	450,83	15.20	609	407.85	0.24	25	1	0.15	0.148
<b>3</b>	1312	15	625.4	1446,33	1.42	25	1	0.15	0.24
<b>4</b>	717,63	1,04	625.4	675.23	1,47	25	1	0.15	0.24



**Figure 4.1 :** Schéma du cycle à gaz avec les quatre principaux états

##### 4.1.1. Le compresseur :

Le bilan exergétique dans le compresseur est donné par :  $Ex_{e,c} + \dot{W}_c = Ex_{s,c} + Ex_{p,c}$

- L'exergie entrante au compresseur :

$$Ex_{e,c} = E_{EA} = \dot{m}_1 [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)]$$

$$Ex_{e,c} = E_{EA} = 609 \times [(2.16 - 0.15) - 298 \times (0.152 - 0.148)] = 498.162 \text{ kW}$$

- L'exergie sortante du compresseur :

$$Ex_{s,c} = E_1 = \dot{m}_1 [(h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0)]$$

$$Ex_{s,c} = E_1 = 609 \times [(407.85 - 0.15) - 298 \times (0.24 - 0.148)] = 231592.956 \text{ kW}$$

- **Puissance mécanique absorbé par le compresseur :**

Elle a été déjà calculé dans le bilan énergétique mentionné dans le PFE, et nous avons trouvé :

$$\dot{W}_c = 257566 \text{ kW}$$

- **Les pertes exergetiques du compresseur :**

$$Ex_{P,c} = Ex_{e,c} + \dot{W}_c - Ex_{S,c} = 498.162 + 257566 - 231592.956 = 26471.206 \text{ kW}$$

- **Le rendement exergetique du compresseur :**

$$\eta_{Ex,c} = \frac{E_1 - E_{EA}}{\dot{W}_c} = \frac{231592.956 - 498.162}{257566} = 90\%$$

#### 4.1.2. La chambre de combustion :

Le Tableau 4.2 donne la composition volumique du gaz naturel algérien :

**Table 4.2 :** Les constituants du gaz naturel avec leurs pouvoirs exergetiques

Constituants	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Pourcentage (%)	5,5	0,21	83.45	7.4	2.45	1
Pouvoir exergetique (kJ/kg)	-	-	51723.49	49657.46	48710.79	48194.34

$$PCI_{Ex(GN)} = \frac{\%CH_4 \cdot PCI_{Ex}(CH_4) + \%C_2H_6 \cdot PCI_{Ex}(C_2H_6) + \%C_3H_8 \cdot PCI_{Ex}(C_3H_8) + \%C_4H_{10} \cdot PCI_{Ex}(C_4H_{10})}{100}$$

$$PCI_{Ex(GN)} = \frac{83.45 \times 51723.49 + 7.4 \times 49657.46 + 2.45 \times 48710.79 + 1 \times 48194.34}{100}$$

$$PCI_{Ex(GN)} = 48513.25 \text{ kJ/kg}$$

- **La puissance exergetique du combustible :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$Ex_{GN} = \dot{m}_2 \cdot PCI_{Ex(GN)}$$

$$Ex_{GN} = 16.4 \times 48513.25 = 795617.3 \text{ kW}$$

Le bilan exergetique dans la chambre de combustion est donné par :

$$Ex_{e,cbc} = Ex_{S,cbc} + Ex_{P,cbc}$$

- **L'exergie entrante à la chambre de combustion :**

$$Ex_{e,cbc} = E_1 + E_2$$

$E_1 = 231592.956 \text{ kW}$  (Exergie sortante du compresseur)

$$E_2 = Ex_{GN} = \dot{m}_2 \cdot PCI_{Ex(GN)} = 795617.3 \text{ kW}$$

Donc :

$$Ex_{e,cbc} = 231592.956 + 795617.3 = 1027210.256 \text{ kW}$$

- **L'exergie sortante de la chambre de combustion :**

$$Ex_{S,cbc} = E_3 = \dot{m}_3 [(h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0)]$$

$$Ex_{S,cbc} = E_3 = 625.4 \times [(1446.33 - 0.15) - 298 \times (1.42 - 0.24)] = 684525.316 \text{ kW}$$

- **Les pertes exergetiques de la chambre de combustion :**

$$Ex_{P,cbc} = Ex_{e,cbc} - Ex_{S,cbc}$$

$$Ex_{P,cbc} = 1027210.256 - 684525.316 = 342684.94 \text{ kW}$$

- **Le rendement exergetique de la chambre de combustion :**

$$\eta_{Ex, chc} = \frac{E_3}{E_1 + E_2} = \frac{684525.316}{1027210.256} = 67\%$$

#### 4.1.3. La turbine à gaz :

Le bilan exergetique dans la turbine à gaz est donné par :

$$Ex_{e, TG} = \dot{W}_{TG} + Ex_{s, TG} + Ex_{p, TG}$$

- **L'exergie entrante à la turbine à gaz :**

$$Ex_{e, TG} = E_3 = 688252.7 \text{ kW} \text{ (Exergie sortante de la chambre de combustion)}$$

- **L'exergie sortante de la turbine à gaz :**

$$Ex_{s, TG} = E_4 = \dot{m}_4 [(h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0)]$$

$$Ex_{s, TG} = E_4 = 625.4 \times [(675.23 - 0.15) - 298 \times (1.47 - 0.24)] = 192960.916 \text{ kW}$$

- **La puissance mécanique fournie à la turbine à gaz :**

Elle a été déjà calculé dans le bilan énergétique du PFE, et nous avons trouvé :

$$\dot{W}_{TG} = 408890 \text{ kW}$$

- **Les pertes exergetiques de la turbine à gaz :**

$$Ex_{p, TG} = Ex_{e, TG} - \dot{W}_{TG} - Ex_{s, TG}$$

$$Ex_{p, TG} = 688252.7 - 408890 - 192960.916 = 86401.784 \text{ kW}$$

- **Le rendement exergetique de la turbine à gaz :**

$$\eta_{Ex, TG} = \frac{\dot{W}_{TG}}{E_3 - E_4} = \frac{408890}{688252.7 - 192960.916} = 83\%$$

#### 4.1.4 Le rendement exergetique du cycle à gaz :

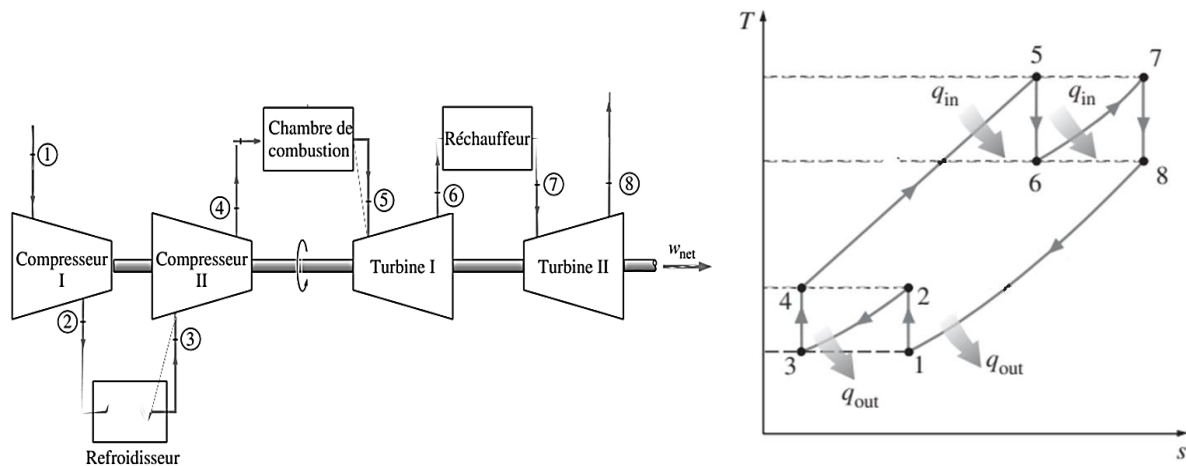
$$\eta_{Ex, cycle \text{ à gaz}} = \frac{\dot{W}_{TG} - \dot{W}_c}{Ex_{GN}} = \frac{408890 - 257566}{795617.3} = 20\%$$

## 4.2. Cycle à gaz à deux compresseurs et deux turbines

Les valeurs des différents points du cycle (figure 4.2) sont regroupées dans le tableau 4.3 :

**Tableau 4.3:** Les différentes grandeurs d'états de chaque point du cycle à gaz modifié

Points	Composants	Température (C°)	Pression (Bar)	Débit (Kg /S)	Enthalpie (kJ/kg)	Entropie (kJ/kg.K)	$T_0$	$P_0$	$h_0$	$s_0$
01	Entrée d'air	30	1,01	609	2,16	0,152	25	1	0,15	0,148
02	Compresseur 1	450,83	15,20	609	407,85	0,24	25	1	0,15	0,148
03	Refroidisseur	30	15,2	609	5,16	-0,60	25	1	0,15	0,148
04	Compresseur 2	450,83	228,75	609	441,7	1,212	25	1	0,15	0,148
05	Combustible	185	26,4	16,4	362,24	0,27	25	1	0,31	0,22
06	Chambre de combustion	1312	228,75	625,4	1446,33	1,42	25	1	0,15	0,24
07	Turbine 1	717,63	15,8	625,4	675,23	1,47	25	1	0,15	0,24
08	Réchauffeur	1312	15,8	625,4	1 522,3	1,35	25	1	0,15	0,24
09	Turbine 2	717,63	1,04	625,4	803,7	1,58	25	1	0,15	0,24



**Figure 4.2 :** Schéma du cycle à gaz modifié (à compression et détente fractionnée)

#### 4.2.1 Le deuxième compresseur :

On suppose que, dans le cas idéal, le premier compresseur du cycle modifié possède les mêmes valeurs de bilan exergétique que dans le cycle à gaz simple. Les valeurs de bilan exergétique du deuxième compresseur du cycle modifié sont données par :

$$Ex_{e,c2} + \dot{W}_{2c} = Ex_{s,c2} + Ex_{p,c2}$$

- **L'exergie entrante au deuxième compresseur :**

$$Ex_{e,c2} = E_3 = \dot{m}_1 [(h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0)]$$

$$Ex_{e,c2} = E_3 = 609 \times [(5,16 - 0,15) - 298 \times (-0,60 - 0,148)] = 138799,626 \text{ kW}$$

- **L'exergie sortante du deuxième compresseur :**

$$Ex_{s,c2} = E_4 = \dot{m}_1[(h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0)]$$

$$Ex_{s,c2} = E_4 = 609 \times [(407.85 - 0.15) - 298 \times (0.24 - 0.148)] = 384037.836 \text{ kW}$$

- **Puissance mécanique absorbée par le deuxième compresseur :**

Elle a déjà été calculée dans le bilan énergétique du PFE, et nous avons trouvé :

$$\dot{W}_c = 257566 \text{ kW}$$

- **Les pertes exergetiques du deuxième compresseur :**

$$Ex_{p,c} = Ex_{e,c2} + \dot{W}_c - Ex_{s,c2} = 138799.626 + 257566 - 384037.836 = 12327.79 \text{ kW}$$

- **Le rendement exergetique du deuxième compresseur :**

$$\eta_{Ex,c} = \frac{E_4 - E_3}{\dot{W}_c} = \frac{384037.836 - 138799.626}{257566} = 95\%$$

#### 4.2.2. La deuxième turbine à gaz :

On suppose que, dans le cas idéal, la première turbine du cycle modifié possède les mêmes valeurs de bilan exergetique que dans le cycle à gaz simple. Les valeurs de bilan exergetique de la deuxième turbine du cycle modifié sont données par :

$$Ex_{e,TG2} = \dot{W}_{TG} + Ex_{s,TG} + Ex_{p,TG}$$

- **L'exergie entrante à la deuxième turbine à gaz :**

$$Ex_{e,TG2} = E_8 = \dot{m}_8[(h_8 - h_0) - T_0(s_8 - s_0)]$$

$$Ex_{e,TG2} = E_8 = 625.4 \times [(1522.35 - 0.15) - 298 \times (1.35 - 0.24)] = 745114.068 \text{ kW}$$

- **L'exergie sortante à la deuxième turbine à gaz :**

$$Ex_{s,TG2} = E_9 = \dot{m}_9[(h_9 - h_0) - T_0(s_9 - s_0)]$$

$$Ex_{s,TG2} = E_9 = 625.4 \times [(803.45 - 0.15) - 298 \times (1.58 - 0.24)] = 295514.008 \text{ kW}$$

- **La puissance mécanique fournie à la deuxième turbine à gaz :**

Elle a déjà été calculée dans le bilan énergétique du PFE, et nous avons trouvé :

$$\dot{W}_{TG2} = 408890 \text{ kW}$$

- **Les pertes exergetiques de la deuxième turbine à gaz :**

$$Ex_{p,TG} = Ex_{e,TG2} - \dot{W}_{TG2} - Ex_{s,TG2}$$

$$Ex_{p,TG} = 745114.068 - 408890 - 295514.008 = 40710.06 \text{ kW}$$

- **Le rendement exergetique de la deuxième turbine à gaz :**

$$\eta_{Ex,TG2} = \frac{\dot{W}_{TG}}{E_8 - E_9} = \frac{408890}{745114.068 - 295514.008} = 90\%$$

#### 4.2.3. Le rendement exergetique du cycle à gaz amélioré :

D'abord, on fait la somme de la puissance des deux compresseurs :

$$\dot{W}_{cT} = \dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2} = 257566 + 257566 = 515132 \text{ KW}$$

Ensuite, on fait la somme de la puissance des deux Turbines :

$$\dot{W}_{TGT} = \dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TG2} = 408890 + 408890 = 817780 \text{ KW}$$

$$\eta_{Ex,cycle \text{ à gaz}} = \frac{\dot{W}_{TGT} - \dot{W}_{cT}}{Ex_{GN}} = \frac{817780 - 515132}{795617.3} = 38\%$$

#### 4.3. Interprétation des résultats obtenus :

Le tableau 4.3 présente un résumé comparatif des rendements exergetiques obtenus pour les cycles à gaz simple et modifié, en regroupant les valeurs issues de la méthode théorique.

**Tableau 4.4** : Résultats de l'analyse exergetique des deux cycles, simple et modifié

Cycle	Composant du cycle	Pertes exergetiques (kW)	Rendement exergetique (%)
Cycle à gaz simple	Compresseur	26471.206	90
	Chambre de combustion	342684.94	67
	Turbine à gaz	86401.784	83
Cycle à gaz modifié	Compresseur 2	12327.79	95
	Turbine 2	40710,06	90

Les données fournies permettent d'analyser les performances et les pertes d'exergie des cycles à gaz simple et modifié. L'exergie représente la partie de l'énergie disponible pour effectuer un travail utile. Les pertes d'exergie indiquent la quantité d'énergie qui n'est pas utilisée efficacement à chaque étape du cycle.

#### Rendements Exergetiques :

- **Compresseurs** : Le deuxième compresseur du cycle modifié a un rendement plus élevé (95% contre 90%), indiquant une meilleure efficacité de compression.
- **Turbines** : La deuxième turbine du cycle modifié a également un rendement supérieur (90% contre 83%), indiquant une meilleure conversion d'énergie.
- 

#### Pertes d'Exergie :

- **Cycle à Gaz Simple** : Les pertes sont significatives, particulièrement dans la chambre de combustion (342684,94 kW), ce qui représente la principale source d'inefficacité.
- **Cycle à Gaz Modifié** : Les pertes d'exergie sont réduites dans les composants modifiés. Les pertes du deuxième compresseur (12327,79 kW) et de la deuxième turbine (40710,06 kW) sont inférieures à celles observées dans le cycle simple, indiquant une meilleure gestion des irréversibilités et une amélioration globale de l'efficacité du système.

#### 4.4. Conclusion :

L'amélioration des rendements exergetiques des composants dans le cycle à gaz modifié par rapport au cycle simple démontre une optimisation significative, notamment grâce à l'ajout du deuxième compresseur et de la deuxième turbine. Ces modifications réduisent les pertes d'exergie et augmentent l'efficacité globale du système. Les pertes considérablement réduites dans les composants modifiés reflètent une meilleure utilisation de l'énergie disponible et une réduction des irréversibilités thermodynamiques.

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion:**

L'exergie, également appelée "énergie utile" ou "travail disponible", est un concept fondamental en thermodynamique qui permet d'évaluer la qualité et la capacité d'un système à produire du travail utile. Dans les cas des cycles à gaz, l'énergie chimique du combustible est convertie en énergie mécanique sous forme de rotation de la turbine. Cependant, une partie de l'énergie initiale est inévitablement perdue sous forme de chaleur inutilisable à cause de l'irréversibilité des processus thermodynamiques. L'exergie nous permet de quantifier ces pertes et d'identifier les sources d'inefficacité dans le cycle.

L'efficacité (ou le rendement) exergetique d'un cycle à gaz est définie comme le rapport entre l'énergie utile produite sous forme de travail mécanique et l'énergie exergetique totale fournie par le combustible. En analysant les pertes d'exergie à chaque étape du cycle, il est possible de déterminer l'efficacité exergetique globale et d'identifier les composants qui contribuent le plus aux inefficacités. L'optimisation des cycles à gaz en tenant compte de l'exergie contribue à une utilisation plus durable des ressources énergétiques. En réduisant les pertes d'exergie et en améliorant l'efficacité exergetique, il est possible de minimiser la consommation de combustible, les émissions de polluants et l'impact environnemental des centrales à gaz.

L'analyse exergetique permet aussi de comparer l'efficacité de différents cycles à gaz et de sélectionner la configuration la plus performante pour une application donnée. En comparant les pertes d'exergie totales et la distribution des pertes par composant, il est possible d'identifier le cycle qui offre la meilleure utilisation de l'énergie exergetique.

Dans notre étude, nous avons procédé à une comparaison des performances et de l'efficacité exergetique des deux cycles à gaz : simple et modifié (à compression et à détente fractionnées). L'analyse exergetique que nous avons effectuée, basée sur les rendements des composants et leurs pertes d'exergie, met en évidence des différences significatives en termes d'efficacité et d'utilisation de l'énergie des deux cycles.

Les rendements des compresseurs et des turbines dans les deux cycles sont raisonnables pour ce type de machines. Cependant, le rendement de la chambre de combustion (67%) est faible en raison de l'incomplétude de la réaction de combustion, entraînant la plus grande perte d'exergie (342684,94 kW), suivie de la turbine (86401,784 kW) et du compresseur (26471,06 kW). Dans le cycle modifié, les pertes d'exergie les plus importantes se situent dans la turbine 2 (40710,06 kW), suivie du compresseur 2 (12327,79 kW).

Enfin, la distribution des pertes par composant nous confirme que le cycle modifié présente une meilleure efficacité exergetique que le cycle simple. Cette amélioration s'explique probablement dans le cycle modifié par une meilleure optimisation des turbines.

## **Perspectives :**

L'étude des cycles à compression et à détente fractionnées est un domaine de recherche dynamique et prometteur qui offre de nombreuses opportunités pour développer des technologies énergétiques plus efficaces, durables et respectueuses de l'environnement.

Voici quelques perspectives possibles dans le but d'améliorer encore l'efficacité et la durabilité des systèmes énergétiques :

1. Exploration de l'effet du nombre d'étages sur les performances du cycle en termes d'efficacité exergétique et optimisation des rapports de compression et de détente dans chaque étage pour maximiser l'efficacité du cycle.
2. Évaluation de l'impact de l'ajout de refroidisseurs et de réchauffeurs intermédiaires dans les étapes de compression et de détente sur l'efficacité du cycle et la production de puissance.
3. Utilisation des simulations CFD (computational fluid dynamics) pour analyser en détail les écoulements de fluides dans les composants du cycle et identifier les zones de pertes d'efficacité.
4. Émergence de nouveaux matériaux et de technologies de fabrication dans le but d'ouvrir de nouvelles possibilités pour la conception de composants plus performants et plus légers pour les cycles à compression et à détente fractionnées.
5. Application de l'intelligence artificielle et du Machine Learning pour permettre d'optimiser les cycles modifiés en temps réel et de prédire les performances du système avec une plus grande précision.

# Références bibliographiques

[1] <https://www.sciencedirect.com/journal/exergy-an-international-journal>

[2] Obieda R. Altarawneh , Alanood A. Alsarayreh , Ala'a M. Al-Falahat, Mazen J. Al-Kheetan, Saad S. Alrwashdeh “Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan”, Case Studies in Thermal Engineering. Volume 31, March 2022, 101852

[3] Eke, M.N., Okoroigwe, E.C., Umeh, S.I. and Okonkwo, P. “Performance Improvement of a Gas Turbine Power Plant in Nigeria by Exergy Analysis: A Case of Geregu 1”. (2020) Open Access Library Journal, 7: e6617.

[4] Thamir K. Ibrahim a, FirdausBasrawi a, Omar I. Awad a, Ahmed N. Abdullah c, G. Najafi b, RizlmanMamat a, F.Y. Hagos a “Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis” Applied Thermal Engineering Volume 115, 25 March 2017, Pages 977-985

[5] Y. A. Çengelet M. A. Boles, Thermodynamics: an engineering approach, Seventh edition. New York, NY : McGraw-Hill, 2011.

[6] M. Dahmani, « Analyse 4E (Energétique, Exergétique, Environnementale et Economique) de systèmes de valorisation énergétique de biomasses », p. 194.

[7] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications”, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, no 3, p. 231 295, 2004, doi : 10.1016/j.pecs.2004.02.001.

[8] Vundela Siva Reddy, Subhash Chandra Kaushik, Sudhir Kumar Tyagi, Naraya Lal Panwar “An Approach to Analyse Energy and Exergy Analysis of Thermal Power Plants: A Review”, Smart Grid and Renewable Energy, 2010, 1, 143-152

[9] Thamir K. Ibrahim, FirdausBasrawi, Omar I. Awad, Ahmed N. Abdullah, G. Najafi, RizlmanMamat, F.Y. Hagos “Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis” Applied Thermal Engineering, Volume 115, 25 March 2017, Pages 977-985.

[10] DivyaPraksh, Onkarsingh “Exergy analysis of combined cycle power plant with carbon capture and utilization”, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (2020), doi.org/10.1080/15567036.2020.1810827.

[11] M. Ameri et M. Mohammadzadeh, “Thermodynamic, thermoeconomic and life cycleassessment of a novel integrated solar combined cycle (ISCC) power plant”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 27, p. 192 205, juin 2018, doi :10.1016/j.seta.2018.04.011.

[12] A. Haouam, C. Derbal, et H. Mzad, “Thermal performance of a gas turbine based on an exergy analysis”, E3S Web Conf., vol. 128, p. 01027, 2019, doi : 10.1051/e3sconf/201912801027.

[13] K. Attonaty, J. Pouvreau, A. Deydier, J. Oriol, et P. Stouffs, « Conception, modélisation et analyse d'un cycle thermodynamique intégrant un stockage thermique massif à haute température », p. 5.