

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat  
Département : génie mécanique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : génie mécanique  
Spécialité : énergétique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Modélisation et optimisation d'une turbine à vapeur  
industrielle à l'aide du logiciel HYSYS**

Présenté par : *Abbad Oussama*

Encadrant : KADRI Salim

MCB

BADJI MOKHTAR – ANNABA

### Jury de Soutenance :

|                         |     |                           |           |
|-------------------------|-----|---------------------------|-----------|
| Mdm. BOUMARAF Latra     | PR  | BADJI MOKHTAR –<br>ANNABA | Président |
| Mr. KADRI Salim         | MCB | BADJI MOKHTAR –<br>ANNABA | Encadrant |
| Mr. DJEMILI Abdelouaheb | MCA | BADJI MOKHTAR –<br>ANNABA | examineur |

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Remerciements

*Avant toute chose, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires tout au long de ce travail.*

*Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadrant.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants de département génie mécanique pour la qualité de leur enseignement, leur engagement, et les connaissances qu'ils m'ont transmises au fil de mon parcours.*

*Un grand merci à mes camarades et collègues pour leur entraide, leurs encouragements et les échanges constructifs que nous avons partagés, notamment durant la phase de simulation et de rédaction.*

*Je n'oublie pas d'exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, en particulier à mes parents, pour leur soutien moral constant, leur amour inconditionnel, et leur confiance en moi. Ce travail leur est dédié.*

*Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire, je dis : merci.*



# *Dédicace*

*A ma chère mère qui pleure avant de pleurer et se réjouit avant de  
Se réjouir À qui elle s'est sacrifiée pour nous et a été patiente avec  
Notre éducation à qui je ne remplis pas son droit (Que Allah  
vous*

*Récompense)*

*A mon chère père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les  
difficultés,*

*Pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer ;*

*A tous mes chères sœurs et mes chères frères ;*

*A mes tantes et oncles ;*

*A toute ma famille ;*

*A tous mes amis ;*

*A tous les enseignants du département génie mécanique ;*

*...je dédie ce modeste travail*

## **Résumé**

Ce mémoire explore les principes thermodynamiques et les applications industrielles des turbomachines, en particulier le turbocompresseur 103J utilisé dans l'unité d'ammoniac de FERTIAL. L'étude combine une approche théorique, basée sur le cycle de Rankine avec resurchauffe, et une modélisation pratique via les logiciels EES (Engineering Equation Solver) et Aspen HYSYS.

**Mots clés :** turbocompresseur, turbine à vapeur, Compresseur centrifuge, Simulation HYSYS Logiciel EES, Gaz de synthèse, cycle de Rankine avec resurchauffe

## ملخص

يستكشف هذا البحث المبادئ الديناميكية الحرارية وتطبيقات الآلات التوربينية في الصناعة، وخاصة الضاغط التوربيني J 103 المستخدم في وحدة الأمونيا في شركة FERTIAL. تجمع الدراسة بين نهج نظري، يعتمد على دورة رانكين مع إعادة التسخين، ونمذجة عملية عبر برمجيات EES (محلل المعادلات الهندسية) و Aspen HYSYS.

**الكلمات المفتاحية:** ضاغط توربيني، توربين بخاري، ضاغط طرد مركزي، محاكاة HYSYS برنامج EES، غاز التخليق، دورة رانكين مع إعادة التسخين

## **Abstract**

This thesis explores the thermodynamic principles and industrial applications of turbomachinery, particularly the 103J turbocharger used in the Fertil ammonia plant. The study combines a theoretical approach, based on the superheated Rankine cycle, with practical modeling using EES (Engineering Equation Solver) and Aspen HYSYS software.

**Keywords:** turbocharger, steam turbine, centrifugal compressor, HYSYS simulation (EES software), syngas, superheated Rankine cycle

# SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

ملخص

Abstract

Résumé

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction Générale ..... 2**

## **Chapitre 1 : Généralité du turbo machine**

**INTRODUCTION ..... 4**

**I-1 Turbine à gaz..... 4**

I-1.1 Présentation générale ..... 4

I .1.2.Principe de fonctionnement de la turbine à gaz: ..... 4

I-1.3 Les avantages inhérents à turbine à gaz : ..... 5

**I-2 Turbine à vapeur ..... 7**

I-2.1 Présentation générale ..... 7

I-2.2 Les Composants du cycle vapeur..... 7

I-2.3 Classification des turbines à vapeur ..... 8

I-2.4 Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur ..... 10

I-2.5 Les avantages inhérents à turbine à vapeur ..... 11

**LES COMPRESSEURS ..... 12**

Introduction : ..... 12

**II.1. Généralités sur les compresseurs ..... 12**

II.1.1. Définition ..... 12

II.1.2. But de la compression ..... 12

**II.2. Classification des compresseurs ..... 13**

II.2.1. Compresseurs volumétriques..... 14

II.2.2. Les compresseurs dynamiques ..... 13

**II.3. Types des compresseurs centrifuges ..... 13**

II.3.1. Compresseur centrifuge avec enveloppe à plan de joint vertical ..... 13

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.3.2. Compresseur centrifuge avec enveloppe à plan de joint horizontal .....   | 13        |
| II.3.3. Compresseur avec corps en forme de cloche.....                           | 13        |
| II.3.4. Compresseur de canalisation.....                                         | 14        |
| II.3.5. Compresseur SR.....                                                      | 14        |
| <b>II.4. Caractéristiques de construction des compresseurs centrifuges .....</b> | <b>14</b> |
| II.4.1. Corps .....                                                              | 14        |
| II.4.2. Rotor .....                                                              | 14        |
| II.4.3. Arbre .....                                                              | 15        |
| II.4.4. Les roue.....                                                            | 16        |
| II.4.5. Le piston d'équilibrage.....                                             | 16        |
| II.4.6. Accouplement d'entraînement.....                                         | 16        |
| II.4.7. Collet du palier de butée .....                                          | 17        |
| II.4.8. Douilles intermédiaires.....                                             | 17        |
| II.4.9. Douilles sous les garnitures d'étanchéité à huile .....                  | 17        |
| II.4.10. Paliers.....                                                            | 17        |
| <b>II.3 CONCLUSION : .....</b>                                                   | <b>17</b> |
| .....                                                                            | <b>13</b> |

## **CHAPITRE 2 : TURBOCOMPRESSEUR 103 J**

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION.....                                                     | 19        |
| <b>II.1.Principe de fonctionnement du Turbocompresseur 103j.....</b>  | <b>19</b> |
| II.1.1.Fonctionnement de la turbine à vapeur .....                    | 19        |
| II.1.2.Fonctionnement de compresseur .....                            | 19        |
| <b>II.2.Caractéristiques 103J.....</b>                                | <b>20</b> |
| II.2.1.Caractéristique technique de la turbine.....                   | 20        |
| II.1.2.Caractéristique technique de la turbine Kr25 (103-JTHP):.....  | 21        |
| II.2.3.Caractéristique technique de la turbine v25 : (103-JTBP) ..... | 21        |
| II.2.4. Compresseurs 103JBP/HP .....                                  | 22        |
| II.2.4.1Conditions de fonctionnement du compresseur :.....            | 23        |
| <b>II.3.Circuit vapeur (turbine 103JT HP et BP) .....</b>             | <b>25</b> |
| <b>II.4.Compression de gaz se synthèse :(103JBP –HP) : .....</b>      | <b>25</b> |
| <b>II.5.HUILE DE GRAISSAGE : .....</b>                                | <b>27</b> |
| II.5.1.Les Pompes de graissage: .....                                 | 28        |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| II.5.2.Huile d'étanchéité ..... | 30        |
| <b>II.6.Conclusion :</b> .....  | <b>34</b> |
| .....                           | <b>1</b>  |

### **CHAPITRE 3 : BILAN CALCULE Cycle de Rankine surchauffé**

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1 Introduction</b> .....                                                          | <b>37</b> |
| <b>III.2 Cycle de Rankine avec resurchauffe ou de Hirn avec surchauffe</b> .....         | <b>37</b> |
| <b>II.3 Description du logiciel EES</b> .....                                            | <b>42</b> |
| II.3.1 Définition de logiciel EES .....                                                  | 42        |
| II.3.2 Information générale .....                                                        | 42        |
| II.3.3 Exploration du menu principal.....                                                | 43        |
| II.3.4 Fenêtres de EES.....                                                              | 45        |
| III.2.3 Etude des performances du cycle de Rankine avec resurchauffe avec le logiciel .. | 49        |
| EES.....                                                                                 | 49        |

### **CHAPITRE 4 : INSTALLATION TURBOCOMPRESSEUR 103J PAR HYSYS**

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IV.1 Introduction</b> .....                                                               | <b>54</b> |
| <b>IV.2 Dessin du système Turbocompresseurs 103J par Hysys</b> .....                         | <b>54</b> |
| <b>IV.3 Calcul des performances de l'installation Turbocompresseurs 103J par Hysys</b> ..... | <b>58</b> |
| Résultats .....                                                                              | 62        |
| Conclusion.....                                                                              | 64        |
| <b>Conclusion Générale</b> .....                                                             | <b>66</b> |

## NOMENCLATURE

|             |                                                                |
|-------------|----------------------------------------------------------------|
| $C_p$       | Capacité calorifique du fluide à pression constante [kJ/kg. K] |
| $C_v$       | Capacité calorifique du fluide à volume constante [kJ/kg. K]   |
| $P$         | Pression [Pa]                                                  |
| $Q_{in}$    | Energie entrante [kJ/kg]                                       |
| $Q_{out}$   | Energie sortante (perdus) [kJ/kg]                              |
| $R$         | Constante des gaz parfaits [kJ/kg. K]                          |
| $T$         | Temperature [K]                                                |
| $W_c$       | Travail du compresseur [kJ/kg]                                 |
| $W_{net}$   | Travail net du cycle [kJ/kg]                                   |
| $W_t$       | Travail de la turbine [kJ/kg]                                  |
| $\eta_{th}$ | Rendement thermique du cycle [%]                               |
| $X$         | Titre de vapeur [ %]                                           |

## Liste des figure

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 01</b> : Principe de fonctionnement de la turbine à gaz .....              | 05 |
| <b>Figure 02</b> : Schéma représentant les composants du cycle vapeur.....           | 06 |
| <b>Figure 03</b> : Mode de fonctionnement de la vapeur.....                          | 07 |
| <b>Figure 04</b> : Mode de transmission.....                                         | 09 |
| <b>Figure 05</b> : Organes du cycle vapeur.....                                      | 10 |
| <b>Figure 06</b> : Classification des compresseurs.....                              | 13 |
| <b>Figure 07</b> : Compresseurs alternatifs.....                                     | 13 |
| <b>Figure 08</b> : Les compresseurs rotatifs.....                                    | 14 |
| <b>Figure 09</b> : Rotor de compresseur multi-étagés.....                            | 15 |
| <b>Figure 10</b> : Roue bidimensionnelle d'un compresseur centrifuge.....            | 16 |
| <b>Figure 11</b> : Coupe d'une machine multicellulaire.....                          | 16 |
| <b>Figure 12</b> : Les turbines de la (103-JBP ,103J-HP) .....                       | 22 |
| <b>Figure 13</b> : Circuit de vapeur T.C 103J.....                                   | 25 |
| <b>Figure 14</b> : Compression de gaz de synthèse 103J.....                          | 26 |
| <b>Figure 15</b> : Réservoir d'huile de graissage.....                               | 27 |
| <b>Figure 16</b> : Pompe principale de graissage.....                                | 28 |
| <b>Figure 17</b> : Pompe auxiliaire de graissage.....                                | 28 |
| <b>Figure 18</b> : Réfrigérants d'huile de graissage.....                            | 29 |
| <b>Figure 19</b> : Manomètre pompe de graissage.....                                 | 29 |
| <b>Figure 20</b> : Conduites d'aspiration d'une moto pompe d'huile d'étanchéité..... | 30 |
| <b>Figure 21</b> : Turbo pompe d'huile d'étanchéité.....                             | 31 |
| <b>Figure 22</b> : Filtre d'huile.....                                               | 31 |
| <b>Figure 23</b> : Refoulement des gaz vers l'atmosphère.....                        | 34 |
| <b>Figure 24</b> : Évacuation des gaz d'huile d'étanchéité.....                      | 34 |
| <b>Figure 25</b> : Cycle de Rankine idéal avec resurchauffe.....                     | 37 |
| <b>Figure 26</b> : Fenêtre des Informations générales.....                           | 42 |
| <b>Figure 27</b> : Les commandes de EES.....                                         | 43 |
| <b>Figure 28</b> : Interface du logiciel EES.....                                    | 44 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 29</b> : Façade de la fenêtre de solution.....                                    | 45 |
| <b>Figure 30</b> : Interface de la fenêtre Tableaux.....                                    | 46 |
| <b>Figure 31</b> : Fenêtre de la table paramétrique.....                                    | 46 |
| <b>Figure 32</b> : Fenêtre Résiduelle.....                                                  | 47 |
| <b>Figure 33</b> : Fenêtre 'Lookup Table'.....                                              | 48 |
| <b>Figure 34</b> : Interface principale HYSYS.....                                          | 55 |
| <b>Figure 35</b> : Compositions Gaz de synthèse et combustible.....                         | 56 |
| <b>Figure 36</b> : Éléments de l'installation Turbocompresseurs 103J.....                   | 57 |
| <b>Figure 37</b> : Données de compresseur BP.....                                           | 58 |
| <b>Figure 38</b> : Données d'échangeur.....                                                 | 59 |
| <b>Figure 39</b> : Données de compresseur HP.....                                           | 60 |
| <b>Figure 40</b> : Installation Turbocompresseurs 103J.....                                 | 61 |
| <b>Figure 41</b> : Puissance utile en fonction de l'efficacité adiabatique ( $\eta$ ) ..... | 63 |

## Liste des tableau

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 01</b> : Caractéristique technique des turbines KR25 et V25.....                  | 20 |
| <b>Tableau 02</b> : Caractéristique technique de la turbine KR25.....                        | 21 |
| <b>Tableau 03</b> : Caractéristique technique de la turbine V25.....                         | 21 |
| <b>Tableau 04</b> : Caractéristique technique de compresseur BP.....                         | 23 |
| <b>Tableau 05</b> : Caractéristique technique de compresseur HP.....                         | 24 |
| <b>Tableau 06</b> : Points du cycle de Hirn avec surchauffe $P_3 = 50$ bar.....              | 51 |
| <b>Tableau 07</b> : Points du cycle de Hirn avec surchauffe $P_3 = 100$ bar.....             | 51 |
| <b>Tableau 08</b> : Points du cycle de Hirn avec surchauffe $P_3 = 150$ bar.....             | 52 |
| <b>Tableau 09</b> : Performances du cycle de Hirn avec surchauffe en fonction de $P_3$ ..... | 52 |
| <b>Tableau 10</b> : Résultats finaux de l'efficacité adiabatique.....                        | 63 |

# Introduction Générale

## Introduction Générale

Les turbomachines, incluant les turbines et les compresseurs, sont des éléments essentiels dans les procédés industriels, notamment dans les centrales énergétiques, les raffineries et les unités de production chimique. Elles permettent de convertir l'énergie thermique ou mécanique en travail utile, assurant ainsi le bon fonctionnement des installations industrielles. Parmi ces machines, le turbocompresseur 103J, utilisé dans l'unité d'ammoniac de FERTIAL, illustre parfaitement leur importance critique en garantissant la continuité et l'efficacité des procédés.

Ce travail se concentre sur l'étude des principes thermodynamiques régissant ces machines, en particulier le cycle de Rankine avec resurchauffe, simulé à l'aide du logiciel EES (Engineering Equation Solver). Les simulations numériques permettent d'analyser les performances du cycle et d'optimiser son rendement. Par ailleurs, des modélisations pratiques réalisées avec Aspen HYSYS mettent en évidence l'influence de paramètres clés, tels que le rendement adiabatique, sur la puissance absorbée par les compresseurs.

L'étude détaillée du turbocompresseur 103J couvre ses caractéristiques techniques, ses circuits de vapeur, de graissage et d'étanchéité, ainsi que son rôle dans la compression des gaz de synthèse. Les résultats obtenus soulignent l'impact des conditions opératoires sur les performances globales du système et proposent des pistes d'optimisation pour en améliorer l'efficacité énergétique.

# CHAPITRE 1

## Généralité du turbo machine

## **Chapitre 1 : Généralité du turbo machine**

### **INTRODUCTION**

Une turbine est un dispositif rotatif conçu pour exploiter l'énergie contenue dans un fluide en mouvement (tel que l'eau, la vapeur, l'air ou les gaz de combustion). Cette énergie, caractérisée par la vitesse du fluide et son enthalpie, est en partie transformée en énergie mécanique grâce à la rotation d'un arbre de transmission. Ce dernier permet de fournir un couple moteur destiné à entraîner différents équipements, tels qu'un alternateur, une pompe ou tout autre appareil mécanique à entraînement rotatif.

### **I-1 Turbine à gaz**

#### **I-1.1 Présentation générale**

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne fonctionnant en régime continu. Il s'agit d'une machine tournante motrice équipée principalement d'un compresseur (de type axial ou centrifuge) et d'une ou plusieurs chambres de combustion. Elle est capable de produire un fluide à haute température et haute pression, qui, lors de son expansion à travers les étages de la turbine, permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un flux gazeux dirigé.

Cependant, les performances de ce type de machine sont fortement influencées par les conditions ambiantes, telles que la température et la pression de l'air, ainsi que par des facteurs environnementaux comme l'humidité et la présence de particules en suspension (poussière). En tant que machine à volume constant, la puissance générée par la turbine à gaz est directement proportionnelle au débit massique d'air, lequel dépend de la densité de l'air ambiant. Or, cette densité décroît avec l'élévation de la température, ce qui entraîne une réduction du débit d'air et donc une diminution de la puissance produite.

En conséquence, dans les régions à climat chaud ou durant les journées à haute température, une turbine à gaz peut perdre une part significative de sa capacité de production. De plus, une température d'admission élevée entraîne une augmentation du travail requis par le compresseur, ce qui se traduit par une baisse du rendement thermique global. Ainsi, dans de telles conditions, non seulement la puissance effective est inférieure à celle prévue en conception, mais la consommation spécifique de carburant est également plus élevée [1]

#### **I.1.2.Principe de fonctionnement de la turbine à gaz:**

Voici comment fonctionne une turbine à gaz :

- a. elle puise de l'air dans son environnement (aspiration) ;
- b. le compresseur comprime cet air à une pression supérieure (compression) ;

c. l'énergie de l'air comprimé est intensifiée par la combustion d'un carburant dans une chambre dédiée (gaz chaud) ;

d. L'air comprimé et chauffé au sein des chambres de combustion est dirigé vers la section turbine, où l'énergie thermique qu'il contient est convertie en énergie mécanique lors de la phase d'expansion. Cette énergie mécanique est utilisée, d'une part, pour entraîner le compresseur, auquel la turbine est directement couplée, assurant ainsi la continuité du cycle de compression. D'autre part, elle permet d'alimenter un équipement externe – tel qu'un alternateur ou un compresseur centrifuge – par l'intermédiaire d'un accouplement mécanique. Ce double rôle fait de la turbine un élément central dans le fonctionnement et l'autonomie du système. e. elle libère dans l'atmosphère les gaz à basse pression et température résultant du processus mentionné précédemment (échappement). [2]

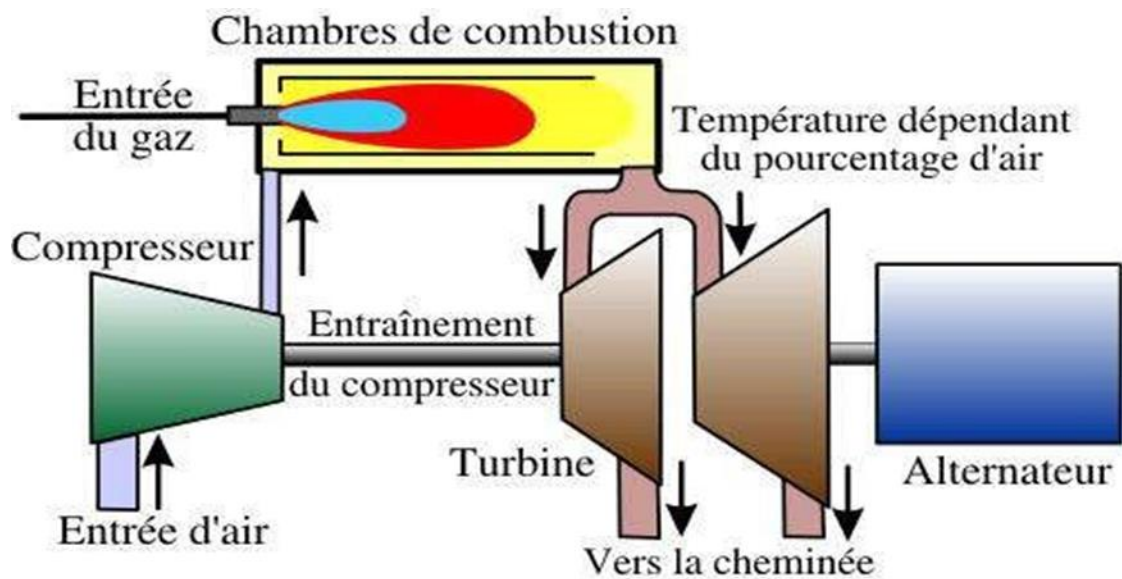


Figure 1: Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

### I-1.3 Les avantages inhérents à turbine à gaz :

- puissance massique et volumique considérable en raison du fonctionnement incessant,
- construction apparemment simple (un rotor dans un boîtier et un brûleur) et équilibrage (minimisation des vibrations),
- Émission réduite de HC et NOx due à l'excès d'air et à la température maîtrisée,
- Capacité de récupération de chaleur (cogénération),
- Durabilité en fonctionnement stationnaire.

- Capacité éventuelle à utiliser divers combustibles de moindre qualité et variés (gaz pauvre, fuel lourd) [4]

## I-2 Turbine à vapeur

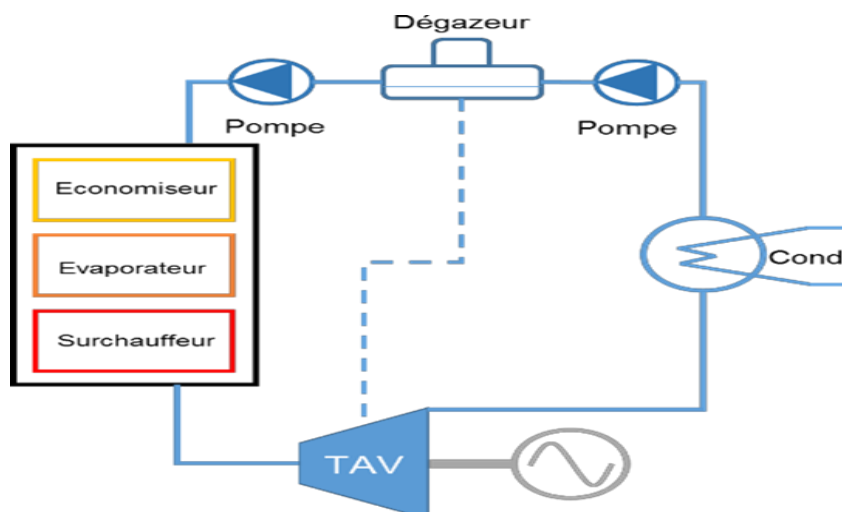
### I-2.1 Présentation générale

La turbine à vapeur est une machine thermique à combustion externe qui fonctionne selon le cycle thermodynamique de Clausius-Rankine. Ce cycle repose sur les changements d'état du fluide de travail, généralement constitué de vapeur d'eau, au cours de différentes étapes : génération, expansion, condensation, puis pompage.

La turbine à vapeur occupe une position centrale dans les installations de production d'électricité, en particulier dans les centrales thermiques. Contrairement à d'autres composants auxiliaires tels que les pompes alimentaires, son indisponibilité entraîne une baisse significative, voire un arrêt, de la production électrique. Dans un système de ce type, la vapeur issue de la chaudière est d'abord convertie en énergie cinétique, puis en énergie mécanique de rotation au niveau de la turbine, avant d'être transformée en énergie électrique à travers un alternateur. [5]

### I-2.2 Les Composants du cycle vapeur

L'installation à cycle vapeur est un système thermodynamique utilisant l'eau comme fluide moteur, reposant sur le cycle de Rankine-Hirn. La figure 2 présente les principaux composants de ce cycle : la pompe d'alimentation, le dégazeur thermique, la turbine à vapeur (TAV) ainsi que le condenseur. L'intégration du dégazeur thermique joue un rôle fondamental dans le bon fonctionnement du système. Il permet de supprimer les gaz dissous (notamment l'oxygène et le dioxyde de carbone) contenus dans l'eau d'alimentation, évitant ainsi les risques de corrosion et contribuant à protéger les équipements thermiques, en particulier la chaudière.



**Figure 2:** Schéma représentant les composants du cycle vapeur, reproduit d'après [3].

## I-2.3 Classification des turbines à vapeur

### A. La méthode de fonctionnement de la vapeur (le mode d'action)

#### ➤ Turbine à action

- La détente a lieu dans la section fixe, convertissant la pression de la vapeur en vitesse.
- L'effet de la vapeur sur les pales mobiles génère un couple qui entraîne la rotation de l'arbre auquel elles sont attachées.
- La pression reste constante dans le dispositif mobile.
- Turbine simplifiée, requérant seulement quelques niveaux.

#### ➤ Turbine à réaction

- La détente se produit à la fois dans la section fixe et dans la section mobile.
- La partie mobile, ayant la forme d'une tuyère, provoque une accélération de la vapeur.
- Turbine sophistiquée, exigeant un nombre supérieur d'étages tout en offrant une efficacité supérieure.

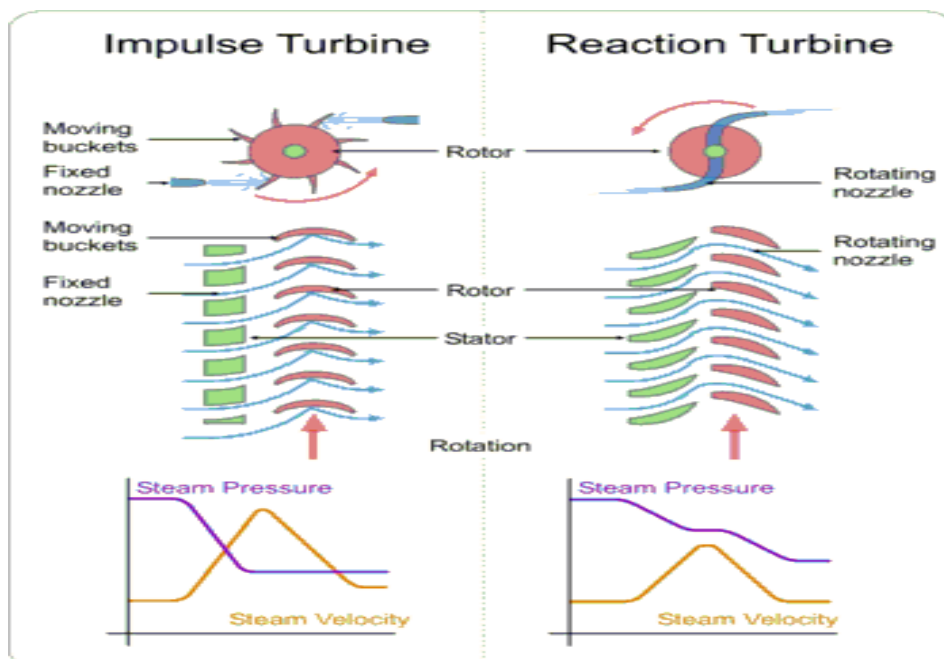


Figure 3: Mode de fonctionnement de la vapeur [7].

### B. Le sens d'écoulement de la vapeur

#### ➤ Turbine axiale

L'écoulement de la vapeur se fait selon un cône ayant même axe que la turbine c'est les turbines les plus utilisées.

#### ➤ Turbine radiale

L'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine.

### C. le nombre d'étages de rotor

-Turbine élémentaire ou à une seule roue ou mono étagée.

-Turbines à éléments multiples ou à plusieurs roues ou multi étagée.

### D. La nature de fonctionnement thermodynamique (L'utilisation)

#### ➤ Turbine à condensation

La vapeur suit un circuit fermé, et le processus de détente permet de réduire la pression de la vapeur à des niveaux extrêmement bas (0.05 bar). Ce genre de turbines est typiquement constitué de turbines à haute pression, à pression moyenne et à basse pression.

#### ➤ Turbine à contre pression

La vapeur circule suivant un cycle ouvert, à l'échappement les pressions sont toujours supérieures à la sortie est utilisée pour d'autres fins (séchage, chauffage industrie chimique,...).

### E. Le mode de transmission d'énergie thermique:

#### ➤ Transmission directe:

L'énergie mécanique produite est transmise directement à la génératrice à la même vitesse de rotation figure 4.a.

#### ➤ Transmission indirecte:

L'installation nécessite un réducteur de vitesse, comme c'est le cas de la turbine de bateaux ou les vitesses d'hélices sont plus petites figure 4.b.

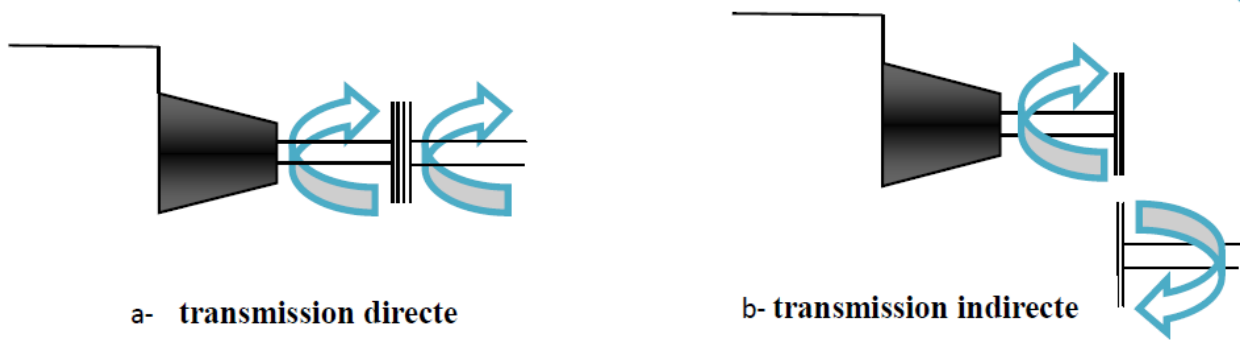


Figure 4: Mode de transmission.

## F. le mode de construction

### ➤ turbine à un corps

Est construite pour des puissances faibles ou moyennes jusqu'à 20 MW.

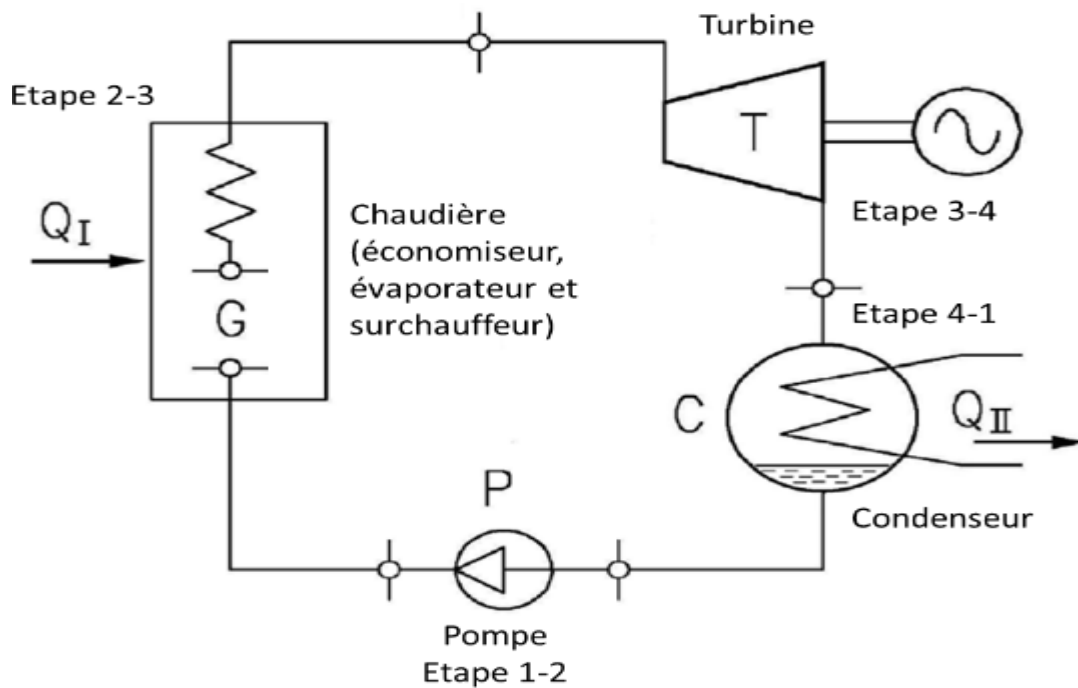
### ➤ turbine à plusieurs corps

Ou de grande puissance Pour les centrales thermiques à grande puissance, elle se compose de deux ou trois sections (haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP)).

Toutes les turbines à vapeur contemporaines sont de type axial et multi-étagées, sauf celles qui entraînent de petits équipements auxiliaires.

## I-2.4 Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur

Le cycle vapeur est une installation motrice à eau basée sur le cycle thermodynamique de Rankine ou Hirn La figure 5 illustre les principaux organes de l'organisme. Dans ce genre de cycle, l'eau sous forme de liquide saturé passe par une pompe qui augmente sa pression et la transforme en liquide non saturé (étape 1-2). Par la suite, ce liquide est introduit dans un générateur de vapeur où il subit un traitement thermique le transformant en vapeur surchauffée (étape 2-3). Cette vapeur est détendue dans une turbine jusqu'à atteindre un état de vapeur humide (étape 3-4), avant d'être reconvertie en liquide saturé au condenseur (4-1). Les changements au niveau du condenseur et du générateur de vapeur sont pratiquement isobares. [3].



**Figure 5 :** Schéma représentant les organes du cycle vapeur, modifié d'après [3].

### I-2.5 Les avantages inhérents à turbine à vapeur

Les turbines à vapeur présentent plusieurs avantages techniques et économiques qui justifient leur large utilisation dans les installations industrielles et de production d'énergie :

**Coût d'implantation réduit :** L'installation d'une turbine à vapeur peut s'avérer moins onéreuse que celle de moteurs électriques de grande puissance ou de turbines à gaz, en particulier dans les environnements industriels disposant déjà d'une source de vapeur.

**Puissance spécifique élevée :** À dimensions et consommation énergétique équivalentes, les turbines à vapeur offrent une puissance de sortie supérieure à celle des turbines à gaz, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant un fort rendement énergétique.

**Simplicité mécanique :** Comparées aux moteurs à piston, les turbines à vapeur comportent moins d'éléments mobiles, ce qui réduit l'usure mécanique, simplifie la maintenance et augmente la fiabilité globale du système.

**Enthalpie élevée de la vapeur :** La vapeur d'eau contient une grande quantité d'énergie sous forme d'enthalpie, en particulier en raison de sa chaleur latente de vaporisation. Cette propriété permet d'obtenir une énergie mécanique importante avec des débits massiques relativement faibles, ce qui améliore l'efficacité du système par rapport aux turbines à gaz nécessitant des débits plus élevés.

## **LES COMPRESSEURS**

### **Introduction :**

Un compresseur est un dispositif dont le rôle est d'augmenter la pression du fluide compressible qui le traverse. Son appellation reflète le fait que, sous l'effet de la pression croissante, le fluide se condense (son volume se réduit). L'augmentation de la pression d'un gaz dans un compresseur est employée pour obtenir une pression spécifique déterminée par divers processus, tels que : - Les réactions chimiques (pression appropriée pour le catalyseur) ; - Le stockage dans des cavités ; - La liquéfaction ou séparation ; - Les cycles de réfrigération ; - L'approvisionnement des réseaux d'air comprimé.

### **II.1. Généralités sur les compresseurs**

Les turbomachines, incluant turbocompresseurs, ventilateurs, turbines (vapeur, gaz, hydrauliques) et pompes centrifuges ou axiales, fonctionnent selon des principes physiques communs (réversibilité, échange d'énergie entre fluide et aubages). En pratique, les phénomènes réels, viscosité, compressibilité, pertes de charge, écartent le comportement du fluide de l'idéal et doivent être pris en compte pour éviter des erreurs de dimensionnement.

Les turbocompresseurs, catégorie particulière de turbomachines, assurent la compression d'un fluide via des rotors à aubes tout en maintenant un débit massique quasi constant entre entrée et sortie. Les canaux formés par les aubages guident l'écoulement et transfèrent l'énergie. Leur conception compacte et l'absence de mécanisme bielle-manivelle permettent un couplage direct à un moteur électrique ou à une turbine, réduisant l'encombrement et les pertes mécaniques par rapport aux compresseurs à piston. Ces atouts expliquent leur large emploi dans l'industrie gazière, la métallurgie et d'autres secteurs. [6]

#### **II.1.1. Définition**

Les compresseurs sont des dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie de pression, en produisant une augmentation de la pression d'un fluide gazeux.

#### **II.1.2. But de la compression**

La compression est souvent requise par le besoin technique de transférer une certaine quantité de gaz d'un système sous une pression donnée vers un autre système à une pression supérieure. Cette procédure vise à :

- Faire passer un gaz dans un système fermé ;
- Créer des conditions propices (de pression) pour des réactions chimiques ;
- Transmettre un gaz du réseau de production vers le consommateur ;
- Générer de l'air comprimé pour la combustion.

### II.2. Classification des compresseurs

Les compresseurs se classent selon plusieurs critères : type de mouvement (linéaire ou rotatif), principe de fonctionnement (volumétrique ou dynamique) et nature du fluide comprimé (air ou gaz). Deux grandes familles se distinguent :

Les compresseurs volumétriques, qui augmentent la pression par réduction mécanique d'un volume de gaz.

Les turbocompresseurs, qui élèvent la pression en transformant l'énergie cinétique transmise au fluide en énergie de pression grâce à l'écoulement autour des aubages.

Chacun de ces types repose sur des principes physiques différents et répond à des besoins spécifiques. [6]

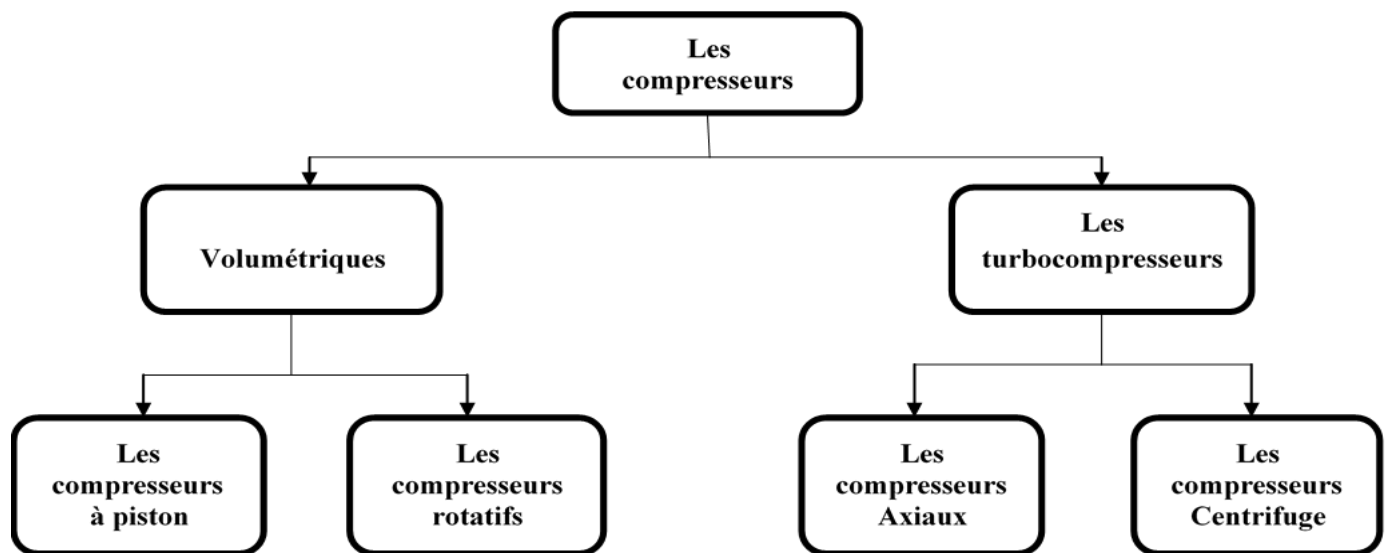
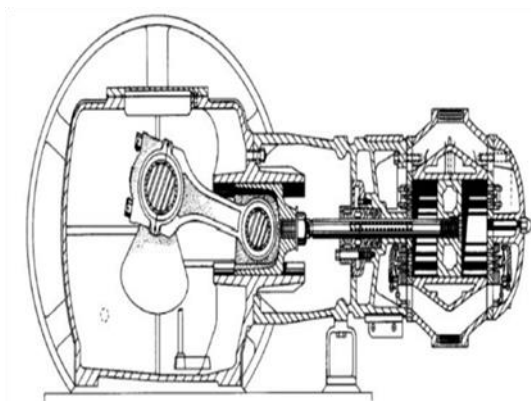


Figure 6 : Classification des compresseurs

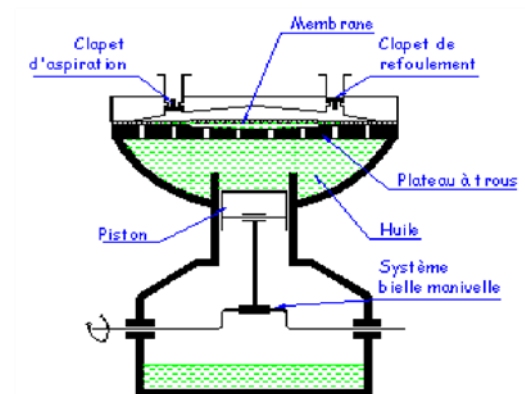
### II.2.1. Compresseurs volumétriques

On divise cette famille en deux catégories.

- a) **Les Compresseurs alternatifs** : Le gaz est introduit dans un espace limité par des parois métalliques (cylindre - piston). L'espace à disposition du gaz est réduit (le piston avance), et par conséquent, la pression augmente, quand la pression est pareille à celle du circuit de haute pression le gaz est refoulé. On distingue deux types, voir figure 7 :



a) Compresseur à piston.



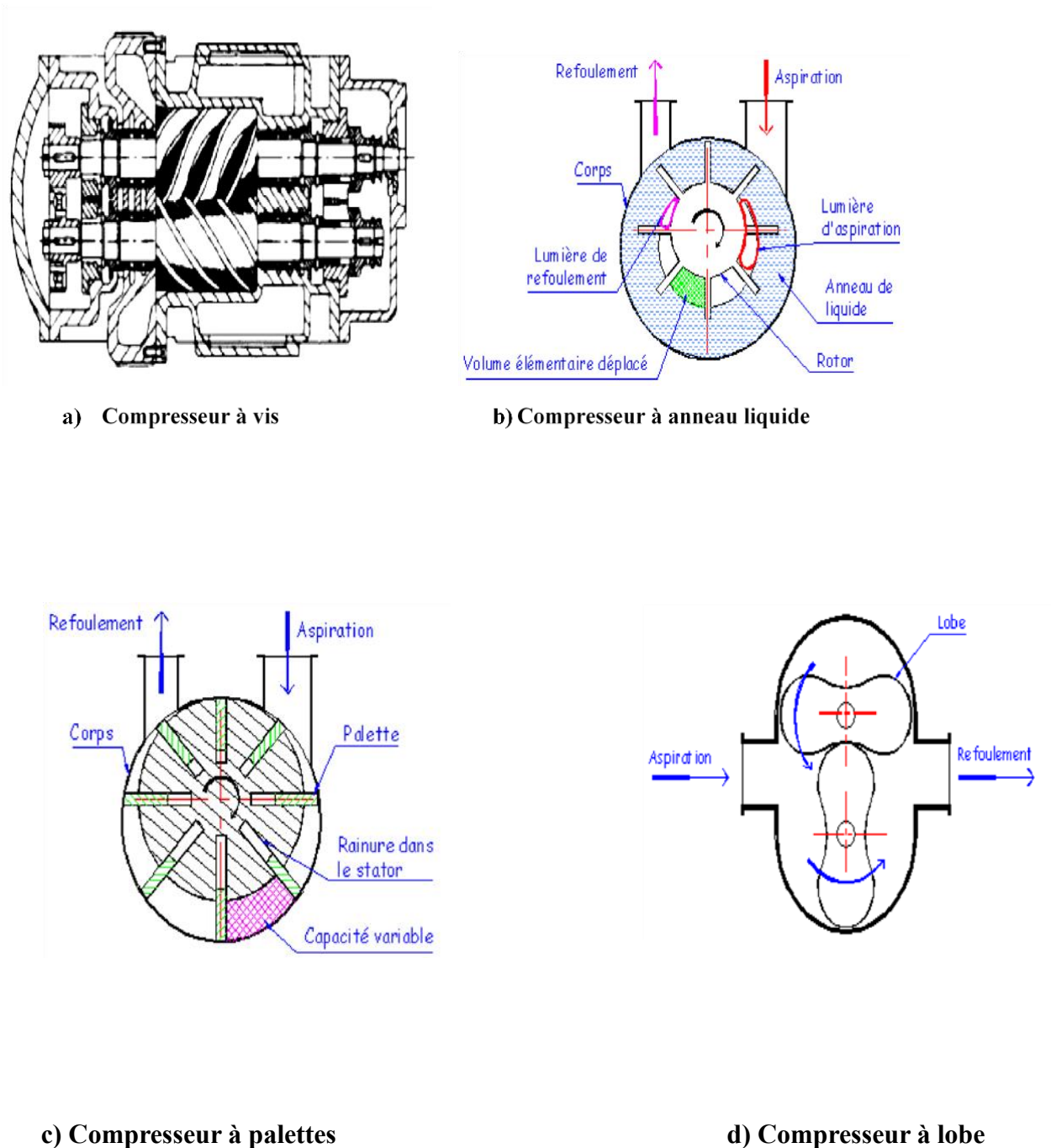
b) Compresseur à membrane.

Figure 7 : Compresseurs alternatifs.

**b) Les compresseurs rotatifs :** Ils sont de plusieurs types, dont le principe de fonctionnement fondamental est le suivant :

- Le gaz est introduit dans un espace limité par le corps du compresseur et une partie de l'élément qui tourne (palettes, lobes, vis, ...) ;
- Le gaz est transporté de l'aspiration au refoulement ;
- Mise en contact avec le circuit à haute pression ; [6]

On distingue les types suivants, voir figure 8 :



**Figure 8:** Les compresseurs rotatifs.

### II.2.2. Les compresseurs dynamiques

Les compresseurs dynamiques se divisent, selon la direction de l'écoulement du fluide, en deux types principaux :

**Les compresseurs axiaux:** utilisés dans les turbines à haute puissance et les turboréacteurs aéronautiques. Ils fonctionnent en flux axial, sans échange thermique avec l'extérieur, et présentent de nombreux étages pour un faible taux de compression ( $\approx 1,3$ ).

**Les compresseurs centrifuges:** courants dans le raffinage et la pétrochimie. Compacts et puissants, ils assurent un fonctionnement stable sans fluctuations de pression. Leur conception limite l'usure mécanique, ce qui garantit une grande fiabilité et un espacement des maintenances (tous les 3 à 5 ans).

### II.3. Types des compresseurs centrifuges

La construction de ces compresseurs étant adaptée au cas particulier de chaque réalisation, on distingue :

#### II.3.1. Compresseur centrifuge avec enveloppe à plan de joint vertical

Ces compresseurs sont généralement conçus avec plusieurs étages, ce qui leur permet d'atteindre des niveaux de pression élevés. Les composants internes principaux, tels que le rotor et les diaphragmes, sont logés à l'intérieur d'une enveloppe rigide. L'étanchéité de l'ensemble est assurée par un joint torique positionné entre le corps principal et le couvercle. Ce dernier est fixé à l'enveloppe par un système de boulonnage, facilitant ainsi l'assemblage et le démontage de l'unité aérodynamique lors des opérations de maintenance ou d'inspection.

#### II.3.2. Compresseur centrifuge avec enveloppe à plan de joint horizontal

Ces compresseurs fonctionnent généralement à basse pression tout en assurant des débits volumétriques élevés. Leur conception repose souvent sur un corps horizontalement ouvert, constitué de deux demi-coques symétriques assemblées au niveau d'un joint longitudinal. L'ensemble intègre les conduites d'aspiration et de refoulement, les tuyauteries intermédiaires, ainsi que les circuits de lubrification et l'ensemble des composants mécaniques du compresseur.

La coque est fabriquée avec une marge d'épaisseur supplémentaire, généralement de l'ordre de 3 mm, afin de compenser la corrosion. En fonderie, les conduites sont souvent dotées d'une spirale extérieure au niveau du refoulement, visant à réduire l'encombrement autour des paliers et à optimiser l'espace

### **II.3.3. Compresseur avec corps en forme de cloche**

Les compresseurs barrels à haute pression ont des corps en forme de cloche et sont fermés par des segments au lieu des boulons.

### **II.3.4. Compresseur de canalisation**

Les corps de ces compresseurs sont en forme de cloche avec un seul flasque de fermeture sur un plan vertical. Généralement ils sont utilisés pour transporter le gaz naturel

### **II.3.5. Compresseur SR**

Généralement utilisés pour comprimer de l'air, de la vapeur et pour des applications géothermiques. [5]

## **II.4. Caractéristiques de construction des compresseurs centrifuges**

Examinons maintenant les diverses composants, en faisant particulièrement attention aux techniques de construction, aux dimensionnements et aux matériaux utilisés.

### **II.4.1. Corps**

L'enveloppe externe constitue le corps principal du compresseur, et peut être conçue selon deux configurations : à ouverture horizontale ou verticale.

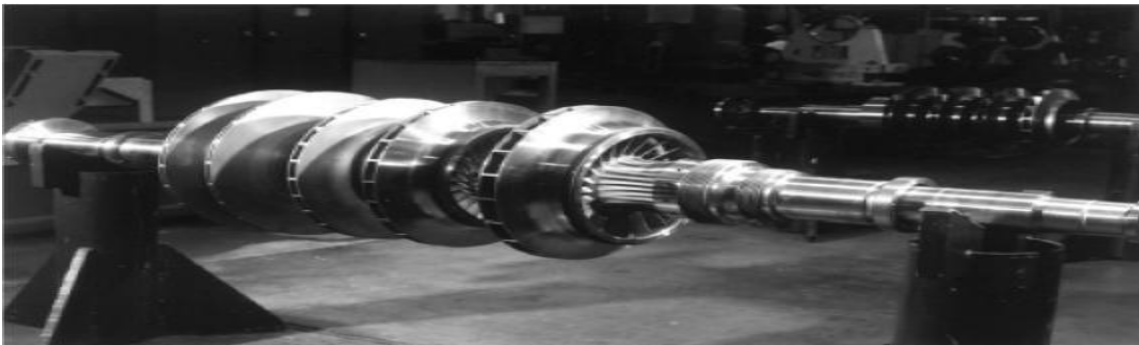
**a) Corps à ouverture horizontale :** Ces corps sont traditionnellement obtenus par fusion, avec des matériaux sélectionnés en fonction de paramètres tels que la pression et la température de fonctionnement, les propriétés du gaz traité, ainsi que les exigences normatives, notamment celles définies par les standards API. L'acier ASTM A216 WCA est couramment utilisé pour ses bonnes caractéristiques de coulabilité. En cas d'utilisation dans des environnements à basses températures, des alliages tels que l'ASTM A351 CA15 (contenant 13 % de chrome) ou le CF8 sont préférés. Une tendance croissante se dirige vers les structures soudées, qui offrent plusieurs avantages par rapport aux pièces moulées, notamment en termes de fiabilité et de facilité d'assemblage.

**b) Corps à ouverture verticale :**

Dans ce cas, les coques, couvercles et extrémités sont généralement forgés, un procédé qui confère une homogénéité accrue au matériau, essentielle pour résister à des pressions de service élevées. On utilise typiquement un acier au carbone faiblement allié (taux de carbone entre 0,20 % et 0,25 %, inférieur à la teneur usuelle de 0,35 %) pour garantir un bon compromis entre résistance mécanique et aptitude au soudage. Pour les compresseurs soumis à des pressions extrêmes, des aciers alliés à haute performance sont employés. Les orifices d'aspiration et de refoulement, fixés par soudage à l'enveloppe, sont également forgés dans le même matériau afin d'assurer la compatibilité mécanique et métallurgique.

**II.4.2. Rotor**

C'est la partie mobile du compresseur qui se trouve dans le stator, c'est un arbre en acier forgé sur lequel sont montés les roues et leurs entretoises, le piston d'équilibrage, le moyeu d'accouplement, le collet de butée et éventuellement les parties tournantes d'étanchéité.



**Figure 9:** Rotor de compresseur multi étagés.

**II.4.3. Arbre**

L'arbre du compresseur est généralement constitué d'une section centrale à diamètre constant, conçue pour recevoir les paliers ainsi que les systèmes d'étanchéité en extrémité. Il est dimensionné de manière à garantir une rigidité maximale, indispensable pour assurer la stabilité mécanique de l'ensemble tournant. Pour la fabrication des arbres, l'acier 40NiCrMo7 UNI est couramment utilisé. Cet alliage se distingue par des caractéristiques mécaniques supérieures à celles habituellement requises pour le fonctionnement standard des arbres de compresseurs centrifuges, ce qui en fait un matériau particulièrement adapté aux applications exigeantes.

#### II.4.4. Les roue

Les roues sont montées frettées sur l'arbre. Le serrage est suffisant pour assurer le contact entre la roue et l'arbre. Lorsque cette roue est soumise aux efforts liés à la rotation, elles seront clavetées et positionnées axialement par leur entretoise. Les roues sont constituées généralement d'un moyeu et d'un flasque.

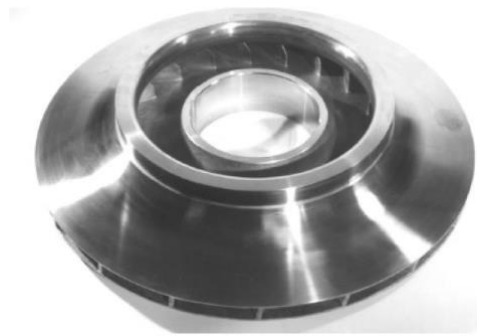


Figure 10: Roue bidimensionnel d'un compresseur centrifuge.

#### II.4.5. Le piston d'équilibrage

Chaque roue a sur une partie de sa surface : D'un côté sa pression d'entrée et de l'autre côté sa pression de sortie. L'étanchéité entre ces deux pressions est réalisée en général par labyrinthe. Ce qui crée une force axiale. La somme des forces axiales des roues donne une force non compatible avec les capacités de charge d'une butée hydraulique. Pour compenser les forces axiales des roues, un piston d'équilibrage est ajouté sur l'arbre.

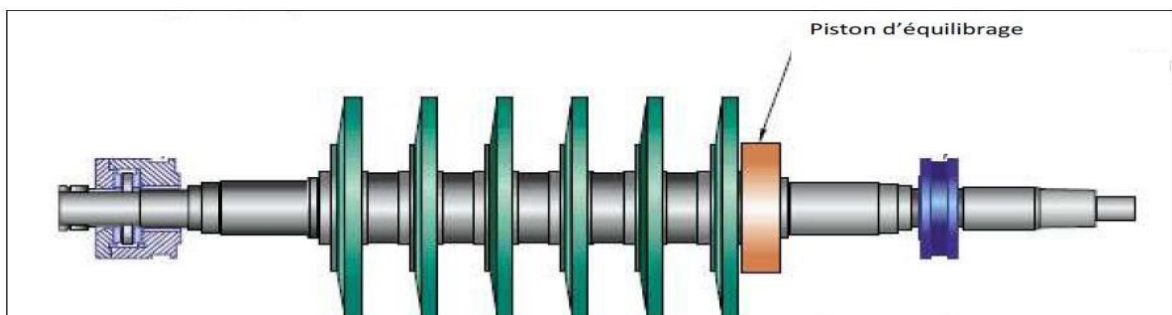


Figure 11: Coupe d'une machine multicellulaire

#### II.4.6. Accouplement d'entraînement

L'accouplement sert à transmettre la puissance de la machine motrice au compresseur. Il peut être direct au moyen d'un multiplicateur de vitesse, suivant le type d'entraînement. Les accouplements flexibles sont les plus utilisés. Ils découplent correctement les comportements

des vibrations de chacun des rotors. Les accouplements à denture nécessitent une lubrification et introduisent des forces axiales importantes. Les accouplements à diaphragmes ou à membranes sont préférés, car ils évitent ces deux inconvénients.

### **II.4.7. Collet du palier de butée**

Le collet est construit en acier au carbone type C40, normalement il est monté hydrauliquement par ajustement forcé.

### **II.4.8. Douilles intermédiaires**

Elles sont des manchons positionnés entre les roues. Elles ont un double but, le premier est celui de protéger l'arbre contre les fluides corrosifs, l'autre est celui de fixer la position relative d'une roue par rapport à l'autre. Les douilles intermédiaires sont montées en force sur l'arbre avec une tolérance négative de  $(0,5 \div 1\%)$ .

### **II.4.9. Douilles sous les garnitures d'étanchéité à huile**

Elles sont faites en acier au carbone revêtu de matériau de dureté élevée type Colmonoy. Les douilles sont employées pour protéger l'arbre contre la corrosion et les rayures éventuelles et en outre, elles peuvent être remplacées facilement.

### **II.4.10. Paliers**

Les paliers porteurs et butés sont du type à fortement graissage forcé. Ils sont logés à l'extérieur du corps du compresseur et peuvent être inspectés sans éliminer la pression à l'intérieur de corps. On trouve :

- Paliers porteurs (radiaux) ;
- Butée axiale ;
- Paliers et butées magnétiques. [6]

## **II.3 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre les différents organes des turbo machine (turbine, compresseur) et les types de ces derniers

# CHAPITRE 2

# TURBOCOPMRESSEUR

## 103 J

## **CHAPITRE 2 : Turbocompresseur 103 J**

### **INTRODUCTION**

Les turbomachines industrielles, qui se trouvent dans des installations de récupération d'énergie (turbines à vapeur), de traitement du gaz naturel (compresseurs centrifuges), ou comme c'est le cas pour nous, dans l'unité d'ammoniac chez FERTIAL (Turbocompresseur 103 J), constituent la force motrice de ces unités. Sans celles-ci, le fluide qualifié de « moteur » ne passerait pas et la production ne serait pas réalisée. L'exploitation des unités de production repose sur deux éléments cruciaux : leur disponibilité et leur fiabilité.

### **II.1.Principe de fonctionnement du Turbocompresseur 103j**

#### **II.1.1.Fonctionnement de la turbine à vapeur**

La vapeur est acheminée à travers des conduits jusqu'à la turbine, où elle pénètre par des buses fixées à l'intérieur du carter. Elle subit une première détente dans la roue d'action initiale, ce qui entraîne une accélération notable de son écoulement. Elle traverse ensuite un redresseur qui réoriente le flux vers la roue suivante, où une nouvelle détente se produit, intensifiant davantage la vitesse du fluide. Ce processus se répète sur plusieurs étages disposés le long de l'arbre, provoquant sa mise en rotation.

Au fur et à mesure que la vapeur se détend, sa température diminue, traduisant une baisse de son énergie interne. Cette perte d'énergie interne est convertie en énergie cinétique, observable par une augmentation de la vitesse des particules de vapeur. La diminution de la pression au sein de la turbine induit une poussée axiale sur les roues, généralement compensée par un dispositif appelé piston d'équilibrage.

À la sortie de la turbine, la vapeur résiduelle est dirigée vers le condenseur, où elle est liquéfiée à l'aide d'un circuit de refroidissement à eau. Cette phase de condensation s'effectue dans un environnement de vide partiel, avec une pression souvent inférieure à 0,1 bar. L'eau condensée est ensuite collectée dans un réservoir à l'aide de pompes de condensation, en vue d'être réinjectée dans le cycle. [10]

#### **II.1.2.Fonctionnement de compresseur**

L'air s'écoule par des tuyères d'aspiration vers le premier étage de la basse pression à 25.6 bar et 38°C est comprimé jusqu'à 64.9 bars et 173°C, ce gaz passe ensuite par les réfrigérant, la température diminue jusqu'à 8°C.

La sortie du premier étage et l'entrée du deuxième étage sont liées par une petite tuyère qui sert à équilibrer la pression.

Le gaz comprimé parcourt vers le réfrigérant pour diminuer sa température, et réduire le besoin en puissance du compresseur, après la réfrigération, le gaz s'écoule vers l'entrée du deuxième étage, il se comprime encore avec un gaz de recyclage de la boucle de synthèse, et il doit sortir du deuxième étage avec une température et une pression de ( $T=70^{\circ}\text{C}$ ,  $P=150^{\circ}\text{bars}$ ) [10]

## II.2.Caractéristiques 103J

### II.2.1.Caractéristique technique de la turbine

|                                                     |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| Turbine KR25, puissance maximale sur l'accouplement | 13600KW        |
| Turbine V25, puissance maximale sur l'accouplement  | 4110KW         |
| Puissance totale sur l'accouplement des turbines    | 17710KW        |
| Puissance maximale continue)                        |                |
| Vitesse (régime nominal 100%)                       | 10527tr/min    |
| Vitesse de fermeture rapide                         | 12100tr/min    |
| Gamme de régulation de vitesse (par rapport à 100%) | 80 – 105%      |
| Vitesse de fonctionnement continue maximal          | 8400tr/min     |
| Vitesse e fonctionnement continue minimal KR25      | N1=7600tr/min  |
| Vitesse du compresseur critique à la flexion V25    | N2=7800tr/ min |

**Tableau 1** : Caractéristique technique des turbines KR25 et V25 . [10]

### II.1.2.Caractéristique technique de la turbine Kr25 (103-JTHP):

|                                                        |              |
|--------------------------------------------------------|--------------|
| Pression de vapeur vive, normale :                     | 102 bar eff  |
| Maximal :                                              | 113 bar eff  |
| Température de vapeur vive, nominale :                 | 439°C        |
| Maximal :                                              | 470°C        |
| Pression de vapeur épuisée, nominal :                  | 39.6 bar eff |
| Maximale :                                             | 44.5 bar eff |
| Capacité d'aspiration :                                | env. 260 t/h |
| Température maximale admissible de la vapeur Epuisée : | 470°C        |

**Tableau 2** : Caractéristique technique de la turbine KR25 . [10]

### II.2.3.Caractéristique technique de la turbine v25 : (103-JTBP)

|                                                        |              |
|--------------------------------------------------------|--------------|
| Pression de vapeur vive, normale :                     | 39.3 bar eff |
| Maximal :                                              | 44.5 bar eff |
| Température de vapeur vive, nominale :                 | 320°C        |
| Pression de vapeur épuisée, nominal :                  | 0.16 bar eff |
| Capacité d'aspiration :                                | env. 21 t/h  |
| Température maximale admissible de la vapeur Epuisée : | 120°C        |

**Tableau 3** : Caractéristique technique de la turbine V25 [10]



**Figure 12:** les turbines de la (103-JBP ,103J-HP) [10]

#### **II.2.4.Compresseurs 103JBP/HP**

- Le compresseur de gaz de synthèse est destiné à monter la pression des gaz provenant du traitement pour la réaction de conversion d'ammoniac et a maintenir le gaz de synthèse a une pression suffisante pour permettre la circulation dans l'équipement de la boucle de synthèse.
- Le gaz de synthèse provenant de la section de reformage (méthanisation) est comprimé et acheminé vers la boucle de synthèse.
- Les limites de la section sont de la vanne d'isolement du gaz synthèse à l'aspiration du compresseur jusqu'à la vanne d'isolement du gaz dans la conduite de refoulement.
- Sans le compresseur 103J la réaction dans le convertisseur d'ammoniac est impossible, donc l'arrêt de la section suit tout déclenchement du compresseur [10]

### II.2.4.1 Conditions de fonctionnement du compresseur :

#### A. Caractéristique du compresseur Basse Pression (BP) :

|                                                        |               |
|--------------------------------------------------------|---------------|
| Pression d'aspiration                                  | 24.6 bars     |
| Température :                                          | 38°C          |
| Pression air refoulement                               | 63bars        |
| Vitesse de rotation                                    | 10343 tr/min  |
| Puissance d'entraînement                               | 17.709Kw      |
| Température maximale admissible de la vapeur Epuisée : | 120°C         |
| Température de refoulement                             | 187°C         |
| Vitesse maxi                                           | 11000 tr/ min |
| Nombre de roues                                        | 9             |
| Débit gaz normal                                       | 46.837 /h     |

**Tableau 4** : Caractéristique technique de compresseur BP [10]

**B. Caractéristiques du compresseur Haute Pression :**

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Pression d'aspiration           | 63.4 bars     |
| Température :                   | 8°C           |
| Pression entre intermédiaire    | 134 bars      |
| Température entre intermédiaire | 43°C          |
| Pression air refoulement        | 150 bars      |
| Vitesse de rotation             | 10343 tr/min  |
| Puissance d'entraînement        | 17.709Kw      |
| Température de refoulement      | 74°C          |
| Vitesse maxi                    | 11000 tr/ min |
| Nombre de roues                 | 8             |
| Poids                           | 10800 Kg      |
| Débit gaz normal                | 46.837 /h     |
| Débit d'entrée normal gaz       | 46.837Kg/H    |
| Débit d'entrée entre étage gaz  | 282.794Kg/h   |
| Débit refoulement normal gaz    | 328.794 Kg/h  |

**Tableau 5 :** Caractéristique technique de compresseur HP [10]

### II.3.Circuit vapeur (turbine 103JT HP et BP) :

La vapeur surchauffée est détendue dans la première turbine (HP), la vapeur est évacuée dans un collecteur de vapeur moyenne pression et dirigée vers une deuxième turbine (BP), et condensée dans un condenseur a surface.

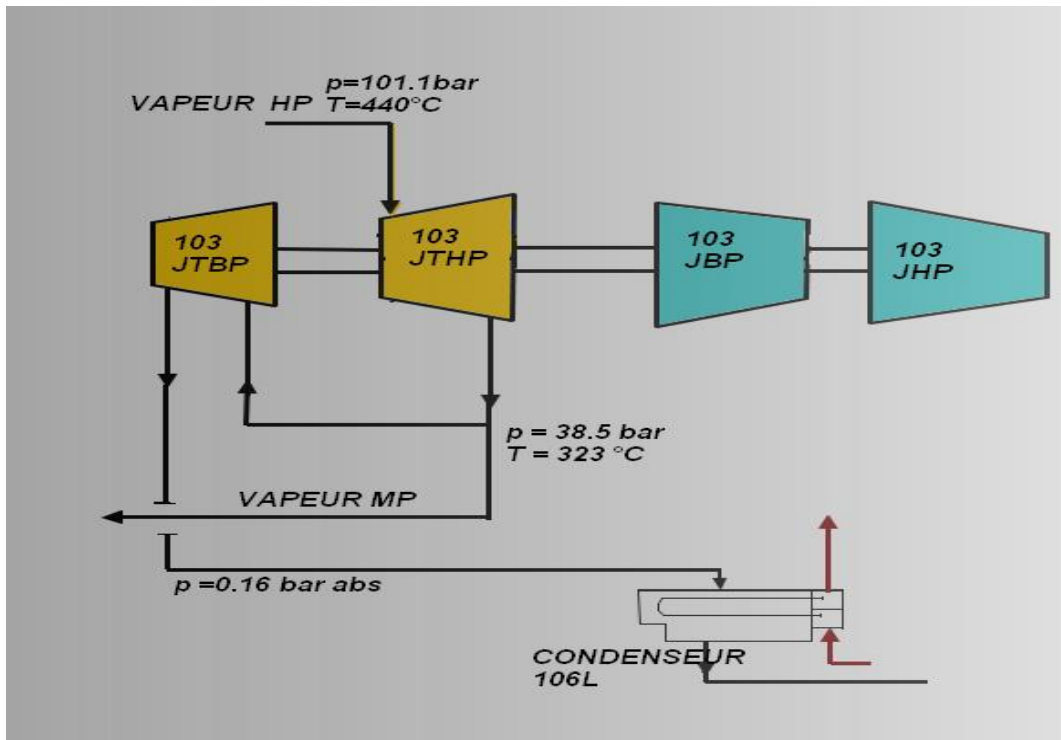


Figure 13:Circuit de vapeur T.C 103J [10]

### II.4.Compression de gaz de synthèse :(103JBP –HP) :

Le compresseur de gaz de synthèse 103J est une machine multiétagée, constituée de deux enveloppes et de trois étages de compression. L'enveloppe basse pression (BP) renferme le premier étage, tandis que les deuxième et troisième étages sont regroupés dans l'enveloppe haute pression (HP).

Le gaz de synthèse, en provenance de l'unité de méthanation, transite d'abord par un ballon-tampon 104F, dont le rôle est de retenir les éventuels résidus liquides. Il est ensuite introduit dans l'enveloppe BP, où il subit une première compression. À la sortie de cette étape, le gaz comprimé traverse trois échangeurs thermiques assurant son refroidissement.

Le gaz refroidi est ensuite dirigé vers un second ballon-tampon (105F), destiné à éliminer les fractions liquides résiduelles, avant son admission dans l'enveloppe HP pour la deuxième phase de compression. À l'issue de cette étape, il entre directement dans le troisième étage, où il est mélangé à un débit recyclé de gaz de la boucle de synthèse. Le mélange gazeux ainsi constitué est comprimé simultanément.

Enfin, le gaz comprimé est évacué de l'enveloppe HP, traverse un réfrigérant (124-C) destiné à abaisser sa température, puis est dirigé vers la section de synthèse pour la suite du procédé. [10]

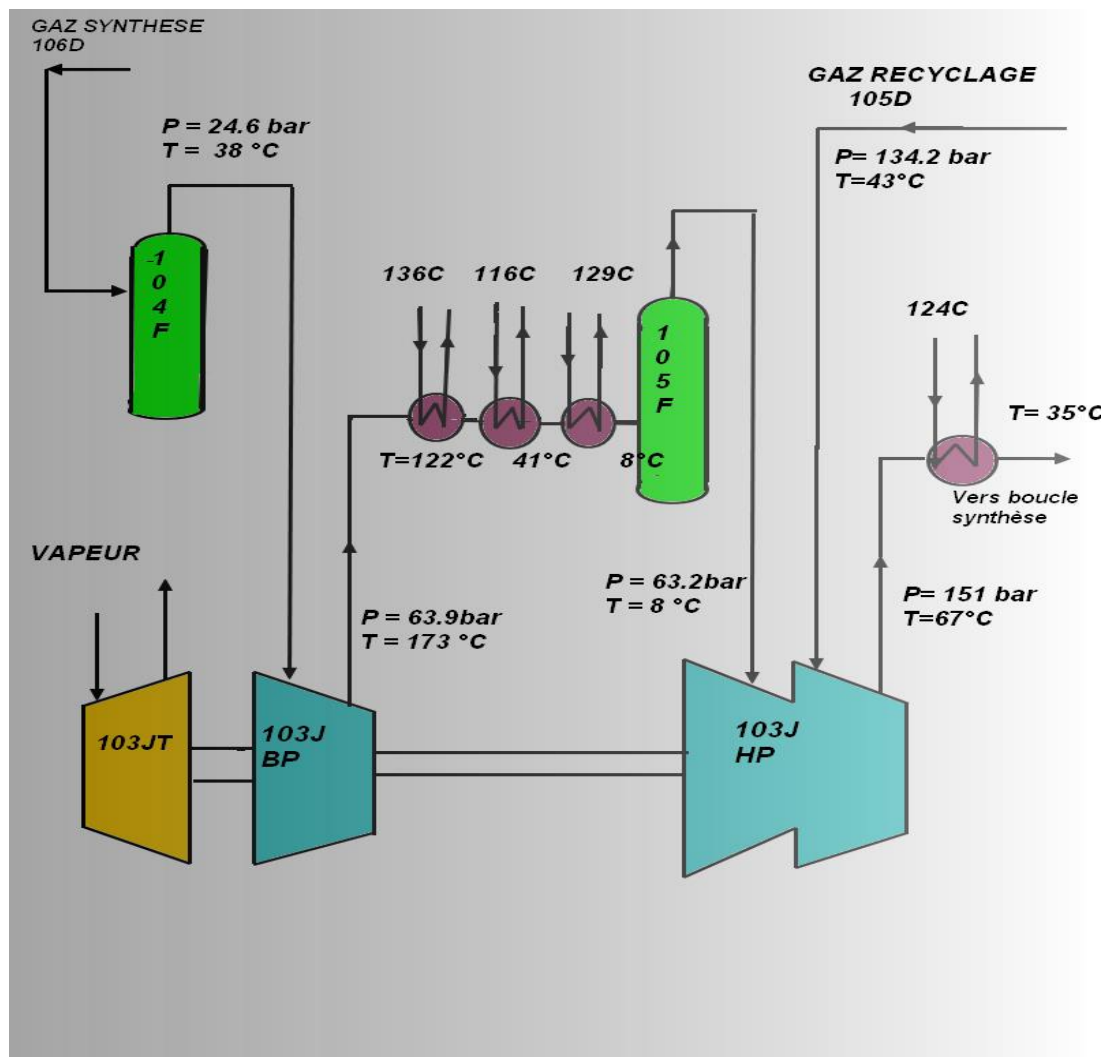


Figure 14: Compression de gaz de synthèse 103J [10]

## II.5.HUILE DE GRAISSAGE :

Le réservoir de graissage est maintenu sous atmosphère d'azote pour prévenir l'oxydation, où l'huile est entreposée.

Le réservoir est équipé d'une soupape de vidange, d'un indicateur de niveau à miroir, d'une jauge, d'un point de remplissage, d'une possibilité de dégagement et d'une alarme de bas niveau LLA341, en plus d'être muni d'un serpentin chauffant à vapeur.

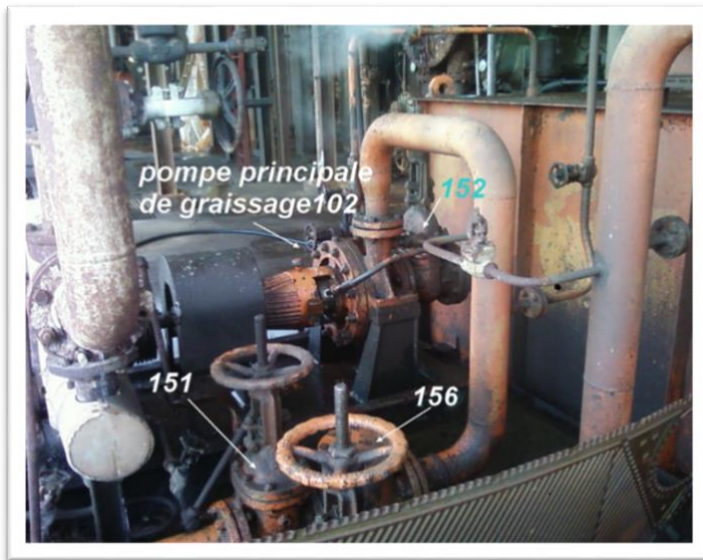


**Figure 15:** Réservoir d'huile de graissage. [10]

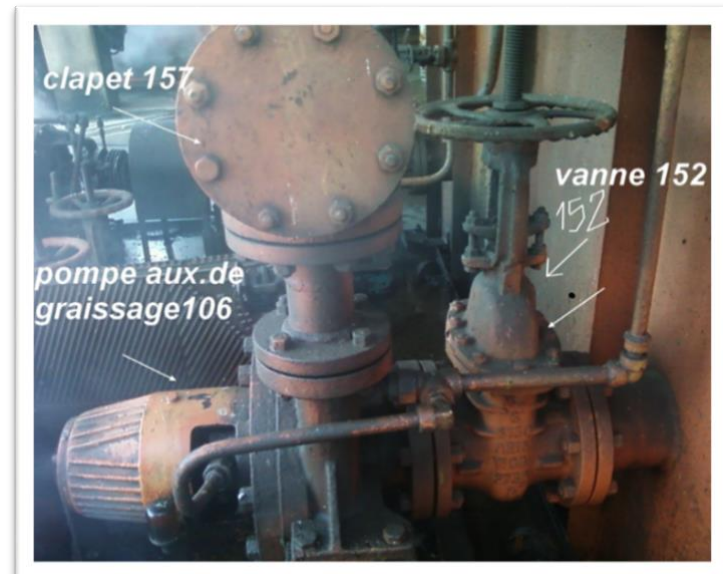
### II.5.1. Les Pompes de graissage:

Chaque conduite d'aspiration qui alimente les pompes à huile de lubrification est équipée de son propre filtre et vanne d'arrêt.

La turbine à vapeur entraîne la pompe principale d'huile.



**Figure 16:** Pompe principale de graissage



**Figure 17:** Pompe auxiliaire de graissage

Le circuit de refoulement des pompes d'huile de graissage est équipé d'un manomètre de pression (PI), d'une soupape anti-retour et d'une vanne d'isolement. En cas de baisse de pression dans le circuit, détectée par le pressostat PA 341 (PS130) placé en refoulement, la pompe d'huile auxiliaire est automatiquement mise en service.

L'huile de lubrification est ensuite dirigée vers les échangeurs thermiques, où sa température est régulée. Un capteur de température permet de suivre la température à l'entrée du système, tandis qu'une vanne à trois voies assure le contrôle du débit. Un by-pass est également prévu pour contourner cette vanne, facilitant ainsi l'équilibrage hydraulique avant l'entrée en fonctionnement des dispositifs de refroidissement.

Par la suite, l'huile est redirigée vers les filtres à huile via une seconde vanne à trois voies. Là encore, un dérivatif permet de court-circuiter cette vanne dans le but de réguler la pression en amont de l'étape de filtration.



**Figure 18:** Réfrigérants d'huile de graissage [10]



**Figure 19:** Mano mètre pour mesurer la pression au niveau de la pompe de graissage

Le capteur HPDA343 (DPIS) mesure la pression différentielle au niveau des filtres à huile afin de détecter leur état d'encrassement et de signaler le besoin de maintenance.

Le système de récupération d'huile de lubrification est équipé d'un manomètre PI, ainsi que des pressostats LLPA347 (PS256) et LLPA342 (PS223), lesquels déclenchent une alerte vers le système d'arrêt d'urgence si la pression d'huile descend en dessous du seuil critique.

Lors du démarrage, un bypass du régulateur permet d'assurer une alimentation directe en huile lubrifiante vers la turbine, garantissant ainsi une lubrification immédiate.

Tous les composants rotatifs, notamment les étages des compresseurs et des turbines, sont alimentés en huile de lubrification. Des thermomètres TI permettent de surveiller la température des paliers et des labyrinthes de gaz (LG), assurant ainsi un suivi rigoureux du flux d'huile à travers ces zones critiques.

L'huile usée retourne vers le collecteur, qui reçoit également l'huile de régulation résiduelle, avant d'être reconduite vers le réservoir principal pour un nouveau cycle

### II.5.2. Huile d'étanchéité

L'huile d'étanchéité utilisée pour le compresseur est directement prélevée depuis le circuit de lubrification. Plus précisément, elle est dérivée en amont du régulateur de pression qui contrôle la pression du collecteur principal d'huile de graissage.

L'alimentation en huile d'étanchéité est assurée par deux pompes, dont l'aspiration se fait par une conduite dédiée. La pompe principale est entraînée mécaniquement par une turbine à vapeur moyenne pression (MP), tandis que la pompe secondaire fonctionne grâce à un moteur électrique, assurant ainsi une redondance du système.

Les conduites d'aspiration des pompes sont équipées de vannes d'isolement permettant leur mise hors service en toute sécurité. Le circuit de refoulement des pompes intègre un manomètre PI, une soupape à clapet ainsi qu'une vanne d'arrêt pour le contrôle opérationnel. Enfin, chaque ligne de refoulement est dotée d'une soupape de sécurité (PSV). Celle-ci a pour fonction de protéger les équipements et les tuyauteries en aval contre toute surcharge de pression susceptible d'endommager le système.



**Figure 20 :** Les conduites d'aspiration d'une moto pompe d'huile d'étanchéité



**Figure 21 :** Turbo pompe d'huile d'étanchéité. [10]

L'huile de scellement est dirigée vers le système de filtration, constitué de deux ensembles de filtres montés en parallèle. Une vanne à trois voies permet d'orienter le flux d'huile vers l'un ou l'autre des ensembles, facilitant ainsi l'alternance ou la redondance en cas de maintenance.

Un dérivatif muni d'un régulateur est prévu pour bypasser la vanne à trois voies, assurant ainsi un ajustement préalable de la pression avant l'activation effective des filtres. Par ailleurs, un capteur de pression différentielle (DPIS) est installé afin de surveiller le niveau d'encrassement des éléments filtrants, et de signaler toute dégradation de performance nécessitant une intervention.



**Figure 22:** Filtre d'huile

La régulation du débit d'huile d'étanchéité au sein du système est assurée par la différence entre la pression de référence et la pression aval de la vanne de régulation du circuit. Cette différence de pression commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne automatique (124) de la ligne de recyclage, permettant ainsi le renvoi de l'huile vers le réservoir principal.

Des vannes de régulation assurent la distribution de l'huile dans les circuits haute et basse pression. En cas de panne des pompes, des dispositifs anti-retour (238 et 239) empêchent tout retour d'huile dans les conduites. La pression du collecteur est surveillée à l'aide de manomètres, via les circuits PI216 et PI217.

La pression dans les réservoirs supérieurs d'huile de scellement est maintenue au niveau de la pression de refoulement des pompes. En cas d'interruption, une temporisation de cinq minutes est prévue avant l'évacuation totale de l'huile. En situation de défaillance des pompes d'étanchéité, ces réservoirs assurent un apport d'huile de secours pendant au moins 20 secondes, garantissant l'alimentation des étages basse (BP) et haute pression (HP).

Le système est équipé d'un ensemble d'alarmes et de capteurs :

HLA344 (huile HP) et HLA347 (huile BP) signalent les niveaux hauts critiques ;

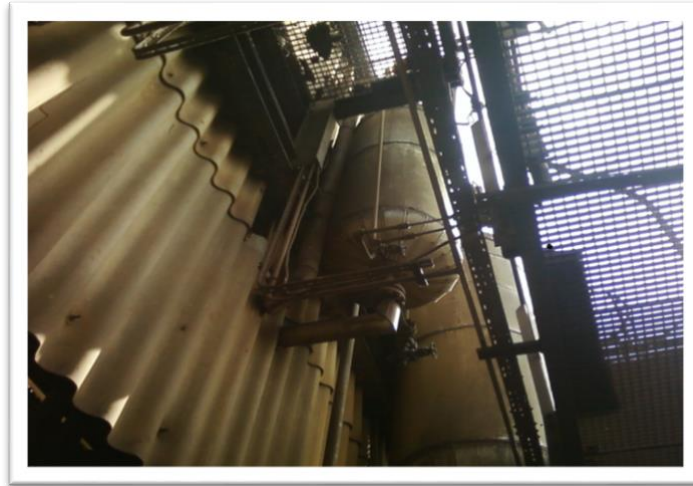
LLA345 (HP) et LLA348 (BP) déclenchent automatiquement la pompe auxiliaire en cas de chute de pression ;

LLA346 (HP) et LLLA349 (BP) sont reliés au système d'arrêt d'urgence.

Chaque réservoir est également pourvu d'un indicateur de niveau, garantissant un suivi visuel constant du fluide. L'huile d'étanchéité est acheminée des collecteurs de fourniture vers les joints des sections haute et basse pression du compresseur, avant d'atteindre les collecteurs d'huile d'étanchéité. Chaque collecteur est équipé d'une vanne de coupure, d'un indicateur de niveau et d'un régulateur qui dégage vers l'atmosphère. Les flux convergent et passent par un autre régulateur et une valve anti-retour avant de se libérer dans l'atmosphère.

Un dispositif de contrôle de niveau sur les collecteurs d'huile d'étanchéité haute pression régule le flux d'huile vers le dégazeur. L'huile d'étanchéité corrosive est ensuite acheminée vers le dégazeur où un serpentin à vapeur élimine les gaz dissous. Sur le dégazeur, deux vannes de purge sont prévues et l'évent libère les gaz dans l'atmosphère.

L'huile d'étanchéité, une fois débarrassée de ses gaz, est renvoyée au réservoir d'huile de lubrification.



**Figure 23:** Refoulement des gaz vers l'atmosphère

Un dispositif de régulation de niveau, installé sur les collecteurs d'huile d'étanchéité haute pression, contrôle le débit d'huile dirigé vers le dégazeur. L'huile, susceptible de contenir des substances corrosives et des gaz dissous, est ensuite transférée vers ce dégazeur, où un serpentin chauffé à la vapeur permet l'élimination des gaz en solution.

Le dégazeur est équipé de deux vannes de purge pour l'évacuation des impuretés, tandis qu'un évent assure la libération contrôlée des gaz vers l'atmosphère. Une fois dégazée, l'huile d'étanchéité est renvoyée vers le réservoir de lubrification, assurant ainsi la fermeture du circuit.



**Figure 24:** évacuation des gaz d'huile d'étanchéité

### **II.6.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons montré les différents composants le rôle, les caractéristiques et l'importance du turbocompresseur 103J dans l'unité d'ammoniac.

# CHAPITRE 3

## BILAN CALCULE cycle de Rankine à surchauffe

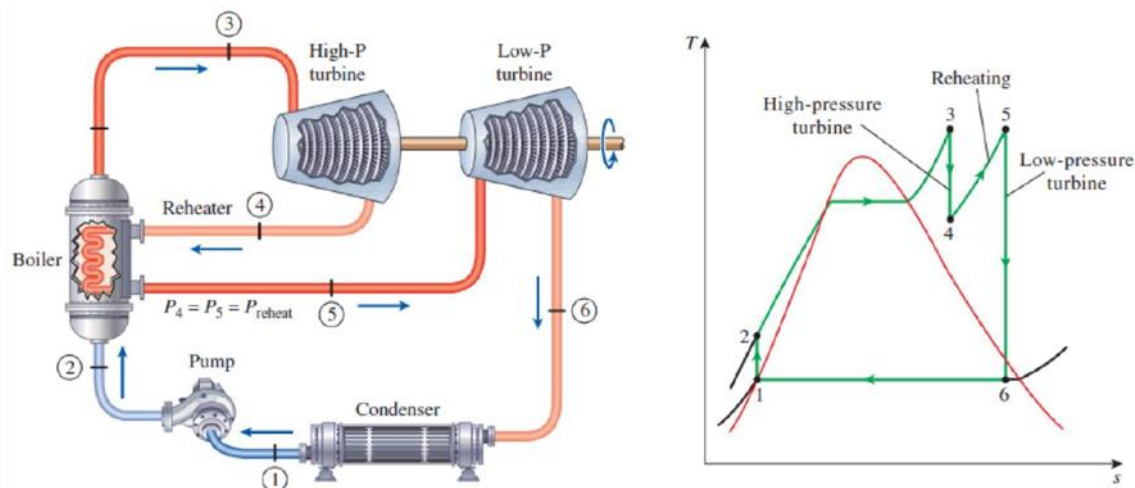
## CHAPITRE 3 : BILAN CALCULE cycle de Rankine à surchauffe

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le cycle de Rankine à surchauffe (cycle de Hirn)

### III.2 Cycle de Rankine avec resurchauffe ou de Hirn avec surchauffe

Principe : la resurchauffe permet de diminuer la teneur en liquide à la sortie de la turbine et améliore le rendement du cycle thermodynamique mais augmente celui des aubages de la turbine suite à la réduction du degré d'humidité dans les derniers étages de la turbine, (voir figure 25).



**Figure 25 :** Cycle de Rankine idéale avec resurchauffe. [11]

La première idée pour améliorer le cycle de Hirn est d'augmenter la température moyenne lors de l'apport de chaleur : on peut y parvenir en réaliser une ou plusieurs resurchauffes, ou réchauffes. [12]

- On détente partiellement la vapeur dans une turbine HP jusqu'à une pression intermédiaire, de façon à atteindre un état proche de l'état saturé (état 4 ci-contre).
- Puis on la fait repasser dans la chaudière ou elle est réchauffée, à la pression intermédiaire, jusqu'à la température maxi du cycle ( $T_3 = T_5$ ).
- Enfin la vapeur se détend dans une turbine BP.

- 1 - 2 Compression isentropique dans une pompe, passage de BP à HP.
- 2 - 3 Ajout de chaleur à pression constante (isobare) dans une chaudière.
- 3 - 4 1<sup>ère</sup> détente adiabatique, de HP à MP, dans la turbine HP,  $w_{12} = h_1 - h_2$
- 4 - 5 chauffages isobares de la vapeur,  $q_{23} = h_3 - h_2$
- 5 - 6 2<sup>ème</sup> détente adiabatique, de MP à BP, dans la turbine BP,  $w_{34} = h_3 - h_4$
- 6 - 1 Rejet de chaleur à pression constante (isobare) dans un condenseur. [12]

### Bilan Énergétique de cycle

Pompe ( $Q = 0$ ) :

$$W_{\text{pompe,in}} = h_2 - h_1 \quad (\text{III.1})$$

Où :

$$W_{\text{pompe,in}} = V \cdot (P_2 - P_1) \quad (\text{III.2})$$

Chaudière ( $W = 0$ ) :

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{in}} (1) + Q_{\text{in}} (2) \quad (\text{III.3})$$

Et :

$$Q_{\text{in}} (1) = h_3 - h_2 \quad (\text{III.4})$$

$$Q_{\text{in}} (2) = h_5 - h_4 \quad (\text{III.5})$$

Donc :

$$Q_{\text{in}} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (\text{III.6})$$

Turbine ( $Q = 0$ ) :

$$W_{\text{turbine,out}} = W_{t1} + W_{t2} \quad (\text{III.7})$$

On a :

$$W_{t1} = h_3 - h_4 \quad (\text{III.8})$$

Et :

$$W_{t2} = h_5 - h_6 \quad (\text{III.9})$$

Donc :

$$W_{\text{turbine,out}} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (\text{III.10})$$

Condenseur ( $W = 0$ ) :

$$Q_{\text{out}} = h_6 - h_1 \quad (\text{III.11})$$

L'efficacité thermique du cycle de Rankine est déterminée à partir de :

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = W_{\text{turbine,out}} - W_{\text{pompe,in}} \quad (\text{III.13})$$

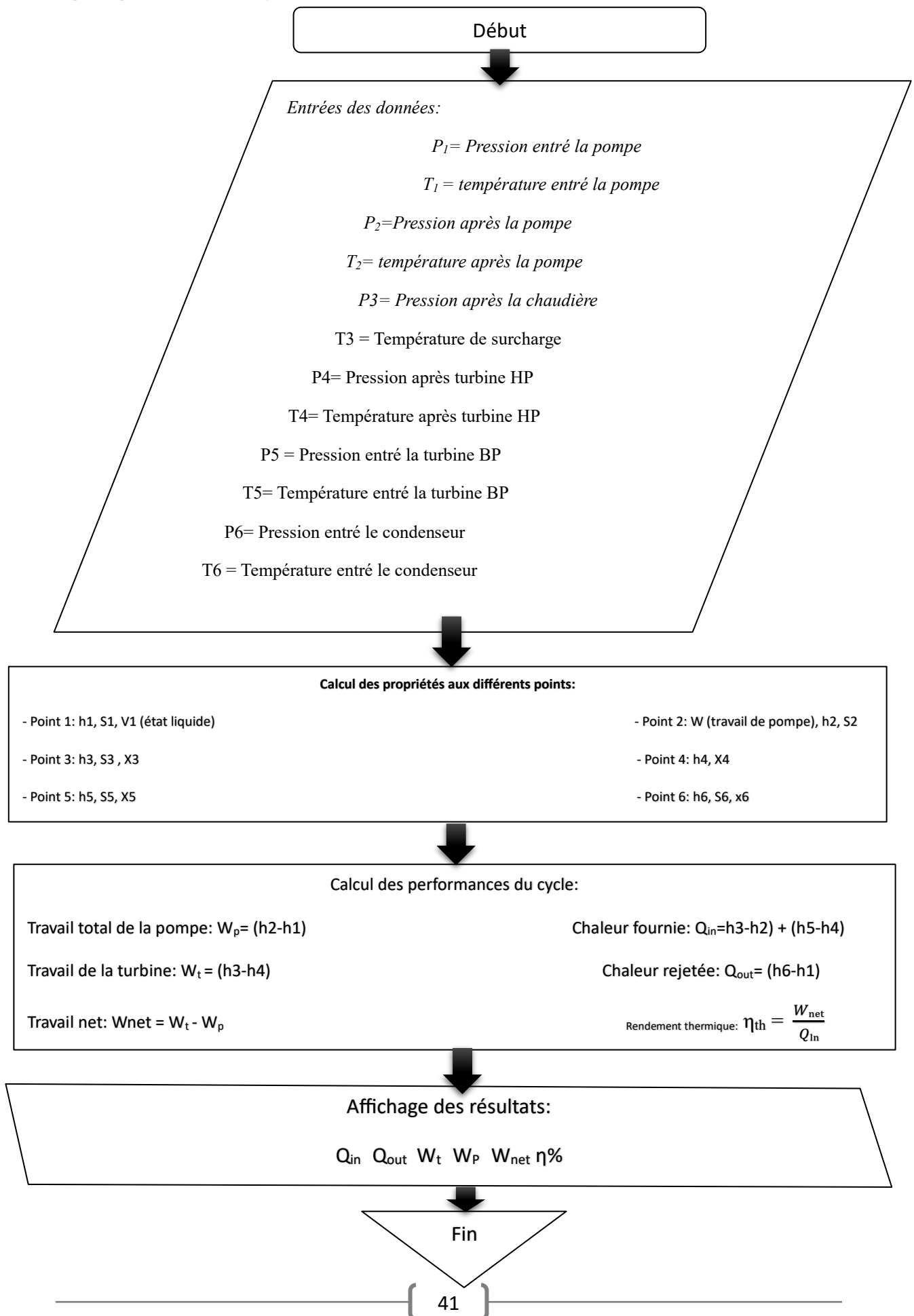
$$W_{\text{net}} = [(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)] - (h_2 - h_1) \quad (\text{III.14})$$

$$Q_{\text{in}} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (\text{III.15})$$

Donc:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{[(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)] - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)} \quad (\text{III.16})$$

## Organigramme du Cycle de Hirn à Surchauffe



## II.3 Description du logiciel EES

### II.3.1 Définition de logiciel EES

Le logiciel EES (Engineering Equation Solver) a été conçu par le professeur Sandy Klein de l'Université du Wisconsin à Madison [13].

Il vise à faciliter la résolution de problèmes d'ingénierie en permettant aux utilisateurs de se concentrer sur la modélisation mathématique sans avoir à consulter manuellement des tables de propriétés ou à se préoccuper des techniques de résolution. EES est capable de traiter des systèmes d'équations algébriques, différentielles, ainsi que des équations à variables complexes. Il permet également l'optimisation de paramètres, la régression linéaire et non linéaire, et la génération de graphiques de haute qualité [14].

Le logiciel intègre une large base de données comprenant des fonctions mathématiques et propriétés thermodynamiques. Toutefois, étant donné la diversité des applications, il propose à l'utilisateur plusieurs moyens pour étendre ses fonctionnalités :

L'introduction de données numériques tabulées avec interpolation directe dans les équations du modèle.

L'utilisation d'un langage de programmation propre à EES, proche du Pascal et du Fortran, permettant de créer des fonctions et procédures personnalisées, enregistrées dans des bibliothèques accessibles à chaque session.

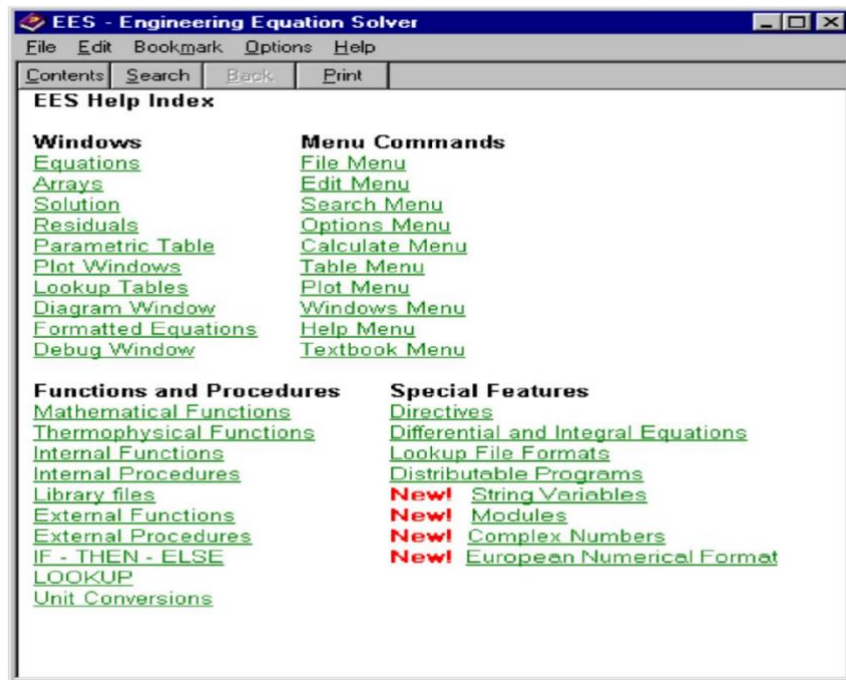
L'intégration de fonctions compilées externes via des bibliothèques dynamiques (DLL) écrites dans des langages comme le Pascal, le C ou le Fortran.

Grâce à ces options, EES s'adapte aux besoins spécifiques de ses utilisateurs et constitue un outil puissant pour la modélisation et l'analyse de systèmes thermodynamiques et énergétiques.

### II.3.2 Information générale

Lors du lancement du logiciel EES, une fenêtre de dialogue initiale s'affiche, contenant notamment le numéro de version et le numéro de licence. Ces informations sont importantes, notamment en cas de demande d'assistance technique. Pour démarrer une session de travail, il suffit de cliquer sur le bouton « OK » [14].

Le logiciel propose une assistance en ligne intégrée accessible à tout moment. L'utilisateur peut activer l'aide contextuelle en appuyant sur la touche F1. Il est également possible de consulter l'index complet de l'aide en cliquant sur le bouton « Contents ». Ce système d'aide est enrichi de liens hypertexte interactifs, signalés par un soulignement vert, facilitant la navigation entre les différentes rubriques.



**Figure 26:** Fenêtre des Informations général. [14]

Les commandes de EES sont réparties suivant 9 menus.



**Figure 27 :** Les commandes de EES. (Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

Sous la barre de menus principale, EES met à disposition une barre d'outils contenant plusieurs icônes facilitant l'accès rapide aux fonctions les plus couramment utilisées du logiciel. En positionnant le curseur sur l'une de ces icônes, une info-bulle descriptive s'affiche après un court instant. Cette barre peut être masquée ou affichée via l'option « Préférences » dans le menu Options.

L'icône du logiciel, située dans le coin supérieur gauche de la fenêtre, permet, par un clic droit, d'accéder aux paramètres d'affichage de la fenêtre, tels que le redimensionnement, le passage en arrière-plan ou la fermeture du programme.

Les fonctionnalités du logiciel sont accessibles via différents menus :

- Le menu Fichier permet la gestion des documents (ouverture, sauvegarde, fusion, impression, chargement de bibliothèques, etc.).

- Le menu Éditer donne accès aux commandes classiques de traitement de texte : annuler, copier, coller, supprimer, sélectionner tout, etc.
- Le menu Recherche propose des fonctions de recherche et de remplacement dans le document actif.
- Le menu Options offre la possibilité de consulter les informations sur les variables, de définir les unités, les plages de calcul, ainsi que les limites numériques. La commande « Préférences » y permet également de configurer l'affichage des résultats, les échelles de tracé ou encore les fonctions personnalisées.
- Le menu Calculer regroupe les commandes nécessaires à la vérification syntaxique, à la mise en forme des données et à l'exécution des calculs.
- Le menu Tables permet de gérer les tables paramétriques, comparables à des feuilles de calcul. On peut y effectuer des analyses de sensibilité, des régressions linéaires et varier les paramètres pour tester plusieurs configurations.
- Le menu PLOT est dédié à la visualisation graphique des résultats. Il permet de tracer des courbes, d'ajuster les axes, de générer des graphes pour les données issues des tables ou des tableaux de variables, et d'effectuer des ajustements de courbes (curve-fitting).
- Le menu Fenêtres permet de réorganiser l'affichage des différentes fenêtres ouvertes dans l'interface de travail.
- Enfin, le menu Aide donne accès à la documentation intégrée, accessible à tout moment pour accompagner l'utilisateur dans son utilisation du logiciel [14].

### **II.3.3 Exploration du menu principal**

Les commandes du logiciel EES sont réparties selon 9 menus déroulants accessibles à partir du menu principal. Une barre d'outils, contenant plusieurs icônes permet à l'utilisateur d'accéder plus rapidement aux commandes les plus utilisées du menu principal. Au démarrage du logiciel, cette barre d'outils est située en dessous de la barre de menu. [14]

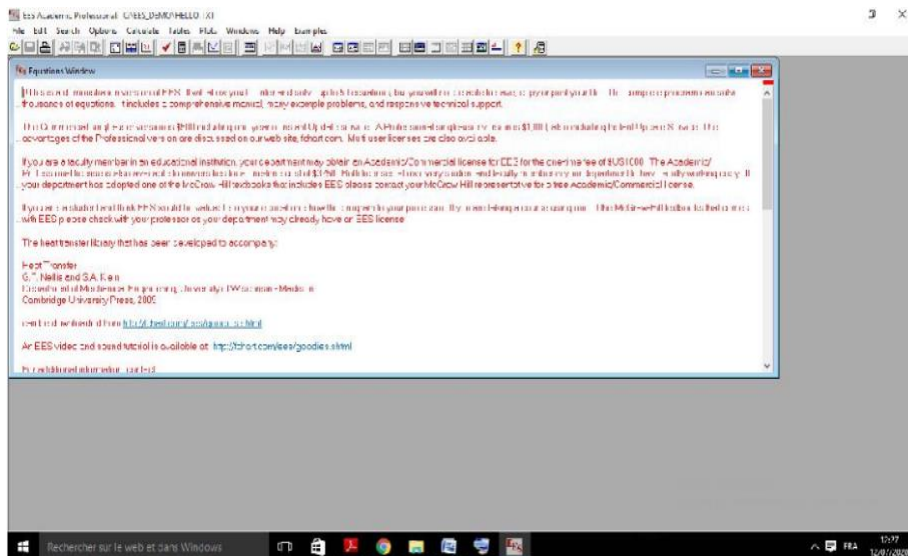


Figure 28: Interface du logiciel EES. [14]

## II.3.4 Fenêtres de EES

### a. Fenêtre de Solution

Après l'exécution d'un calcul dans EES, la fenêtre des résultats (ou fenêtre de Solution) s'affiche automatiquement au premier plan. Elle présente les valeurs numériques et unités associées de toutes les variables définies dans la fenêtre des équations, organisées par ordre alphabétique.

L'utilisateur a la possibilité de réajuster la largeur des colonnes de cette fenêtre selon ses préférences. En outre, les formats d'affichage ainsi que les unités des variables peuvent être modifiés en accédant à la commande « Information sur les variables » disponible dans le menu Options.

Un double-clic sur une variable ouvre une boîte de dialogue permettant de configurer les paramètres de format, tels que les unités, le nombre de décimales, ou encore le style d'affichage. Ces paramètres s'appliquent à toutes les variables sélectionnées. À noter que l'appui sur la touche "Entrée" permet également d'accéder directement à cette boîte de dialogue.

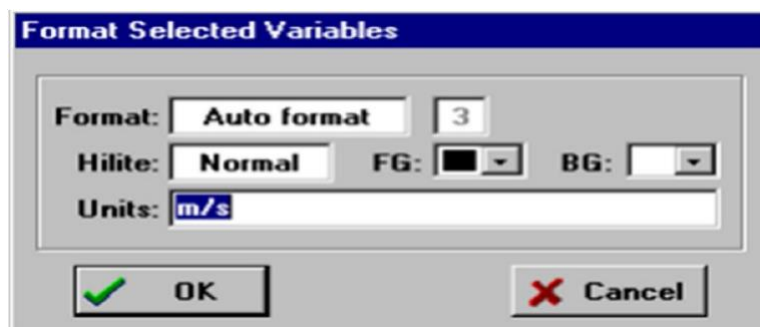


Figure. 29 : Façade de la fenêtre de solution [14]

### b. Fenêtre Tableaux

Le logiciel EES permet d'utiliser des variables de type tableau, identifiées par des indices entre crochets. Par exemple, l'expression  $X[5]$  désigne une variable tableau unidimensionnelle, tandis que  $Y[6,2]$  correspond à une variable tableau bidimensionnelle.

Ces variables se comportent de manière similaire aux variables scalaires classiques. Elles peuvent être initialisées, dotées de valeurs limites (supérieures et inférieures), et leurs paramètres d'affichage peuvent être personnalisés

Par défaut, les valeurs de toutes les variables – y compris celles de type tableau – sont affichées dans la fenêtre des résultats après l'exécution des calculs. Toutefois, il est possible de visualiser ces variables dans une fenêtre dédiée aux tableaux, en modifiant l'option correspondante dans la boîte de dialogue "Préférences"

|      | 1 $t_i$<br>[sec] | 2 $y_i$<br>[observed] | 3 $y_{p,i}$<br>[predicted] |
|------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| [1]  | 1.1              | 3                     | 2.998                      |
| [2]  | 1.2              | 2.9                   | 3.16                       |
| [3]  | 1.3              | 3.6                   | 3.322                      |
| [4]  | 1.9              | 4.2                   | 4.297                      |
| [5]  | 2.3              | 5.1                   | 4.948                      |
| [6]  | 3.1              | 5.9                   | 6.257                      |
| [7]  | 3.3              | 7                     | 6.586                      |
| [8]  | 4.1              | 7.8                   | 7.903                      |
| [9]  | 4.4              | 8                     | 8.399                      |
| [10] | 4.6              | 9.1                   | 8.73                       |

Figure 30: Interface de La fenêtre Tableaux. [14]

### c. Fenêtre de la table paramétrique

|       | 1 P2<br>[kPa] | 2 T2<br>[C] | 3 Vel2<br>[m/s] | 4 h2<br>[kJ/kg] |
|-------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Run 1 | 100           | 31.46       | 109.9           | 278.9           |
| Run 2 | 150           | 36.32       | 73.79           | 282.2           |
| Run 3 | 200           | 38.7        | 55.29           | 283.4           |
| Run 4 | 250           | 40.34       | 44.08           | 284             |
| Run 5 | 300           | 41.67       | 36.57           | 284.3           |

Figure 31: Fenêtre de la table paramétrique. [14]

La fenêtre "Parametric Table" d'EES permet de travailler avec des données paramétriques. Il est possible de saisir des valeurs numériques directement dans les cellules de cette table. Les variables renseignées, comme par exemple celles figurant dans une colonne nommée P2, sont considérées comme variables indépendantes.

Ces valeurs sont affichées en fonction du jeu de caractères par défaut, modifiable via l'option "Préférences" du menu "Options". Attribuer une valeur à une variable dans cette table équivaut à une affectation classique dans la fenêtre des équations.

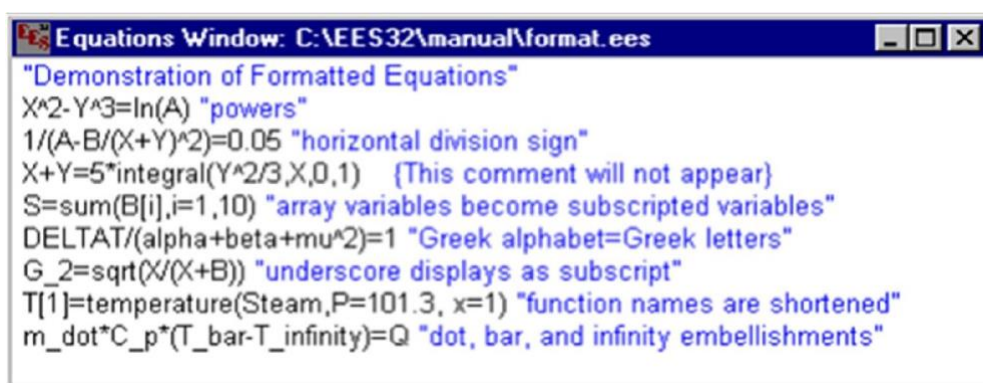
Une fois les calculs lancés à l'aide de la commande "Resolve Table" ou "Min/Max Table" depuis le menu "Calculate", les variables dépendantes sont automatiquement déterminées. Leurs résultats sont alors affichés dans la table selon le style défini dans les préférences (généralement en bleu, gras ou italique). [14]

#### d. Fenêtre d'équations

La saisie des équations se fait dans une fenêtre dédiée d'une façon similaire à la saisie d'un document dans un traitement de texte classique. Les commandes d'édition, Copier, Couper, Coller sont disponibles dans le menu 'Edit'.

#### e. Fenêtre de mise en forme d'équations

Cette fenêtre affiche les équations saisies sous la forme mathématique usuelle

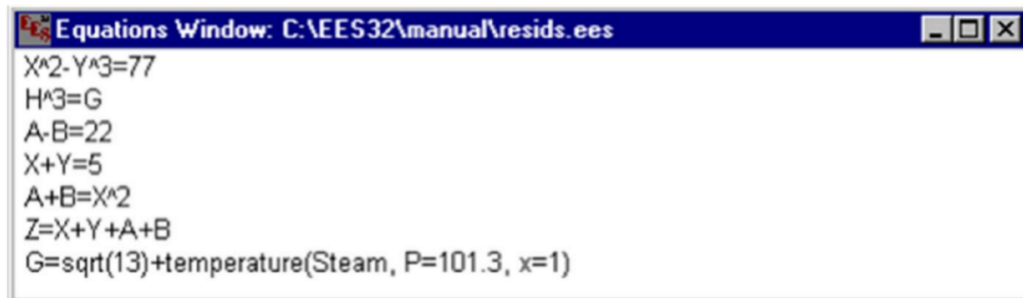


**Figure31:** Interface de la fenêtre de mise en forme d'équations. [14]

#### f. Fenêtre Résiduelle (Résiduel Windows)

La fenêtre Résiduelle indique le bloc d'équation, l'ordre de calcul utilisé par EES, ainsi que les valeurs relatives et absolues résiduelles. La valeur absolue résiduelle d'une équation est la différence entre les valeurs situées à gauche et à droite d'une équation.

La valeur résiduelle relative est déterminée en faisant la division entre la valeur résiduelle absolue par la valeur de l'expression située à gauche d'une équation.



**Figure 32:** Fenêtre Résiduelle. [14]

#### g. Fenêtre 'Lookup Table'

La table 'Lookup' dans EES fonctionne comme une base de données interne, permettant d'extraire des valeurs et de les intégrer directement dans les équations du modèle. Cette table est créée via la commande « New Lookup Table » disponible dans le menu Tables.

Lors de sa création, l'utilisateur définit le nombre de lignes et de colonnes souhaité. Ces dimensions peuvent ensuite être modifiées à l'aide des commandes « Insert/Delete Rows » ou « Insert/Delete Cols ».

Il est possible de sauvegarder une table 'Lookup' indépendamment du fichier principal EES, en utilisant la commande « SaveLookup ». Deux formats sont proposés :

- LKT, un fichier binaire propre au logiciel EES,
- TXT, un fichier texte de type ASCII contenant uniquement les données.

Ces deux types de fichiers sont compatibles avec EES et peuvent être importés dans n'importe quelle session de travail. [14]

|       | 1 Temp [C] | 2 Time [sec] | 3 Pos [m] |
|-------|------------|--------------|-----------|
| Row 1 | 100.0      | 0.00         | 5.50      |
| Row 2 | 120.0      | 1.00         | 5.86      |
| Row 3 | 140.0      | 2.00         | 6.11      |
| Row 4 | 160.0      | 3.00         | 6.36      |
| Row 5 | 180.0      | 4.00         | 6.58      |

Figure 33: Fenêtre 'Lookup Table'.

### III.2.3 Etude des performances du cycle de Rankine avec resurchauffe avec le logiciel

#### EES

A partir du logiciel EES nous avons réalisé une simulation thermodynamique des performances du cycle de Rankine avec resurchauffe (Hirn avec surchauffe).

Les données de la simulation sont présentées comme suit:

(Water),  $T_1=T_6=38^\circ\text{C}$ ,  $T_4=323^\circ\text{C}$ ,  $T_3=T_5=440^\circ\text{C}$ ,  $P_1=2[\text{bar}]$ ,  $P_2=60[\text{bar}]$ ,  $P_3=50, 100$  et  $150[\text{bar}]$ ,  $P_5=P_4=39[\text{bar}]$ ,  $P_6=4[\text{bar}]$ .

Le programme du cycle de Hirn avec surchauffe avec le logiciel EES est présenté comme suit:

"Etude du cycle de Hirn à surchauffe"

"Données"

"Point 1"

$x[1]=0$

$P[1]=2[\text{bar}]$

$h[1]=\text{Enthalpy}(\text{water}; T=T[1]; x=x[1])$

$s[1]=\text{Entropy}(\text{water}; P=P[1]; x=x[1])$

$T[1]=38[\text{C}]$

$v[1]=\text{Volume}(\text{water};P=P[1];x=x[1])$

"Point 2"

$P[2]=60[\text{bar}]$

$W_p=v[1]*(P[2]-P[1])$

$h[2]=\text{Enthalpy}(\text{water};T=T[2];P=P[2])$

$s[2]=\text{Entropy}(\text{water};h=h[2];P=P[2])$

$T[2]=105[^\circ\text{C}]$

$x[2]=0$

"Point 3"

$P[3]=100[\text{bar}]$

$T[3]=440[^\circ\text{C}]$

$h[3]=\text{Enthalpy}(\text{water};T=T[3];P=P[3])$

$s[3]=\text{Entropy}(\text{water};T=T[3];P=P[3])$

$x[3]=\text{Quality}(\text{water};T=T[3];s=s[3])$

"Point 4"

$P[4]=39[\text{bar}]$

$s[4]=s[3]$

$T[4]=323[^\circ\text{C}]$

$h[4]=\text{Enthalpy}(\text{Water};p=p[4];s=s[4])$

$x[4]=\text{Quality}(\text{water};T=T[4];s=s[4])$

"Point 5"

$T[5]=T[3]$

$p[5]=p[4]$

$x[5]=\text{Quality}(\text{water};T=T[5];s=s[5])$

$h[5]=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[5];p=p[5])$

$s[5]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[5];p=p[5])$

"Point 6"

$p[6]=4[\text{bar}]$

$s[6]=s[5]$

$T[6]=T[1]$

$h[6]=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[6];S=S[6])$

$x[6]=\text{Quality}(\text{Water};p=p[6];s=s[6])$

"Solution"

" le travail total de la pompe"

$$W_{pt}=(h[2]-h[1])$$

"Chaudière"

$$Q_{in}=((h[3]-h[2])+(h[5]-h[4]))$$

"Turbine"

$$W_t=((h[3]-h[4])+(h[5]-h[6]))$$

"Condenseur"

$$Q_{out}=(h[6]-h[1])$$

" Le travail net"

$$W_{net}=W_t-W_p$$

" le rendement"

$$Eta_{th}=(W_{net}/Q_{in})*100$$

### Points du cycle

Le tableau (6) présente les points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=50[\text{bar}]$

depuis logiciel EES

|     | 1                | 2              | 3                  | 4            | 5                             | 6     |
|-----|------------------|----------------|--------------------|--------------|-------------------------------|-------|
|     | $h_i$<br>[kJ/kg] | $P_i$<br>[bar] | $s_i$<br>[kJ/kg-K] | $T_i$<br>[C] | $v_i$<br>[m <sup>3</sup> /kg] | $x_i$ |
| [1] | 159,1            | 2              | 1,53               | 38           | 0,00106                       | 0     |
| [2] | 444,5            | 60             | 1,358              | 105          |                               | 0     |
| [3] | 3292             | 50             | 6,786              | 440          |                               | 100   |
| [4] | 3217             | 39             | 6,786              | 323          |                               | 100   |
| [5] | 3309             | 39             | 6,917              | 440          |                               | 100   |
| [6] | 2142             | 4              | 6,917              | 38           |                               | 100   |

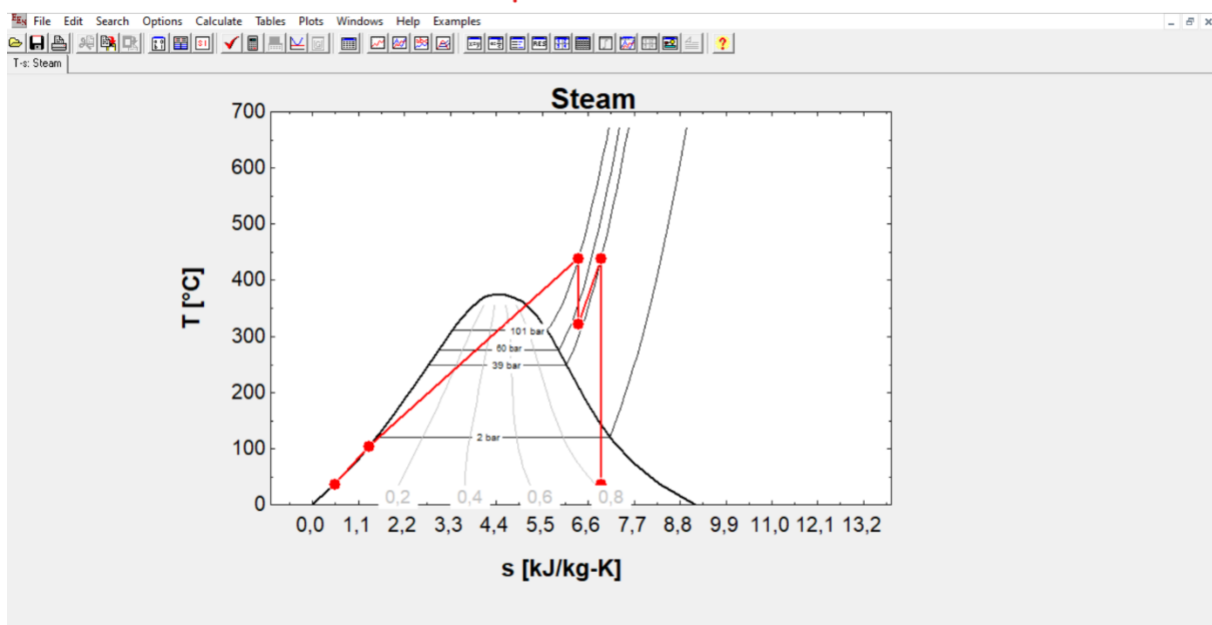
**Tableau 6** : Points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=50[\text{bar}]$ .

### Points du cycle

Le tableau (7) présente les points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=100[\text{bar}]$  depuis logiciel EES.

|     | 1                | 2              | 3                  | 4            | 5                             | 6     |
|-----|------------------|----------------|--------------------|--------------|-------------------------------|-------|
|     | $h_i$<br>[kJ/kg] | $P_i$<br>[bar] | $s_i$<br>[kJ/kg-K] | $T_i$<br>[C] | $v_i$<br>[m <sup>3</sup> /kg] | $x_i$ |
| [1] | 159,1            | 2              | 1,53               | 38           | 0,00106                       | 0     |
| [2] | 444,5            | 60             | 1,358              | 105          |                               | 0     |
| [3] | 3213             | 100            | 6,381              | 440          |                               | 100   |
| [4] | 2966             | 39             | 6,381              | 323          |                               | 100   |
| [5] | 3309             | 39             | 6,917              | 440          |                               | 100   |
| [6] | 2142             | 4              | 6,917              | 38           |                               | 100   |

**Tableau 7 :** Points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=100$ [bar].



**Figure 33:** Cycle de Rankine idéal avec resurchauffe (T-s)

### Points du cycle

Le tableau (8) présente les points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=150$ [bar]. depuis logiciel EES.

|     | 1                | 2              | 3                  | 4            | 5                             | 6     |
|-----|------------------|----------------|--------------------|--------------|-------------------------------|-------|
|     | $h_i$<br>[kJ/kg] | $P_i$<br>[bar] | $s_i$<br>[kJ/kg-K] | $T_i$<br>[C] | $v_i$<br>[m <sup>3</sup> /kg] | $x_i$ |
| [1] | 159,1            | 2              | 1,53               | 38           | 0,00106                       | 0     |
| [2] | 444,5            | 60             | 1,358              | 105          |                               | 0     |
| [3] | 3123             | 150            | 6,095              | 440          |                               | 100   |
| [4] | 2809             | 39             | 6,095              | 323          |                               | 100   |
| [5] | 3309             | 39             | 6,917              | 440          |                               | 100   |
| [6] | 2142             | 4              | 6,917              | 38           |                               | 100   |

**Tableau 8 :** Points du cycle de Hirn avec surchauffe avec  $P_3=150$ [bar].

c. **Performances du cycle de Rankine avec resurchauffe**

Le tableau (9) présente les performances du cycle de Hirn avec surchauffe.

| $P_3$<br>[bar] | $Q_{in}$<br>[kJ/kg] | $Q_{out}$<br>[kJ/kg] | $W_{net}$<br>[kJ/kg] | $W_{pt}$<br>[kJ/kg] | $W_t$<br>[kJ/kg] | $W_p$<br>[kJ/kg] | $\eta$<br>% |
|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------|
| 50             | 2939                | 1983                 | 1242                 | 285.4               | 1242             | 0.06151          | 42.26       |
| 100            | 3112                | 1983                 | 1415                 | 285.4               | 1415             | 0.06151          | 45.46       |
| 150            | 3178                | 1983                 | 1481                 | 285.4               | 1481             | 0.06151          | 46.6        |

**Tableau 9:** Performances du cycle de Hirn avec surchauffe en fonction de  $P_3$ .

**CHAPITRE 4**  
**INSTALATION**  
**Turbocompresseurs 103J**  
**Par HYSYS**

## **CHAPITRE 4 : INSTALATION Turbocompresseurs 103J Par HYSYS**

### **IV.1 Introduction**

Aspen HYSYS est un logiciel de simulation largement utilisé dans les secteurs du raffinage pétrolier et de l'industrie chimique. Développé par la société AspenTech, il s'impose comme un outil de référence grâce à ses nombreuses fonctionnalités.

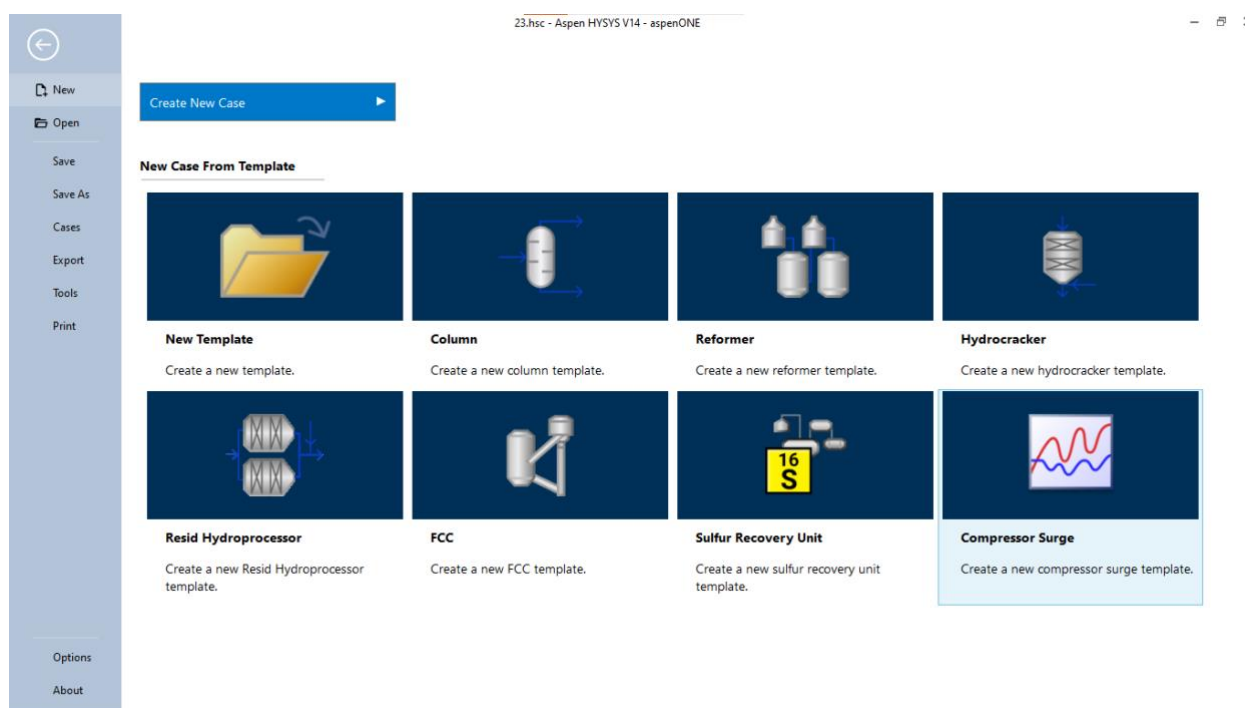
Parmi les principaux avantages de HYSYS, on peut citer :

- La capacité à calculer avec précision les propriétés physiques des fluides,
- La possibilité de simuler un large éventail d'équipements industriels, tels que les colonnes de distillation, les échangeurs de chaleur, les compresseurs ou encore les turbines,
- Une interface utilisateur intuitive, facilitant la prise en main du logiciel,
- Un moteur de calcul dynamique, qui n'exige pas que l'ensemble des données soit renseigné pour démarrer les calculs,
- Une mise à jour automatique des résultats à chaque modification des paramètres d'entrée,
- Une gestion claire des erreurs, permettant d'identifier rapidement les sources de dysfonctionnement dans le modèle.

### **IV.2 Dessin du système Turbocompresseurs 103J par Hysys**

#### **Premièrement**

En cliquant sur le bouton nouveau page nous obtenons le texte suivant.



**Figure 35** : Interface principale Hysys.

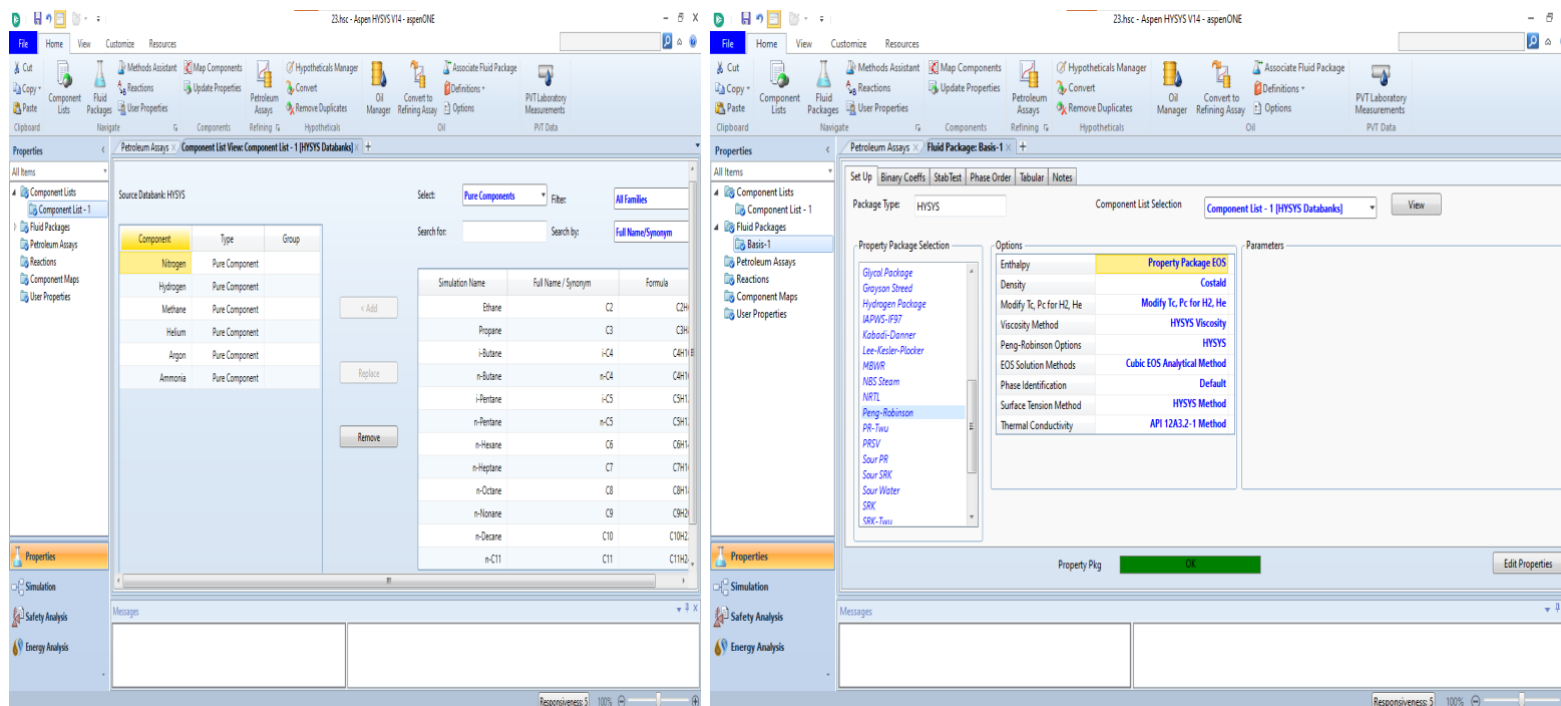
## Deuxièmement

Pour dessiner l'installation Turbocompresseurs 103J. On prend les compositions disponibles dans le menu des outils situés sur la gauche de l'écran:

Component lists>Add

### a) Composition Gaz de synthés :

| Composant             | % Molaire     |
|-----------------------|---------------|
| <b>N<sub>2</sub></b>  | <b>24,67</b>  |
| <b>H<sub>2</sub></b>  | <b>73,99</b>  |
| <b>CH<sub>4</sub></b> | <b>1,00</b>   |
| <b>He</b>             | <b>0,04</b>   |
| <b>Ar</b>             | <b>0,30</b>   |
| <b>Total</b>          | <b>100,00</b> |



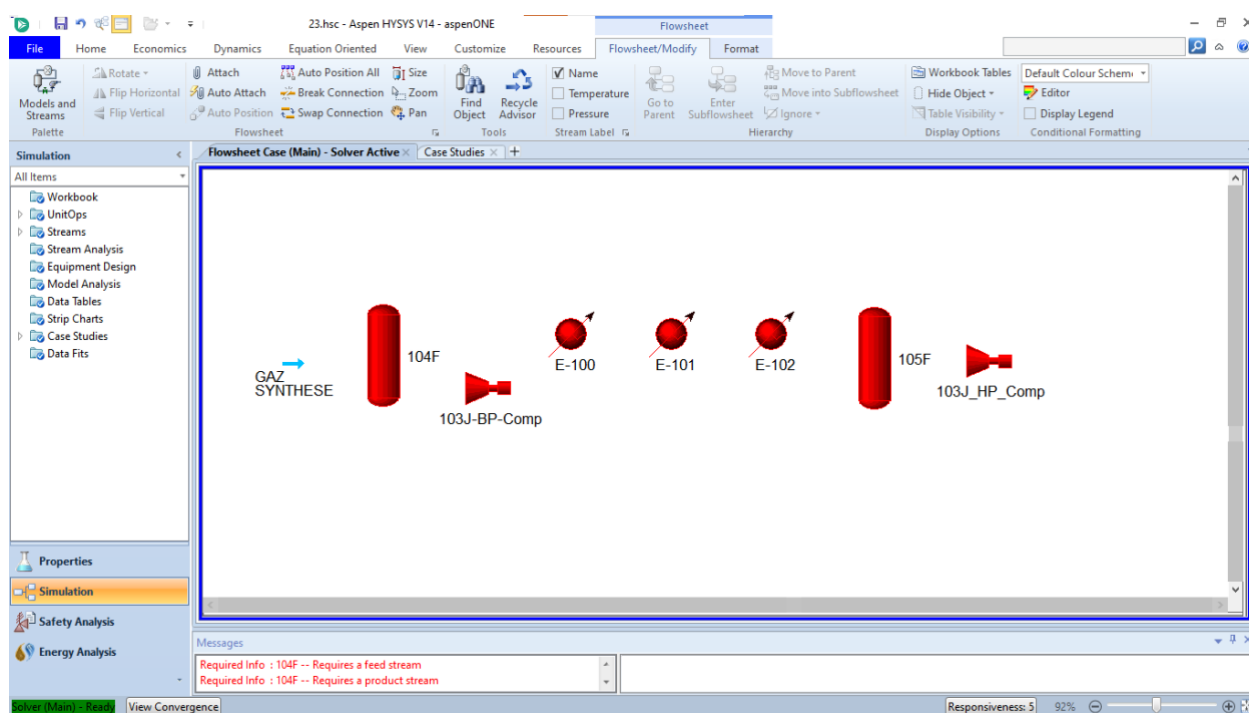
**Figure 36:** Compositions Gaz de synthés et combustible.

## Fluid Packages>Add>Peng-Robinson

### Troisièmement

Choisir les éléments disponibles dans le menu des outils situés sur la gauche de l'écran et on le met dans l'espace du dessin, comme il est illustré dans la figure 36.

On va faire l'insertion des données principales et nous relierons entre les éléments de l'installation de Turbocompresseurs 103J,



**Figure 37 :** Éléments de l'installation Turbocompresseurs 103J.

### IV.3 Calcul des performances de l'installation Turbocompresseurs 103J par Hysys

Données d'entrée

Cas de base : double étage de compression

Les paramètres principaux sont insérés par double clic sur chaque bloc :

**Gaz entrant (Gaz de synthés) :**

Température :  $T = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$

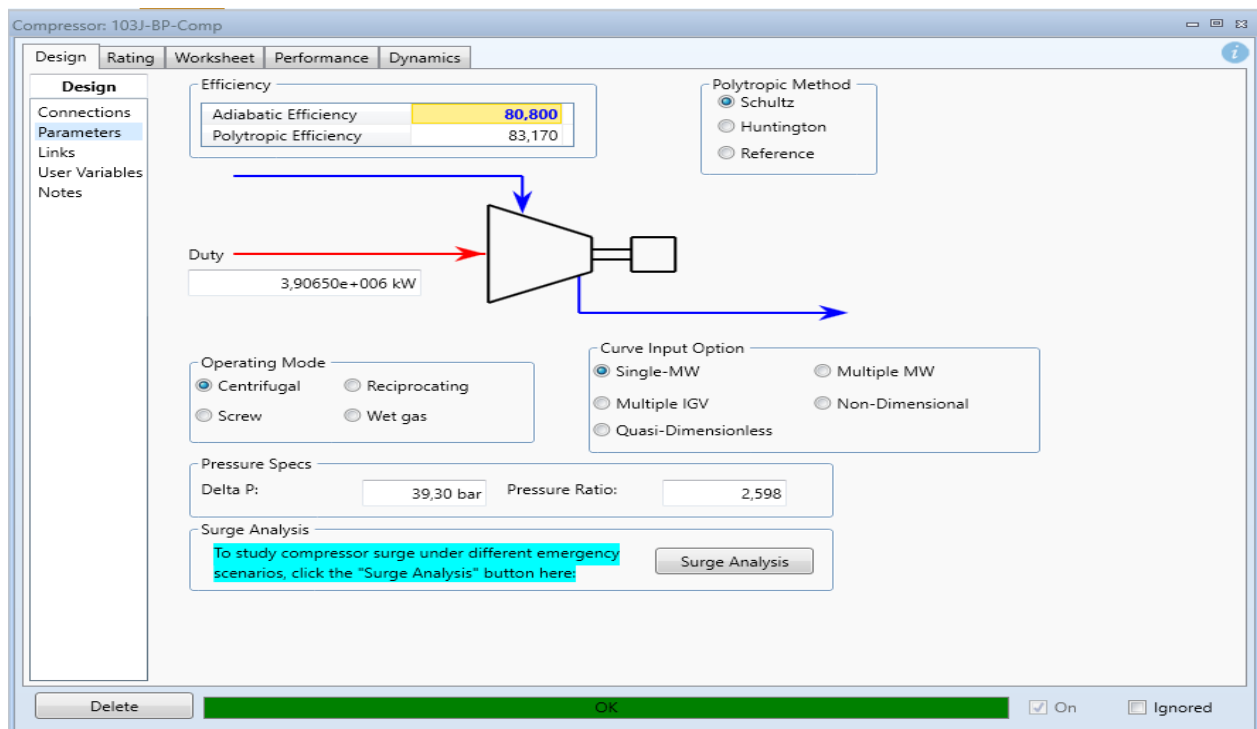
Pression d'entrée :  $P = 24.6\text{ bar}$

Débit massique :  $m = 120471\text{ Nm}_3/\text{h}$

**Compresseur 1 :**

Rapport de pression de compresseur  $\tau = 2.598$

Adiabatic Efficiency  $\eta = 0.808$



**Figure 38 :** Fenêtre des données de compresseur BP.

## Système de refroidissement

Le procédé comporte trois échangeurs de chaleur placés en série. Le fluide de procédé entre dans le premier échangeur à une température de 172 °C et est progressivement refroidi jusqu'à atteindre une température de 8 °C à la sortie du dernier échangeur

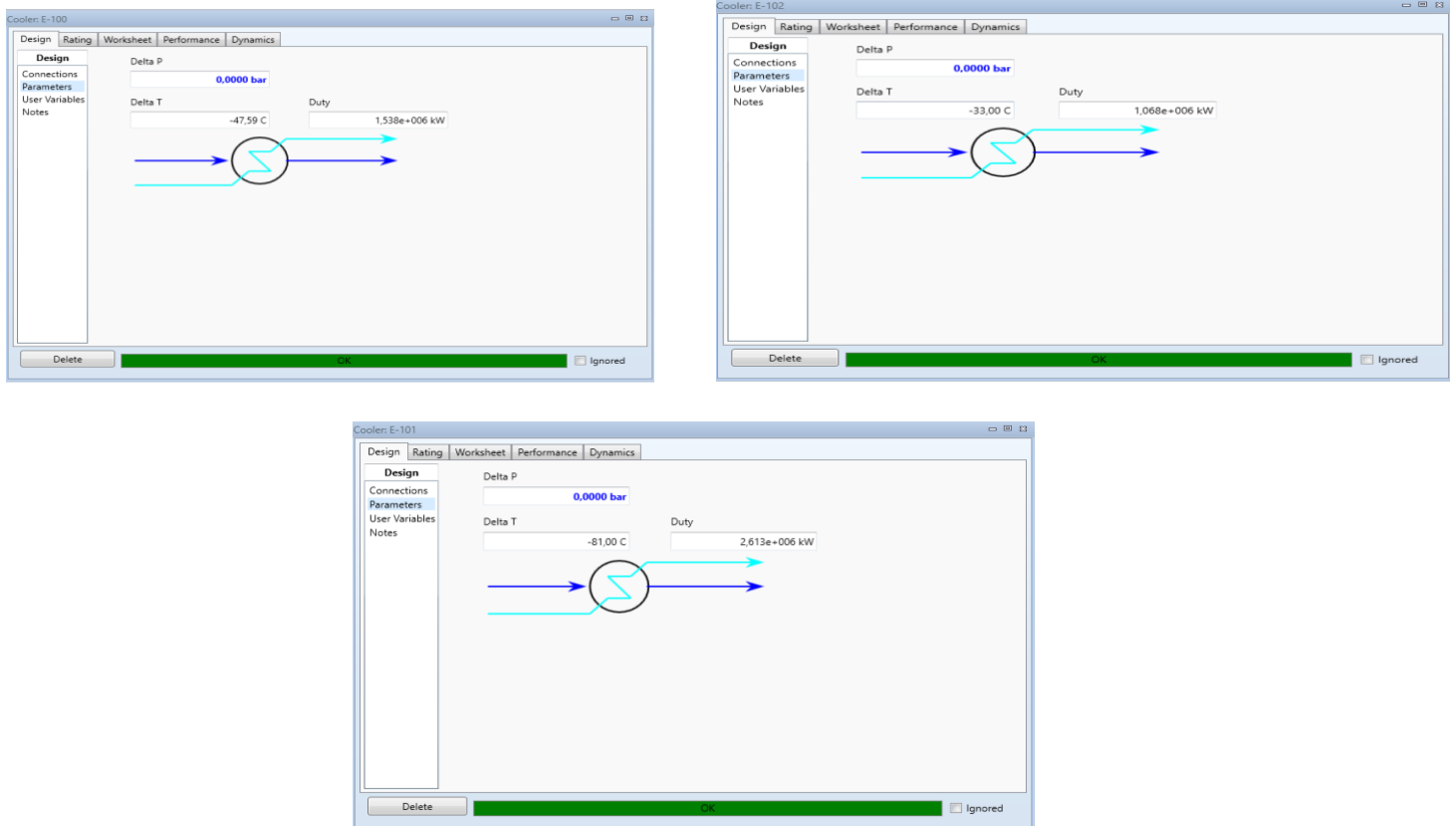


Figure 39: Fenêtre des données d'échangeur

## Compresseur 2 :

Adiabatique Efficiency  $\eta = 0.767$

Rapport de pression de compresseur  $\tau = 2.389$

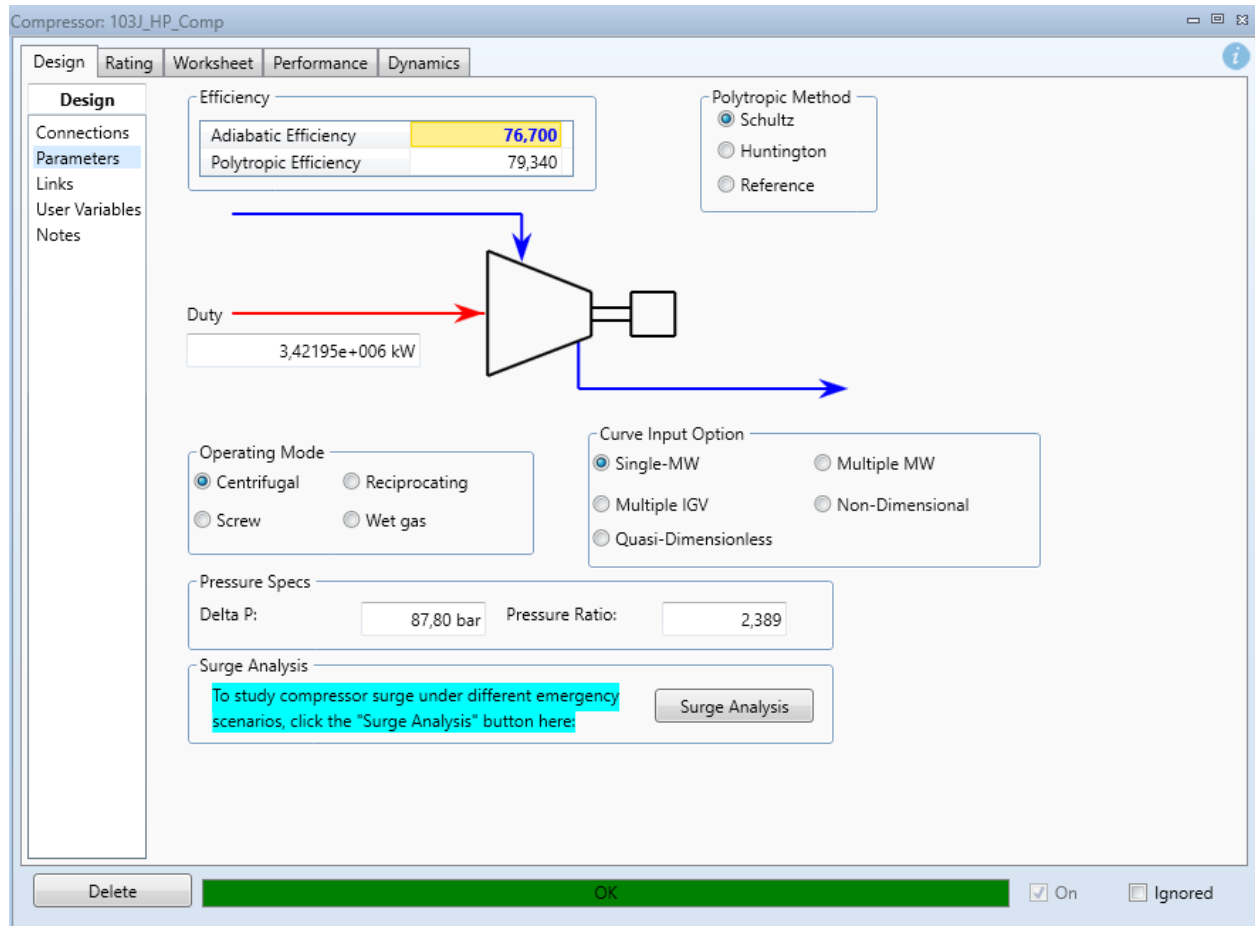
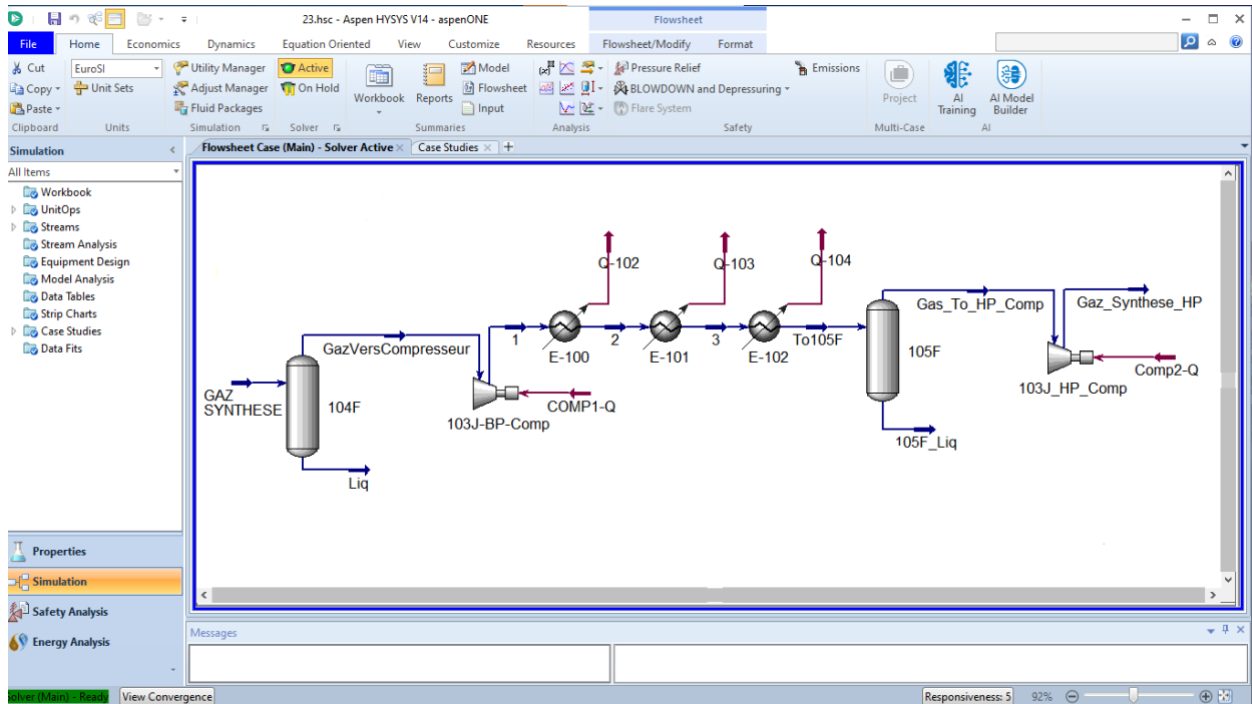


Figure 40 : Fenêtre des données de compresseur HP.

## Turbine à vapeur

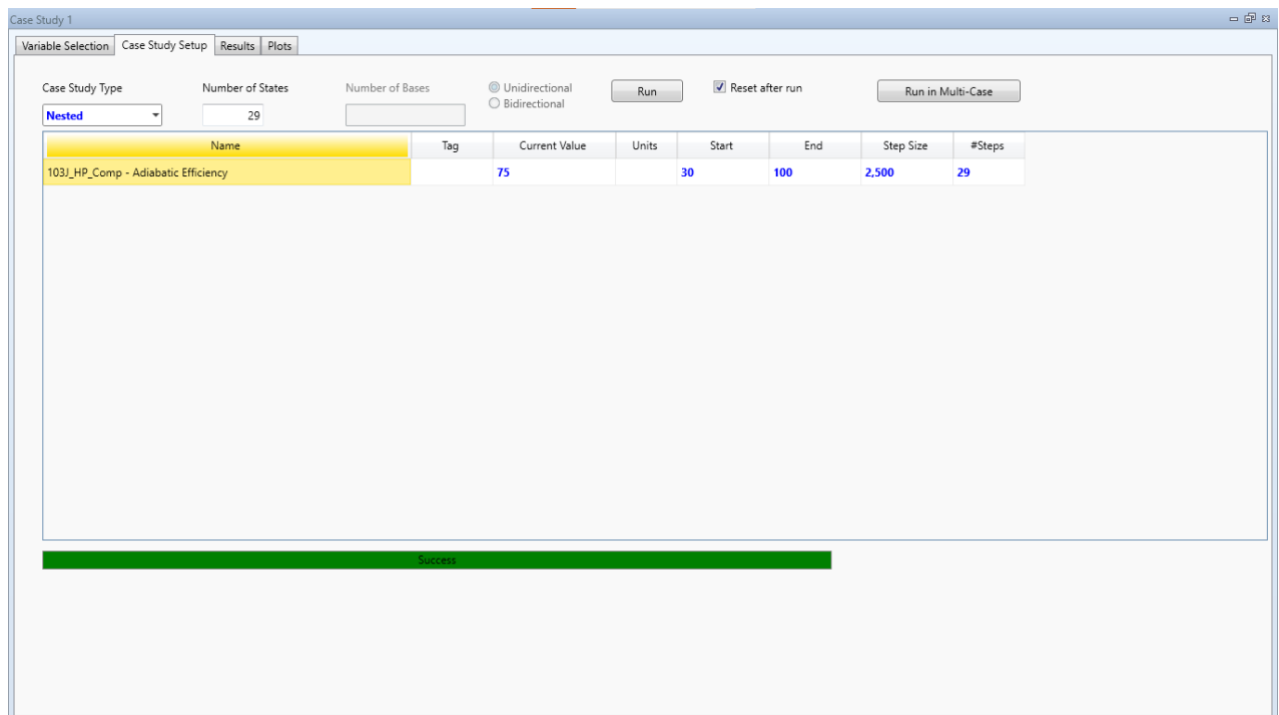
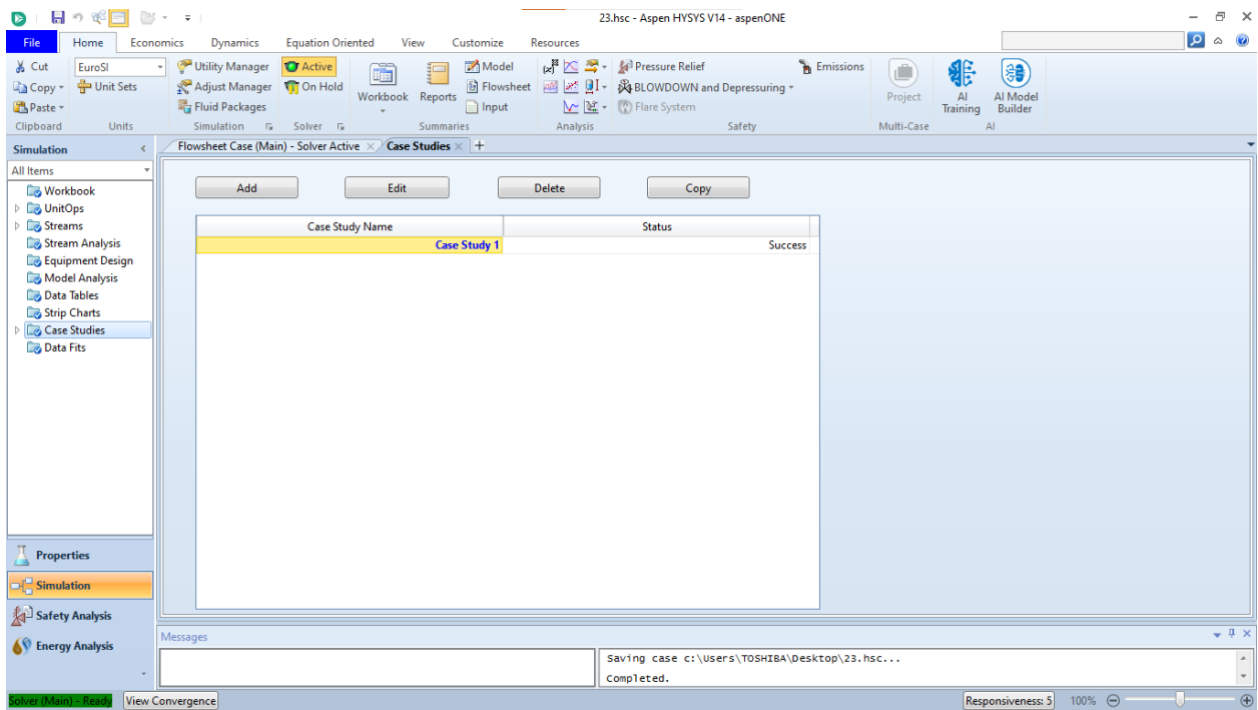
Deux turbines à vapeur fournissent une puissance mécanique de 20815 kW, destinée à l'entraînement du compresseur

## L'installation finale



### Figure 41 : Installation Turbocompresseurs 103J

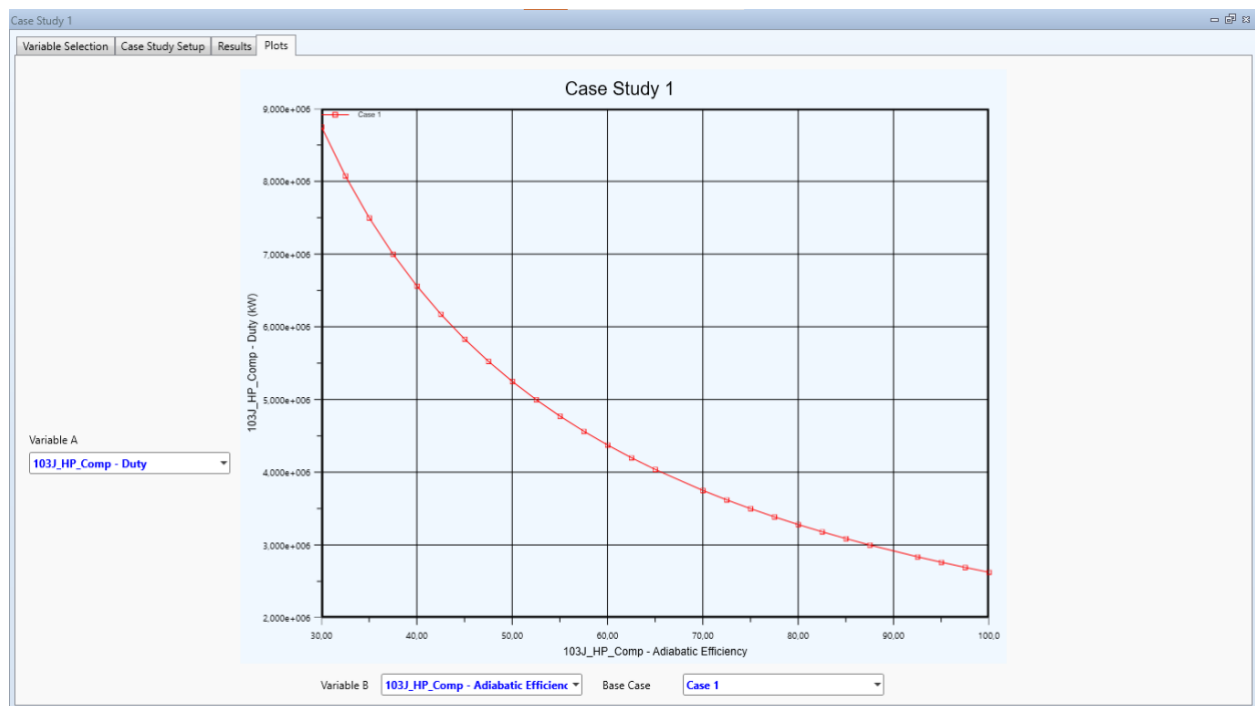
# Résultats



## CHAPITRE 4

| Case Study 1                                                                                                                 |                                     |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Variable Selection Case Study Setup Results Plots                                                                            |                                     |                          |
| Failed Cases: 0 Show: All <input checked="" type="checkbox"/> Transpose results <input type="button" value="Send to Excel"/> |                                     |                          |
| State                                                                                                                        | 103J_HP_Comp - Adiabatic Efficiency | 103J_HP_Comp - Duty [kW] |
| Case 1                                                                                                                       | 30                                  | 8,749e+006               |
| Case 2                                                                                                                       | 33                                  | 8,076e+006               |
| Case 3                                                                                                                       | 35                                  | 7,499e+006               |
| Case 4                                                                                                                       | 38                                  | 6,999e+006               |
| Case 5                                                                                                                       | 40                                  | 6,562e+006               |
| Case 6                                                                                                                       | 43                                  | 6,176e+006               |
| Case 7                                                                                                                       | 45                                  | 5,833e+006               |
| Case 8                                                                                                                       | 48                                  | 5,526e+006               |
| Case 9                                                                                                                       | 50                                  | 5,249e+006               |
| Case 10                                                                                                                      | 53                                  | 4,999e+006               |
| Case 11                                                                                                                      | 55                                  | 4,772e+006               |
| Case 12                                                                                                                      | 58                                  | 4,565e+006               |
| Case 13                                                                                                                      | 60                                  | 4,374e+006               |
| Case 14                                                                                                                      | 63                                  | 4,199e+006               |
| Case 15                                                                                                                      | 65                                  | 4,038e+006               |
| Case 16                                                                                                                      | 68                                  | <empty>                  |
| Case 17                                                                                                                      | 70                                  | 3,749e+006               |
| Case 18                                                                                                                      | 73                                  | 3,620e+006               |
| Case 19                                                                                                                      | 75                                  | 3,500e+006               |
| Case 20                                                                                                                      | 78                                  | 3,387e+006               |
| Case 21                                                                                                                      | 80                                  | 3,281e+006               |
| Case 22                                                                                                                      | 83                                  | 3,181e+006               |
| Case 23                                                                                                                      | 85                                  | 3,088e+006               |
| Case 24                                                                                                                      | 88                                  | 3,000e+006               |
| Case 25                                                                                                                      | 90                                  | <empty>                  |

**Tableau 10 : Résultats finaux de la adiabatique Efficiency**



**Figure 42 : Puissance utile en fonction du  $\eta$**

Une étude de cas a été menée afin d'évaluer l'influence du rendement adiabatique sur la puissance absorbée par le compresseur haute pression 103J. Les résultats obtenus sont présentés à la figure ci-dessous. Il en ressort une diminution nette de la puissance requise lorsque le rendement adiabatique augmente. Plus précisément, pour un rendement de 30 %, la puissance exigée dépasse 8,9 MW, tandis qu'à 100 % de rendement, elle chute à environ 2,9 MW. Cette tendance traduit une relation inversement proportionnelle entre les deux grandeurs. L'amélioration du rendement adiabatique réduit les pertes thermodynamiques lors de la compression, ce qui permet de limiter l'énergie nécessaire pour comprimer le gaz. Ces résultats soulignent l'intérêt d'optimiser l'efficacité adiabatique du compresseur afin de minimiser la consommation énergétique globale du procédé.

## **Conclusion**

La modélisation de l'installation des turbocompresseurs 103J réalisée dans ce chapitre à l'aide du logiciel Aspen HYSYS a permis de simuler avec précision les conditions de fonctionnement du procédé et d'évaluer ses performances. L'analyse des résultats a mis en évidence le rôle déterminant du rendement adiabatique dans la réduction de la puissance absorbée par les compresseurs. Une amélioration de ce rendement conduit à une diminution notable des pertes thermodynamiques et, par conséquent, à une meilleure efficacité énergétique de l'installation. Cette étude souligne ainsi l'importance de l'optimisation des paramètres de fonctionnement dans les systèmes industriels afin de limiter la consommation énergétique et d'améliorer les performances globales du procédé.

# Conclusion Générale

### Conclusion Générale

Cette étude a permis d'analyser en détail les principes de fonctionnement, les caractéristiques techniques et les performances des turbomachines, en mettant l'accent sur le turbocompresseur 103J utilisé dans l'unité d'ammoniac de FERTIAL. Les simulations thermodynamiques réalisées avec les logiciels EES et Aspen HYSYS ont démontré l'importance du cycle de Rankine avec resurchauffe et l'influence critique du rendement adiabatique sur l'efficacité énergétique des compresseurs. Les résultats obtenus soulignent que l'optimisation des paramètres opératoires, tels que la pression et la température, peut significativement améliorer les performances du système. Enfin, cette recherche met en évidence le rôle central des turbomachines dans les procédés industriels et ouvre des perspectives pour des études futures visant à renforcer leur fiabilité et leur durabilité. Ces travaux contribuent ainsi à une meilleure compréhension des enjeux énergétiques et technologiques liés à ces équipements essentiels.

# Référence Bibliographique

## Référence Bibliographique :

1. **Cortés, C. R. et Willems, D.** *Gas turbine inlet air cooling techniques: an overview of current technologies*. POWER-GEN Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 2003.
2. **Lallemand, André.** *Production d'énergie électrique par centrales thermiques*. Techniques de l'Ingénieur, Réf. D 4 002, 1195, pp. 1–11.
3. **Martin, J. et Wauters, P.** *Installations thermiques motrices : Analyse énergétique et exergétique*. 2<sup>e</sup> édition revue, Presses universitaires de Louvain, 2011.
4. **Bouam, A.** *Amélioration des performances des turbines à gaz utilisées dans l'industrie des hydrocarbures par l'injection de vapeur d'eau à l'amont de la chambre de combustion*. Mémoire de Doctorat, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 2009.
5. **Ramella, H. P.** *Maintenance des turbines à vapeur*. Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2002.
6. **Yunus A. Çengel et Michael A. Boles.** *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8<sup>e</sup> édition, McGraw-Hill, 2014, pp. 555–566.
7. **Goncalvès da Silva, Éric et Thibault, Jean-Paul.** *Cycles thermodynamiques des machines thermiques*. Éditions Cépaduès, Octobre 2008, p. 110.
8. **Klein, S. A. et Alvarado, F. L.** *EES – Engineering Equation Solver pour Microsoft Windows*. F-Chart Software, 1998.
9. **École Polytechnique de Montréal.** *EES – Engineering Equation Solver : Notions de base*. Montréal, Septembre 2018.
10. **Fertial – Unité d'ammoniac.** *Section turbocompresseurs 103J/JT*.
11. « **THERMODYNAMICS AN Engineering Approach** », YUNUS A.çengel, MICHAEL A.Boles, 2014, page 555,566
12. **Cycles thermodynamiques des machines thermiques**, Eric Goncalvès da Silva, Jean-Paul Thibault, octobre 2008, page 110.
13. **“EES Engineering Engineering Equation Solver Notions de base”**, école polytechnique Montréal, September 2018.

14. **“E E S Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows”**, S.A.Klein et F.L. Alvarado. 1198.