



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique.

## PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par :

- CHEBAB Amina
- NACERKHODJA Yasmine

Spécialité : Génie Mécanique.  
Option : Energétique.

## THEME

Evaluation de la production du froid par une machine à absorption  
alimenté par la récupération de chaleur résiduelle d'une turbine à gaz

Soutenu le : 29/ 06/2025

devant le jury composé :

- Président : Mr. LEKHAL Rachid - MCB
- Examinatrice : Mme. BAGHDADI Fazia - MCB
- Encadrant : Mr. ABERKANE Sofiane - MCA

2024/2025



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) شباب امينة . . . . .الصفة: طالبة

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 410022653 والصادرة بتاريخ 28.02.2024

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم الهندسة الميكانيكية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).  
عنوانها:

**Evaluation de la production du froid par une machine a absorption alimenté  
par la récupération de chaleur résiduelle d'une turbine à gaz**

تحت إشراف الأستاذ(ة): ابركان سفيان .

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة  
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2024/06/21

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



% 24.3

النسبة:

الامضاء:



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) ناصرخوجة ياسمين . الصفة: طالبة

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 414381520 والصادرة بتاريخ 19.02.2025

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم الهندسة الميكانيكية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها:

Evaluation de la production du froid par une machine a absorption alimenté  
par la récupération de chaleur résiduelle d'une turbine à gaz

تحت إشراف الأستاذ(ة): ابركان سفيان .

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة  
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2024/06/11

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

24.3 %

الامضاء:



## **Remerciement**

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de sagesse, de nous avoir guidés tout au long de ce parcours et permis d'achever ce travail dans les meilleures conditions.

À l'issue de ce mémoire, fruit de plusieurs mois de travail, d'efforts partagés, de doutes parfois, mais aussi de découvertes et d'enrichissement personnel et collectif, nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce projet.

Nous remercions tout d'abord notre encadrant [Mr. ABERKANE Sofiane], pour sa disponibilité, son écoute et la justesse de ses conseils. Son regard critique, toujours bienveillant, a su guider notre réflexion et donner du sens à notre démarche. Travailler sous sa direction a été aussi stimulant qu'enrichissant.

À travers ce mémoire, nous avons non seulement mis en application des savoirs acquis au fil des années, mais aussi découvert la force de la collaboration. Ce travail en binôme fut l'occasion d'un véritable partage de compétences, de responsabilités et de remises en question mutuelles dans un esprit de respect, d'écoute et de complémentarité. À ce titre, nous tenons à souligner la qualité de notre coopération, qui a été, sans aucun doute, l'un des éléments clés de la réussite de ce projet.

Nos remerciements vont également à nos enseignants et responsables pédagogiques, pour la richesse des enseignements dispensés tout au long de notre formation, et pour leur engagement dans la construction de notre parcours.

Enfin, nous réservons nos derniers mots de gratitude à nos familles et proches, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants, et leur confiance en nous, même dans les moments de fatigue ou de découragement. Leur présence à nos côtés a été notre plus grande source de motivation.

## Dédicace

Je dédie cet humble travail avec grand amour, sincérité et fierté À mon paradis, a la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie, à ma chère mère « FATIHA » Ton amour, ton soutien et tes prières ont été ma force dans chaque étape de ce parcours. Merci pour ta patience, tes sacrifices silencieux et ton encouragement constant. Ce mémoire est le fruit de ton dévouement et de ton amour inconditionnel.

À celui qui a fait de moi une femme forte À mon père « ABDERRAHMANE » Même si tu n'es plus là pour partager ce moment avec moi, ta présence reste vivante dans mon cœur. Ton souvenir m'a donné la force d'avancer et de croire en moi. Ton amour, tes conseils et ta force continuent de vivre en moi. Ce travail, je te le dédie avec fierté, en espérant qu'il aurait rendu ton regard fier. Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et t'ouvre les portes de Son paradis.

À mes chères sœurs, « AHLEM » et « IBTISSEM » Merci pour votre amour, votre soutien et votre présence dans ma vie. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles. Votre affection et vos encouragements m'ont porté jusqu'ici. Ce mémoire est aussi le vôtre.

À mon éternelle amie, ma confidente, mon âme sœur, mon binôme « AMINA », je ne compte plus les fois où ta présence m'a sauvé la morale. Chaque souvenir avec toi est un trésor que je garde précieusement. Je te remercie du fond du cœur pour ton soutien, ton écoute, ton humour ta force et ton amour.

À mon petit ange « Acil », mes grands-parents, mes chères tantes, cousins et cousines, mes chères amies précisément « NAHLA », Merci de m'avoir toujours encouragée à donner le meilleur de moi-même.

À mes chers camarades, Merci pour les échanges, le soutien mutuel et les moments partagés tout au long de ce parcours. Votre présence a rendu cette aventure plus riche, plus humaine et plus motivante. Je vous souhaite à tous réussite et épanouissement dans vos chemins respectifs.

**Yasmine**

## Dédicace

Je dédie ce mémoire à **ma famille**, pour leur amour, leur soutien sans faille et leur patience à chaque étape de ce parcours.

À ma maman, Ce travail est le fruit de ton amour, de ta force et de ton soutien constant. Grâce à toi, j'ai appris à croire en moi et à ne jamais abandonner. Je te dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon affection. Merci d'être toujours là, d'être mon modèle et ma source d'inspiration. Je t'aime profondément.

À mon père, Merci pour ton soutien, ta patience et ton amour. Ce travail est le fruit de tout ce que tu m'as appris. Je te le dédie avec tout mon cœur.

À mes deux frères, Merci pour être toujours là pour moi. Votre soutien m'a aidée à aller jusqu'au bout de ce travail. Je vous le dédie avec tout mon cœur.

À mon binôme, mon âme sœur, Merci pour ta collaboration, ton soutien et ta bonne humeur. Tu as été une véritable source de motivation, et ce travail n'aurait pas été le même sans toi. Ton amitié et ton engagement m'ont permis de franchir chaque étape avec confiance et sérénité. Je te dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon affection.

À mes cousines, Merci pour votre soutien, vos encouragements et vos moments de partage. Vous avez été une véritable source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de votre amitié et de votre présence à mes côtés.

**Amina**

## Résumé

L'industrie pétrolière est l'un des secteurs les plus consommateur d'énergie, La solution proposée est l'utilisation de machines à absorption pour transformer la chaleur résiduelle des turbines à gaz en froid utile, Cette solution est particulièrement bénéfique pour améliorer l'efficacité énergétique dans le domaine pétrolier.

L'objectif de notre travail est de réaliser l'intégration d'une machine à absorption utilisant le mélange eau/ammoniac ( $H_2O/NH_3$ ) comme fluide de travail pour la récupération de la chaleur résiduelle d'une turbine à gaz à partir des gaz d'échappement, La simulation sera réalisée avec le logiciel Aspen HYSYS V.14 pour analyser les performances de cette machine de cette machine.

L'application de cette intégration à la centrale électrique de F'Kirina a permis d'augmenter le rendement total passant de 34 % à 64.7% pour la centrale de production combinée du froid et d'électricité CCP (Combined Cooler and Power).

**Mots Clés :** turbine à gaz, machines à absorption eau -ammoniac, chaleur résiduelle, Aspen Hysys, COP.

## Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

### **Chapitre 1 : Généralités sur les turbines à gaz et les machines à absorption**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I. Turbine à gaz .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1. Historique de la turbine à gaz .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Définition de la turbine à gaz .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3. Composants de la turbine à gaz .....</b>	<b>3</b>
I.3.1. Compresseur .....	3
I.3.2. Chambre de combustion .....	4
I.3.3. Turbine .....	5
<b>I.4. Principe de fonctionnement de la turbine à gaz .....</b>	<b>6</b>
<b>I.5. Cycle thermodynamique de la turbine à gaz .....</b>	<b>7</b>
I.5.1. Cycle idéal de Brayton.....	7
I.5.2. Cycle réel de Brayton.....	8
<b>I.6. Classification des turbines à gaz .....</b>	<b>9</b>
I.6.1. D'après le mode de construction.....	9
I.6.1.1. Turbine mono-arbre .....	9
I.6.2. Turbine bi-arbre .....	10
I.6.3. Mode de travail .....	10
I.6.3.1. Turbine à action .....	10
I.6.3.2. Turbine à réaction .....	10
I.6.4. Mode de fonctionnement thermodynamique .....	11
I.6.4.1. Turbine à gaz à cycle fermé .....	11



I.6.4.2. Turbine à cycle ouvert .....	11
<b>I.7. Domaine d'application .....</b>	<b>12</b>
<b>I.8. Avantages et inconvénients.....</b>	<b>13</b>
I.8.1. Avantages .....	13
I.8.2. Inconvénients .....	13
<b>II. Applications de la récupération de la chaleur résiduelle.....</b>	<b>13</b>
<b>II.1. Production de chaleur .....</b>	<b>13</b>
II.1.1. Principe de fonctionnement de la chaudière de récupération .....	13
II.2.2. Diagramme T-Q d'une chaudière de récupération .....	15
<b>II.2. Production de froid.....</b>	<b>16</b>
<b>II.3. Production d'électricité .....</b>	<b>17</b>
<b>III. Machine à absorption NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O.....</b>	<b>18</b>
<b>III.1. Historique de la production du froid.....</b>	<b>18</b>
<b>III.2. Historique de la machine à absorption.....</b>	<b>18</b>
<b>III.3. Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique.....</b>	<b>19</b>
<b>III.4. Différentes techniques de production du froid .....</b>	<b>19</b>
<b>III.5. Machine frigorifique .....</b>	<b>20</b>
<b>III.6. Définition de machine à absorption.....</b>	<b>21</b>
<b>III.7. Fonctionnement de chaque composant de la machine à absorption (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) .....</b>	<b>21</b>
<b>III.8. Diagrammes utilisée .....</b>	<b>23</b>
III.8.1. Diagramme d'Oldham .....	23
III.8.2. Diagramme de Merkel .....	23
<b>III.9. Avantages et inconvénients du couple fluide (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O).....</b>	<b>25</b>
III.9.1. Avantages .....	25
III.9.2. Inconvénients .....	25

## **CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE A GAZ.**

<b>II.1. Présentation du cas d'étude (turbine à gaz) .....</b>	<b>26</b>
II.1.1. Description de la centrale .....	26
<b>II.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS .....</b>	<b>29</b>
II.2.1. Description Du logiciel Aspen HYSYS .....	29

II.2.2. Concepts de base de simulateur HYSYS .....	29
II.2.3. Environnement de simulation .....	30
II.2.4. Caractéristiques principales de HYSYS .....	31
II.2.5. Structure générale de HYSYS .....	32
II.2.6. Modèles thermodynamiques de HYSYS .....	33
II.2.6.1. Equations d'état .....	33
II.2.6.2. Equations de REDLICH-K WONG (RK) .....	33
II.2.6.3. Equations de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK) .....	34
II.2.6.4. Equations de PENG- ROBINSON .....	34
II.2.6.5. Etapes d'utilisation du logiciel HYSYS .....	35
<b>II.3. Etapes de simulation de la centrale .....</b>	<b>35</b>
<b>II.4. Validation de la simulation .....</b>	<b>49</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>50</b>

### **CHAPITRE III : INTEGRATION DE LA MACHINE A ABSORPTION.**

<b>III.1. Présentation du nouveau système CCP .....</b>	<b>51</b>
<b>III.2. Etapes de simulation .....</b>	<b>52</b>
III.2.1. Première étape : Propriétés .....	52
III.2.1.1. Composants .....	52
III.2.1.2. Fluid packages .....	53
III.2.2. Deuxième étape : Simulation .....	53
III.2.3. Refroidisseur .....	60
<b>III.3. Rendement global.....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>

### **CHAPITRE IV : RESULTATS ET L'INTERPRETATION.**

<b>IV. Introduction .....</b>	<b>64</b>
<b>IV.1. Validation de résultats de la turbine à gaz.....</b>	<b>64</b>
<b>IV.2. Validation de la machine à absorption .....</b>	<b>64</b>

IV.2.1. Performances de la machine à absorption .....	65
IV.2.2. Valeurs des échangeurs de chaleurs (UA) .....	65
<b>IV.3. Résultats de couplage .....</b>	<b>65</b>
IV.3.1. Valeurs des échangeurs de chaleurs (UA) .....	66
IV.3.2. Résultats de la nouvelle machine à absorption .....	66
IV.3.3. Nouvelles performances de la machine à absorption .....	67
<b>IV.4. Calcul du rendement .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.5. Bilan Carbone .....</b>	<b>68</b>
IV.5.1. Emissions de CO <sub>2</sub> .....	68
IV.5.2. Consommation du carburant .....	69
<b>Conclusion .....</b>	<b>70</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>71</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>73</b>

## Liste des Figures

### Chapitre 1 : Généralités sur les turbines à gaz et les machines à absorption

<b>Figure I.1</b> : Turbine à gaz .....	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b> : Les composants de la turbine à gaz.....	<b>3</b>
<b>Figure I.3</b> : Schéma de rotor et stator du Compresseur axial.....	<b>4</b>
<b>Figure I.4</b> : Schéma du fonctionnement d'une chambre à combustion .....	<b>5</b>
<b>Figure I.5</b> : Dessin d'un étage d'une turbine.....	<b>6</b>
<b>Figure I.6</b> : Le principe de fonctionnement de la turbine à gaz .....	<b>6</b>
<b>Figure I.7</b> : Diagrammes (P-V) et (T-s) pour un cycle idéal de Brayton .....	<b>7</b>
<b>Figure I.8</b> : Diagrammes (P-V) et (T-s) pour un cycle réel de Brayton.....	<b>8</b>
<b>Figure I.9</b> : Classification des turbines à gaz .....	<b>9</b>
<b>Figure I.10</b> : Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre .....	<b>9</b>
<b>Figure I.11</b> : Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre .....	<b>10</b>
<b>Figure I.12</b> : Schéma d'une turbine à action et à réaction .....	<b>11</b>
<b>Figure I.13</b> : Cycle fermé .....	<b>11</b>
<b>Figure I.14</b> : Cycle ouvert .....	<b>12</b>
<b>Figure I.15</b> : Principe de récupération de chaleur .....	<b>14</b>
<b>Figure I.16</b> : Différents éléments d'une chaudière de récupération .....	<b>14</b>
<b>Figure I.17</b> : Représentation du pincement et de l'approche.....	<b>15</b>
<b>Figure I.18</b> : Diagramme T-Q d'une chaudière de récupération .....	<b>15</b>
<b>Figure I.19</b> : Schéma de principe d'un système de production de froid et de chaleur .....	<b>16</b>
<b>Figure I.20</b> : Une centrale à cycle combiné : turbine à gaz-turbine à vapeur .....	<b>17</b>
<b>Figure I.21</b> : Schéma de principe de fonctionnement d'une machine frigorifique.....	<b>19</b>
<b>Figure I.22</b> : Structure d'une machine à absorption .....	<b>21</b>
<b>Figure I.23</b> : Machine à absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) .....	<b>22</b>
<b>Figure I.24</b> : Diagramme d'Oldham .....	<b>23</b>
<b>Figure I.25</b> : Diagramme de Merkel .....	<b>24</b>

## **CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE A GAZ.**

<b>Figure II.1 : Le Schéma de la centrale électrique .....</b>	<b>27</b>
<b>Figure II.2 : Environnements de développement dans HYSYS .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II.3 : Structure générale du HYSYS .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.4 : Fenêtre du ASPEN HYSYS V14 .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.5 : Les composants de différentes entrées de la centrale .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.6 : Liste de fluides packages .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.7 : Fenêtre des réactions créent.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.8 : Réaction de méthane.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.9 : Réaction de Ethane .....</b>	<b>39</b>
<b>Figure II.10 : Réaction de propane .....</b>	<b>39</b>
<b>Figure II.11 : Réaction de i-Butane .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure II.12 : Fenêtre des composants de l'air .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure II.13 : Fenêtre des conditions d'entrée d'air .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.14 : Présentation de compresseur .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.15 : Installation de compresseur .....</b>	<b>42</b>
<b>Figure II.16 : Fenêtre de paramètre de compresseur .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure II.17 : Fenêtre des composants de gaz naturel.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure II.18 : Fenêtre des conditions d'entrée de gaz naturel .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure II.19 : Présentation de la chambre de combustion .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure II.20 : Installation de la chambre de combustion .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.21 : Fenêtre de réaction dans la chambre de combustion .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.22 : Présentation de la turbine .....</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.23 : Installation de la turbine .....</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.24 : Fenêtre des paramètres de la turbine .....</b>	<b>47</b>
<b>Figure II.25 : Présentation de la balance .....</b>	<b>47</b>
<b>Figure II.26 : Installation du Balance .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure II.27 : Caractéristiques de la centrale électrique aux conditions de fonctionnement ..</b>	<b>49</b>

### **CHAPITRE III : INTEGRATION DE LA MACHINE A ABSORPTION.**

<b>Figure III.1 :</b> Couplage entre la turbine à gaz et la machine à absorption eau ammoniac.....	<b>51</b>
<b>Figure III.2 :</b> Fenêtre de Composants de la machine .....	<b>52</b>
<b>Figure III.3 :</b> Fenêtre de la liste de fluides packages .....	<b>53</b>
<b>Figure III.4 :</b> Installation d'une pompe .....	<b>53</b>
<b>Figure III.5 :</b> Installation d'un échangeur de chaleur SHX .....	<b>54</b>
<b>Figure III.6 :</b> Installation de heater .....	<b>55</b>
<b>Figure III.7 :</b> Installation de générateur .....	<b>55</b>
<b>Figure III.8 :</b> Installation de détendeur 2 .....	<b>56</b>
<b>Figure III.9 :</b> Installation de Mixeur .....	<b>57</b>
<b>Figure III.10 :</b> Installation de Mixeur 1 .....	<b>57</b>
<b>Figure III.11 :</b> Installation de Condenseur.....	<b>58</b>
<b>Figure III.12 :</b> Installation d'un échangeur de chaleur RHX .....	<b>58</b>
<b>Figure III.13 :</b> Installation de détendeur 2 .....	<b>59</b>
<b>Figure III.14 :</b> Installation d'un échangeur de chaleur EVAP .....	<b>59</b>
<b>Figure III.15:</b> Installation d'absorbeur .....	<b>60</b>
<b>Figure III.16 :</b> Installation de Cooler .....	<b>60</b>
<b>Figure III.17 :</b> Simulation d'une machine à Absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) .....	<b>61</b>

### **CHAPITRE IV : RESULTATS ET L'INTERPRETATION.**

<b>Figure IV.1 :</b> Comparaison des émissions de $\text{CO}_2$ pour la configuration étudiée.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.2 :</b> Comparaison de la consommation spécifique du carburant.....	<b>70</b>

## Liste des Tableaux

### **Chapitre 1 : Généralités sur les turbines à gaz et les machines à absorption**

<b>Tableau I.1</b> : Les différents phénomènes de production de froid .....	<b>20</b>
---	-----------

### **CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE A GAZ.**

<b>Tableau II.1</b> : Composition du gaz naturel .....	<b>26</b>
<b>Tableau II.2</b> : Propriétés du gaz naturel.....	<b>26</b>
<b>Tableau II.3</b> : Conditions de fonctionnement de la conception de la centrale.....	<b>28</b>

### **CHAPITRE III : INTEGRATION DE LA MACHINE A ABSORPTION.**

<b>Tableau III.1</b> : Les conditions de fonctionnement du système .....	<b>52</b>
<b>Tableau III.2</b> : Éléments de couplage avec leurs données d'entrée .....	<b>62</b>

### **CHAPITRE IV : RESULTATS ET L'INTERPRETATION.**

<b>Tableau IV.1</b> : Comparaison entre les valeurs de la simulation et les valeurs de Khaldi.....	<b>64</b>
<b>Tableau IV.2</b> : Validation de la simulation de système absorption avec logiciel Aspen HYSYS V.14.....	<b>64</b>
<b>Tableau IV.3</b> : Résultats des performances de système absorption.....	<b>65</b>
<b>Tableau IV.4</b> : Les valeurs de UA calculée à une température de l'air 35 °C .....	<b>65</b>
<b>Tableau IV.5</b> : Les valeurs de refroidisseurs à partir de Aspen HYSYS.....	<b>66</b>
<b>Tableau IV.6</b> : Résultats de couplage par logiciel Aspen HYSYS .....	<b>66</b>
<b>Tableau IV.7</b> : Résultats des performances de nouveau système .....	<b>67</b>
<b>Tableau IV.8</b> : Valeurs des rendements globaux .....	<b>67</b>
<b>Tableau IV.9</b> : Emission de CO <sub>2</sub> .....	<b>68</b>
<b>Tableau IV.10</b> : Temps de fonctionnement annuel de la centrale à turbine à gaz .....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.11</b> : Énergie fournie par année.....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.12</b> : La consommation spécifique de carburant de deux systèmes .....	<b>70</b>

## Liste des Symboles

Symbole	Désignation et Unité
T	Température, [°C]
P	Pression, [bar]
Q	Energie fournie dans la chambre de combustion, [kJ/kg]
$W_{net}$	Travail net, [kJ/kg]
$exch$	exergie chimique [KJ/kg]
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieure [KJ/kg]
d	La densité [kg/Nm <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$	Débit massique kg/s
V	Volume [m <sup>3</sup> ]
m	Masse [kg]
A	Surface [m <sup>2</sup> ]
W	La puissance [KW]
R	Constante universelle des gaz parfaits
$\pi_c$	Rapport de compression
$\gamma$	Coefficient adiabatique
$\tau$	Taux de compression
$\eta$	Rendement
$\eta_{th}$	Rendement thermique
$\eta_{plt\ c}$	Rendement polytropique du compresseur
$\eta_{HRSG}$	Rendement thermique d'une chaudière de récupération
$\omega$	Facteur acentrique
$\epsilon$	Rapport d'exergie chimique

### Indices inférieurs, indices supérieurs :

c	compresseur
t	turbine
th	thermique
ply	polytropique
f	Combustible
is	isentropique
Gen	Générateur
mé	mécanique
a	Air
ac	Air comprimé



**Abréviation :**

TAG	Turbine à gaz
HP	Haute pression
BP	Basse pression
HRSG	Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur
RK	Equation de Redlich-Kwong
SRK	Equation de Soave-Redlich-Kwong
PR	Equation d'état de Peng-Robinson
CA	Compresseur axial
CC	Chambre de combustion
G	Générateur
CCP	Combined Cooling and Power
ABS	Absorbeur
EVAP	Evaporateur
Rec	Rectificateur
MIX	Mixeur
RHX	Échangeur de chaleur de refroidissement
SHX	Échangeur de chaleur de la solution
MA	Machine Absorption

# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et l'urgence climatique, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes industriels devient une priorité stratégique. De nombreuses installations produisent de grandes quantités de chaleur résiduelle, souvent rejetée sans valorisation, ce qui constitue une perte énergétique importante. La récupération et l'exploitation de cette chaleur perdue représentent ainsi un levier essentiel pour optimiser la consommation énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les solutions innovantes permettant de valoriser cette chaleur résiduelle, les machines à absorption se distinguent par leur capacité à produire du froid sans recourir à une source électrique importante, utilisant à la place une source de chaleur comme énergie motrice. Ce type de technologie devient particulièrement pertinent lorsqu'il est associé à des systèmes de production d'énergie tels que les turbines à gaz, qui rejettent une quantité significative de chaleur sous forme de gaz d'échappement à haute température.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en étudiant la production de froid par une machine à absorption alimentée par la récupération de chaleur résiduelle d'une turbine à gaz. L'objectif principal est d'évaluer les performances thermodynamiques d'un tel couplage à l'aide d'une simulation réalisée sous le logiciel Aspen HYSYS V.14, un outil puissant et largement utilisé dans l'industrie pour la modélisation de procédés énergétiques complexes.

### La structure du mémoire

Le travail est structuré autour de plusieurs axes principaux. Dans un premier temps, une revue théorique des concepts liés à la turbine à gaz, à la récupération de chaleur, et aux machines à absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) sera présentée. Ensuite, la méthodologie de simulation utilisée dans Aspen HYSYS sera décrite, en détaillant les modèles thermodynamiques choisis, les paramètres d'entrée, et les conditions de fonctionnement. Enfin, les résultats obtenus seront analysés, en mettant l'accent sur la performance énergétique globale du système couplé, les quantités de froid produites, et les possibilités d'optimisation.

À travers cette étude, l'objectif est de contribuer à la valorisation énergétique des rejets thermiques industriels, et de proposer une solution concrète pour améliorer la durabilité des systèmes de production énergétique en intégrant des technologies complémentaires.

# **Chapitre 1 : Généralités sur les turbines à gaz et les machines à absorption**

### **I. Turbine à gaz**

#### **I.1 Historique de la turbine à gaz**

La turbine à gaz a été inventée en 1629 par Giovanni Branca, qui a conçu une machine actionnant une roue reliée à une presse. Plusieurs améliorations ont été apportées au fil des siècles.

En 1791, John Barber a conçu un appareil hybride combinant un compresseur, Entre 1820 et 1833, Claude Bourdin, professeur français, créa plusieurs installations de machines hydrauliques, les appelant turbines, du latin « turbins » signifiant « tourner ». Les turbines Fourneyron, introduites en 1844, ont constitué une percée notable en Europe et aux États-Unis. Les turbines à gaz commencèrent à être produites à la fin du XIXe et au début du XXe siècle.

La première turbine à gaz capable de produire de l'électricité aurait été établie par Elling En 1903, suivie en 1906 par le premier turbomoteur autonome français.

En 1910, Henri Coanda a fait l'essai d'un avion équipé d'une turbine à gaz. C'est seulement dans les années 1930 la turbine à gaz a connu un développement important en Europe et aux États-Unis, étant utilisée efficacement pour la production d'électricité à partir de 1950.

En 1940, Secundo Compini a apporté sa contribution au développement du turbopropulseur, tandis que Frank Whittle, reconnu comme le père de la turbine à gaz moderne [1].

#### **I.2 Définition de la turbine à gaz**

Une turbine à gaz est un dispositif moteur indépendant qui opère grâce à la combustion interne. On peut la qualifier de système autonome. Elle absorbe et comprime l'air atmosphérique à travers son compresseur axial, où elle augmente son énergie dans la chambre de combustion en brûlant du carburant sous pression constante et transforme cette puissance en énergie mécanique utile lors des processus d'expansion des gaz chauds dans la section turbine.

L'énergie générée est transmise à un appareil récepteur afin d'approvisionner les opérations industrielles « Alternateurs, pompes centrifuges, compresseurs des gaz ...etc. » [2] [3].

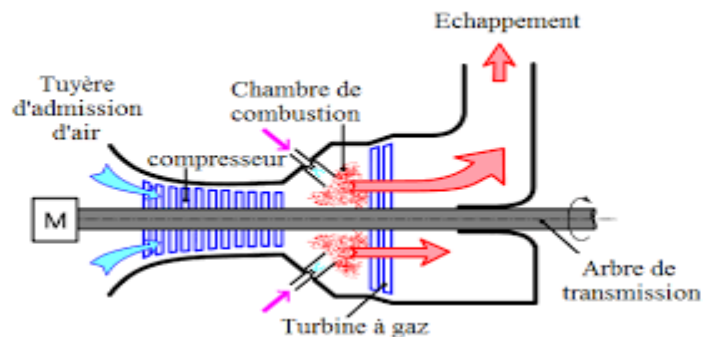


**Figure I.1 :** Turbine à gaz.

### **I.3 Les éléments de la turbine à gaz [4] :**

La turbine à gaz est constituée de trois éléments principaux :

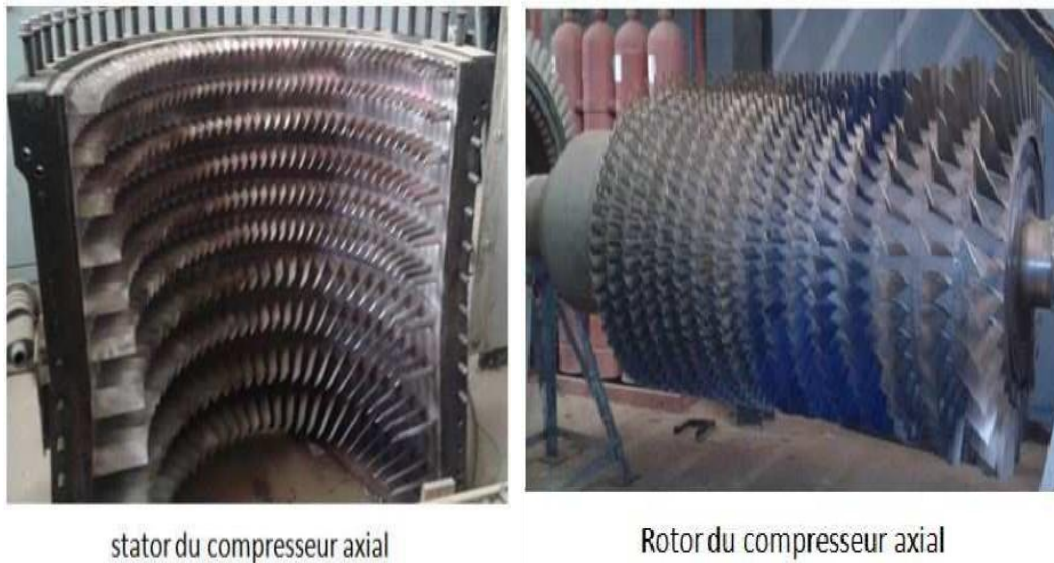
- Le compresseur à écoulement axial ou centrifuge.
- La chambre de combustion.
- La turbine.



**Figure I.2 :** Les éléments de la turbine à gaz.

#### **I.3.1 Compresseur**

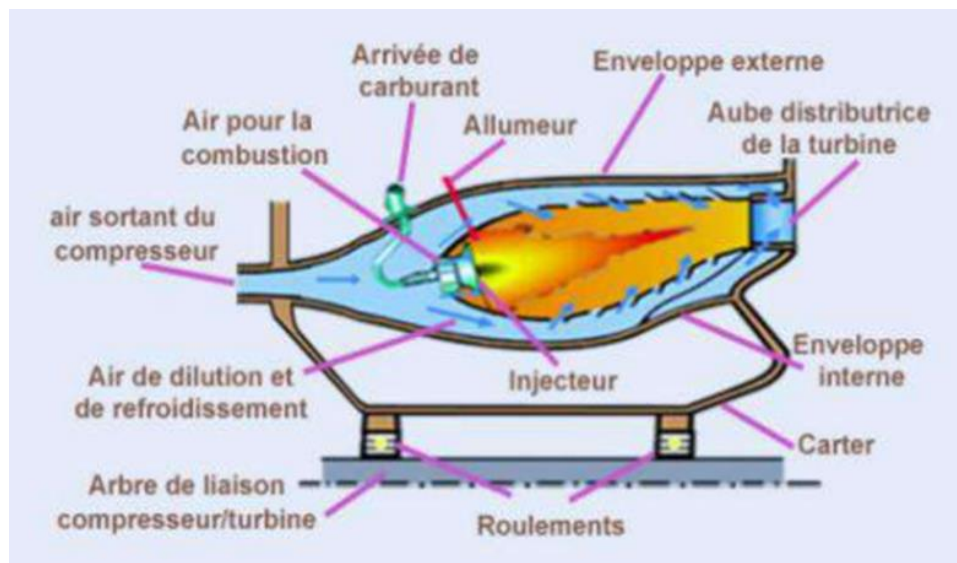
Un compresseur se compose de plusieurs étages d'aubes mobiles qui amplifient la vitesse de l'air, suivis par des étages d'aubes fixes qui convertissent cette énergie cinétique en haute pression. Le nombre d'étages varie en fonction de la conception de la turbine à gaz et du taux de compression nécessaire. Sa fonction principale est d'orienter l'air, fourni par le système d'aspiration, vers la première série d'aubes du rotor.



**Figure I.3:** Schéma de rotor et stator du Compresseur axial.

### I.3.2 Chambre de combustion

La chambre de combustion, située entre le compresseur et la turbine, est généralement en forme torique et est parfois appelée foyer ou tube à flamme. Elle brûle un mélange d'air comprimé et de carburant pour produire la chaleur nécessaire au cycle de la turbine à gaz, en dégageant les gaz issus de cette combustion vers la turbine (conversion de l'énergie potentielle chimique contenue dans le carburant en énergie thermique). Son objectif est de chauffer l'air comprimé pour fournir l'énergie nécessaire à l'entraînement des turbines et générer la poussée dans la tuyère des avions.



**Figure I.4 :** Schéma du fonctionnement d'une chambre à combustion [5].

### I.3.3 Turbine

La turbine à gaz convertit l'énergie des gaz chauds en énergie mécanique à l'aide d'étages constitués de stators et de rotors. Les stators accélèrent les gaz, convertissant leur énergie thermique en énergie cinétique, tandis que les rotors convertissent cette dernière en puissance utilisée à faire tourner l'arbre du moteur. La puissance de la turbine peut être ajustée en modifiant l'alimentation en combustible [4].

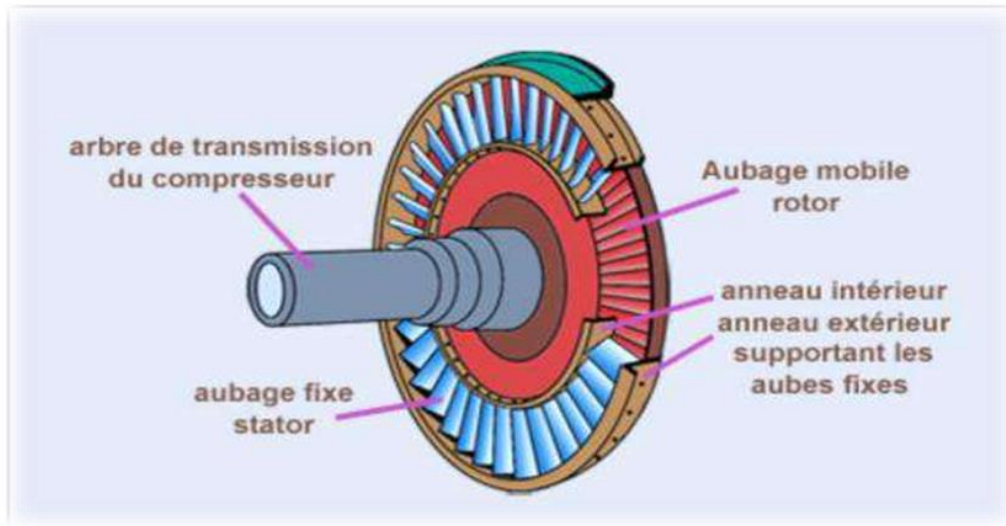


Figure I.5 : Dessin d'un étage d'une turbine [5].

### I.4 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

L'air atmosphérique est aspiré par le compresseur. L'air est comprimé puis libéré dans la chambre de combustion où le carburant est injecté : le mélange souhaité (air comprimé et gaz sous pression) est ainsi obtenu. L'allumage est provoqué par une étincelle produite par une bougie. L'énergie thermique générée dans la chambre de combustion et l'énergie libérée par le produit de la combustion sont transférées vers la première roue de la turbine, où cette énergie thermique se convertit en énergie mécanique. Une portion de l'énergie générée par la turbine est utilisée pour faire fonctionner le compresseur (une fois celui-ci séparé du moteur ou de la turbine de démarrage). Une autre portion de la puissance produite est transformée en énergie exploitée, c'est-à-dire qui permet d'actionner une machine.



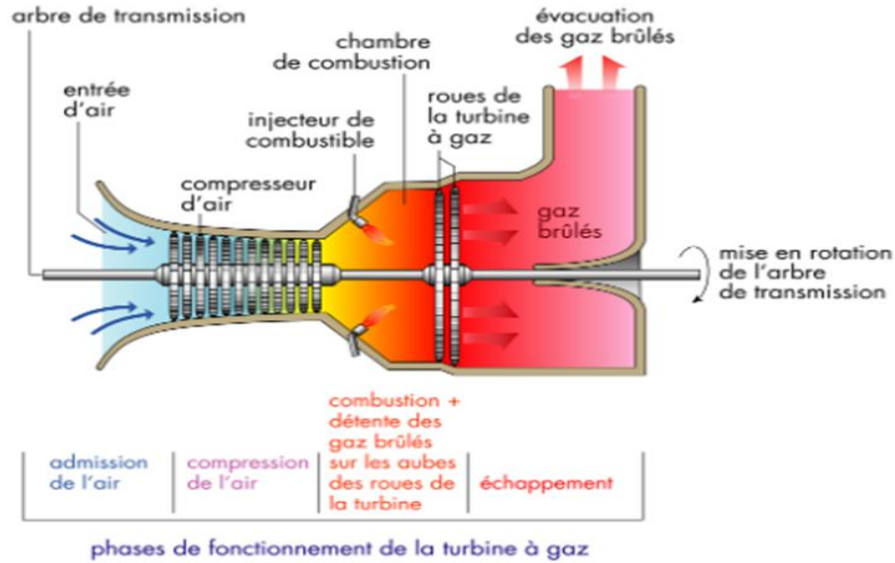


Figure I.6 : Le principe de fonctionnement de la turbine à gaz.

## I.5 Cycle thermodynamique de la turbine à gaz

### I.5.1 Cycle idéal de Brayton

Le cycle de Brayton représente le cycle de fonctionnement optimal pour une turbine à gaz. Le cycle est représenté par un diagramme P-V et T-s. Le cycle est fermé, soit à travers un échangeur de chaleur (cycle fermé), soit directement rejeté dans l'air ambiant (cycle ouvert).

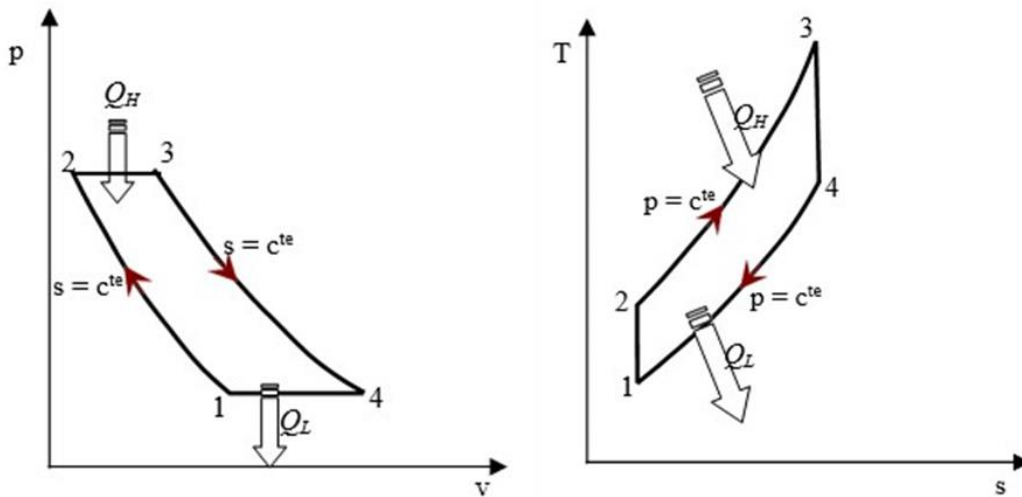


Figure I.7 : Diagrammes (P-V) et (T-s) pour un cycle idéal de Brayton [6].

Les processus 1-2 et 3-4 sont isentropiques et  $P_2 = P_3$  et  $P_1 = P_4$ , ainsi :

$$\frac{T_4}{T_1} = \left[ \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}, \quad \frac{T_3}{T_4} = \left[ \frac{P_3}{P_4} \right]^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \quad (\text{I.1})$$

$$Q_H = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2) \quad (I.2)$$

$$Q_L = h_4 - h_1 = C_p(T_4 - T_1) \quad (I.3)$$

Le travail net du cycle :

$$W_{net} = Q_H - Q_L \quad (I.4)$$

Le rendement du cycle de Brayton idéal est calculé comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(\frac{T_4}{T_1} - 1)}{T_2(\frac{T_3}{T_2} - 1)} \quad (I.5)$$

En Substituant (IV.1) dans (IV.5) on obtiendra la formule du rendement thermique du cycle de Brayton idéal :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (I.6)$$

Avec :

$r_p = \frac{P_2}{P_1}$  : Rapport de pression.

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  : Constante adiabatique du fluide moteur.

### **I.5.2 Cycle réel de Brayton**

Le cycle réel d'une turbine à gaz ne correspond pas au cycle idéal. En réalité lors des phases de compression (1-2r) et d'expansion (3-4r), les irréversibilités (frottement, effet sur les pales) produisent de l'entropie et entraînent une augmentation de la température du gaz supérieure à celle prévue selon le cycle de Brayton.

Ces irréversibilités contribuent toujours à dégrader l'efficacité de la turbine.

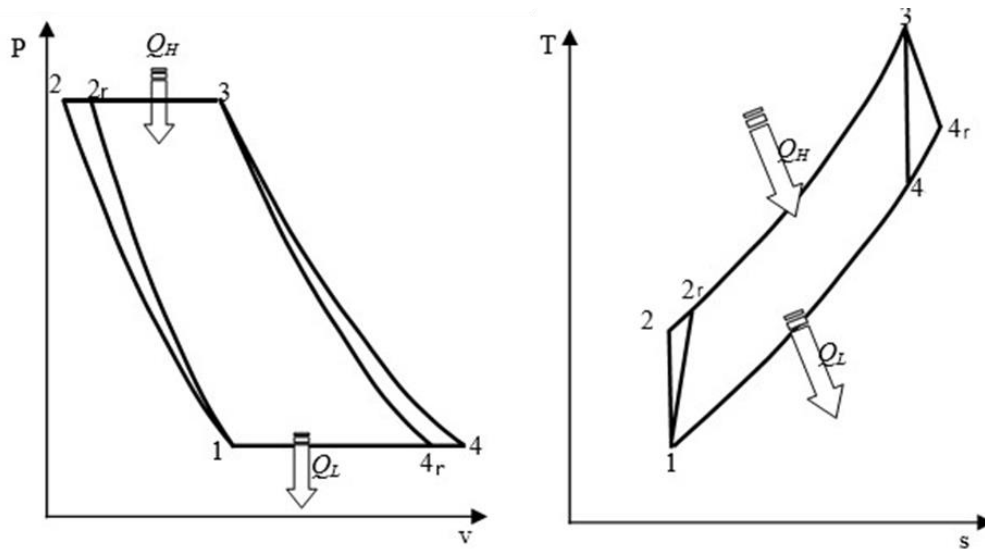


Figure I.8 : Diagrammes (P-V) et (T-s) pour un cycle réel de Brayton [6].

Les rendements isentropiques de la turbine et du compresseur :

$$\eta_{is\ C} = \frac{W_{is,C}}{W_{r,C}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad (I.7)$$

$$\eta_{is\ T} = \frac{W_{r,T}}{W_{is,T}} = \frac{h_{4r} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (I.8)$$

## I.6 Classification des turbines à gaz

Les turbines à gaz sont divisées en trois catégories principales, comme le montre le schéma ci-dessous :

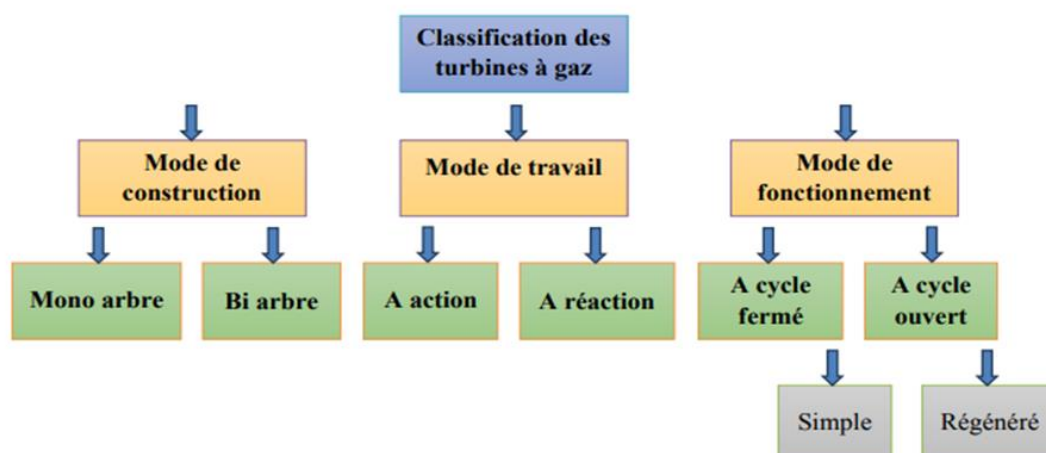


Figure I.9 : Classification des turbines à gaz [7].

### I.6.1 D'après le mode de construction

Le choix de la turbine à gaz dépend de l'application prévue. Dans le secteur industriel, on distingue les turbines mono-arbres, également appelées à un seul arbre, et les turbines bi-arbres, caractérisées par deux arbres.

#### I.6.1.1 Turbine-mono-arbre

Le compresseur et la turbine sont installés sur un axe commun, assurant ainsi une vitesse de rotation exclusive. Ce type est appliqué pour des applications où la vitesse reste constante, particulièrement pour la production d'électricité.

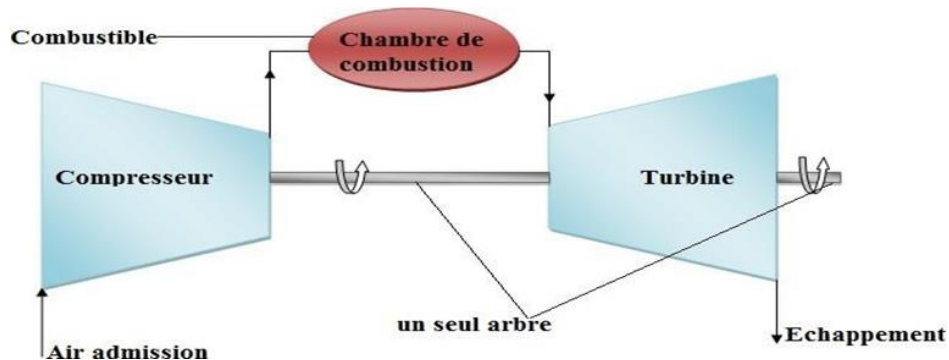


Figure I.10 : Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre [8].

### I.6.2 Turbine bi-arbre

La turbine à gaz comprend deux roues turbines qui opèrent de manière autonome : la roue haute pression (HP) entraîne le compresseur axial, tandis que la roue basse pression (BP) entraîne l'élément récepteur. Cette structure à double arbre offre la possibilité aux deux roues de tourner à des vitesses différentes, afin de mieux s'adapter aux changements de charge de l'élément récepteur.

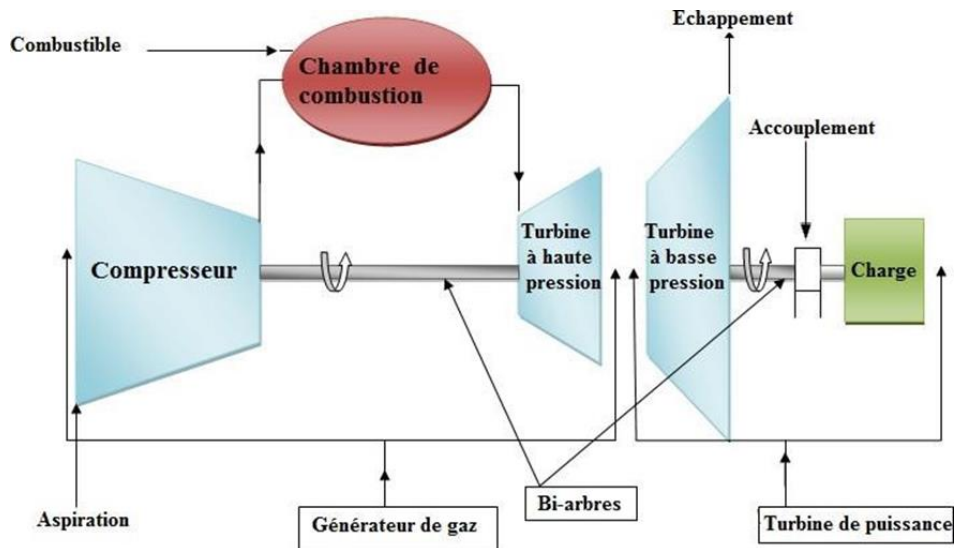


Figure I.11 : Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre [8].

## I.6.3 Mode de travail

### I.6.3.1 Turbine à action

La détente a lieu dans le distributeur, où la pression au niveau de la roue reste stable. Le taux de réaction  $\varepsilon$  indique la fraction de l'énergie thermique totale qui est complètement convertie en énergie cinétique dans la directrice.

### I.6.3.2 Turbine à réaction

L'énergie thermique du fluide est convertie en énergie mécanique à travers une détente progressive qui se déroule à la fois dans les distributeurs et les roues, entraînant une réduction continue de la pression.

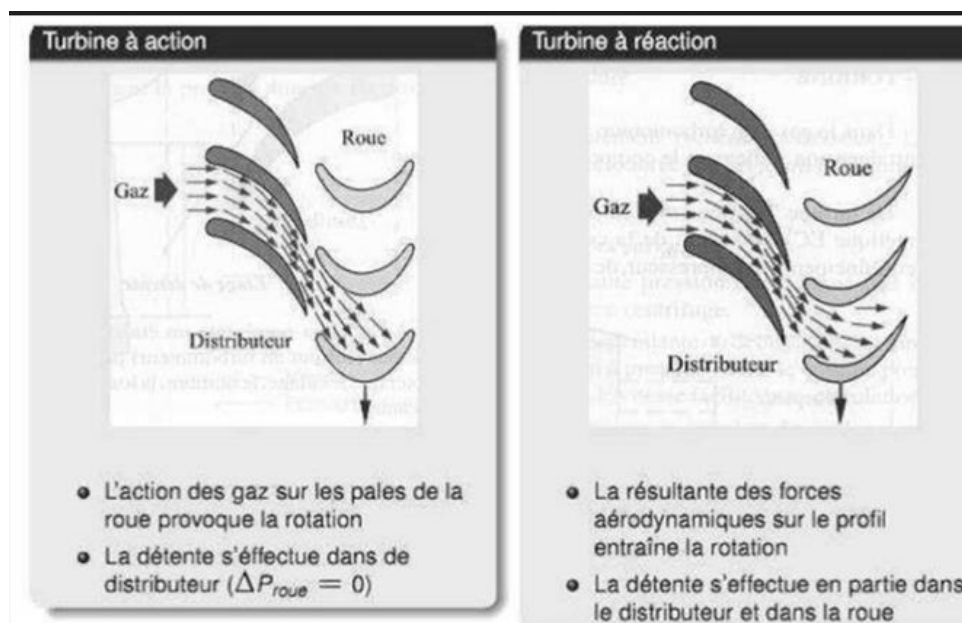


Figure I.12 : Schéma d'une turbine à action et à réaction [9].

### I.6.4 Mode de fonctionnement thermodynamique

On distingue deux cycles thermodynamiques.

#### I.6.4.1 Turbine à gaz à cycle fermé

Le fluide circule en boucle fermée et est utilisé de nouveau à chaque cycle.

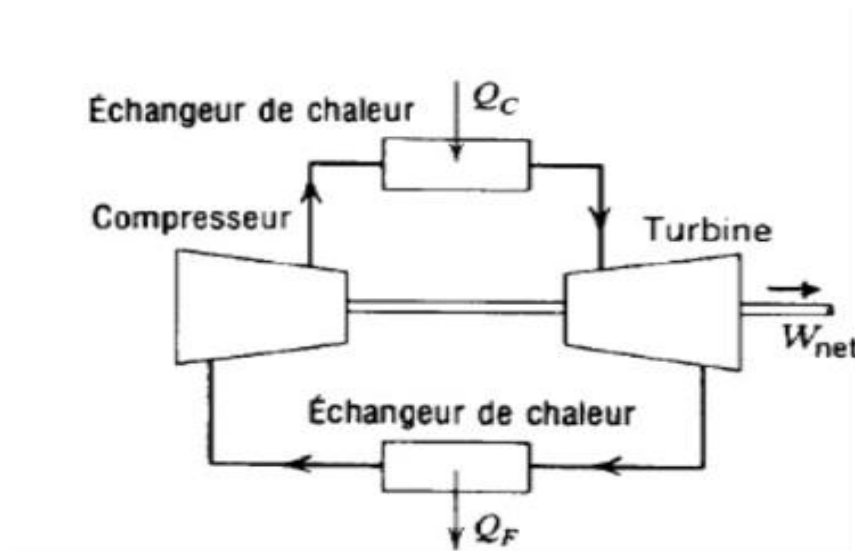


Figure I.13 : Cycle fermé.

#### I.6.4.2 Turbine à cycle ouvert

Capte et rejette l'air directement dans l'atmosphère. Se divise en deux catégories :

- **Turbine à cycle simple** : C'est une turbine qui opère avec un seul fluide pour générer de l'énergie mécanique. Suite à la phase de détente, une portion d'énergie thermique est toujours présente dans les gaz d'échappement, qui se perd simplement dans l'air ambiant.
- **Turbine à cycle régénéré** : Ce type de turbine utilise plusieurs fluides moteurs dans son cycle thermodynamique afin d'optimiser la performance de l'appareil.

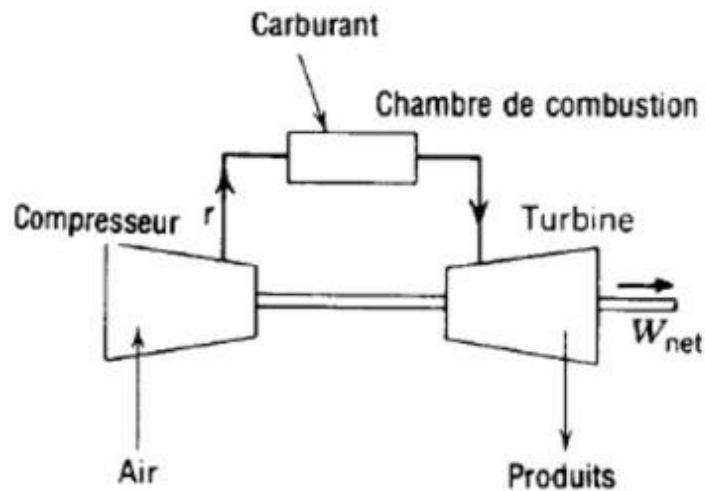


Figure I.14 : Cycle ouvert.

### I.7 Domaine d'application

Les domaines d'application des turbines à gaz se divisent en deux catégories :

- Domaines fixes (utilisation industrielle) :
  - Mise en mouvement de compresseurs.
  - Mouvement de pompes.
  - Fonctionnement d'alternateurs.
- Domaines mobiles :
  - Motorisation automobile.
  - Propulsion ferroviaire.
  - Applications marines.
  - Aviation (turboréacteurs et turbopropulseurs).

### Avantages et inconvénients

#### I.7.1 Avantages

- À l'exception des phases de démarrage et d'arrêt, la puissance est générée de manière continue.
- Faible encombrement et puissance élevée par rapports au poids.
- Diversité de combustible pour le fonctionnement.

- Démarrage simple et rapide, même dans des conditions de grand froid.
- Possibilité de fonctionnement à faible charge.
- Haute fiabilité nécessitant peu d'entretien.
- Aucun refroidissement externe.
- Échappement peu polluant.

### **I.7.2 Inconvénient**

- Performances faibles : moins de 30 % de l'énergie thermique contenue dans le carburant se transforme en énergie mécanique.
- Le temps de démarrage est nettement plus long comparé à un groupe diesel : il varie de 30 à 120 secondes pour la turbine, 8 à 20 secondes pour un groupe diesel.
- Importante consommation de carburant.
- Régimes souvent beaucoup trop élevés.
- Mal adaptée aux faibles puissances.
- Nécessite des réducteurs coûteux.
- Bruyante par la vitesse des gaz.
- Faibles pressions de travail.
- Coûts de production élevés.

## **II. Applications de la récupération de la chaleur résiduelle**

### **II.1 Production de chaleur**

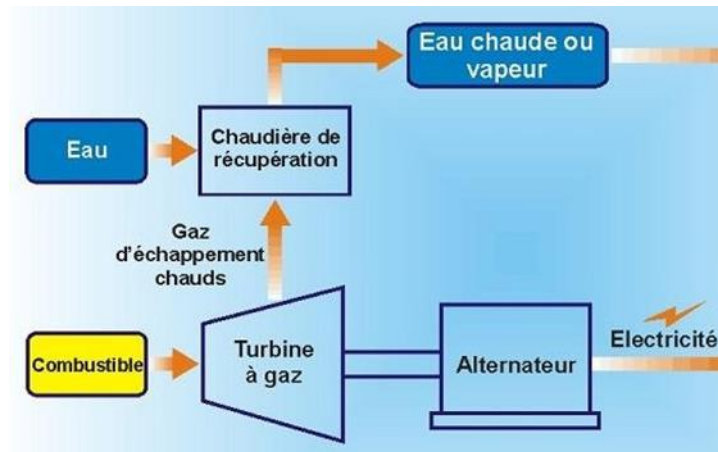
#### **II.1.1 Principe de fonctionnement de la chaudière de récupération**

Les gaz d'échappement issus de la turbine sont dirigés à travers :

- Soit vers la chaudière de récupération thermique avant d'être évacués par la cheminée froide,
- Soit directement vers une cheminée de dérivation (by-pass) en cas d'indisponibilité de la chaudière.

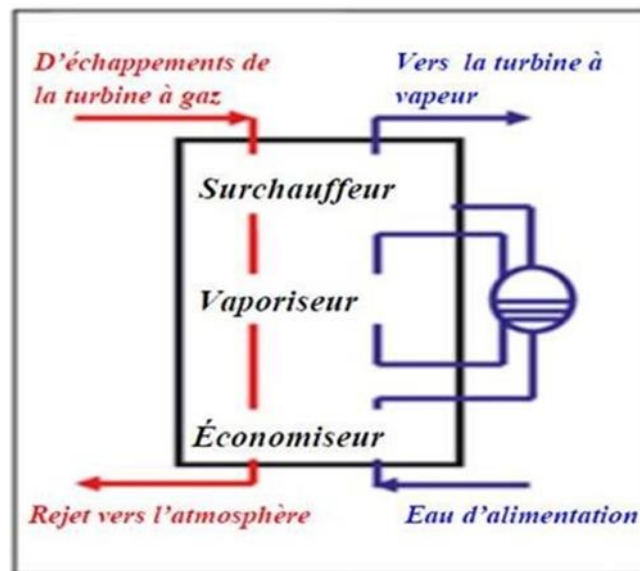
La chaudière permet de produire l'eau surchauffée pour le réseau de chauffage urbain. Elle est équipée d'un brûleur de post-combustion, permettant de fournir une puissance supplémentaire au réseau de chaleur lorsque c'est nécessaire.





**Figure I.15 :** Principe de récupération de chaleur [10].

Une chaudière de récupération est un dispositif regroupant plusieurs échangeurs de chaleur. Cet équipement est constitué de trois échangeurs montés en série : un économiseur, un évaporateur relié à un réservoir (tambour) et un surchauffeur. Ces échangeurs sont positionnés de manière perpendiculaire dans une conduite de fumée. Grâce à l'économiseur, l'eau d'alimentation est portée à la température d'ébullition correspondant à la pression appropriée. L'eau est transformée en vapeur par l'intermédiaire de l'évaporateur. Grâce à la surchauffe, la vapeur atteint la température souhaitée [11], voir Figure I.16 :



**Figure I.16 :** Différents éléments d'une chaudière de récupération [11].

Deux paramètres essentiels caractérisent l'échange thermique dans la chaudière : l'approche de température, qui évalue la différence entre l'eau sortant de l'économiseur et la température de saturation, et la température de pincement, qui indique l'écart entre les gaz de combustion au terme de l'évaporateur et la température de saturation [12].

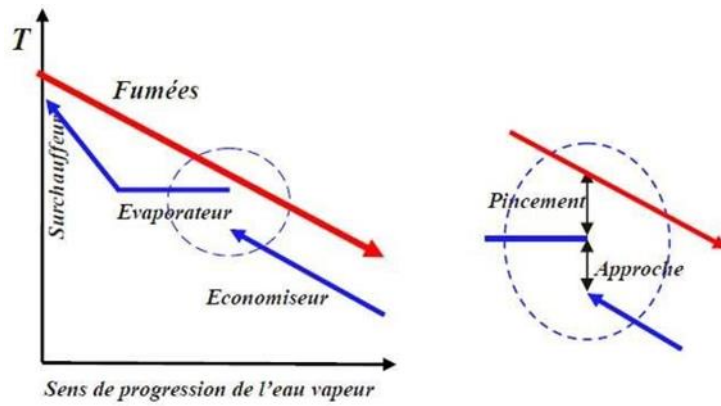


Figure I.17 : Représentation du pincement et de l'approche [12].

Ces deux concepts permettent d'évaluer l'efficacité de l'échange thermique et de dimensionner la surface d'échange, alors que la température de la vapeur à la sortie des surchauffeurs est limitée par celle des gaz circulant dans la chaudière.

### II.1.2 Diagramme T-Q d'une chaudière de récupération

Le diagramme T-Q est couramment utilisé à la fois pour illustrer le processus et pour simplifier les calculs. Il offre la possibilité de visualiser les profils de transfert thermique entre les gaz d'échappement et l'eau/vapeur.

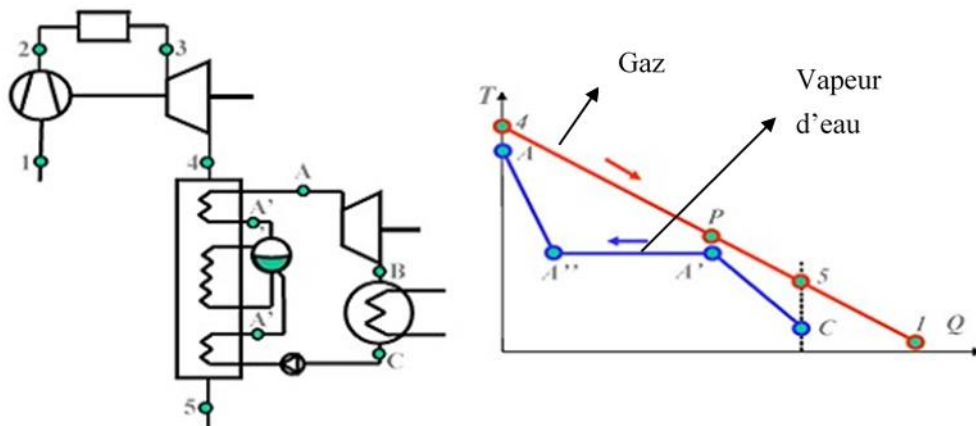


Figure I.18 : Diagramme T-Q d'une chaudière de récupération [12].

Le rendement thermique d'une chaudière de récupération se calcule par la formule :

$$\eta_{HRSG} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_1} \quad (I.9)$$

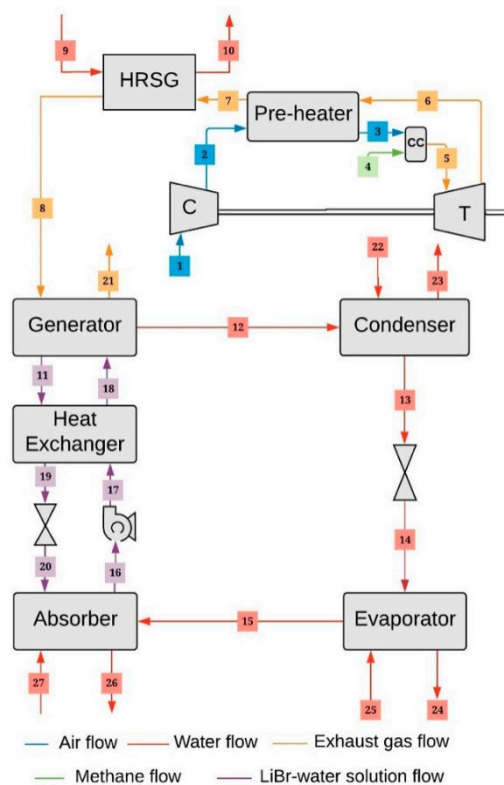
## II.2 Production de froid

Le réchauffement climatique et le déclin des énergies fossiles ont encouragé le développement de technologies plus efficaces comme la trigénération. Ce procédé, couplé à des dispositifs comme les cycles Rankine et les machines à absorption, permet de produire du froid tout en

réduisant les coûts et les émissions. Les systèmes à absorption sont particulièrement appréciés pour leur faible impact environnemental et leur capacité à utiliser la chaleur résiduelle ou solaire.

La figure I.19 illustre le système de tri génération de production de froid et de chaleur, qui comporte une microturbine à gaz, un récupérateur de chaleur et une machine à absorption [13].

Dans la turbine à gaz l'air est comprimé, préchauffé puis mélangé à du méthane dans une chambre de combustion. Les gaz brûlés entraînent une turbine produisant de l'énergie. La chaleur résiduelle est récupérée dans un générateur de vapeur (HRSG) pour produire de la vapeur. Ensuite, ces gaz d'échappement alimentent une machine à absorption eau - bromure de lithium, permettant de produire du froid via un évaporateur. La boucle est complétée par un absorbeur et une pompe qui renvoient la solution riche ( $H_2O - LiBr$ ) vers le générateur.



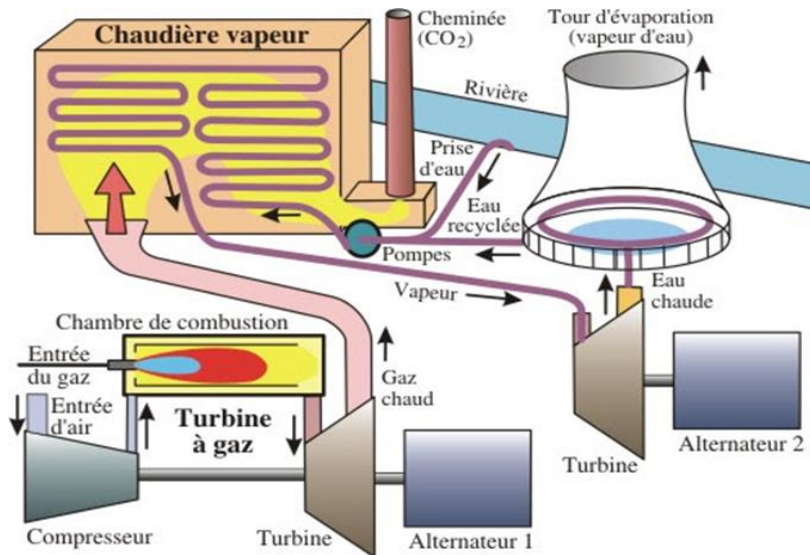
**Figure I.19 :** Schéma de principe d'un système de production de froid et de chaleur [13].

### II.3 Production d'électricité

Une centrale thermique à Cycle Combiné Gaz (CCG) génère de l'électricité en utilisant la chaleur issue de la combustion du gaz naturel via une turbine à gaz et une turbine à vapeur,

toutes deux connectées à un alternateur. Ces deux turbines, avec le même volume de carburant, génèrent une quantité d'électricité plus conséquente.

La combustion du combustible produit de la chaleur qui sert à chauffer de l'eau et à la transformer en vapeur d'eau sous haute pression.



**Figure I.20 :** Une centrale à cycle combiné : turbine à gaz- turbine à vapeur [14].

L'emploi du gaz naturel comme moyen de production d'énergie réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de moitié comparé à une centrale alimentée au charbon. Avec une grande capacité d'adaptation et de réaction, une centrale à cycle combiné exploite la turbine à gaz de haute puissance (> 1 MW) pour alimenter un alternateur et générer de l'électricité, ce qui lui confère un rendement supérieur par rapport aux centrales thermiques conventionnelles. Elle est en mesure d'atteindre sa capacité maximale en moins de soixante minutes et s'adapte aux fluctuations importantes de la demande, particulièrement lors des jours très froids.

### III. Machines à absorption NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O.

#### III.1 Historique de la production du froid [15] :

La gestion de la production de froid est un progrès relativement récent à l'échelle de l'histoire humaine. Dans l'Antiquité, les civilisations grecques et romaines utilisaient des méthodes rudimentaires pour conserver le froid hivernal. Elles conservaient la neige ou la glace isolées pour garder les aliments et boissons frais en été. C'est également à cette époque qu'il fut découvert qu'un mélange de glace pilée et de sel marin permettait d'abaisser davantage la température.

Le développement scientifique et technologique du XIX<sup>e</sup> siècle, notamment dans le domaine de l'électricité, a marqué un tournant décisif dans la production artificielle du froid. Voici les principales étapes de cette évolution :

- 1805 : L'Américain Oliver Evans conçoit la première machine frigorifique fonctionnant par compression d'éther.
- 1835 : Jacob Perkins, également américain, a conçu le premier système de réfrigération à Londres. Utilisant de l'éther comme fluide frigorigène. Cette machine, capable de produire de la glace, ne suscite pas encore l'intérêt des industriels.
- 1844 : L'invention de la machine frigorifique à air.
- 1859 : Création de la première machine frigorifique utilisant le principe de l'absorption.
- 1913 : Commercialisation du tout premier réfrigérateur domestique.
- 1919 : Lancement de la marque Frigidaire.
- 1928 : Midgley et Henne, chercheurs chez Frigidaire (General Motors), découvrent les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés comme gaz réfrigérants.
- 1931 : Début de la production industrielle de réfrigérateurs par la société Electrolux.
- Années 1950 : Le réfrigérateur devient un appareil courant dans les foyers.
- 1964 : Apparition des modèles à double porte.
- Années 1970 : Les réfrigérateurs s'équipent de nouvelles fonctionnalités (éclairage intérieur, compartiments spécialisés, etc.).
- Années 1980 : Introduction des modèles combinés et des systèmes à double moteur.
- Années 1990 : Transition vers des gaz réfrigérants plus respectueux de l'environnement.
- Années 2000 : La problématique environnementale devient un enjeu majeur pour l'industrie du froid, orientant les recherches vers des technologies plus durables et moins polluantes.

### **III.2 Historique de la machine à absorption [16]**

Le procédé de production de froid par absorption est l'un des plus anciens fonctionnant selon un cycle thermodynamique. Ses premières bases remontent à 1777, mais c'est seulement en 1810 que J. Lestie a conçu la première machine frigorifique sous vide, utilisant un mélange d'eau et d'acide sulfurique, ce dernier jouant le rôle d'agent absorbant.

Une avancée majeure fut réalisée en 1859 par Ferdinand Carré, qui mit au point une machine à absorption fonctionnant de manière continue avec un mélange binaire ammoniac/eau. Cette invention permit de produire du froid de façon plus stable et efficace. Les premières machines

étaient rapidement opérationnelles, mais leur compréhension thermodynamique ne fut approfondie qu'à partir des travaux de l'allemand Edmund Altenkirch.

Ces recherches ont abouti, dans les années 1940, à la conception de systèmes à absorption utilisant le couple eau–bromure de lithium, principalement développés aux États-Unis. À cette époque, ces machines étaient déjà capables de fournir des puissances frigorifiques de l'ordre de 523 kW, notamment dans les applications de climatisation.

Les systèmes à absorption présentent un avantage significatif : ils valorisent une source de chaleur à température modérée (telles que les rejets thermiques industriels, l'énergie solaire ou la biomasse) en produisant du froid. Contrairement aux systèmes à compression, ils ne nécessitent pas de machines tournantes (à l'exception d'une petite pompe), car l'énergie mécanique est remplacée par un apport thermique, rendant ces installations particulièrement attractives pour des contextes où la récupération de chaleur est possible.

### III.3 Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique

Un appareil frigorifique est un dispositif thermodynamique qui favorise le transfert de chaleur d'un milieu à basse température ( $T_F$ ), désigné comme source froide, vers un milieu à température supérieure ( $T_C$ ), identifié comme source chaude, en échange d'une consommation d'énergie mécanique. La transition thermique entre les deux sources est réalisée par le biais du changement d'état d'un fluide frigorigène qui s'écoule en boucle fermée dans cet appareil [16].

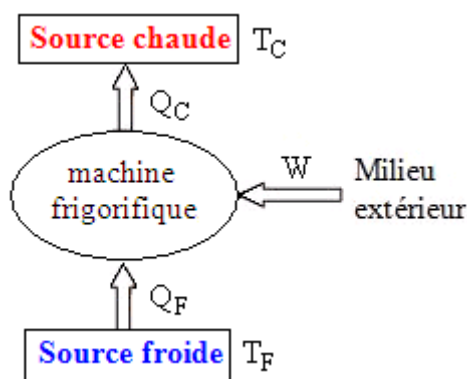


Figure I.21 : Schéma de principe de fonctionnement d'une machine frigorifique.

### III.4 Différentes techniques de production de froid

La production de froid consiste à extraire la chaleur d'un objet plutôt qu'à lui fournir du froid. Ce processus utilise diverses techniques physiques, illustrées dans le tableau I.1, qui décrivent

les phénomènes endothermiques et exothermiques impliqués dans le transfert de chaleur au sein des systèmes frigorifiques ou des pompes à chaleur [15].

Le tableau I.1 présente les différents phénomènes physiques (endothermiques et exothermiques) qui permet les déplacements de chaleur dans un système frigorifique ou une pompe à chaleur.

Phénomènes endothermiques	Phénomènes Exothermiques	Observations et applications
Fusion d'un solide	Solidification d'un liquide.	Mise en jeu de l'enthalpie de fusion (Glace : 335kJ/kg).
Vaporisation d'un liquide	Condensation en phase liquide	Mise en jeu de l'enthalpie de vaporisation (Eau à 0 °C : 2500kJ/kg). Utilisé dans les systèmes de refroidissement par évaporation, climatisation.
Sublimation d'un solide	Condensation en phase solide	Mise en jeu de l'enthalpie de sublimation. Utilisé dans le séchage à froid.
Désorption d'un gaz ou d'une vapeur  - D'un Liquide - D'un solide	Absorption d'un gaz ou d'une vapeur  - Dans un liquide (absorption) - Dans un solide (adsorption)	Elles peuvent être physiques ou chimiques.  Utilisé dans les purificateurs d'air (charbon actif), les procédés de séparation.
Détente d'un gaz comprimé	Compression d'un gaz	La détente sans travail extérieur ne s'accompagne de refroidissement que dans certaines conditions. Utilisé dans les réfrigérateurs, les climatiseurs.

**Tableau I.1 : Les différents phénomènes de production de froid [15].**

### III.5 Machines frigorifiques

De nos jours, il existe une grande variété de systèmes de production de froid, mais leur mode d'opération reste principalement identique. On distingue deux grandes catégories de machines, selon la nature de l'énergie utilisée (chaleur ou travail) [17] :

- Les dispositifs de compression mécanique, qui exploitent le travail comme moyen énergétique. Elles opèrent entre deux sources thermiques. Cela concerne les machines

à cycle thermodynamique (comme le cycle de compression de vapeur) ou les machines fonctionnant au gaz.

- Les dispositifs à énergie thermique, qui exigent une fourniture de chaleur à une température élevée. Elles fonctionnent généralement entre trois niveaux de température (machines trithermes), ce qui permet le transfert de chaleur et la production de froid.

### III.6 Définition de machine à absorption :

Un dispositif de réfrigération à absorption est une sorte d'équipement frigorifique qui fait appel à deux fluides distincts pour son fonctionnement : un fluide absorbant et un fluide frigorigène. Par exemple : L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est utilisé comme réfrigérant, tandis que l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sert d'absorbant. Contrairement aux systèmes de réfrigération à compression classiques, les machines de réfrigération par absorption emploient une solution d'absorbant pour convertir le réfrigérant gazeux en liquide.

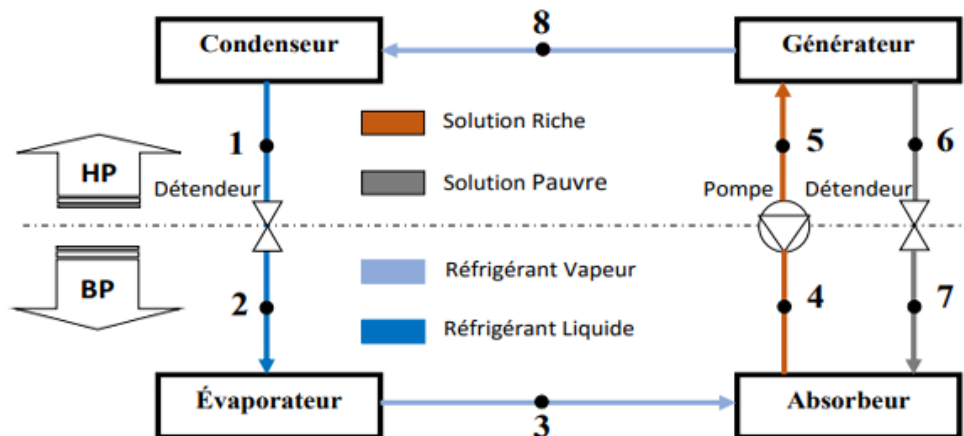


Figure I.22 : Structure d'une machine à absorption [18].

### III.7 Fonctionnement de chaque composant de la machine à absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ )

Une machine à absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) est constituée de 8 composants selon le cycle suivant [19] :

**Une pompe (1-2) :** Le processus de pompage augmente la pression de la solution riche en liquide saturé. La chaleur est généralement ajoutée pour rapprocher le point d'état 2 du liquide saturé avant son entrée dans l'échangeur.



**Un échangeur de solution** (2-3), (4-5) : Diminue la quantité de chaleur émise par l'absorbeur en transférant une portion de la chaleur de la solution chaude à faible pour réchauffer la solution riche plus froide. (Herold et al. 1996).

**Un générateur-Rectificateur** (3-4 et 7) : Qui reçoit un flux de chaleur à partir de la source chaude, la vapeur du point (7) est simultanément extraite de la solution riche en liquide (3) et laisse une solution faible saturée en liquide au point d'état 4. La vapeur de  $\text{NH}_3$  au point d'état 7 est idéalement un réfrigérant pur.

Le rectificateur a le but de purifier autant que possible l'ammoniac de la solution.

**Un condenseur** (7-8) : D'où sort la vapeur condensée et éventuellement sous-refroidie (point 8), la chaleur extraire étant rejetée à l'environnement.

**Un détendeur DET 1** (9-10) : Réduit la pression du réfrigérant à la pression de fonctionnement inférieure.

Le point d'état 10 se trouve généralement dans la région biphasique à basse température.

**Un évaporateur** (10-11) : Reçoit la chaleur qui correspond à la charge de refroidissement de l'eau réfrigérée. La chaleur est obtenue en évaporant et surchauffé le réfrigérant.

**Un absorbeur** (1-6 et 12) : La vapeur de réfrigérant est idéalement pure au point d'état 12, est simultanément absorbée dans une solution liquide (parfois biphasique) faible (6). La solution devient alors plus riche en réfrigérant lorsqu'elle devient un liquide saturé au point d'état 1. La chaleur récupérée est dispersée dans l'environnement.

**Un détendeur en sortie d'échangeur** : ramène la solution pauvre à la pression de l'absorbeur.

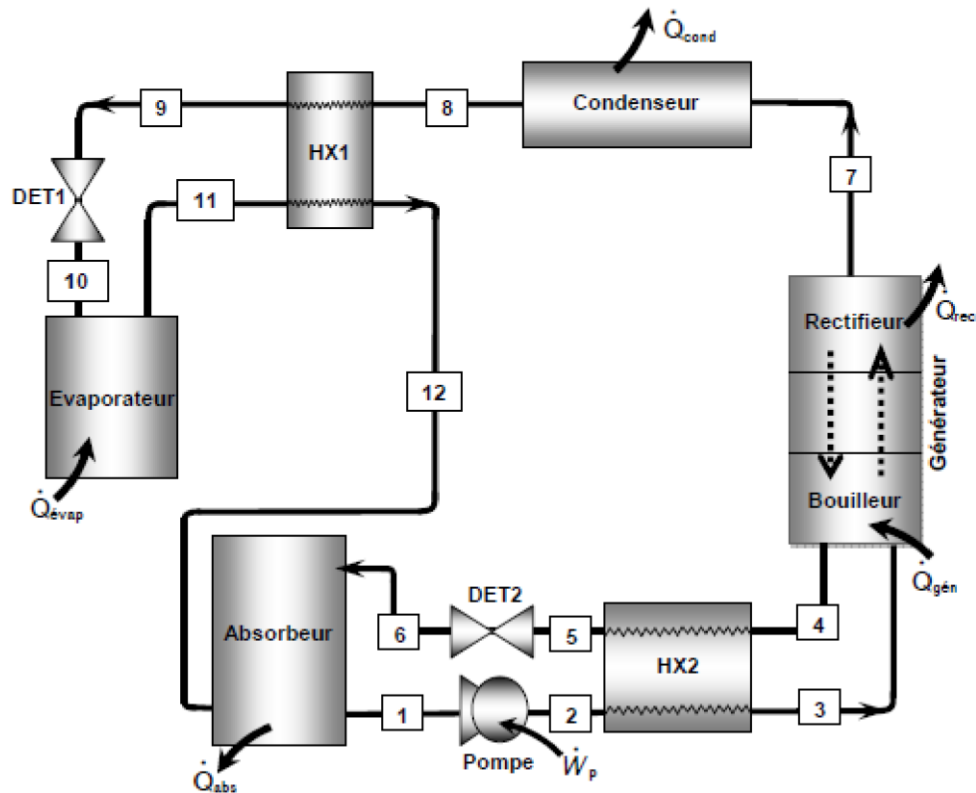


Figure I.23 : machine à absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) [20].

### III.8 Diagrammes utilisés

Les diagrammes thermodynamiques le plus utilisé pour le couple  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  :

#### III.8.1 Diagramme d'Oldham

Pour une analyse de cycle, le schéma d'Oldham est le plus fréquemment employé, Il s'agit d'un graphique ( $\ln(P)$ ,  $-1/T$ ), paramétré selon la concentration massique. Le diagramme concernant le couple  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  est illustré à la Figure (3.4). Dans ce schéma, les iso titres sont pratiquement des lignes droites. La ligne de concentration 0% fait référence à l'état d'équilibre liquide/vapeur de l'eau pure. L'iso-titre est déterminé en fonction de la concentration en ammoniac  $\text{NH}_3$ .

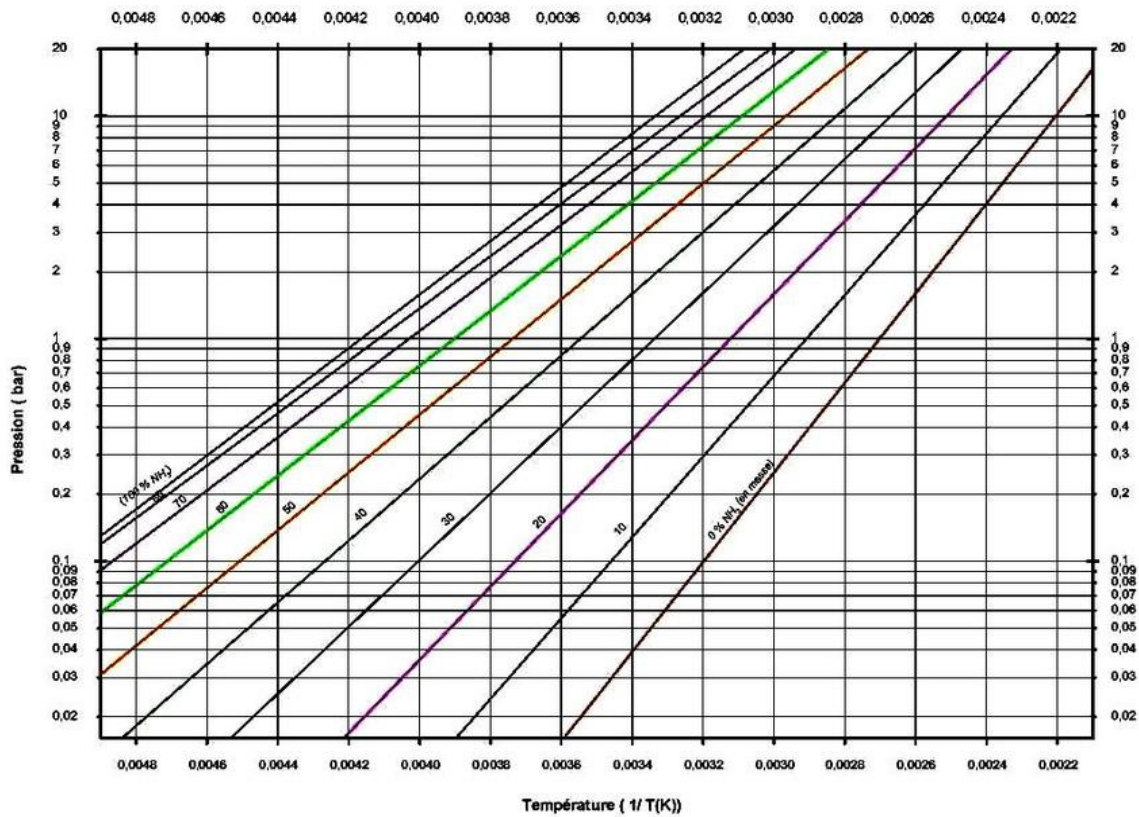


Figure I.24 : diagramme d'Oldham [21].

## III.8.2 Diagramme de Merkel

Le diagramme de Merkel propose une étude détaillée de la machine à absorption, facilitant ainsi la détermination des puissances thermiques transférées au sein des échangeurs. De plus, le modèle de Shultz, fondé sur ce même diagramme, permet de calculer le flux ou la quantité de solution par kilogramme d'ammoniac [22].

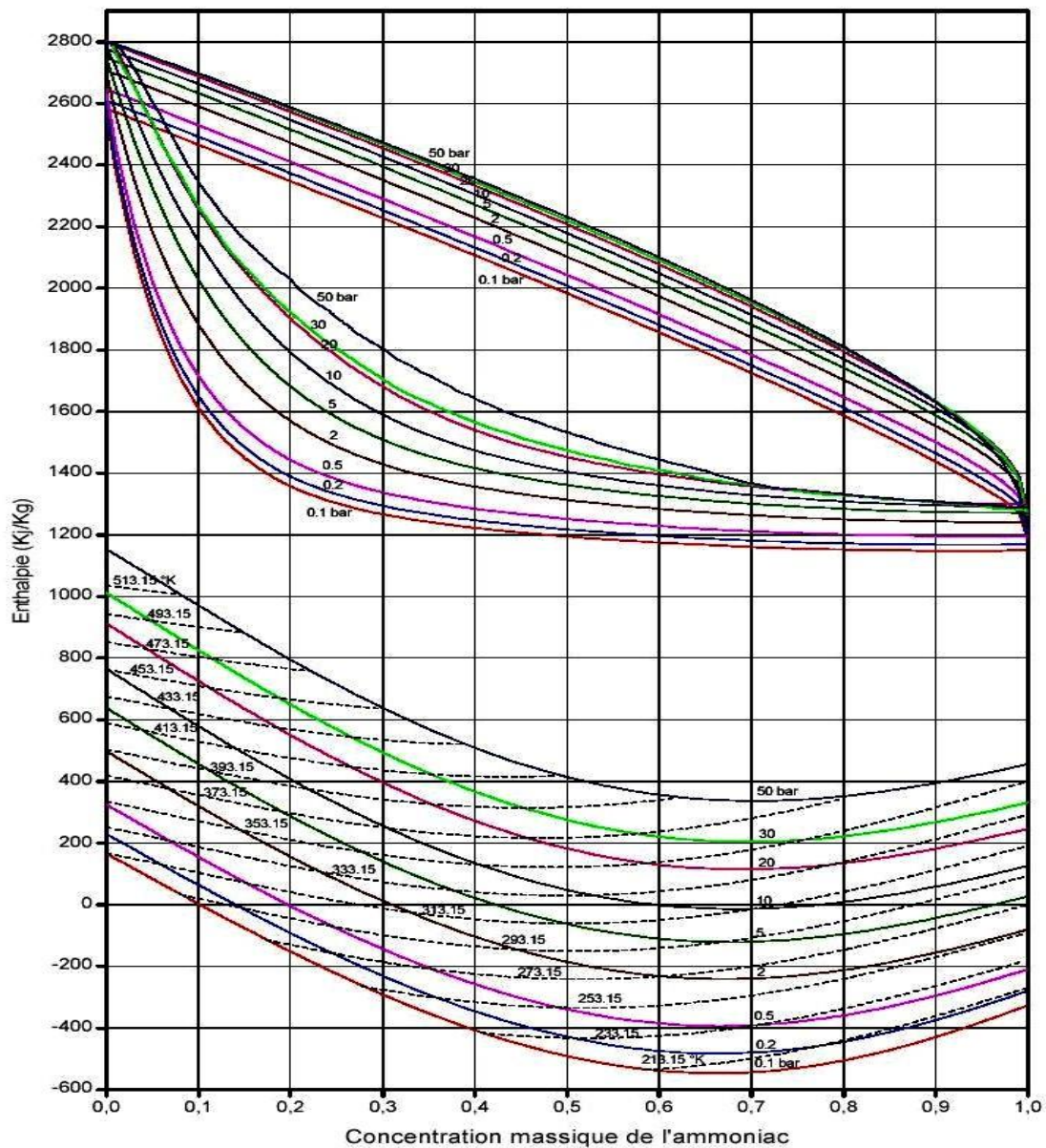


Figure I.25 : diagramme de Merkel [23].

### III.9 Avantage et inconvénients du couple fluide (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O)

#### III.9.1 Avantages

- Faible consommation d'énergie électrique
- Chaleur reçue par le fluide dans le bouilleur peut être gratuite (solaire ou régénérée par les gaz d'échappement).
- Les machines à (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) peuvent obtenir des températures inférieures à zéro et sont principalement employés dans les secteurs de la réfrigération et de la climatisation.
- La puissance frigorifique produite au niveau de l'évaporateur est très importante.
- L'absence de compression mécanique élimine les vibrations.
- Aucun effet sur l'environnement.

- La simplicité de son fonctionnement.
- Une longue durée de vie

### III.9.2 Inconvénients

- La vapeur provenant du désorbeur renferme un résidu d'eau et requiert donc l'ajout d'un dispositif supplémentaire nommé rectifieur, dont la fonction est d'éliminer cette eau avant que la vapeur ne soit dirigée vers le condenseur.
- Le coût de cette installation est considérable étant donné qu'elle implique parfois l'intégration d'un rectifieur et d'un déflegmateur.
- L'ammoniac, constituant le fluide frigorigène, les niveaux de pression restent analogues à ceux rencontrés dans les machines à compression (jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$  environ). Actuellement plusieurs installations fonctionnent à  $-20^{\circ}\text{C}$ .
- Elle ne fonctionne qu'à haute température.

## **CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE A GAZ.**

## II.1 Présentation du cas d'étude (turbine à gaz)

### II.1.1 Description de la centrale

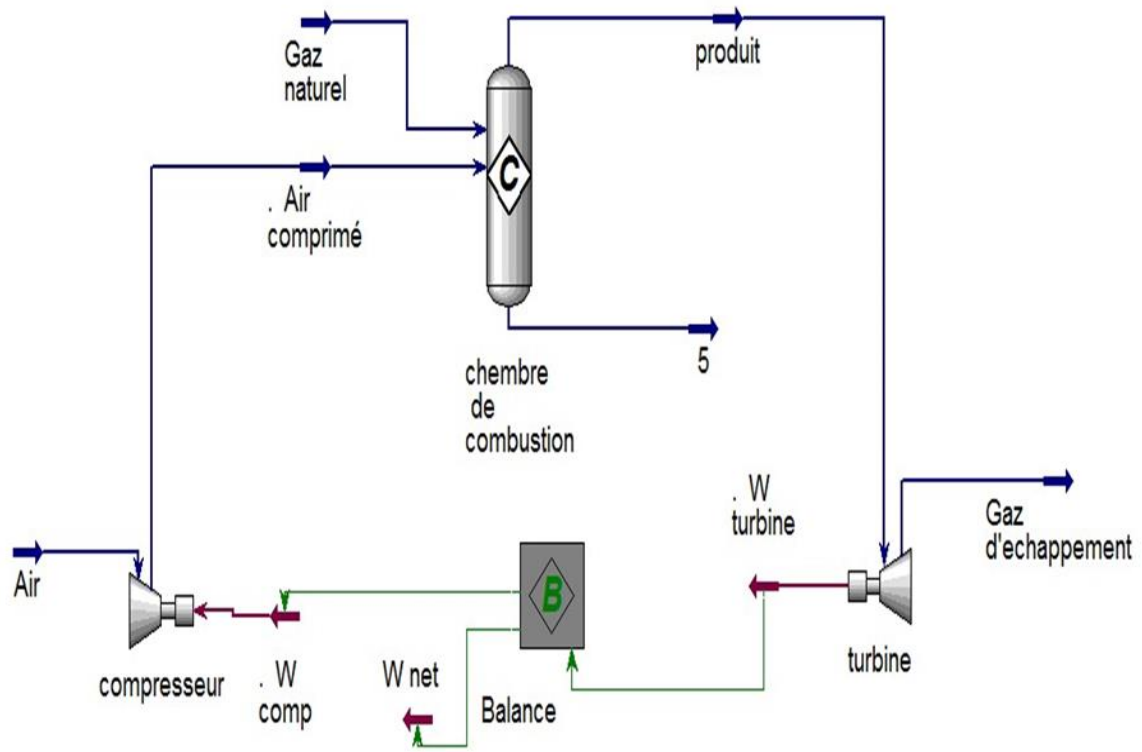
La centrale est équipée de deux turbines de référence TG13E2 produites par Alstompower Swiss. Elle est située à F'Krina, une daïra d'Ain Beida dans la wilaya d'Oum ElBouaghi, au nord-est de l'Algérie, à 520 km d'Alger. Elle a démarré sa production d'énergie en octobre 2004. La figure (II.3) illustre la structure d'une unité TAG. Chaque TAG dispose d'un arbre qui connecte un compresseur axial à 21 niveaux (CA), une turbine à gaz à 5 niveaux et un générateur (G). La combustion La chambre (CC) est équipée d'un cercle de 72 brûleurs écologiques (EV). Le champ de Hassi R'Mel constitue la provenance du gaz naturel : le tableau (II.1) et (II.2) présente sa composition et ses caractéristiques [25].

Compositions chimiques	Mole (%)
CH <sub>4</sub>	83.5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.1
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.0
N <sub>2</sub>	5.3
CO <sub>2</sub>	0.2
Somme	100

Tableau II.1 : Composition du gaz naturel.

Type	Le gaz naturel de Hassi R'Mel
d (kg/Nm <sup>3</sup> )	0.7971
PCI (KJ/kg)	45213
ex <sup>ch</sup> (KJ/kg)	47014

Tableau II.2: Propriétés du gaz naturel.



**Figure II.1 :** Le Schéma de la centrale électrique.

Le lieu se trouve à une altitude de 950 mètres au-dessus du niveau marin, avec un taux d'humidité relative allant de 41% à 83%, et une température ambiante qui peut osciller entre 7 °C et 45 °C. Base de données contient les spécifications de conception de la centrale en détail dans le tableau (II.3).



Conditions de conception	Valeur
TAG modèle de conception	ABB TG13E2
Température ambiante ( $T_0$ )	17 ° C
Pression ambiante ( $P_0$ )	0,904 bar
Humidité relative de l'air (HR)	62%
Débit massique du combustible $\dot{m}_f$	9,6 kg / s
Température du carburant $T_f$	26 ° C
Pression de carburant $P_f$	24,9 bars
Température d'entrée de la turbine $T_{t-e}$	1109 ° C
Rapport de pression du compresseur $\pi_c$	13,5
Vitesse de l'arbre (N)	3000 tr / min
Efficacité isentropique du compresseur $\eta_{is-c}$	0.82
Efficacité isentropique de la turbine $\eta_{is-t}$	0.88
Efficacités mécaniques ( $\eta_m$ )	0,99
Efficacité du générateur $\eta_{Gé}$	0.98
Puissance de sortie nette $W_{net}$	146,2 MW

**Tableau II.3:** Conditions de fonctionnement de la conception de la centrale [25].

- Le rendement global de la centrale thermique à gaz est exprimé par le rapport entre la puissance nette produite à la sortie et l'énergie fournie par le combustible. On l'exprime par la formule suivante :

$$\eta_{GT} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_f \times PCI} \quad (II.1)$$

## II.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS

### II.2.1. Définition du logiciel Aspen HYSYS

Aspen HYSYS est un outil de simulation en régime continu utilisé pour modéliser, analyser et optimiser les procédés industriels dans les secteurs de la chimie, de la pétrochimie, de la métallurgie et de l'énergie. Il est également employé pour la gestion des performances dans la production et le traitement des hydrocarbures. Grâce à ses nombreuses fonctionnalités intégrées, il permet une conception efficace et un suivi précis des processus complexes.

### II.2.2. Concepts de base du simulateur HYSYS

HYSYS est un simulateur de procédés basé sur l'orientation objet, facilitant la conception et la modélisation de systèmes industriels complexes. Grâce à son architecture interactive et sa gestion des événements, toute modification apportée à un élément est automatiquement propagée à l'ensemble du modèle. Il fonctionne selon une logique non séquentielle et modulaire, assurant une mise à jour instantanée des données et des calculs.

Le logiciel repose sur plusieurs concepts clés :

❖ « **Flowsheet** »

Représentation graphique du procédé contenant des courants, opérations unitaires et variables, tous reliés à une base thermodynamique commune appelée *Fluid Package*.

❖ « **Fluid Package** »

Définit les composants chimiques, leurs propriétés, les modèles thermodynamiques et les réactions chimiques du procédé.

❖ « **Process Flow Diagram** »

Schéma illustrant les flux, opérations et connexions entre les éléments du procédé.

❖ « **Workbook** »

Tableau de données fournissant des informations détaillées sur les courants et les unités.

❖ « **Desktop** »

C'est l'interface principale de travail dans HYSYS.

❖ « **Property view** »

Fenêtre affichant les propriétés détaillées d'un courant ou d'une opération.

### ❖ « Simulation Case »

Ensemble complet de tous les éléments et Paramètres qui composent le modèle de simulation.

### II.2.3. Environnement de simulation

Le simulateur propose cinq environnements de développement, chacun dédié à la manipulation et à la mise en forme des informations de simulation :

- **Environnement « Basis Manager »** : utilisé pour la création et la modification du *Fluid Package*, qui définit les propriétés physiques et thermodynamiques des fluides.
- **Environnement « Oil Characterization »** : destiné à la caractérisation des fluides de type pétrolier, afin d'en définir les propriétés spécifiques.
- **Environnement « Main Flowsheet »** : permet de concevoir l'architecture principale du schéma de procédé. On y positionne les courants, les opérations unitaires ainsi que les *Sub-Flowsheets* qui composent l'ensemble du procédé simulé.
- **Environnement « Sub-Flowsheet »** : utilisé pour modéliser une partie spécifique du schéma principal, telle qu'un courant ou une opération unitaire, en la traitant comme un sous-ensemble distinct.
- **Environnement « Column »** : dédié à la modélisation des colonnes de distillation. Cet objet spécifique dispose de ses propres éléments : *Flowsheet*, *Fluid Package*, *PFD* (Process Flow Diagram) et *Workbook*.

Dans la Figure (II.2), les flèches montrent que seuls l'environnement « Column » et le « sub Flowsheet » sont accessibles depuis l'environnement principal « Main Flowsheet ». Toutefois, en utilisant l'Object Navigator on peut se déplacer directement d'un Flowsheet.

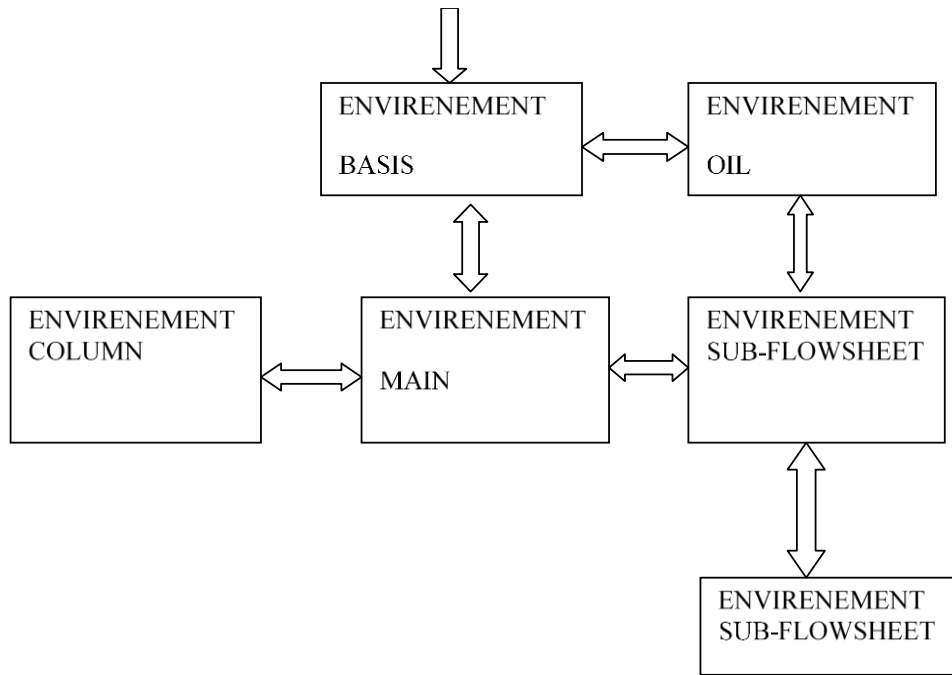


Figure II.2 : Environnements de développement dans HYSYS.

#### II.2.4. Caractéristiques principales de HYSYS

HYSYS est une plateforme de simulation performante, utilisée pour modéliser des procédés en **régime stationnaire** (pour la conception et l'optimisation) ainsi qu'en **régime dynamique** (pour l'analyse de la contrôlabilité et des stratégies de régulation).

##### Principaux atouts :

- **Environnement intégré** : Toutes les applications fonctionnent dans un espace commun, facilitant l'interaction entre les différents modules.
- **Automatisation** : Grâce à un moteur de macros interne compatible Visual Basic, les tâches peuvent être automatisées sans logiciel externe.
- **Calculs intelligents et réactifs** :
  - Calculs déclenchés automatiquement à chaque nouvelle donnée (*event-driven*).
  - Mise à jour instantanée des propriétés thermodynamiques.
  - Transmission bidirectionnelle de l'information entre unités et courants.
- **Flexibilité de conception** : L'algorithme de résolution non linéaire permet de réaliser les Flowsheets dans l'ordre de son choix.

### II.2.5. Structure générale du HYSYS

La figure ci-dessous illustre la structure générale de fonctionnement du logiciel Aspen HYSYS:

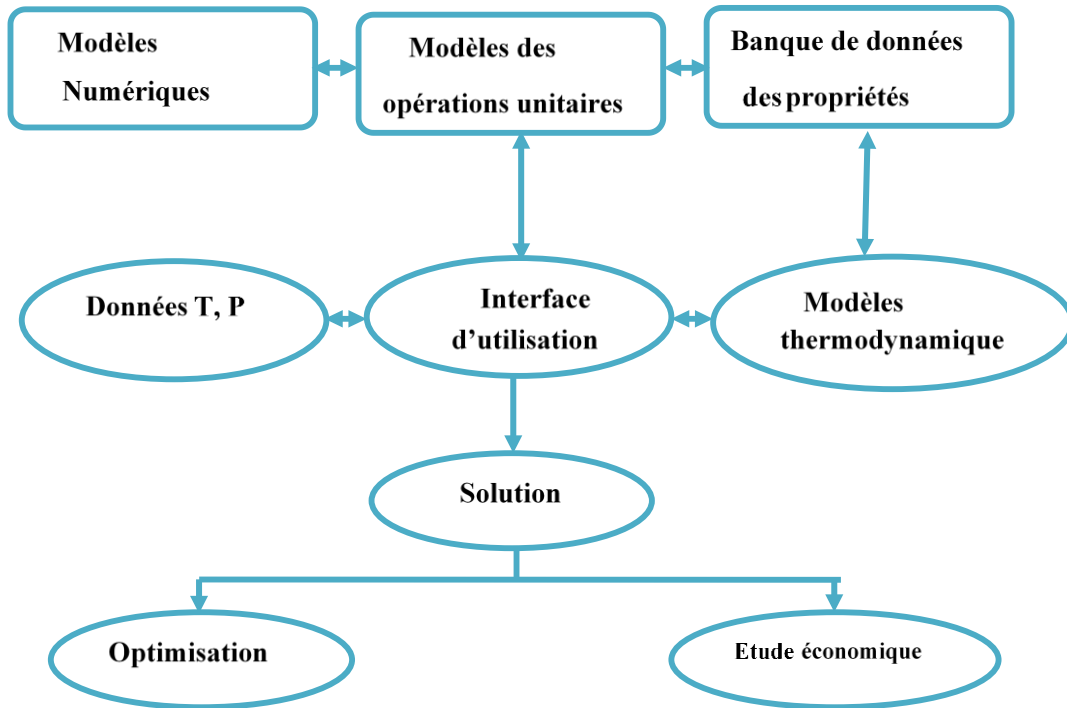


Figure II.3 : Structure générale du HYSYS.

### II.2.6. Modèles thermodynamiques de HYSYS

#### II.2.6.1. Equations d'état

Les modèles basés sur les équations d'état (RK, SRK, PR. etc.) ; sont souvent utilisés pour le calcul des systèmes d'hydrocarbures et des systèmes presque idéaux.

- REDLICH-K WONG (RK).
- SOAVE REDLICH KWONG (SRK).
- PENG ROBINSON (PR).

Leurs avantages par rapport aux autres modèles résident dans le fait de l'utilisation des coefficients d'interaction-binaire. En générale les équations d'état permettent de calculer l'ensemble des propriétés des produits par rapport à la température et aux fractions molaires.

#### II.2.6.2. Equation de REDLICH-K WONG (RK)

Considérer comme la plus simple des équations d'état, elle est très utilisée pour prédire d'état de la phase vapeur.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{T} \frac{1}{V(V+b)}} \quad (\text{II.2})$$

### II.2.6.3. Equation de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK)

Cette équation modifiée celle de REDLICH-KWONG, par l'introduction d'une fonction  $a(T)$  qui dépend du facteur acentrique.

L'équation de SOAVE est de la même forme générale que l'équation (II.2).

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad (\text{II.3})$$

SOAVE a introduit les relations suivantes pour exprimer la fonction  $(T)$  :

$$a(T) = a_c a(T_R) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$a(T_R) = (1 + m(1 - \sqrt{T_R}))^2 \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient  $m$  est calculé en fonction du facteur acentrique  $\omega$  :

$$m = 0.480 + 1.574 \omega - 0.176 \omega^2 \quad (\text{II.6})$$

### II.2.6.4. Equation de PENG-ROBINSON

L'équation de **PENG-ROBINSON** diffère de l'équation de SOAVE par l'expression du terme d'attraction. Elle a été introduite en vue d'améliorer les résultats obtenus par l'équation de SAOVE, notamment en ce qui concerne le calcul des densités en phase liquide, sans modifier le nombre de paramètres :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + 2Vb - b^2} \quad (\text{II.7})$$

$P$  : Pression du système.

$T$  : Température.

$V$  : Volume molaire du gaz.

Pour un corps pur, les paramètres  $a$  et  $b$  sont calculés à partir des coordonnées du point critique (mesurables expérimentalement) selon :

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_C^2}{P_C} \alpha \quad (\text{II.8})$$

L'équation de SOAVE est de la même forme générale que l'équation (II.2).

$$b = \frac{0.077796 R T_C}{P_C} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\alpha = (1 + m (1 - T_r^{0.5}))^2 \quad (\text{II.10})$$

La fonction reliant le paramètre  $m$  au facteur acentrique  $\omega$  est :

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992 \omega^2 \quad (\text{II.11})$$

Ces équations sont très largement utilisées dans les modèles de simulation, en production et traitement de gaz. L'équation la plus recommandée pour les systèmes d'hydrocarbures est l'équation de PENG ROBINSON, car elle résout correctement les problèmes d'équilibre et permet de prédire des densités liquides plus en accord avec les valeurs réelles que les autres équations.

#### **II.2.6.5. Etapes d'utilisation du logiciel HYSYS**

Pour réaliser une simulation en HYSYS, les pas suivants sont nécessaires :

- Démarrage de HYSYS.
- Création d'un fichier.
- Choix des composés.
- Sélection d'un modèle thermodynamique.
- Construction du PFD (Process Flow Diagram).
- Spécification des courants et des unités.
- Exécution du programme de simulation.
- Interprétation des résultats.

### II.3. Etapes de simulation de la centrale

Le logiciel Aspen HYSYS est utilisé pour simuler la centrale, et il est indispensable de suivre les étapes ci-dessous :

#### ➤ Démarrage de HYSYS

Pour le démarrage de la simulation, cliquer deux fois sur l'icône.

On obtient la fenêtre suivante :

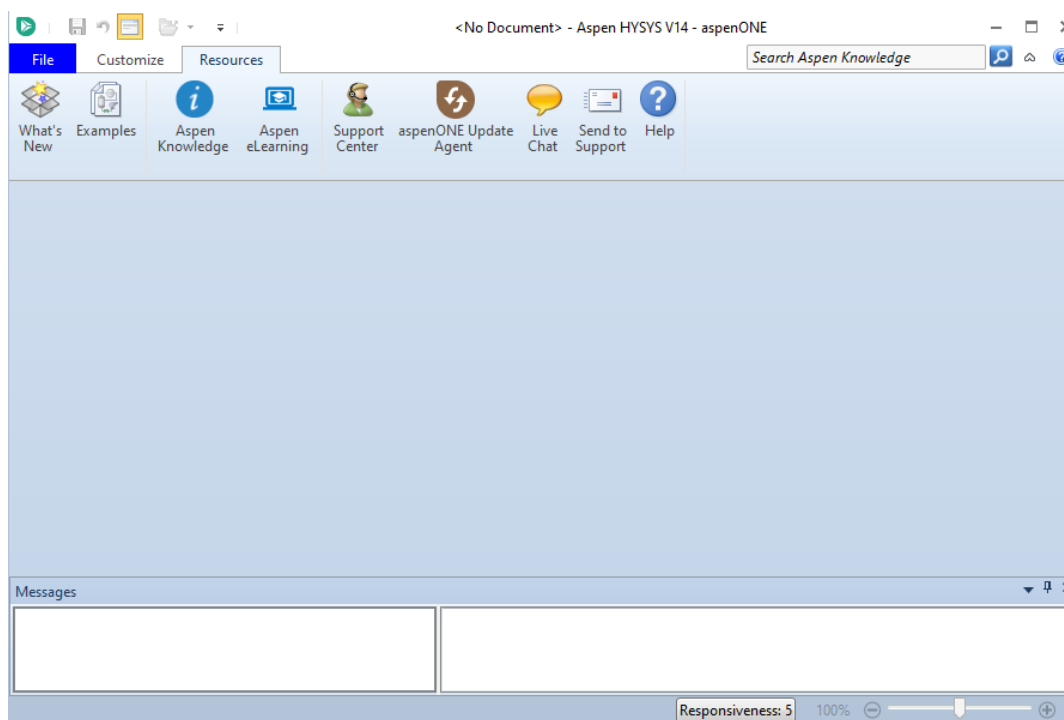


Figure II.4 : Fenêtre du ASPEN HYSYS V14.

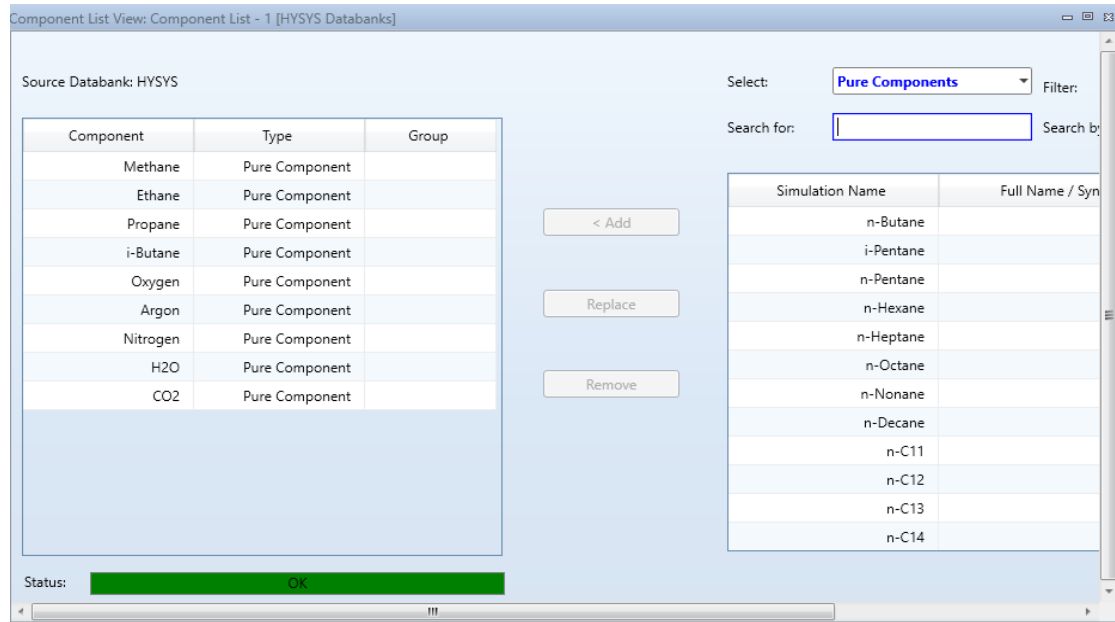
#### ➤ Création d'un fichier

Cliquez sur le « File » —> « New » —> « Create new case »

#### ➤ Sélectionner la liste des composants

Pour modéliser un système dans HYSYS, il est nécessaire de définir au préalable la composition chimique des fluides employés. On procède en sélectionnant « component lists » puis « Add » pour choisir les composants disponibles. Pour notre situation, les éléments à déterminer comprennent : le méthane, l'éthane, le propane, l'i-butane, l'oxygène, l'argon, l'azote, l'eau et le dioxyde de carbone.





**Figure II.5:** Les composants de différentes entrées de la centrale.

### ➤ Choix du modèle thermodynamique

Pour étudier les propriétés des gaz réels ou des mélanges complexes, on choisit un modèle d'équation d'état dans la liste « Fluid package ».

Dans notre cas, Pour le gaz naturel de l'air, l'équation de Peng Robinson est utilisée, pour les mélanges d'hydrocarbures.

Pour spécifier un fluide package, on clique sur « Add » est sélectionné sur Peng Robinson.



**Figure II.6 :** Liste de fluides packages.

## ➤ Création des réactions chimiques

La définition des 4 réactions de combustion du gaz naturel :

Pour ajouter des réactions on clique sur « Réaction » puis « Add ».

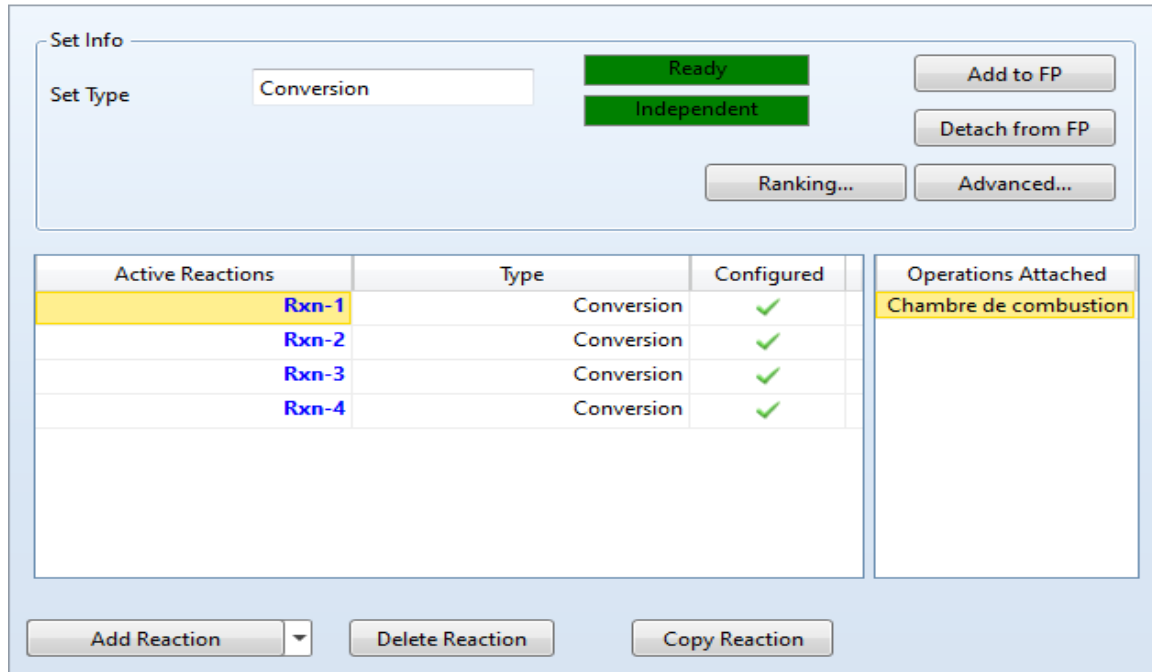


Figure II.7: Fenêtre des réactions créent.

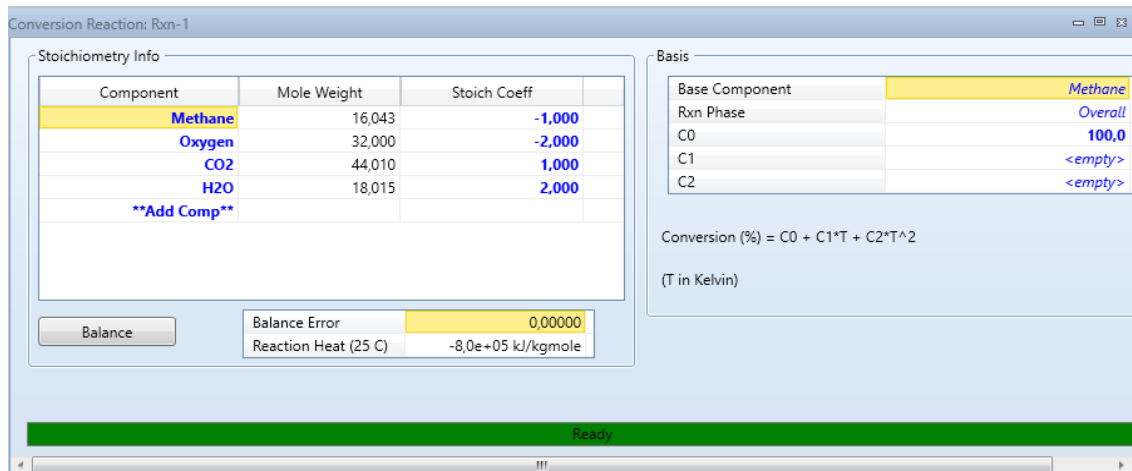
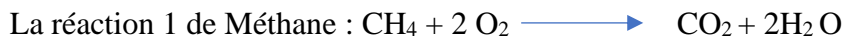
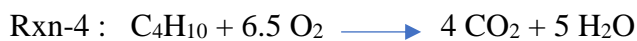
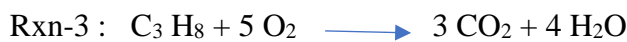
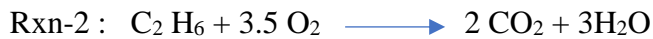


Figure II.8 : Réaction de méthane.

La réaction 2 de Ethane :  $\text{C}_2 \text{H}_6 + 3.5 \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$

Conversion Reaction: Rxn-2

Stoichiometry Info

Component	Mole Weight	Stoich Coeff
Ethane	30,070	-1,000
Oxygen	32,000	-3,500
CO2	44,010	2,000
H2O	18,015	3,000
<b>**Add Comp**</b>		

Balance

Balance Error: 0,00000  
Reaction Heat (25 C): -1,4e+06 kJ/kgmole

Basis

Base Component	
Rxn Phase	Overall
C0	100,0
C1	<empty>
C2	<empty>

Conversion (%) =  $C0 + C1 \cdot T + C2 \cdot T^2$   
(T in Kelvin)

Ready

Figure II.9 : Réaction de Ethane.

La réaction 3de Propane :  $\text{C}_3 \text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \longrightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$

Conversion Reaction: Rxn-3

Stoichiometry Info

Component	Mole Weight	Stoich Coeff
Propane	44,097	-1,000
Oxygen	32,000	-5,000
CO2	44,010	3,000
H2O	18,015	4,000
<b>**Add Comp**</b>		

Balance

Balance Error: 0,00000  
Reaction Heat (25 C): -2,0e+06 kJ/kgmole

Basis

Base Component	
Rxn Phase	Overall
C0	100,0
C1	<empty>
C2	<empty>

Conversion (%) =  $C0 + C1 \cdot T + C2 \cdot T^2$   
(T in Kelvin)

Ready

Figure II.10 : Réaction de propane.

La réaction 4 de i-Butane :  $\text{C}_4\text{H}_{10} + 6.5 \text{O}_2 \longrightarrow 4 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$

Conversion Reaction: Rxn-4

Component	Mole Weight	Stoich Coeff
i-Butane	58,124	-1,000
Oxygen	32,000	-6,500
CO2	44,010	4,000
H2O	18,015	5,000
**Add Comp**		

Base Component	Rxn Phase
i-Butane	Overall
C0	100,0
C1	<empty>
C2	<empty>

Conversion (%) =  $C0 + C1 \cdot T + C2 \cdot T^2$   
(T in Kelvin)

Balance Error: 0,00000  
Reaction Heat (25 C): -2,6e+06 kJ/kgmole

Ready

Figure II.11 : Réaction de i-Butane.

### ➤ L'entrée de l'air

La définition de la composition de l'air à partir d'ajouter les fractions molaires de l'air :

Material Stream: Air

Worksheet Attachments Dynamics

	Mole Fractions	Vapour Phase
Methane	0,0000	0.0000
Ethane	0,0000	0.0000
Propane	0,0000	0.0000
i-Butane	0,0000	0.0000
Oxygen	0,2070	0.2070
Argon	0,0076	0.0076
Nitrogen	0,7719	0.7719
H2O	0,0132	0.0132
CO2	0,0003	0.0003

Total: 1,00000

Edit... View Properties... Basis...

OK

Delete Define from Stream... View Assay

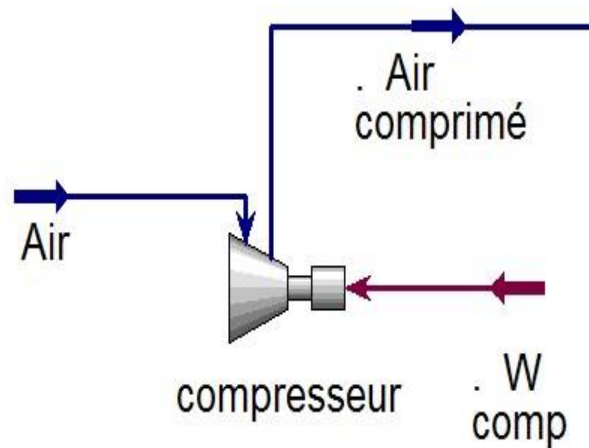
Figure II.12 : Fenêtre des composants de l'air.

On définit les caractéristiques de l'air (la température, la pression et le débit massique), qui sont définis dans le tableau II.3 :

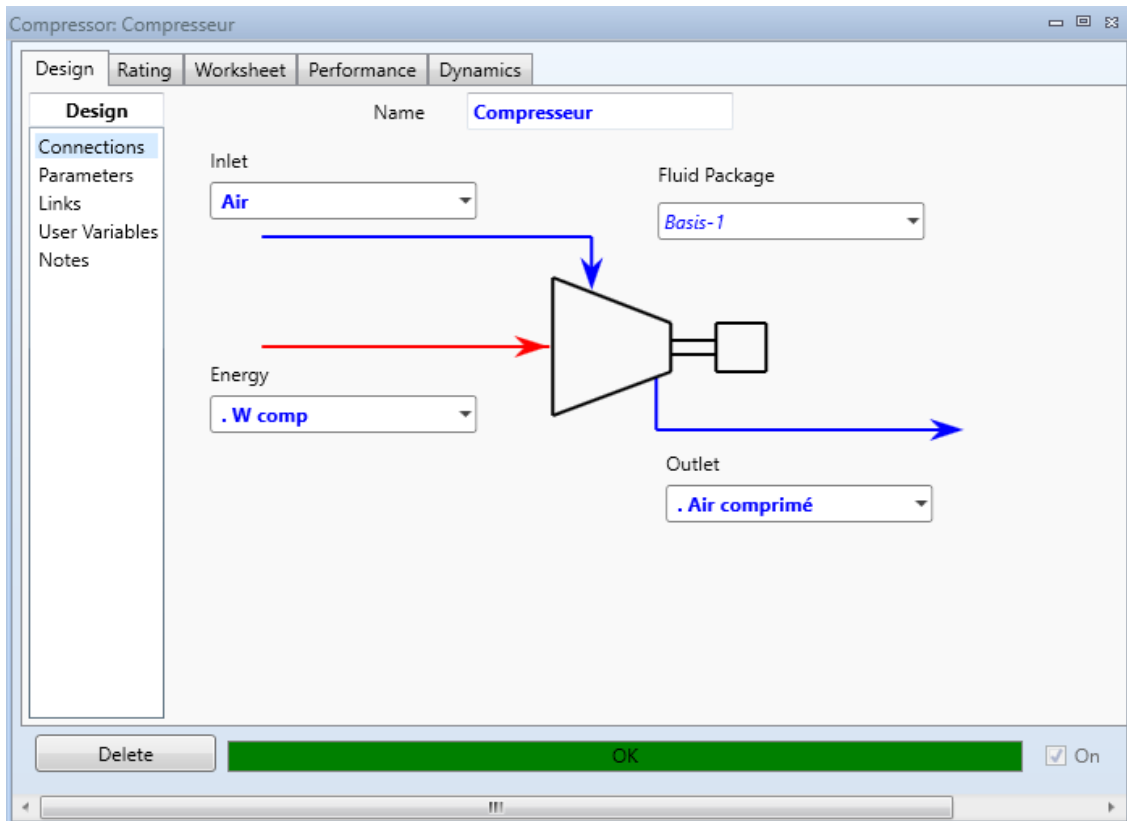
Material Stream: Air			
Worksheet	Attachments	Dynamics	
<b>Worksheet</b>	Stream Name	<b>Air</b>	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	<b>17,00</b>	17,00
Composition	Pressure [bar]	<b>0,9040</b>	0,9040
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	6,051e+004	6,051e+004
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/s]	<b>484,1</b>	484,1
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2004	2004
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-3552	-3552
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	152,9	152,9
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-5,969e+004	-5,969e+004
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1,429e+006	1,429e+006
▸ Emissions	Fluid Package	<i>Basis-1</i>	
OK			
Delete		Define from Stream...	View Assay
		← →	

**Figure II.13 :** Fenêtre des conditions d'entrée d'air.

### ➤ Compresseur



**Figure II.14:** Présentation de compresseur.



**Figure II.15 : Installation de compresseur.**

On définit dans la figure (II.15) l'entrée, la sortie et l'énergie du compresseur :

L'entrée : Air (Nom de l'alimentation).

La sortie : Air comprimé.

L'énergie :  $W_{comp}$  (travail de la compresseur).

Dans paramètres, ajouter les valeurs (le rendement adiabatique et le rapport de pression) :

- Rendement isentropique :  $\eta_{is-c}=0.82$
- Le rapport de pression :  $\pi_c = 13.5$

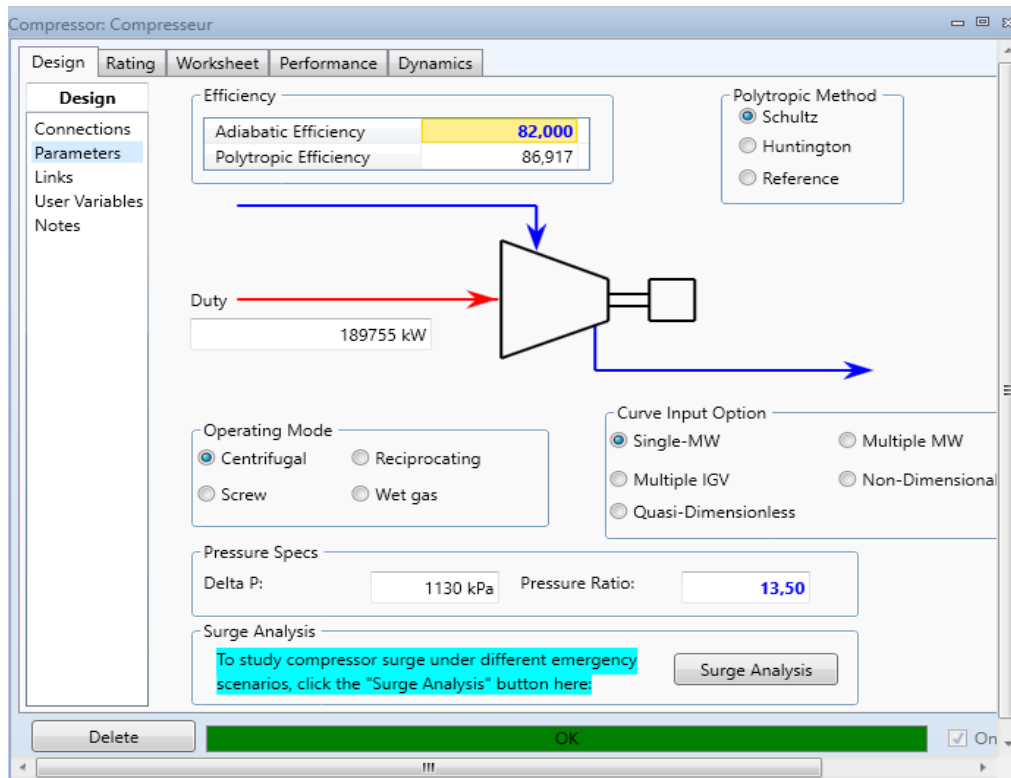


Figure (II.16) : Fenêtre de paramètre de compresseur.

### ➤ L'entrée de gaz naturel

On définit la composition du gaz naturel, représentée dans le tableau II.1 :

Material Stream: Gaz naturel

Worksheet		Mole Fractions	Vapour Phase
Methane		0,8350	0.8350
Ethane		0,0790	0.0790
Propane		0,0210	0.0210
i-Butane		0,0100	0.0100
Oxygen		0,0000	0.0000
Argon		0,0000	0.0000
Nitrogen		0,0530	0.0530
H2O		0,0000	0.0000
CO2		0,0020	0.0020
Total		1,00000	

Buttons: Edit..., View Properties..., Basis..., OK, Delete, Define from Stream..., View Assay, navigation arrows.

Figure II.17 : Fenêtre des composants de gaz naturel.

On entre les caractéristiques du gaz naturel (la température, la pression et le débit massique) représentées dans le tableau II.3 :

- La température :  $T_f = 26^\circ\text{C}$ .
- La pression :  $P_f = 24.9$  bars.
- Le débit massique :  $m_f = 9.6$  kg/s.

Worksheet	Stream Name	Gaz naturel	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	26,00	26,00
Composition	Pressure [bar]	24,90	24,90
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	1833	1833
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/s]	9,600	9,600
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	103,1	103,1
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7,406e+004	-7,406e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	159,5	159,5
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-3,771e+004	-3,771e+004
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	4,321e+004	4,321e+004
Emissions	Fluid Package	Basis-1	

Figure II.18 : Fenêtre des conditions d'entrée de gaz naturel.

### ➤ CHAMBRE DE COMBUSTION

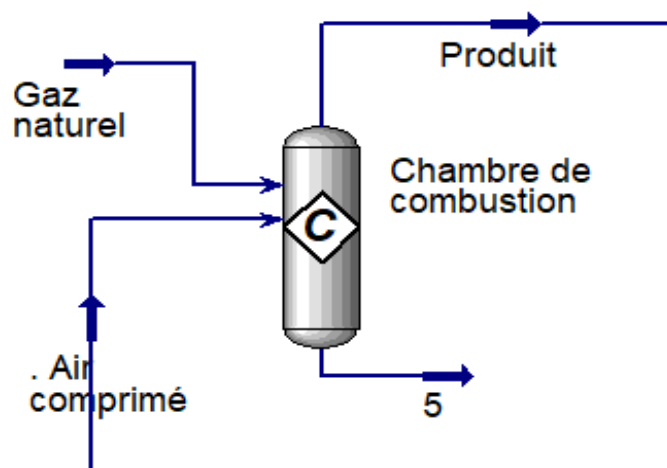
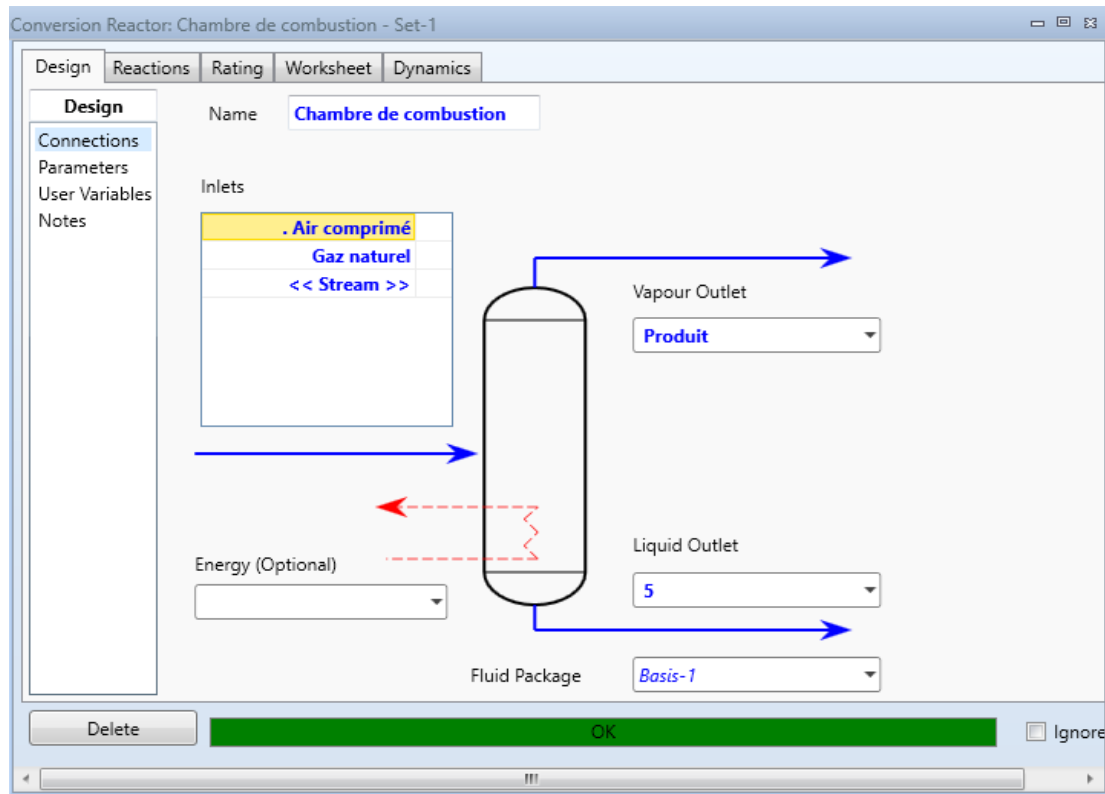


Figure II.19 : Présentation de la chambre de combustion.

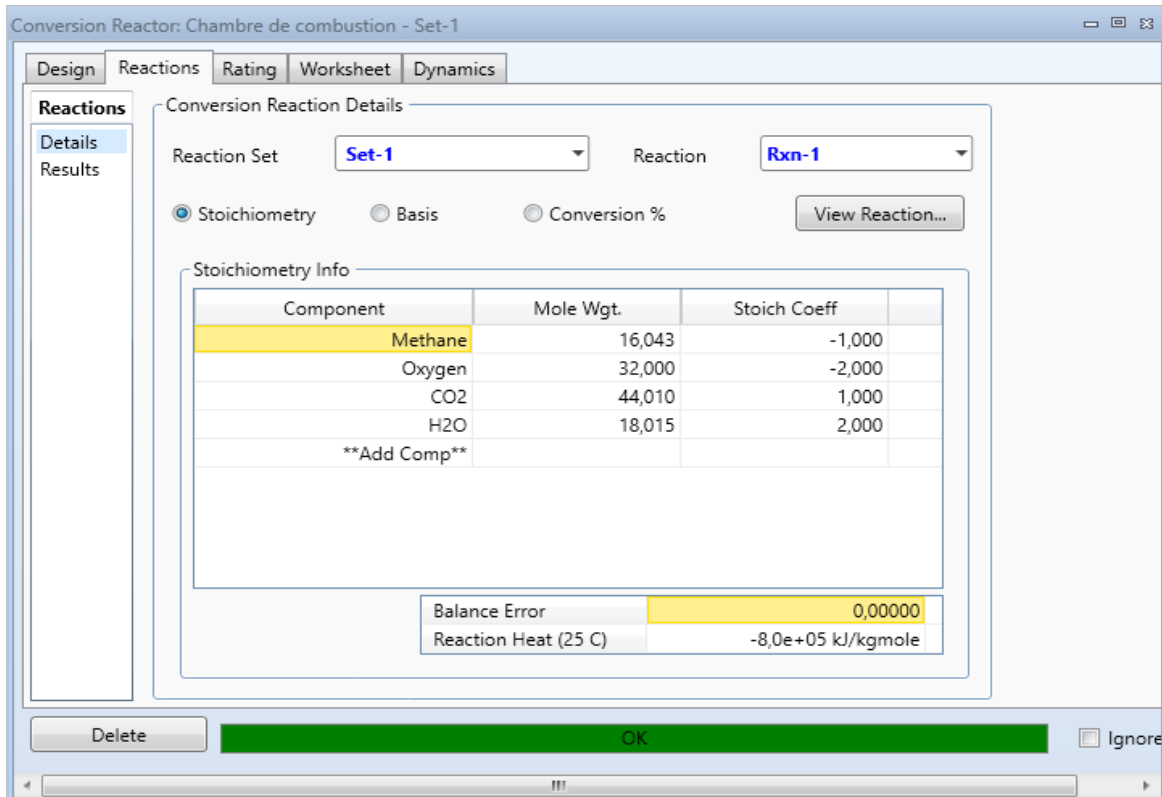
Définir à l'entrée (l'air comprimé et gaz naturel), la sortie de vapeur (produit) et la sortie de liquide (5) de la chambre de combustion.





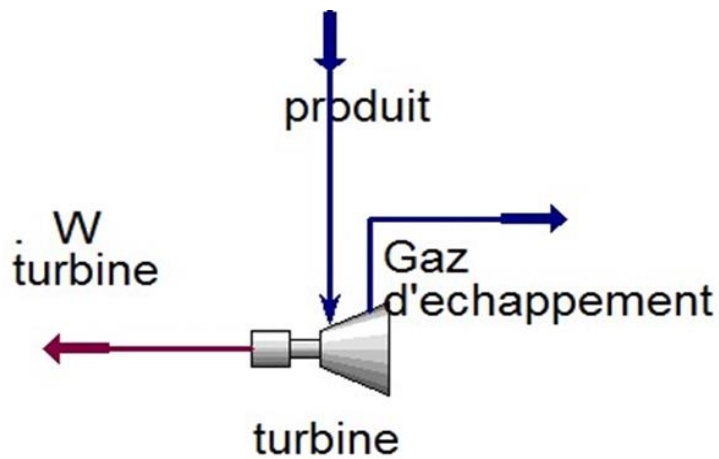
**Figure II.20 :** Installation de la chambre de combustion.

On introduit les quatre réactions dans la chambre à combustion qu'on a définie auparavant.



**Figure II.21 :** Fenêtre de réaction dans la chambre de combustion.

## ➤ TURBINE



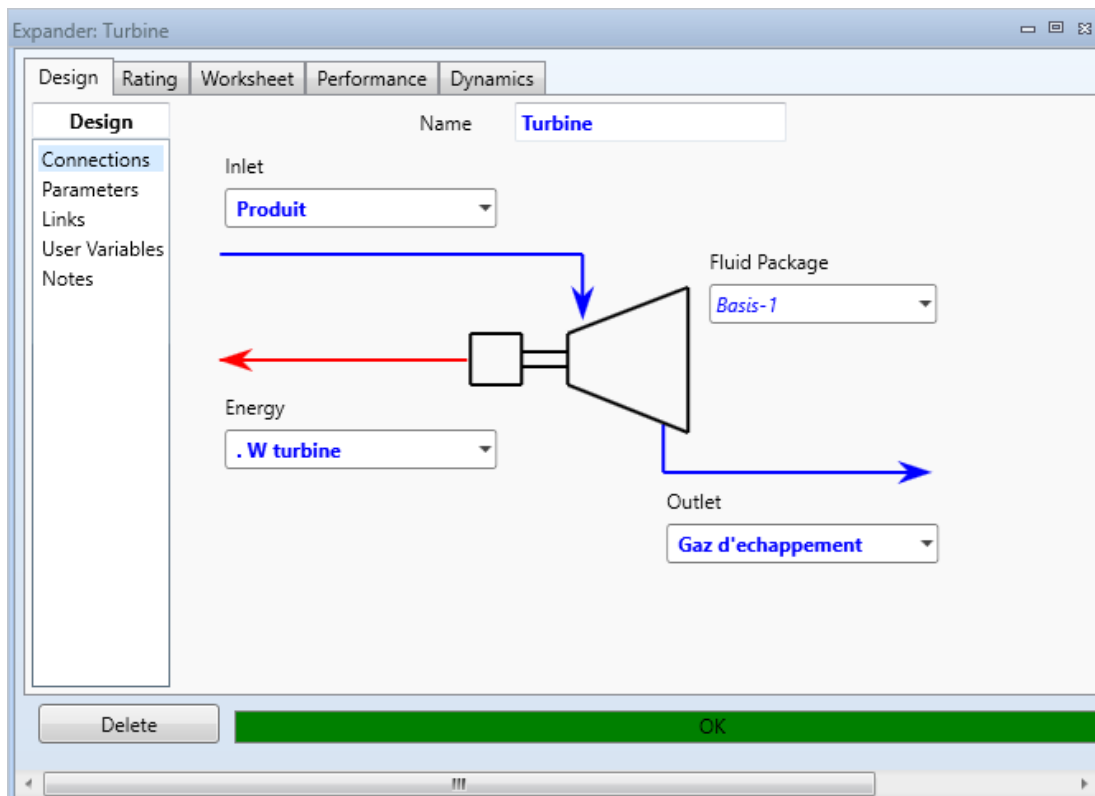
**Figure II.22 :** Présentation de la turbine.

On définit l'entrée, la sortie et l'énergie de la turbine.

L'entrée : C'est la sortie de la chambre de combustion (produit).

La sortie : Gaz d'échappement.

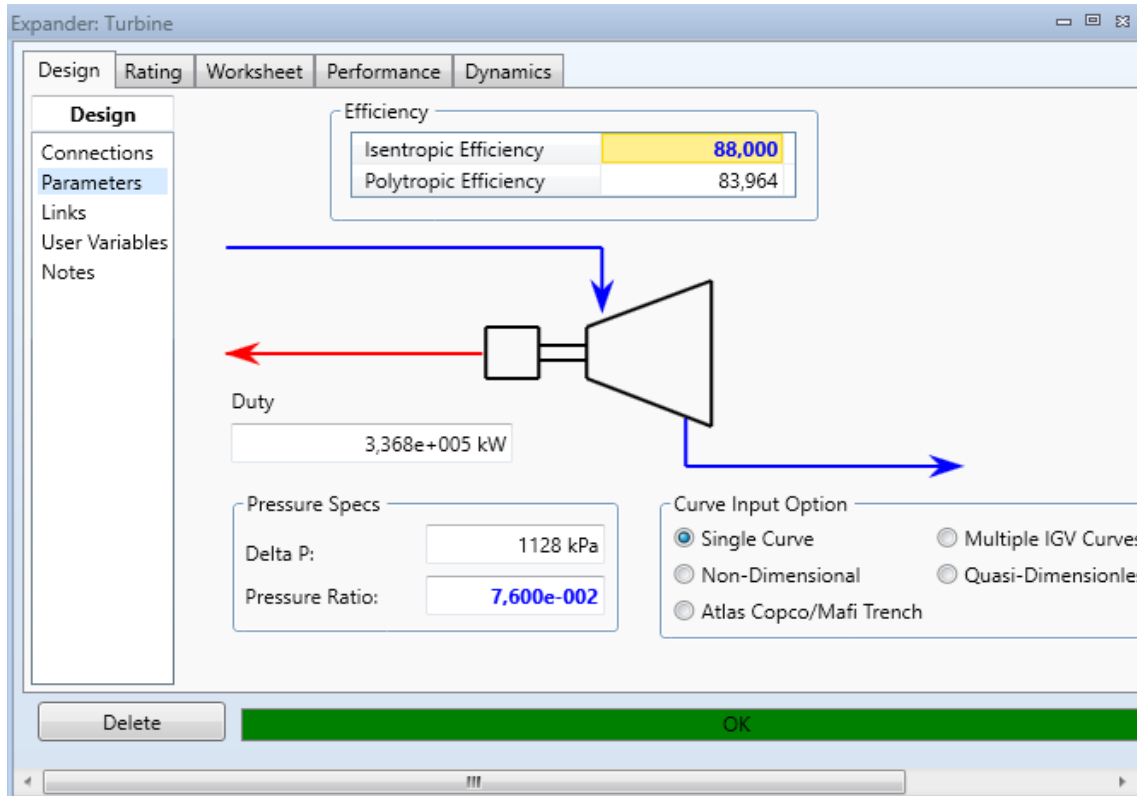
L'énergie : W turbine.



**Figure II.23 :** Installation de la turbine.

Dans les paramètres de la turbine, on définit les valeurs suivantes qui sont définies dans le tableau II.3 :

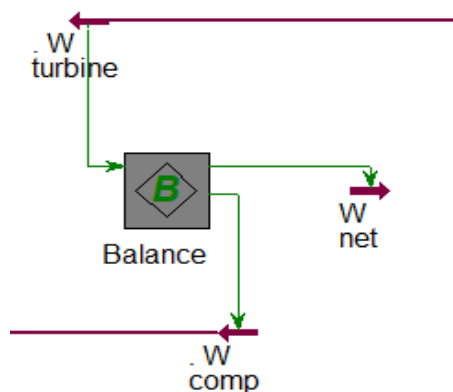
- Rendement isentropique :  $\eta_{is-t} = 0.88$
- Le rapport de pression :  $\pi_t = 7.6 \text{ e-}02$



**Figure II.24 :** Fenêtre des paramètres de la turbine.

### ➤ Balance

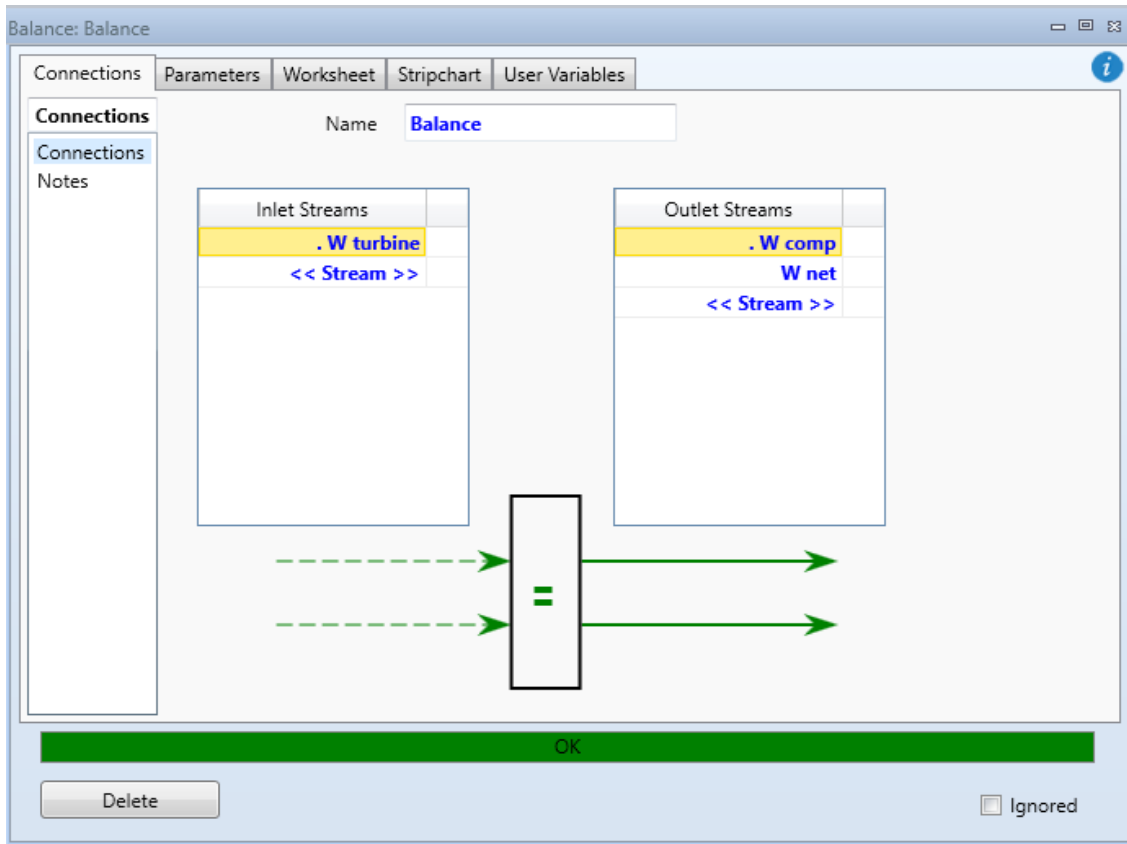
On utilise la balance pour diviser le travail de la turbine en deux parties le premier qui va faire entrainer le compresseur et le deuxième pour faire marcher le générateur.



**Figure II.25 :** Présentation de la balance.

Dans le paramètre de la balance on définit les entrées et les sorties :

- L'entrée : travail de la turbine  $W_{\text{turbine}}$ .
- La sortie : travail de compresseur  $W_{\text{comp}}$  et travail net  $W_{\text{net}}$  ( du générateur).



**Figure II.26 :** Installation du Balance.

## II.4. Validation de la simulation

La simulation thermodynamique de la centrale aux conditions de design est réalisée par Aspen HYSYS V.14. Sur la figure (II.27) le diagramme du processus de fonctionnement de la centrale de F'krina affiche quelques propriétés thermodynamiques importantes comme : (pression, température, débit massique, et exergie) à l'entrée et à la sortie de chaque appareil.

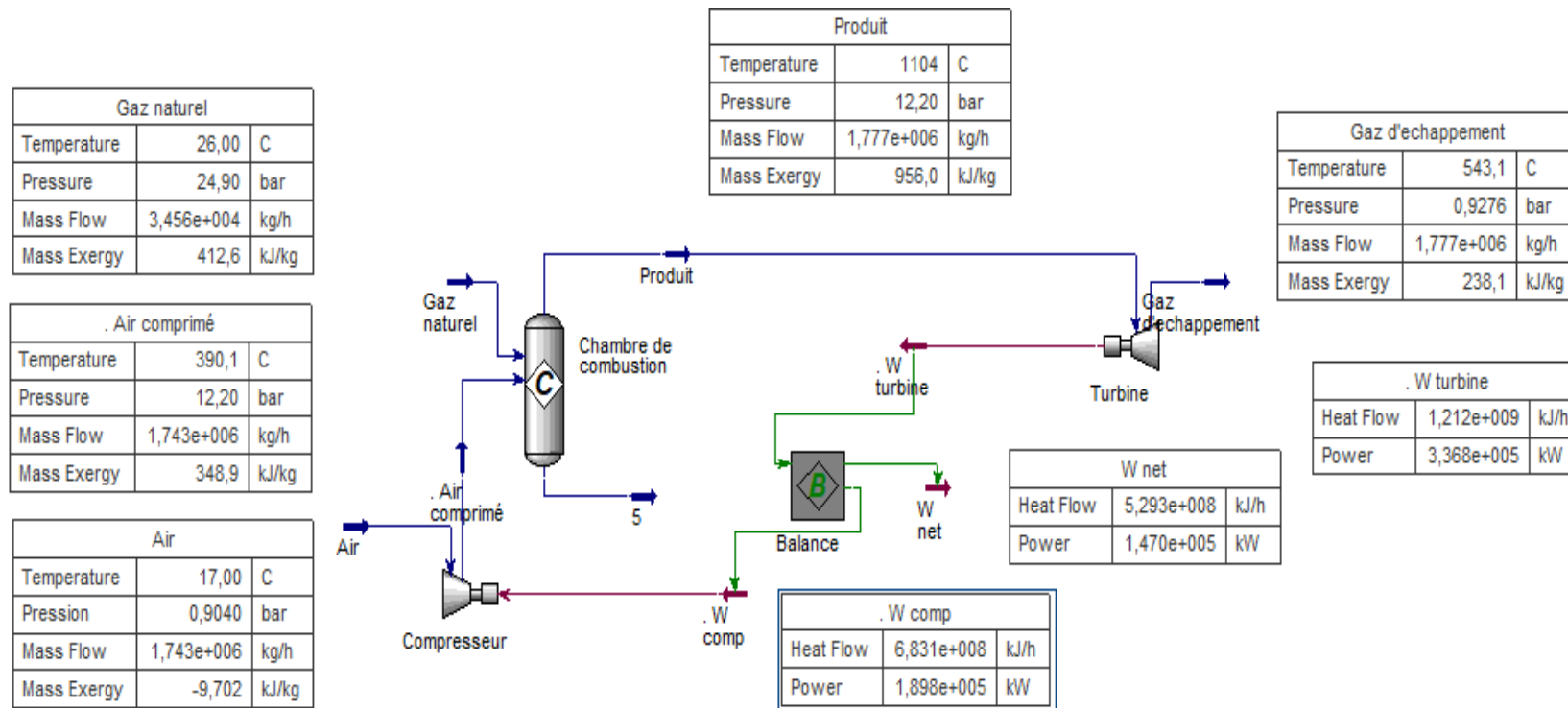


Figure II.27: Caractéristiques de la centrale électrique aux conditions de fonctionnement.

### Conclusion

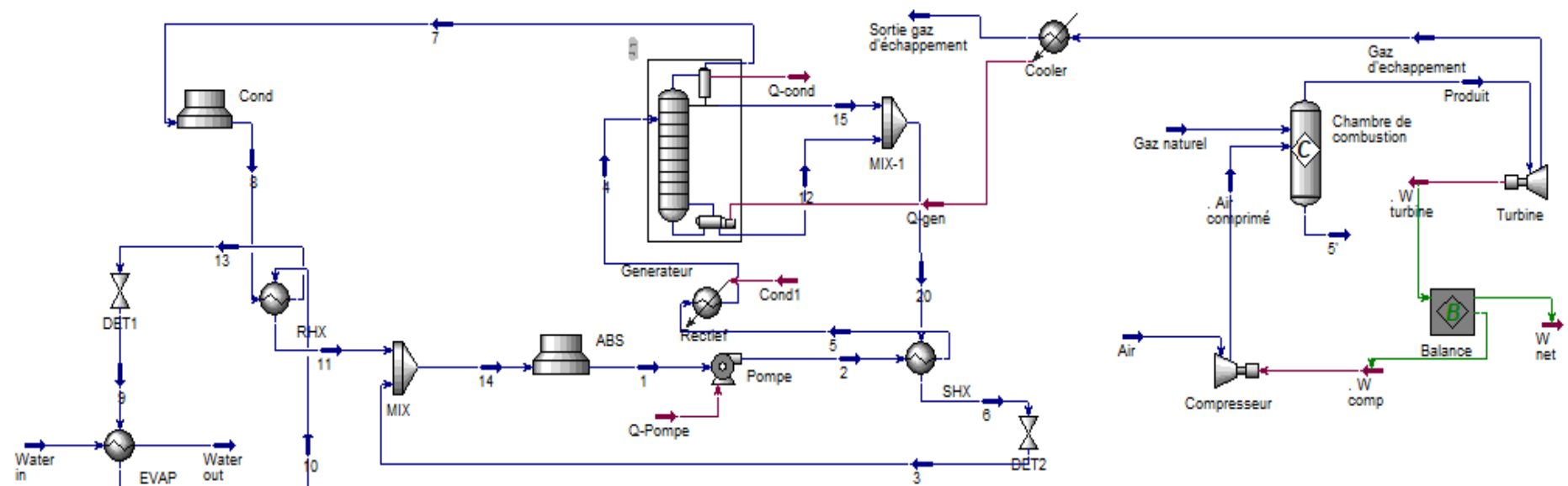
Une simulation approfondie de la centrale thermique de F'Krina a été effectuée dans ce chapitre à l'aide du logiciel Aspen HYSYS V.14, conformément aux conditions de conception requises

**CHAPITRE III : INTEGRATION DE LA  
MACHINE A ABSORPTION.**

### III.1. Présentation du nouveau système CCP

Le schéma de procédé du nouveau système CCP ( Combined Cooling and Power) proposé est présenté à la Figure III.1. Comme illustré, il comprend deux systèmes distincts, à savoir : la turbine à gaz existante et la machine à absorption à simple effet à ammoniac-eau.

Les gaz d'échappement à haute température issue de la turbine à gaz sont dirigés vers le générateur de la machine à absorption. Par conséquent, ces gaz fournissent la chaleur requise au générateur, tout en se refroidissant à l'aide d'un échangeur de chaleur (cooler) qui relie la turbine à gaz et la machine à absorption.



**Figure III.1 :** Couplage de la turbine à gaz existante et la machine à absorption eau-ammoniac.



Le système de réfrigération à absorption à simple effet utilisant le couple ammoniac- eau, utilisé pour convertir la centrale à turbine à gaz en une centrale à cycle combiné (CCP), est composé des éléments suivants : un générateur (colonne de distillation), un évaporateur, un condenseur à air, un absorbeur (composé : mélangeur avec échangeur de chaleur à air), deux détendeurs, une pompe, un échangeur de chaleur de solution et un échangeur de chaleur du réfrigérant.

Le tableau (III.1) définit les paramètres d'entrées utilisée pour la simulation de la machine à absorption couplé à la turbine à gaz.

Paramètre	Valeurs
Pression d'évaporateur	4.936 bar
Pression de condensation	22.38 bar
Température d'air	35 °C
Fraction massique de l'ammoniac a la sortie de générateur	0.07
Débit massique de la solution riche	23980 Kg/h
Température d'entrée d'eau	12 °C

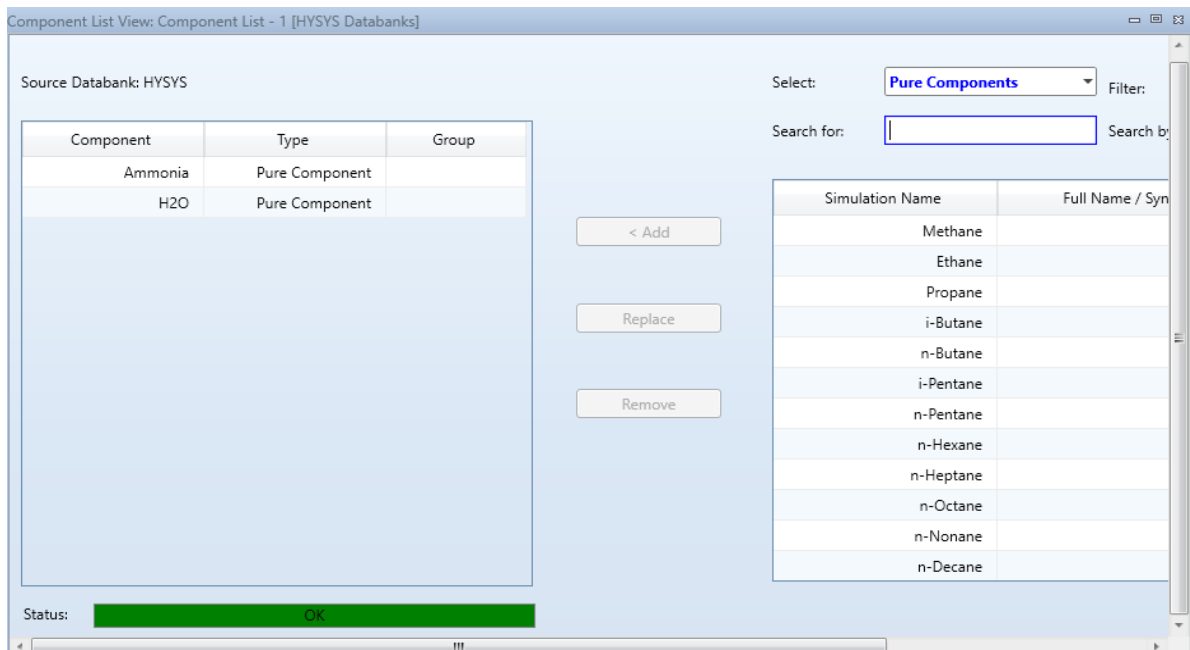
**Tableau III.1** : Les conditions de fonctionnement du système.

### III.2. Etapes de simulation

#### III.2.1 Première étape : Properties.

##### III.2.1.1 Composants

La première étape consiste à définir le couple fluide de la machine à absorption qui sont : l'eau et l'ammoniac ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure III.2** : Fenêtre de Composants de la machine.

### III.2.1.2. Fluid packages

L'équation d'état de Peng-Robinson a été choisie comme modèle thermodynamique.

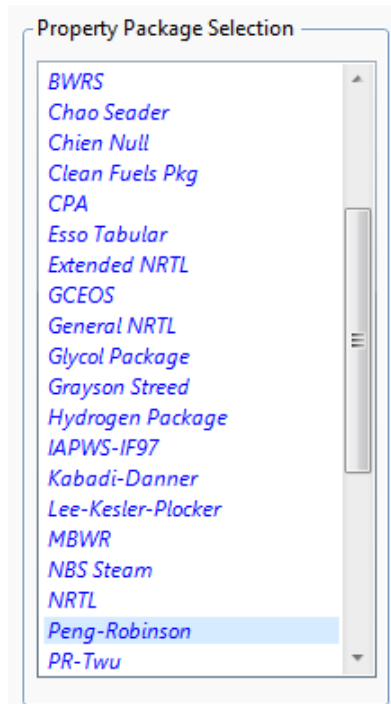


Figure III.3 : Fenêtre de la liste de fluides packages.

### III.2.2. Deuxième étape : Simulation.

Cette deuxième phase est dédiée à la simulation des divers composants de la machine à absorption.

#### ▪ Pompe

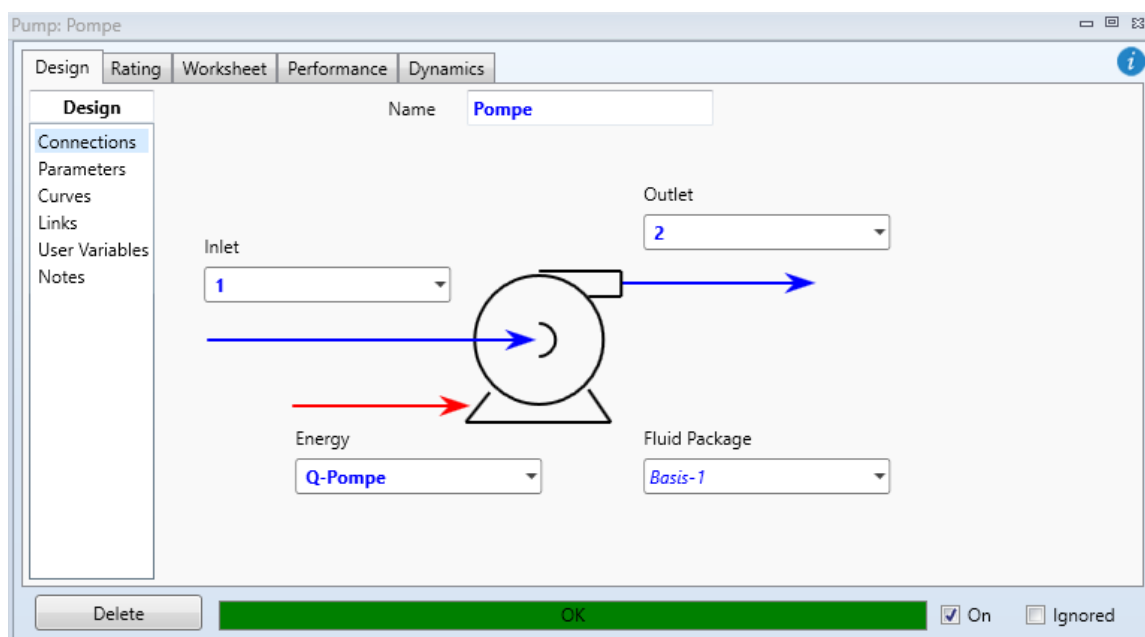


Figure III.4 : Installation d'une pompe.

A partir de la figure III.4, on a :

1 : Entrée de la pompe (la solution riche : ammoniac et l'eau)

2 : Sortie de la pompe

Q-Pompe : l'énergie consommée par la pompe.

#### ▪ Echangeur de chaleur tube/calandre

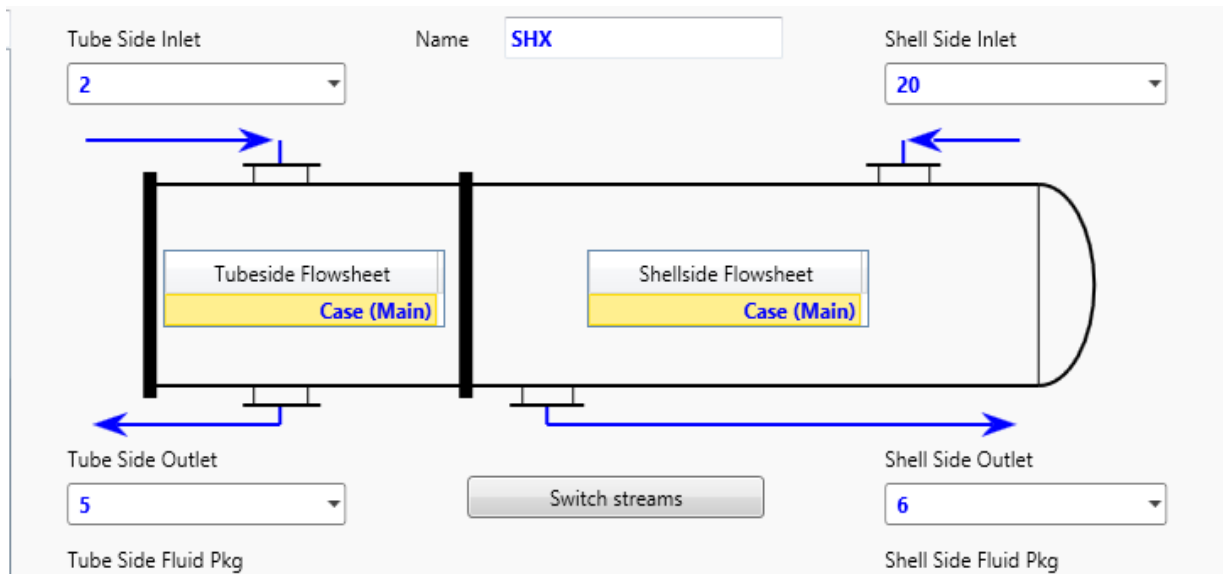
Dans notre système il existe 3 échangeurs de chaleur :

SHX : Echangeur de chaleur de la solution.

RHX : Echangeur de chaleur de refroidissement.

EVAP : Evaporateur.

La solution pauvre produite par le générateur est refroidie dans l'échangeur de chaleur de solution (SHX) en préchauffant la solution concentrée d'ammoniac avant son entrée dans le générateur.



**Figure III.5 :** Installation d'un échangeur de chaleur SHX.

Où :

2 : L'entrée de la solution riche froide côté tube.

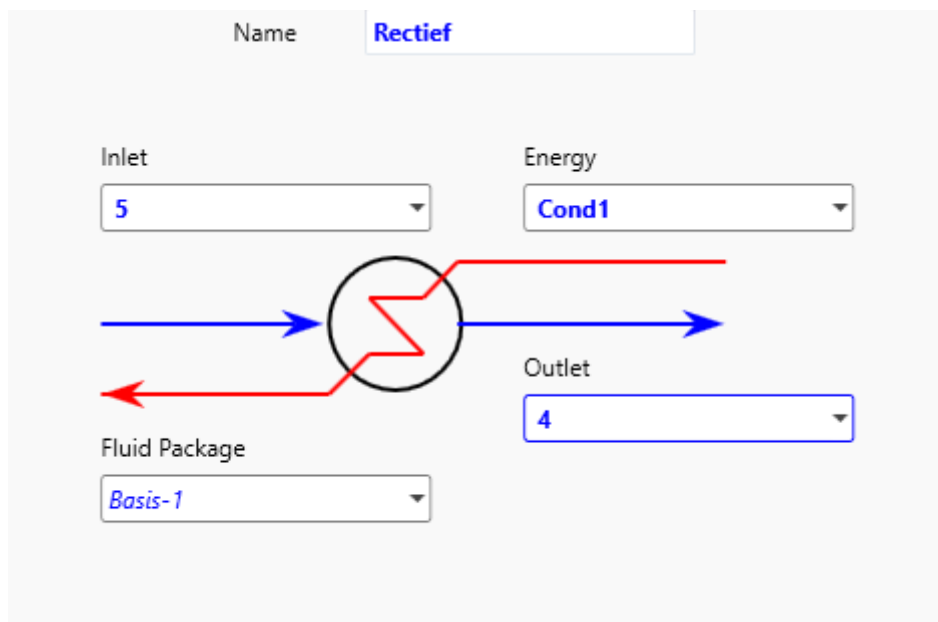
5 : La sortie de solution riche froide côté tube.

20 : Entrée de la solution pauvre côté calandre.

6 : Sortie de la solution pauvre côté calandre.

### ▪ Heater

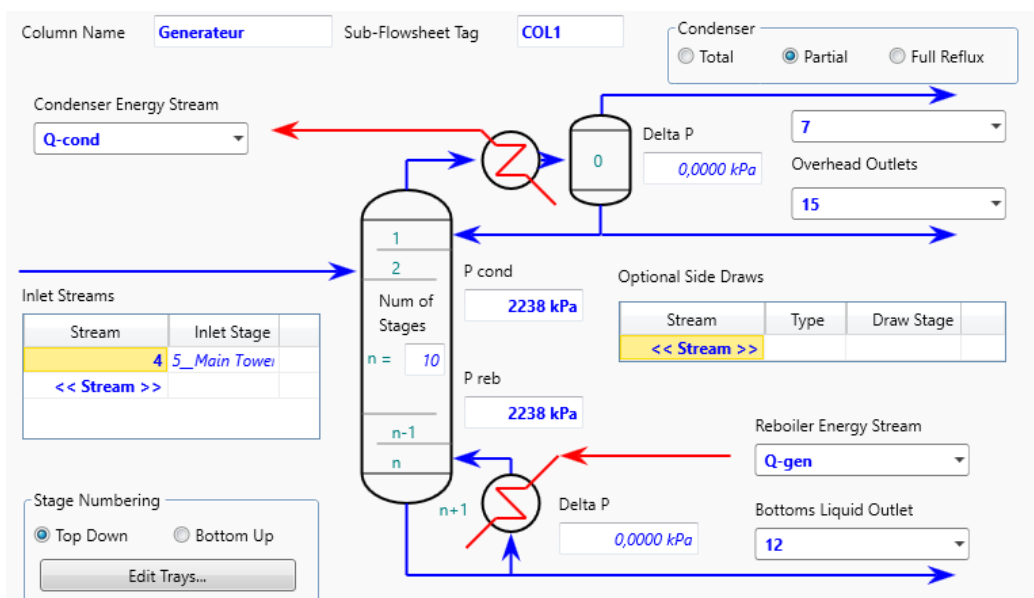
Le heater est utilisé pour chauffer la solution riche jusqu'à la température de saturation avant l'entrée au générateur.



**Figure III.6 :** Installation de heater.

### ▪ Générateur

Dans le générateur, le mélange de solution ammoniac-eau est chauffé et séparé en phases gazeuse et liquide, grâce à la chaleur fournie par les gaz d'échappement issus initialement de la turbine à gaz.



**Figure III.7 :** Installation de générateur.

4 : La solution riche ammoniac-eau à l'entrée du générateur.

7 : La vapeur d'ammoniac produite par le générateur.

15 : Liquide sortant du condenseur.

12 : Liquide en sortie du Reboiler.

Q-cond : L'énergie dégagée par le condenseur.

Q-reg : L'énergie absorbée par le rebouilleur, qui constitue la chaleur récupérée à partir des gaz d'échappement de la turbine à gaz.

#### ▪ Vanne de régulation ou détendeur

Il existe 2 détendeurs dans ce système qui permet de réguler la pression et le flux, la température de liquide.

##### ➤ Pour le DET2

La solution pauvre issue de l'échangeur de chaleur de solution (SHX) est détendue dans la vanne de détente avant (DET2)

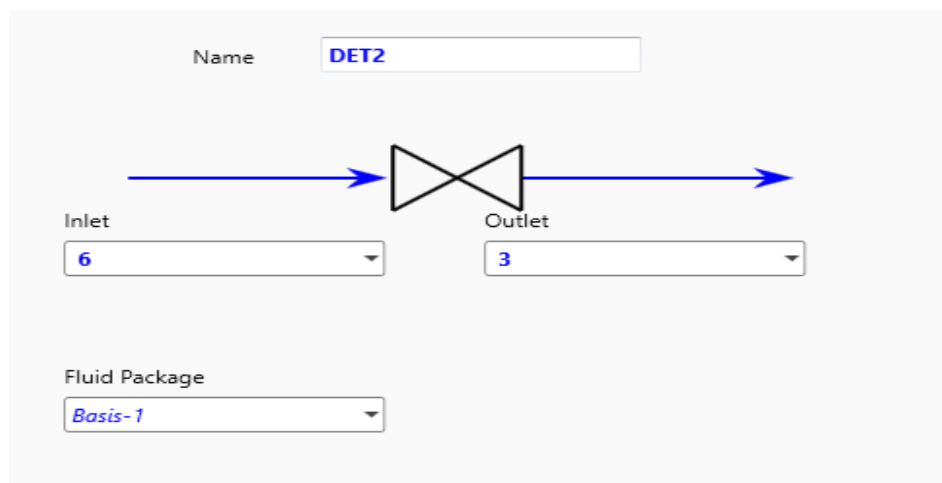


Figure III.8 : Installation de détendeur 2.

#### ▪ Mixeur

Le rôle du mixeur (ou mélangeur) dans cette installation est de mélanger les deux fluides, afin d'obtenir une solution homogène en température, en pression, ou en concentration. Il existe deux mixeurs dans notre système.

### ➤ MIX

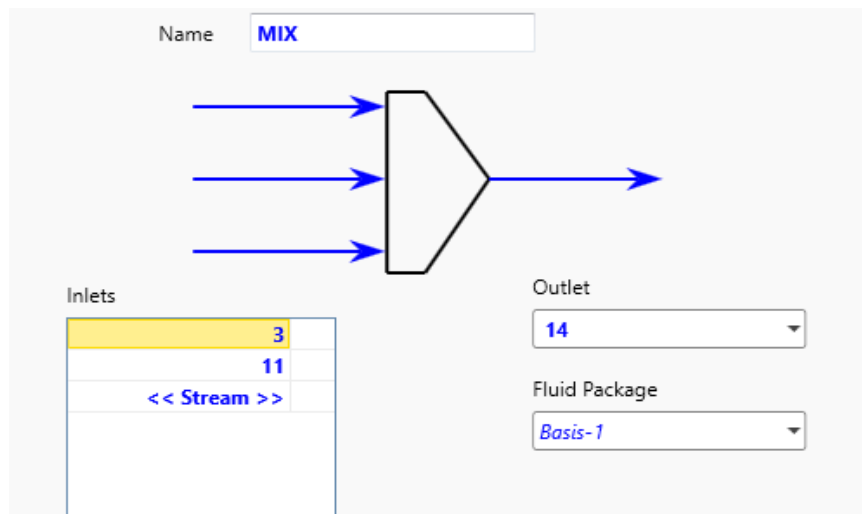


Figure III.9 : Installation de Mixeur.

### ➤ MIX 1

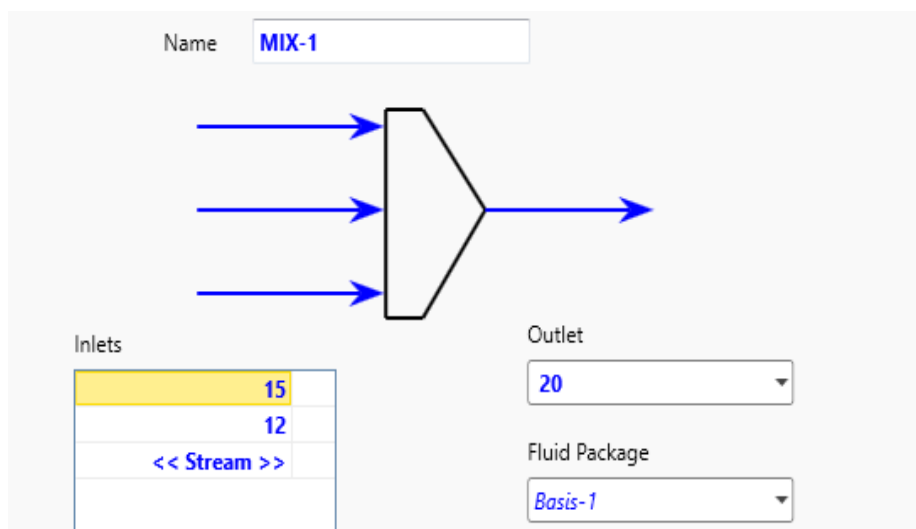
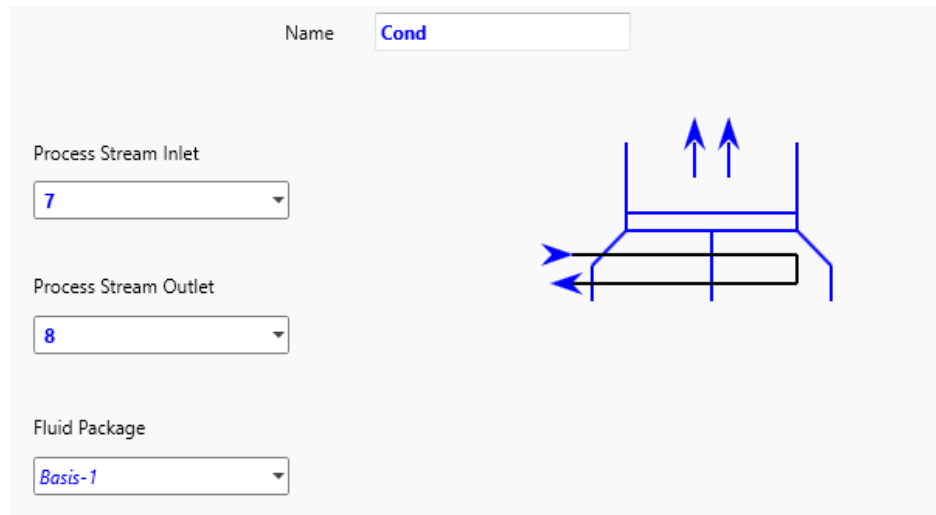


Figure III.10 : Installation de Mixeur 1.

### ▪ Condenseur

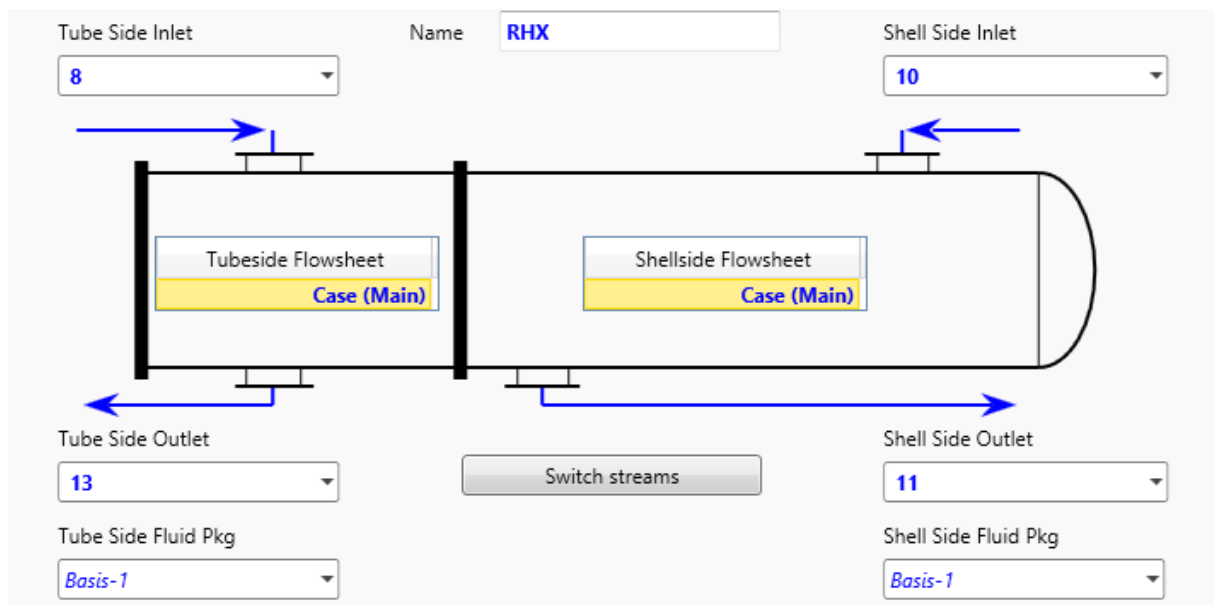
La vapeur d'ammoniac produite par le générateur est liquéfiée dans le condenseur.



**Figure III.11 :** Installation de Condenseur.

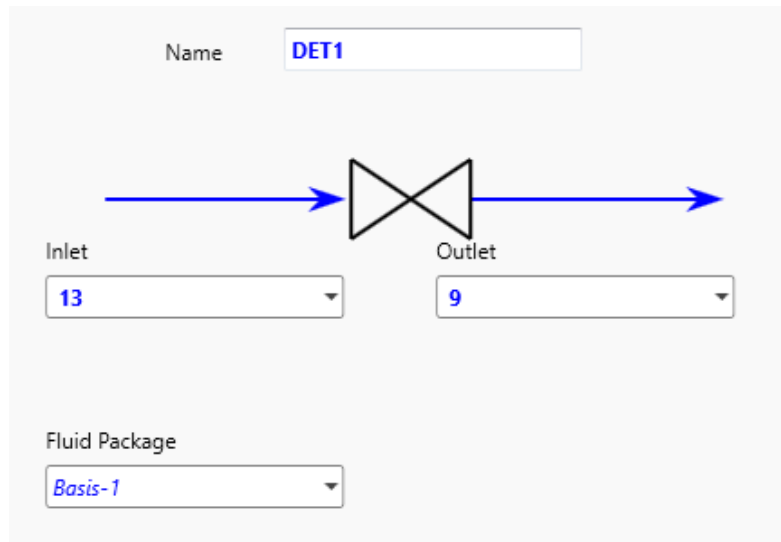
### ▪ RHX

Le liquide produit par le condenseur est refroidi dans l'échangeur de chaleur de solution (RHX).



**Figure III.12 :** Installation d'un échangeur de chaleur RHX.

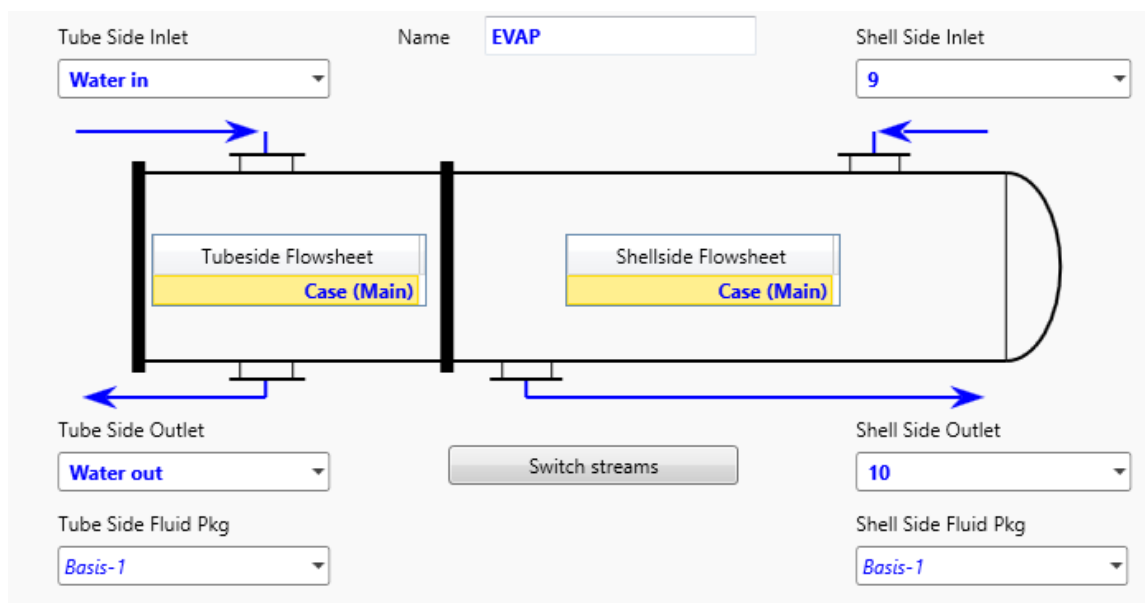
### ▪ DET 1



**Figure III.13:** Installation de détendeur 2.

### ▪ EVAP

Le liquide ammoniac s'évapore à basse pression en absorbant la chaleur de l'eau.



**Figure III.14:** Installation d'un échangeur de chaleur EVAP.

### ▪ Absorbeur

Dans notre simulation l'absorbeur est composé d'un mixeur et d'un échangeur de chaleur à air (air Cooler). La solution pauvre est mélangée à la vapeur de  $\text{NH}_3$  qui provient de l'évaporateur ensuite l'absorption se complète dans l'échangeur de chaleur à air. La solution concentrée ammoniac-eau est ensuite pompée de la basse pression vers la haute pression dans le générateur.



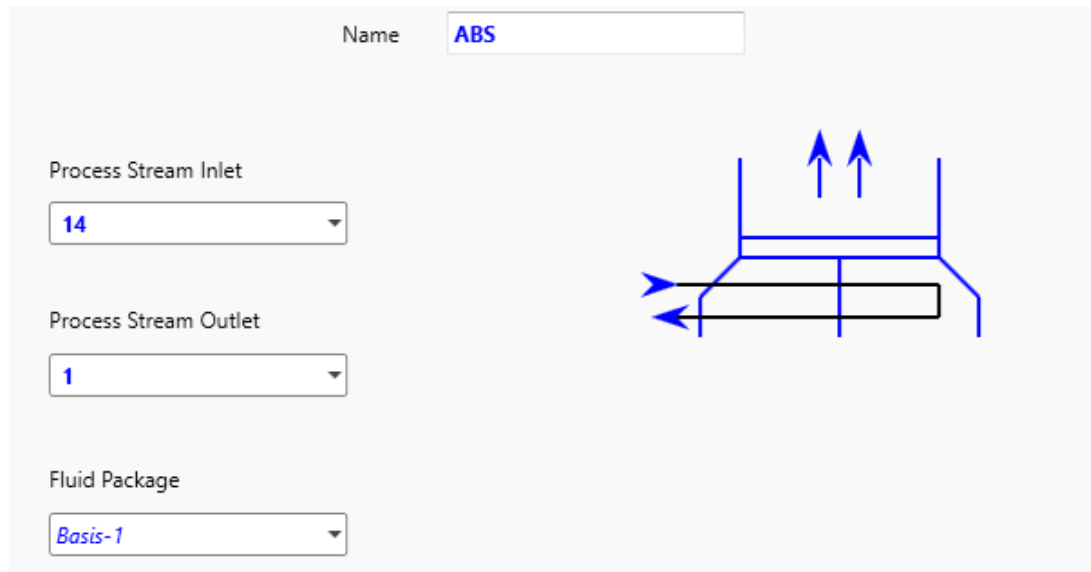


Figure III.15 : Installation d’Absorbeur.

### III.2.3 Refroidisseur

Refroidisseur (Cooler) est un échangeur de chaleur qui est utilisé comme un moyen de couplage entre la turbine à gaz et la machine à absorption.

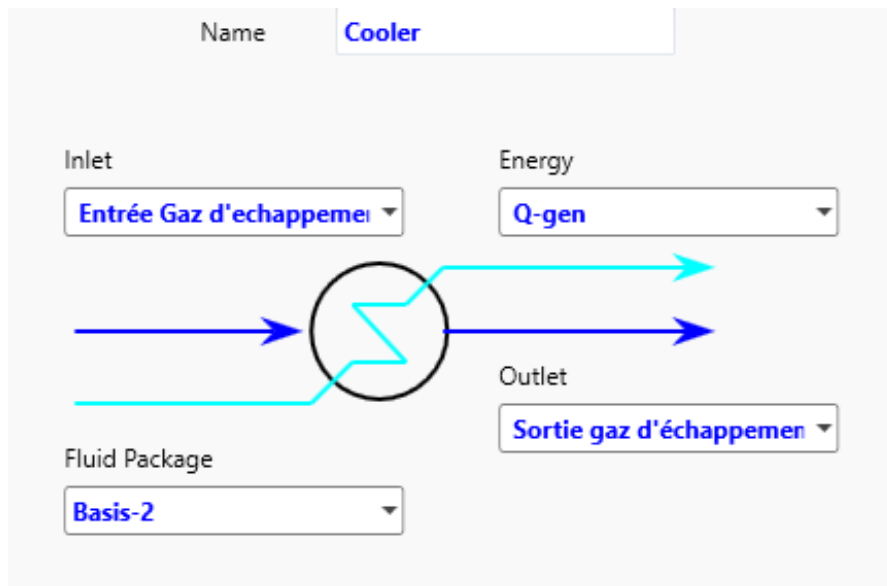
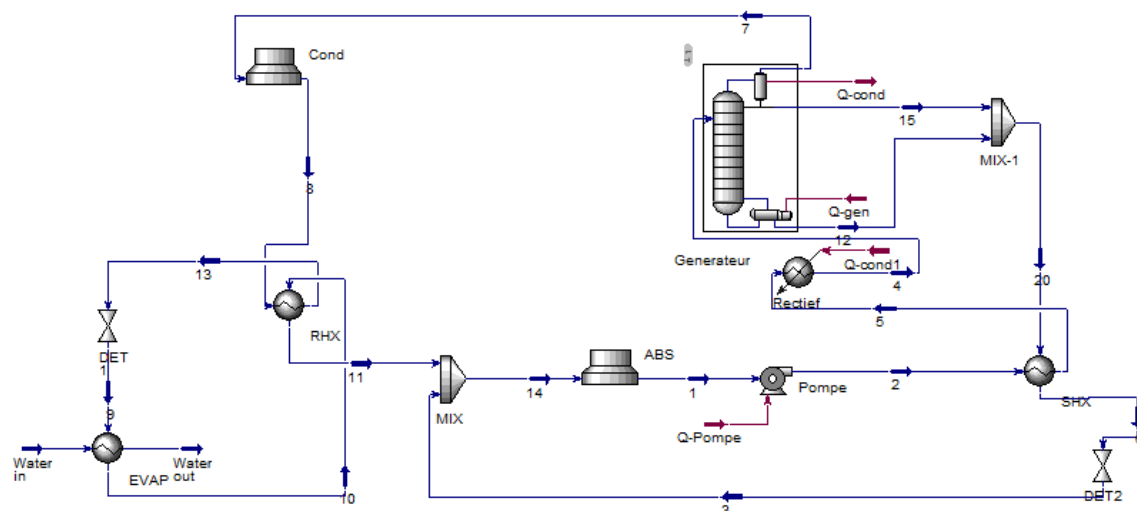


Figure III.16 : Installation de Cooler.

Le processus final de la machine à absorption eau- ammoniac étudié sous le logiciel Aspen HYSYS V.14 est représenté dans la figure II.14.



**Figure III.17 :** Simulation d'une machine à Absorption ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ).

Le tableau III.2 résume les différents composants de la machine modélisés sous ASPEN HYSYS, ainsi que les données d'entrée correspondantes.

Éléments de la machine	Valeurs d'entrée
Point d'état 1	Pression (bar)= 4,936 bar Température (°C) = 43,45°C Débit massique total (kg/h) = 23980 kg /h Fraction de vapeur = 0 Fraction massique de $\text{NH}_3$ = 0,437. Fraction massique de $\text{H}_2\text{O}$ = 0,563.
Pompe	Rendement isentropique = 1 Haute pression = 22,38 bar Perte de pression = 0 bar
Échangeur de chaleur de la solution (SHX)	Température de sortie du fluide chaud =63.88°C Perte de pression = 0 bar
Échangeur de chaleur de refroidissement (RHX)	Perte de pression = 0 bar

Générateur	<p>Ratio massique de reflux = 0.03</p> <p>La pression du condenseur = 22.38 bar</p> <p>La pression du rebouilleur = 22.38 bar</p> <p>Perte de pression = 0 bar</p> <p>La masse de vapeur = 9911.26 kg/ h</p> <p>La masse de liquide = 14068.74 kg/h</p>
Condenseur	<p>Pincement de température =13,5°C</p> <p>Température d'air =35°C</p> <p>Perte de pression = 0 bar</p>
Absorbeur	<p>Pincement de température =8,5°C</p> <p>Perte de pression = 0 bar</p>
Evaporateur	<p>Pincement de température = 2,5 °C</p> <p>Perte de pression = 0 bar</p> <p>Eau : Température d'entrée =12°C</p> <p>Fraction de vapeur = 0</p>

**Tableau III.2 :** Éléments de couplage avec leurs données d'entrée.

### III.3 Rendement global

Le rendement global de la nouvelle centrale combinée de la production du froid et d'électricité CCP se calcule par la formule suivante :

$$\eta_{CCP} = \frac{W_{net} + \dot{Q}_f}{\dot{m}_f \times PCI} \quad (III.2)$$

$W_{net}$ : Puissance nette électrique produite (MW).

$\dot{Q}_f$ : Puissance frigorifique produite (MW).

$\dot{m}_f \times PCI$  : Représente l'énergie du combustible consommé pour obtenir la production nette de chaleur et d'électricité.

#### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation du nouveau système d'intégration de la machine à absorption (eau-ammoniac) à simple effet avec des étapes bien détaillée à l'aide de logiciel Aspen HYSYS.

**CHAPITRE IV : RESULTATS ET  
INTERPRETATION.**

## **IV. Introduction**

Ce chapitre présente les résultats de la simulation thermodynamique de la centrale optimisée de F'kirina, effectuée à l'aide du logiciel Aspen HYSYS V.14. Il inclut également l'estimation du bilan carbone associé à la nouvelle configuration proposée.

### **IV.1. Validation de résultats de la turbine à gaz [25]**

À partir du tableau IV.1, qui représente la comparaison entre les résultats de l'étude faite par logiciel Aspen HYSYS V.14 et les valeurs de Khaldi [27]. Nous remarquons que l'erreur est faible. Nous concluons que les valeurs obtenues par la simulation avec Aspen HYSYS V.14 et les valeurs de Khaldi sont proches.

	Puissance Simulation de notre étude W(KW)	Puissance simulation de Khaldi [27] W(KW)	L'erreur (%)
Compresseur	189750	190205.38	0.24
Chambre de combustion	434208	434044.8	0.04
Turbine	336666.67	340009.12	0.98
Puissance nette	147027.77	146200	0.57

**Tableau IV.1 :** Comparaison entre les valeurs de la simulation et les valeurs de Khaldi.

### **IV.2. Validation de la machine à absorption [26]**

On représente les résultats de validation de la simulation de la machine à absorption (eau-ammoniac) à une température de l'air 35°C à l'aide de logiciel Aspen HYSYS V.14 dans ce tableau qui présente les valeurs : pression, température, fraction de vapeur, débit massique, et fraction massique de NH<sub>3</sub> pour tous les points de système :

Points	Situé entre	Pression (bar)	Température (°C)	Fraction de vapeur	Débit massique (kg/h)	Fraction massique de NH <sub>3</sub>
1	ABS_Pompe	4.936	43.45	0	90.72	43.70
2	Pompe_SHX	22.38	43.58	0	90.72	43.70
3	DET2_MIX	4.936	115.3	0	55.07	9.49
4	Heater_Générateur	22.38	111.4	0.489	90.72	43.70
5	SHX_ Générateur	22.38	92.32	0	90.72	43.70
6	SHX_DET2	22.38	115	0	55.07	9.49
7	Générateur _Cond	22.38	102.4	1	35.65	97.29

8	Cond_RHX	22.38	48.50	0	35.65	97.44
9	DET1_Evap	4.936	4.929	0.0904	35.65	97.44
10	Evap_RHX	4.936	9.5	0.8339	35.65	97.44
11	RHX_MIX	4.936	15.03	0.0902	35.65	97.44
12	Generateur_MIX1	22.38	194.1	0	55.04	9.46
13	RHX_DET1	22.38	28.66	0	35.65	97.44
14	MIX_ABS	4.936	89.36	0.3493	35.65	43.70
15	Generateur_MIX1	22.38	102.4	0	90.72	47.40
20	MIX1_SHX	22.38	194.1	0	55.07	9.01

**Tableau IV.2 :** Validation de la simulation de système absorption avec logiciel Aspen HYSYS V.14.

On observe que le fonctionnement du cycle à absorption est caractérisé par deux niveaux de pression principaux. Les températures varient selon les étapes du circuit, atteignant plus de 200°C au niveau du générateur, ce qui indique une bonne récupération de chaleur. La fraction de vapeur évolue selon les différentes phases du cycle, montrant les zones d'évaporation et de condensation. Les débits massiques restent constants dans chaque boucle, ce qui traduit une bonne conservation de la masse. Enfin, la fraction massique de  $\text{NH}_3$  varie fortement selon les points, passant d'une solution pauvre à une solution riche en ammoniac, ce qui confirme le bon déroulement du cycle d'absorption.

#### **IV.2.1. Performances de la machine à absorption**

Le tableau représente les puissances thermiques pour les composants principaux de la machine à absorption et le Coefficient of Performance (COP) :

Composants	Nos valeurs	Valeur de [26]	L'erreur %
Q Générateur (KW)	17.97	17.97	0
Q Evaporateur (KW)	9.557	9.537	0.21
Q Condenseur (KW)	12.68	12.69	0.08
Q Absorbeur (KW)	17.89	14.11	27
COP	0.53	0.53	0

**Tableau IV.3 :** Comparaison des résultats des performances de système absorption.

Le tableau IV.3 démontre une correspondance près de parfaite entre nos valeurs déterminées et celles de référence pour la majorité des composants, avec des variations faibles concernant les puissances du générateur, de l'évaporateur et du condenseur (erreurs en dessous de 0,3 %). Le Coefficient de Performance (COP) est exactement le même, ce qui indique de la fiabilité générale de notre modélisation. Mais, une différence significative se montre en ce qui concerne

la capacité de l'absorbeur, avec un écart de 27 %, indiquant soit une modification dans les conditions pratiques, soit une divergence dans les suppositions ou paramètres simulés.

#### IV.2.2. Valeurs des échangeurs de chaleurs (UA)

Echangeurs de chaleurs	UA de notre étude (W/C)	UA(W/C) [26]	L'erreur %
Condenseur	379.0	378.89	0.03
Evaporateur	4070	4083.33	0.33
Absorbeur	487.7	658.61	26
Echangeurs de chaleurs de refroidissement (RHX)	40.5	40.28	0.54

**Tableau IV.4 :** Les valeurs de UA calculée à une température de l'air 35 °C.

L'échangeur Condenseur montre une excellente correspondance avec la référence, affichant une erreur de 0,03 %. De même, l'écart entre l'évaporateur et l'échangeur de refroidissement (RHX) est faible, respectivement 0,33 % et 0,54 %, ce qui témoigne d'une excellente précision dans les calculs. Par contre, l'Absorbeur montre un écart important avec une valeur d'erreur de 26%, ce qui indique la nécessité d'une étude plus détaillée pour saisir cette différence et améliorer la modélisation de cet échangeur.

### IV.3. Résultats de couplage

Le couplage c'est l'intégration de la turbine à gaz avec la machine à absorption (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) en alimentant le générateur de la machine à absorption avec les gaz d'échappement de la turbine qui sortant à une température 543.1°C et se refroidir dans un refroidisseur pour baisser la température et récupérer la chaleur perdue qui égale à 5 MW ont modifiés les débits au niveau de la machine et vérifiant les fractions massiques de NH<sub>3</sub>.

- Les valeurs de la turbine à gaz restent les mêmes de chapitre 2.
- On relie entre la turbine à gaz et la machine à absorption avec Cooler.

#### IV.3.1. Valeurs de l'échangeur de chaleur

Paramètre	Température (°C)	Pression (bar)	Débit (Kg/h)	Q (MW)
Entrée (gaz d'échappement)	543.1	0.9276	1.777 e+06	5
Sortie (gaz d'échappement)	534.4	0.9276	1.777 e+06	

**Tableau IV.5 :** Les valeurs de refroidisseurs à partir de Aspen HYSYS.



### IV.3.2. Résultats de la nouvelle machine à absorption

Points	Situé entre	Pression (bar)	Température (°C)	Fraction de vapeur	Débit massique (Kg/h)	Fraction massique de NH <sub>3</sub> (%)
1	ABS _ Pompe	4.936	43.45	0	23980	43.70
2	Pompe _ SHX	22.38	43.58	0	23980	43.70
3	DET2_ MIX	4.936	64.24	0	14300	6.97
4	Heater_Générateur	22.38	92.32	0.0489	23980	43.70
5	SHX_ Rectief	22.38	111.4	0	23980	43.70
6	SHX_DET2	22.38	63.88	0	14300	7.34
7	Générateur_ Cond	22.38	96.72	1	9675	98
8	Cond_RHX	22.38	48.50	0	9675	98
9	DET1_Evap	4.936	4.707	0.0914	9675	98
10	Evap_RHX	4.936	9.5	0.8774	9675	98
11	RHX_MIX	4.936	18.29	0.9094	9675	98
12	Generateur_MIX1	22.38	201.8	0	14070	6.60
13	RHX_DET1	22.38	28.66	0	9675	98
14	MIX_ABS	4.936	82.58	0.3081	23980	43.70
15	Generateur_MIX1	22.38	102.4	0	234.9	49.43
20	MIX1_SHX	22.38	200	0	14300	7.34

**Tableau IV.6 :** Résultats de couplage par logiciel Aspen HYSYS.

Les résultats de couplage obtenus avec Aspen HYSYS V.14 montrent un bon équilibre des pressions et des paramètres clés du cycle d'absorption, tels que les températures, fractions de vapeur et concentrations d'ammoniac, confirmant un fonctionnement efficace et stable de la machine à absorption, ainsi que sa capacité à optimiser ses performances.

### IV.3.3. Nouvelles performances de la machine à absorption

Le tableau représente les nouvelles puissances thermiques pour les composants principaux de la machine à absorption après le couplage et le Coefficient of Performance (COP) :

Composants	Valeurs
Q Générateur (KW)	5000
Q Evaporateur (KW)	2741
Q Condenseur (KW)	3369

Q Absorbeur (KW)	4079
COP	0.55

**Tableau IV.7:** Résultats des performances de nouveau système.

Le tableau IV.7 présente les nouvelles puissances thermiques des principaux composants de la machine à absorption après couplage, ainsi que le Coefficient of Performance (COP). On observe une puissance thermique élevée au générateur (5000 kW) à partir de Cooler, ce qui indique une bonne récupération de chaleur. L'évaporateur, le condenseur et l'absorbeur affichent également des puissances significatives, témoignant d'un fonctionnement équilibré du système. Le COP de 0,55, bien que modéré, reste acceptable pour ce type de machine utilisant de la chaleur résiduelle, et indique une amélioration de l'efficacité énergétique globale.

- Nombre de machines à absorption simple effet pouvant être alimentés par la récupération totale de la chaleur 243.9MW lorsque chaque machine nécessite pour alimenter à une puissance de 5MWde chaleur égale :

$$\text{Nombre de machine} = \frac{243.9 \text{ MW}}{5 \text{ MW}} = 48.78$$

Donc la puissance totale 243.9 MW peut alimenter près de 48 machines à absorption de 5MW chacune.

#### IV.4 Calcul du rendement

Le tableau (IV.8) représente les valeurs de rendement global pour la turbine à gaz et CCP :

	Rendement globale
Turbine à gaz	34%
CCP	64.7%

**Tableau IV.8 :** Valeurs des rendements globaux.

Le rendement de la turbine à gaz fonctionnant en cycle simple est faible, car une partie de l'énergie thermique du combustible est convertie en énergie mécanique ou électrique, cela signifie qu'une grande partie de l'énergie du combustible est ainsi perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement.

Le rendement de CCP est très élevé, car ce système exploite la récupération de la chaleur résiduelle de la turbine à gaz à partir des gaz d'échappement pour alimenter une machine à absorption, ce qui permet de produire du froid, d'améliorer l'efficacité énergétique globale et de réduire les pertes.

## IV.5. Bilan Carbone

Le bilan carbone permet de calculer et de mesurer la quantité totale des gaz à effet de serre émise ou produits par une activité

### IV.5.1. Emissions de CO<sub>2</sub>

L'estimation de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> a été calculée sur la base de la relation suivante [28] :

$$\text{Émissions de CO}_2 \text{ [kgCO}_2\text{/MWh]} = \frac{(\text{Facteur d'émission du gaz naturel } [\frac{\text{kgCO}_2}{\text{TJ}}] \times 0,0036 [\frac{\text{MWh}}{\text{TJ}}])}{(\text{Rendement global de la centrale électrique [\%]} / 100)}$$

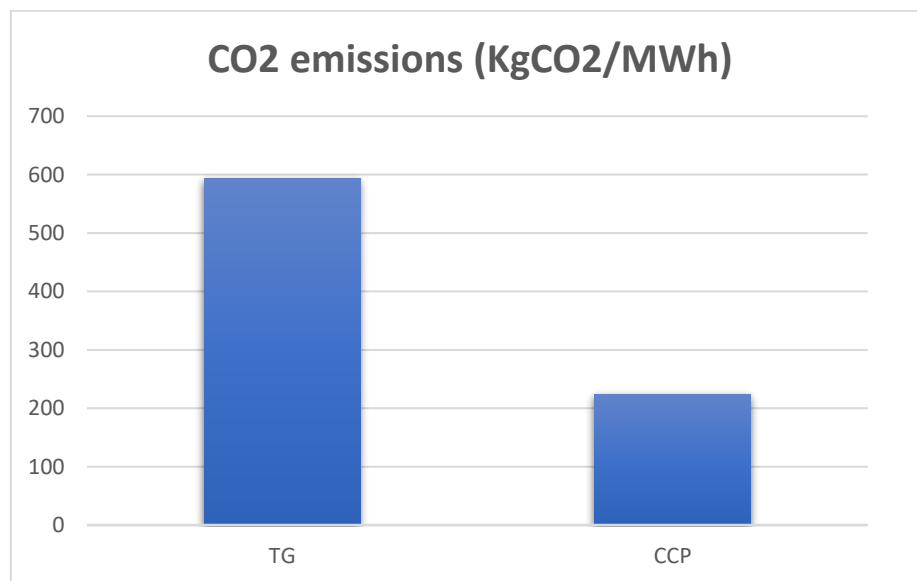
Où :

Facteur d'émission du gaz naturel = 56 100 kgCO<sub>2</sub>/TJ [29].

1 MWh = 0,0036 TJ.

	Emission de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /MWh]
Turbine à gaz	594
CCP	224

**Tableau IV.9 :** Emission de CO<sub>2</sub>.



**Figure IV.1:** Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> pour la configuration étudiée.

A partir de la figure IV.1 on trouve que la turbine à gaz (TG) présente un niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> très élevé en raison de son faible rendement et de l'absence de récupération de la chaleur résiduelle, ce qui constitue une perte énergétique importante et une source directe d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Le système CCP distingue une forte réduction des émissions de CO<sub>2</sub>/MWh, Grâce à son meilleur rendement énergétique Il valorise la chaleur perdue de la turbine à gaz en la convertissant en froid, ce qui diminue la consommation de combustible. Cette technologie de CCP plus respectueuse de l'environnement et efficace à la face de changement climatique.

#### **IV.5.2. Consommation de carburant**

En considérant le temps de fonctionnement total des deux turbines composant la centrale à turbine à gaz, présenté dans le tableau IV.10, cela permet de réaliser le bilan énergétique pour chaque configuration étudiée, résumé dans le tableau IV.11.

<b>Turbines</b>	<b>2016 (h)</b>	<b>2017 (h)</b>	<b>2018 (h)</b>
TG1	3373,9	5184,1	3518,5
TG2	2627,4	2536	4523,1

**Tableau IV.10 :** Temps de fonctionnement annuel de la centrale à turbine à gaz.

<b>Power plant</b>	<b>2016 (MWh)</b>	<b>2017 (MWh)</b>	<b>2018 (MWh)</b>	<b>Moyenne (MWh)</b>
TG1	496030.8	762166.4	517289.9	
TG2	386280.3	372842.7	664986.2	
<b>TG Centrale électrique</b>	<b>882311.1</b>	<b>1135009.1</b>	<b>1182276.1</b>	<b>1066532.1</b>
TG_MA (1)	1318925	2026568.4	1375452	
TG_MA (2)	1027103.2	991373.1	1768170.7	
<b>TG_MA</b>	<b>2346028.2</b>	<b>3017941.5</b>	<b>3143622.7</b>	<b>2835864.1</b>
Masse du carburant (1)	116601984	179162496	121599360	
Masse du carburant (2)	90802944	87644160	156318336	
<b>Masse du carburant</b>	<b>207404928</b>	<b>266806656</b>	<b>277917696</b>	<b>250709760</b>

**Tableau IV.11 :** Énergie fournie par année.

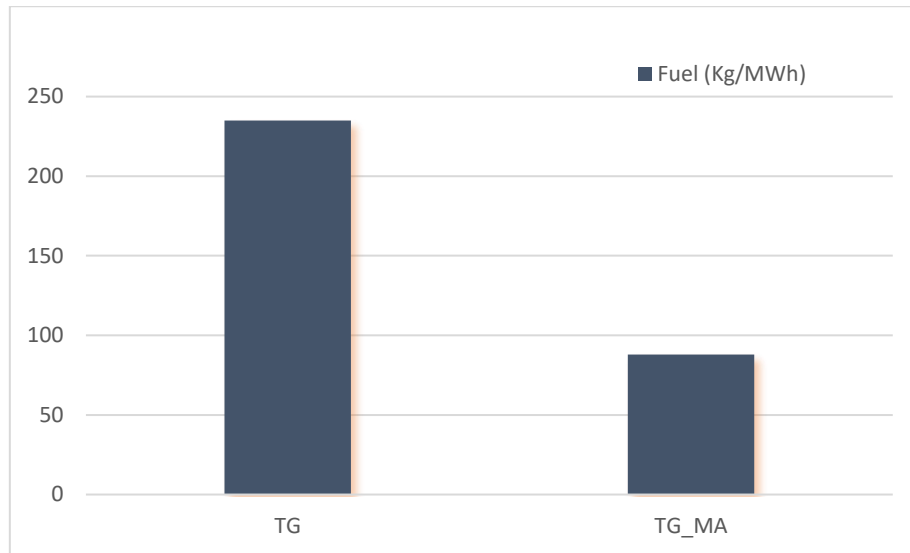
En considérant la valeur moyenne de l'énergie totale fournie pendant ces trois années, qui est égale à : centrale à turbine à gaz de base = 1066532.1 MWh, GT\_MA= 2835864.1 MWh ce qui correspond à une consommation moyenne de carburant de 250709760 kg.

La consommation spécifique de carburant (kg/MWh) est calculée comme suit :

$$\text{Consommation spécifique de carburant} = \frac{\text{masse de carburant (Kg)}}{\text{énergie électrique produite (MWh)}}$$

	Consommation spécifique du carburant [kg/MWh]
TG	235
TG_MA	88

**Tableau IV.12 :** La consommation spécifique de carburant de deux systèmes.



**Figure IV.2 :** Comparaison de la consommation spécifique du carburant.

La figure IV.2 : un histogramme qui présente la consommation de carburant (Kg/MWh) pour la turbine à gaz (TG) et le système de couplage (TG\_MA). À partir de la figure, on observe que la consommation de la turbine à gaz TG est plus élevée que celle du système couplé. Cette différence s'explique par la valorisation de la chaleur résiduelle dans le système TG\_MA.

## Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter, d'analyser et de valider les résultats obtenus après l'intégration d'une machine à absorption (eau-ammoniac) avec la turbine à gaz de la centrale de F'Kirina. L'étude a démontré une amélioration du rendement global grâce à la récupération de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement, ainsi une diminution des émissions CO<sub>2</sub> et de la consommation spécifique de carburant.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Au terme de cette étude, Ce travail a été consacré à l'intégration d'une machine à absorption au couple ammoniac/eau ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) à simple effet avec une turbine à gaz représente une solution énergétique pertinente pour valoriser la chaleur résiduelle dans les systèmes industriels (Centrales électriques à gaz, Usines agroalimentaires, usines pétrochimiques, Hôpitaux, Industries chimiques), en intégrant un échangeur de chaleur (Cooler) pour la récupération de chaleur, Ce procédé permet de transformer une énergie thermique souvent gaspillée en froid utile, contribuant ainsi à améliorer le rendement global de l'installation. À partir des résultats obtenus :

- La centrale de turbine à gaz génère (**2x147 MW**) d'électricité et (**2x243.9 MW**) de puissance provenant du récupérateur de chaleur qui extrait des gaz d'échappement par un échangeur de chaleur (Cooler).

- L'obtention de chaleur résiduelle à partir des gaz d'échappement grâce à un appareil à absorption conçu pour la production de froid permet d'améliorer le rendement énergétique de la centrale de F'Kirina, qui s'élève de **34 %** à **64.7 %** pour la centrale de production combinée du froid et d'électricité CCP (Combined Cooler and power). Par ailleurs, grâce à ce gain d'efficacité, le système CCP permet une réduction significative des émissions spécifiques de  $\text{CO}_2$  par MWh produit.

- Nous avons récupéré une quantité totale de **243,9 MW** de chaleur à partir d'une température maximale de condensation de **100 °C**. En considérant la puissance moyenne de **5 MW**, qui correspond à la puissance moyenne des machines à absorption simple effet dans l'industrie pour alimenter le générateur d'une machine à absorption simple effet dans l'industrie, cette chaleur permettrait d'alimenter jusqu'à **48** de ces machines simultanément.

- Les émissions de  $\text{CO}_2$  de La turbine à gaz sont très élevées à l'ordre de **594  $\text{kgCO}_2/\text{MWh}$** , en raison de son faible rendement et de l'absence de récupération de la chaleur résiduelle. Cependant le système CCP a distingué une forte réduction de ces émissions, qui passent à **224  $\text{kgCO}_2/\text{MWh}$**  grâce à son meilleur rendement énergétique.

- La machine à absorption  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  du nouveau système présente un coefficient de performance (COP) de **0,55** qui assure une production frigorifique à la fois stable et efficace.

Ce type de système présente de nombreux avantages. Sur le plan environnemental, il permet une réduction significative des émissions de  $\text{CO}_2$  à effet de serre, en limitant l'usage d'électricité provenant de sources fossiles pour la production de froid. Sur le plan économique, il contribue

à réduire les coûts d'exploitation énergétique en substituant une partie de l'énergie électrique par une source thermique gratuite ou peu coûteuse.

Ce mémoire vise ainsi à analyser et démontrer, à travers une modélisation sous Aspen HYSYS V.14, tout le potentiel énergétique, environnemental et économique d'un tel système pour des applications industrielles durables.



# **REFERENCES**

## **BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

- [1] Bahamou.L, Telmami I, Étude de l'amélioration des performances d'un turbine à gaz par le refroidissement de l'air à l'entrée du compresseur axial.
- [2] Earl, Logan (Turbomachinery, basic theory and application), Marcel Dekker, Inc,1953
- [3] RI, Lewis (Turbomachinery, performance, analyses), British library,1996.
- [4] HASSANI S, Étude comparative entre les cycles thermodynamiques dans le cadre d'augmentation les performances d'une turbine à gaz, Université de Biskra, 2021.
- [5] TOTAL, Manuel de formation, « Exploration et production, les équipements et les turbines »
- [6] MESSOUCI. S, MERMAT. S, Analyse exergo-économique de la centrale électrique de RAS DJANET, Université de Boumerdès 2021.
- [7] S. BENDJEDIDI, "Pompe centrifuge " Rapport de stage, Université de Batna, 2012.
- [8] BOUCHEBOUT Said, DEFFAS Chemseddine, « ANALYSE 4E (ENERGIE- EXERGIE ECONOMIQUE- ENVIRONNEMENTALE) D'UNE CENTRALE A TURBINE A GAZ » mémoire fin d'étude, Algérie. (2018).
- [9] ((15/02/2020), cour turbine à gaz.pdf,  
[online][https://elearning.univ-eloued.dz/pluginfile.php/15750/mod\\_resource/content/1/cours%20turbine%20%c3%a0%20gaz.pdf](https://elearning.univ-eloued.dz/pluginfile.php/15750/mod_resource/content/1/cours%20turbine%20%c3%a0%20gaz.pdf)
- [10] DDAE - Juin 2017 Site de Villeurbanne Einstein
- [11] Monteil J.-M., Centrale à cycle combiné. Composants potentiels, Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, 2003.
- [12] Bisma C. Analyse thermodynamique d'une centrale thermique hybride solaire /gaz. Mémoire de magistère en physique. Mémoire de master. Université Hadj Lakhdar Batna, 2014.
- [13] Article Thermo-Economic Assessment of a Gas Microturbine-Absorption Chiller Trigenation System under Different Compressor Inlet Air Temperatures
- [14] Chabou Abdelkader,Maslek Achref Eddine, «Influence des condition climatiques sur les performances d'un cycle combiné», mémoire de fin d'étude de master en génie des mécanique option optimisation des systèmes énergétique, Université de Blida, 2016.
- [15] thermodynmique BOUKREDIME SARRA. Évaluation des performances d'une machine frigorifique hybride à absorption / éjection. Mémoire, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [16] Michel Feidt Thermodynamique appliquée – Machines frigorifiques et pompes à chaleur Presses Universitaires de Grenoble, 2010.
- [17] Gearoid Falay, Robert Devant, Richard Devant, Richard Sweatster, The future of absorption technology, America 2008.

- [18] C.A.Dhouib, “Dynamics modelling and simulation of photovoltaic refrigeration plant”, Renewable Energy, May 2002.
- [19] **Ularee Upathumchard**, Waste Heat Recovery Options in a Large Gas Turbine Combined Power Plant, Purdue University 2014.
- [20] **Houda Dardour**, Etude d’une machine frigorifique à absorption et absorption-diffusion utilisant un mélange d’Alcane : étude systémique et modélisation rigoureuse de l’absorbeur, thèse de doctorat, 2012.
- [21] **Majamak, Smith, Karagozian**, Passive Mixing Control via Lobed Injectors in High-Speed Flow, A LAAS Journal, 2003.
- [22] Sun D.W, Variable geometry ejectors and their applications in ejector refrigeration systems Energy, 1996.
- [23] Castaing-Lasvignottes, J. « Aspect thermodynamiques et technico-economique des systèmes à absorption liquide » CNAM, Institut français du froid industriel.
- [24] Dr.Reinhard Radermacher, SIMULATION OF ABSORPTION CYCLES FOR INTEGRATION INTO REFINING PROCESSES, Mechanical Engineering, 2009.
- [25] TOUAT. O, BELAIDI. F. “Analyse énergétique et exergetique d’une centrale à gaz”, Université de Bouira, 2018.
- [26] Medjdoub. M et Mebarki. A, « Etude et Simulation d’un Système de Réfrigération à absorption Eau-Ammoniac », Université Bouira, 2024.
- [27] Khaldi, F. and Adouane, B. ‘Energy and exergy analysis of a gas turbine power plant in Algeria’, Int. J. Exergy, 2011. Faculty of Sciences, Department of Physics, University of Batna
- [28] ACER Examples of Calculation CO2 emission limits in Capacity Mechanisms based on Article 22(4) of Regulation (EU) 2019/943 and ACER’s Opinion 22/2019
- [29] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, V2\_2\_Ch2\_Stationary\_Combustion.