

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master en Génie Mécanique
Option énergétique

Thème

Analyse exergetique du cycle combiné de la centrale de
Hadjret Ennous.

Réalisé par :

M^{lle} Selma BOUTIRA

Dirigé par :

M. H. BENNOUR

Présenté et soutenu publiquement le 12/07/2017

Composition du jury :

Président :	M. Y. BELKACEMI	MC-B, ENP
Promoteur :	M. H. BENNOUR	MA-A, ENP
Examineur :	M. M. BENBRAIKA	MA-A, ENP

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master en Génie Mécanique
Option énergétique

Thème

Analyse exergetique du cycle combiné de la centrale de
Hadjret Ennous.

Réalisé par :

M^{lle} Selma BOUTIRA

Dirigé par :

M. H. BENNOUR

Présenté et soutenu publiquement le 12/07/2017

Composition du jury :

Président :	M.Y. BELKACEMI	MC-B, ENP
Promoteur :	M. H. BENNOUR	MA-A, ENP
Examineur :	M. M. BENBRAIKA	MA-A, ENP

ENP 2017

DEDICACES

A mes très chers parents, mes modèles,

A ma merveilleuse sœur,

A Radia et Selma, Wassim et Mahdi,

A mes amies du 204,

A tous ceux qui me sont chers,

Je dédie ce modeste travail.

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu seul, clément et miséricordieux

Tout d'abord, j'adresse ma profonde reconnaissance ainsi que ma plus sincère gratitude à mon encadreur Mr BENNOUR, qui a su me guider m'aider durant toute cette période de stage mais aussi depuis le début de mon cursus à l'Ecole Nationale Polytechnique par son soutien moral, ses encouragements, sa perpétuelle présence et ses conseils inestimables.

Mes vifs remerciements vont à mon encadreur au sein de General Electric Mr Hossam GAMAL dont l'aide et le support m'ont été précieux, à Mme Wafaa KHAMMAR pour ses conseils et sa bonne humeur ainsi qu'à Mr Mourad BOURENANE pour sa bienveillance.

Je saisis cette occasion pour destiner à mes professeurs ayant contribué à ma formation mes remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail.

Que toute personne ayant participé de près ou de loin, à la réalisation de ce projet, veuille trouver ici mon témoignage de gratitude et de remerciements.

ملخص

يتطرق العمل الحالي الى التحليل الطاقوي للدورة المركبة لمحطة توليد الكهرباء بحجرة النوس. اجري هذا التحليل ليوم 21 أوت 2016، مع الأخذ كمثال الوحدة الثالثة لمحطة حجرة النوس التي تم دراستها سابقا في مشروع التخرج وهذه لأرصدة تطبيقها على مختلف العناصر من أجل تحديد كمية تدمير الطاقة في الدورة المركبة.

كلمات البحث: دورة مركبة، تحليل طاقي، توربينات الغاز، مولد البخار، التوربينات البخارية، توازن الطاقة، محطة حجرة النوس الكهربائية.

Abstract

The present work focuses on the exergetic analysis of the combined cycle of the Hadjret Ennous power plant for the 21 August 2016, taking as an example the third unit that was studied in my final year project. The exergy analysis was therefore carried out using the results of the PFE and those of the various exergy balances applied to the plant components in order to determine the destruction of exergy in the combined cycle.

Key words: Combined cycle, exergy analysis, gas turbine, heat recovery steam generator, steam turbine, exergetic balance, Hadjret Ennous power plant.

Résumé

Le travail présent a pour thème l'analyse exergetique du cycle combine de la centrale de Hadjret Ennous pour la journée du 21 Août 2016 en prenant comme exemple la tranche 03 qui a été étudié dans mon projet de fin d'études. L'analyse exergetique a donc été menée en utilisant les résultats du PFE et ceux des différents bilans exergetiques appliqués aux composants de la centrale dans le but de déterminer la destruction d'exergie dans le cycle combiné.

Mots clés : Cycle combiné, analyse exergetique, turbine à gaz, chaudière de récupération, turbine à vapeur, bilan exergetique, centrale électrique de Hadjret Ennous.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE.....	11
1. CHAPITRE 1	12
1.1. Introduction	14
1.2. Notions générales sur l'analyse exergetique	14
1.2.1. Définition de l'exergie.....	14
1.2.2. Exergie physique d'un fluide :.....	15
1.2.3. Exergie physique d'un mélange de gaz :	15
1.2.4. Exergie chimique :	16
1.2.5. Exergie chimique d'un mélange de gaz :.....	16
1.2.6. Exergietotale.....	16
1.2.7. Calcul de l'exergie perdue	17
1.3. Rappel des résultats du PFE nécessaires pour les calculs exergetiques	17
1.4. Conclusion	18
2. CHAPITRE 2	19
2.1. Introduction	20
2.2. Calcul de l'exergie du combustible	20
2.2.1. Composition du combustible.....	20
2.2.2. Réaction de combustion	20
2.2.3. Exergie du combustible.....	21
2.3. Exergie de l'air de combustion.....	22
2.4. Exergie des gaz d'échappement.....	23
2.5. Exergie de l'eau	23
2.6. Bilans d'exergiedes différents composants	23
2.7. Conclusion	27
3. CHAPITRE 3	28
3.1. Introduction	29
3.2. Présentation des résultats et tracé du diagramme de Grassmann	29
3.3. Conclusion	32
CONCLUSION GENERALE	33
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	34

ANNEXES 35
ANNEXE A..... 36

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1 - Volume de contrôle compresseur</i>	<i>24</i>
<i>Figure 2.2 - Volume de contrôle chambres de combustion.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 2.3 - La turbine à gaz</i>	<i>25</i>
<i>Figure 2.4 - Chaudière de récupération</i>	<i>26</i>
<i>Figure 2.5 – La turbine à vapeur</i>	<i>26</i>
<i>Figure 2.6 - Volume de contrôle condenseur</i>	<i>27</i>
<i>Figure 3.1 - Diagramme de Grassmann appliqué au cycle combiné de la centrale de Hadjret Ennous</i>	<i>32</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 - Composition molaire de l'air à l'état de référence</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 1.2 - Résultats obtenus par l'analyse énergétique de la centrale.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2.1 - Composition molaire du gaz naturel.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 2.2 - Emplacements des différents points considérés.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 3.1- Exergie calculée aux différentes entrées et sorties des composants.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3.2 - Destruction d'exergie dans les différents composants</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 3.3 - Bilan exergétique du cycle combiné Hadjret Ennous</i>	<i>30</i>

NOMENCLATURE

Symboles latins	Signification	Unité	Acronymes
\bar{c}_p	chaleur spécifique	kJ/kmol.K	BP : Basse Pression
\bar{h}	enthalpie	kJ/kmol	CC : Cycle Combiné
\dot{m}	débit massique	kg/s	CD : Condenseur
p	pression	kPa	GN : Gaz naturel
\dot{Q}	quantité de chaleur	kW	HP : Haute pression
\bar{R}	constante des gaz parfaits	kJ/kmol.K	HRSG : HeatRecoverySteamGenerator
\bar{s}	entropie	kJ/kmol.K	MP : Moyenne Pression
T	température	K ou °C	PC : Postcombustion
\dot{n}	débit volumique	kmol/s	TG : Turbine à Gaz
y_i	fraction molaire	-	TV : Turbine à vapeur
\dot{W}	puissance électrique	kW ou MW	

Symboles grecs

Δ	différence	
ψ	exergie molaire	kJ/kmol

Exposants

d	détruite
p	perdue
0	standard
ch	chimique
ph	physique

Indices

0	: à l'état de référence
cd	: condenseur
ch	: chaudière de récupération
mel	: mélange
tg	: turbine à gaz
tv	: turbine à vapeur

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, l'exergie est de plus en plus employée pour la caractérisation des systèmes énergétiques, car elle constitue un critère rationnel assurant la durabilité des solutions mises en place, dans un contexte mondial visant à préserver globalement les ressources énergétiques existantes, en incitant à combattre le gaspillage d'énergie sous toutes ses formes. Elle permet de localiser les irréversibilités au sein des procédés énergétiques, et donc d'apporter des solutions pour les limiter.

Suite à l'étude des performances de la centrale électrique de Hadjret Ennous menée dans le cadre de mon projet de fin d'études et basée essentiellement sur une analyse énergétique du cycle combiné, nous allons procéder dans le cadre de ce master, à une extension de l'étude par une analyse exergetique qui permettra de mieux caractériser ces performances en dressant la carte de la distribution des pertes et des destructions d'exergie par composant. A cet effet, nous avons choisi les données relevées pour la journée du 21 Août 2016, où la température ambiante était en moyenne de 27 °C, afin d'illustrer l'approche exergetique du problème.

L'analyse exergetique est une approche intéressante pour caractériser de manière appropriée la performance d'un système énergétique. Elle est en relation avec la qualité de l'énergie, elle met en évidence les pertes d'énergie utilisable dans les différents équipements composant un système. Ainsi, elle permet de localiser les endroits qui offrent les plus grandes possibilités d'amélioration.

Le document présent est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre comportera les notions générales concernant l'exergie et l'analyse exergetique ainsi qu'un rappel des résultats obtenus dans le travail de fin d'études et qui seront nécessaires pour effectuer les bilans exergetiques.

Ensuite, dans le second chapitre nous présenterons la méthode de calcul adoptée pour établir les bilans d'exergie pour les composants de la centrale de Hadjret Ennous (compresseur, chambres de combustion, turbine à gaz, chaudière de récupération, turbines à vapeur et condenseur) et ce, afin de déterminer la quantité d'exergie détruite dans chacun de ces éléments.

Enfin, dans le troisième et dernier chapitre nous exposerons les résultats obtenus suite aux calculs et bilans d'exergie exposés dans le second chapitre, puis nous tracerons un diagramme de Grassmann qui nous permettra de visualiser de façon simple et immédiate la destruction d'exergie dans la centrale.

CHAPITRE 1

GENERALITES ET RAPPELS

1.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présenterons des notions générales relatives à l'analyse exergétique sur lesquelles les bilans d'exergie ont été basés. Aussi, afin de faciliter la compréhension du travail mené, nous rappellerons les résultats obtenus par les bilans énergétiques dans mon projet de fin d'études. [1]

1.2. Notions générales sur l'analyse exergétique

L'exergie permet de décrire l'évolution de la qualité de l'énergie disponible dans un système. Elle se base à la fois sur le premier principe de la thermodynamique qui est un principe de conservation de l'énergie, et sur le second principe de la thermodynamique selon lequel toute transformation réelle est irréversible. [2]

1.2.1. Définition de l'exergie

Lorsque deux systèmes à des états thermodynamiques différents interagissent entre eux pour parvenir à un état d'équilibre, il est possible d'en extraire du travail utile. Ainsi, n'importe quel système ou source d'énergie se trouvant dans un état différent de l'état de son environnement extérieur produira du travail utile pour parvenir à un état d'équilibre avec ce dernier. Parmi les nombreuses définitions de l'exergie que l'on peut trouver dans la littérature, celle donnée par Benelmir (2002), a été retenue : « l'exergie d'une certaine quantité de matière contenue dans un système est une mesure du potentiel de production (ou de récupération) d'un travail maximal (ou minimal) par le super-système (constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant ». Ainsi, l'exergie est la mesure du travail utile total que renferme un système par rapport à un environnement de référence. [2]

L'exergie est donc un moyen d'évaluer la qualité de l'énergie. Elle représente le maximum de travail qu'on peut extraire d'une énergie. Ce moyen de diagnostic nous permettra de visualiser la destruction d'exergie dans chaque composant de la centrale électrique de HadjretEnnous. Afin de procéder aux calculs exergétiques, nous allons prendre la référence la plus communément adoptée, un environnement représenté par l'air atmosphérique à une température $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et une pression $p_0 = 1 \text{ atm}$, ayant la composition chimique donnée au tableau 1.1 suivant :

Tableau 1.1 - Composition molaire de l'air à l'état de référence

Composant	Pourcentage molaire
N ₂	75,67
O ₂	20,35
H ₂ O _(g)	3,12
CO ₂	0,03
Autres	0,83

1.2.2. Exergie physique d'un fluide :

L'exergie physique molaire d'un fluide à une température T et une pression p est définie par l'équation :

$$\bar{\psi}_i = \bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i \quad (1.1)$$

où \bar{h}_i et \bar{s}_i sont respectivement l'enthalpie molaire et l'entropie molaire du fluide à la température T et à la pression p .

1.2.3. Exergie physique d'un mélange de gaz :

L'exergie physique molaire d'un mélange de gaz est donnée par l'équation:

$$\bar{\psi}_{mél}^{ph} = \sum y_i [(\bar{h}_i - \bar{h}_{0i}) - T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_{0i})] \quad (1.2)$$

Avec :

\bar{h}_i : enthalpiemolaire du constituant i à une température T en kJ/kmol

\bar{h}_{0i} : enthalpiemolaire du même constituant i à la température de 298 K en kJ/kmol

\bar{s}_i : entropiemolaire du constituant (i) à une température T et à sa pression partielle $y_i P$, en kJ/kmol.K

\bar{s}_{0i} : entropiemolaire du constituant (i) à la température 298 K et à sa pression partielle $y_i P$, en kJ/kmol.K

y_i : fraction molaire du constituant (i) dans le mélange.

$(\bar{h}_i - \bar{h}_{0i}) = \Delta \bar{h}_i^T$ différence d'enthalpie extraite directement des tables thermodynamiques pour une température T .

Détermination de la différence d'entropie :

Afin de pouvoir utiliser les données tabulées concernant l'entropie, transformons l'équation de la différence d'entropie ci-dessus comme suit:

$$\bar{s}_i - \bar{s}_{0i} = \bar{s}_i(T; y_i P_0) - \bar{s}_{0i}(T_0; y_i P_0) \quad (1.3)$$

$$\bar{s}_i(T; y_i P_0) = \bar{s}_i(T; P_0) + [\bar{s}_i(T; y_i P_0) - \bar{s}_i(T; P_0)] \quad (1.4)$$

$$\bar{s}_i(T; y_i P_0) = \bar{s}_i(T; P_0) - \bar{R} \ln \frac{y_i P_0}{P_0} \quad (1.5)$$

Avec \bar{R} : Constante des gaz parfaits, qui vaut $8.3144 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$

$$\bar{s}_i(T; y_i P) = \bar{s}_i(T; P_0) - \bar{R} \ln \frac{y_i P}{p_0} \quad (1.6)$$

$$\bar{s}_i^0(T_0; y_i P_0) = \bar{s}_i^0(T_0; P_0) - \bar{R} \ln y_i \quad (1.7)$$

Ce qui donne :

$$\bar{s}_i - \bar{s}_i^0 = \left[\bar{s}_i(T; P_0) - \bar{R} \ln \frac{y_i P}{p_0} \right] - [\bar{s}_i^0(T_0; P_0) - \bar{R} \ln y_i] \quad (1.8)$$

Nous avons donc enfin l'expression de la différence d'entropie entre l'état considéré et l'état standard :

$$\bar{s}_i - \bar{s}_i^0 = \left[\bar{s}_i(T; P_0) - \bar{s}_i^0(T_0; P_0) - \bar{R} \ln \frac{p}{p_0} \right] \quad (1.9)$$

Chacun des termes de cette différence d'entropie se lit sur les tables des propriétés thermodynamiques des différentes substances intervenant dans la combustion. L'expression de l'exergie physique d'un mélange devient:

$$\bar{\psi}_{mél}^{ph} = \sum y_i \left\{ \Delta \bar{h}_i^T - T_0 \left[\bar{s}_i(T; P_0) - \bar{s}_i^0(T_0; P_0) - \bar{R} \ln \frac{p}{p_0} \right] \right\} \quad (1.10)$$

1.2.4. Exergie chimique :

L'exergie chimique d'une substance ne dépend pas de la température et peut être déduite à partir des tables à l'état de référence. A l'annexe A, sont présentées les exergies chimiques standard des différentes substances chimiques figurant dans les calculs exécutés. [3]

1.2.5. Exergie chimique d'un mélange de gaz :

L'exergie chimique d'un mélange de gaz peut être déduite à partir de celles de ses constituants en utilisant l'équation (1.11) suivante : [3]

$$\bar{\psi}_{mél}^{ch} = \sum_i y_i \bar{\psi}_i^{ch} + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (1.11)$$

1.2.6. Exergietotale

L'exergie totale d'un composant ou d'un mélange, s'obtient en faisant la somme de son exergie chimique et de son exergie physique :

$$\bar{\psi}_i = \bar{\psi}_i^{ch} + \bar{\psi}_i^{ph} \text{ et } \bar{\psi}_{mél} = \bar{\psi}_{mél}^{ch} + \bar{\psi}_{mél}^{ph} \quad (1.12)$$

1.2.7. Calcul de l'exergie perdue

L'exergie perdue est celle qui accompagne la chaleur dissipée $|\dot{Q}|$ dans le milieu ambiant, elle se calcule après avoir appliqué le bilan d'énergie pour obtenir cette chaleur, à l'aide de l'équation (1.13) suivante :

$$\psi^p = |\dot{Q}| \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (1.13)$$

Où $|\dot{Q}|$ représente la quantité de chaleur dissipée.

T_s : température de la surface à partir de laquelle la chaleur a été émise.

1.3. Rappel des résultats du PFE nécessaires pour les calculs exergetiques

Les résultats de l'analyse énergétique menée dans mon PFE sur l'analyse des performances de la centrale de HadjretEnnous [1] qui figurent dans les tableaux 4.2 et 4.4 du chapitre 4 du mémoire de PFE, sont utilisés afin de procéder à l'analyse exergetique qui est l'objet du travail présent. Le tableau 1.2 ci-dessous présente ces résultats :

Tableau 1.2 - Résultats obtenus par l'analyse énergétique de la centrale

Grandeurs		Unités	Valeur
Température admission	T_a	K	291,31
Débit d'air	\dot{m}_{air}	kg/s	613,22
Chaleur reçue dans les chambres de combustion	\dot{Q}_{cc}	MW	694,71
Puissance produite par la turbine	\dot{W}_{TG}		533,49
Puissance absorbée par le compresseur	\dot{W}_{comp}		250,05
Puissance nette cycle à gaz	$(\dot{W}_{net})_{TG}$		283,43
Chaleur reçue dans les bruleurs de postcombustion	\dot{Q}_{PC}		71,44
Puissance fournie par le corps HP	\dot{W}_{hp}		34,71
Puissance fournie par le corps MP	\dot{W}_{mp}		53,60
Puissance fournie par le corps BP	\dot{W}_{bp}		74,73
Puissance fournie par la turbine à vapeur (totale)	$(\dot{W}_{net})_{TV}$		163,04
Débit molaire de combustible admis dans les chambres de combustion	\dot{n}_{cc}		kmol/s
Débit molaire de combustible admis dans les brûleurs de la chaudière de récupération	\dot{n}_{pc}	0.0871	
Débit molaire d'air admis dans le compresseur	\dot{n}_{air}	21.17	

1.4. Conclusion

Ces résultats, extraits du PFE vont constituer la base des bilans d'exergie que nous allons effectuer au chapitre suivant sur les différents composants de la centrale de HadjretEnnous pour déterminer l'exergie détruite à travers chacun d'eux, pour le cas d'étude choisi.

CHAPITRE 2

Analyse exergetique du cycle combiné de la centrale de HadjretEnnous

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, seront exposées les différentes étapes du calcul exergétique qui sera mené sur les différents composants de la centrale, aussi bien ceux du cycle à gaz que ceux du cycle à vapeur. Afin de procéder à ces calculs, nous avons suivi la méthode exposée dans ce qui suit.

2.2. Calcul de l'exergie du combustible

2.2.1. Composition du combustible

Les chambres de combustion de la turbine à gaz ainsi que la chaudière de récupération de la centrale électrique de Hadjret Ennous utilisent le gaz naturel provenant de Hassi-Rmel comme combustible. Ce dernier est analysé par l'organisme CREDEG de la SONELGAZ, et ses composants sont mis en évidence dans le tableau 2.1 ci-dessous : [4]

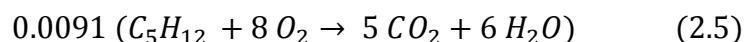
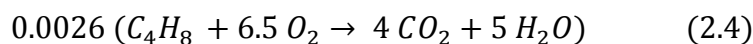
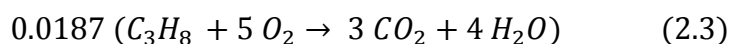
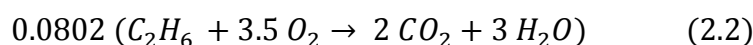
Tableau 2.1 - Composition molaire du gaz naturel

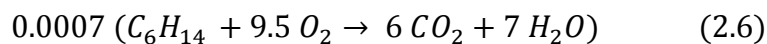
Composant	Pourcentage (%)
CH ₄	83,01
C ₂ H ₆	8,02
C ₃ H ₈	1,87
C ₄ H ₁₀	0,26
C ₅ H ₁₂	0,91
C ₆ H ₁₄	0,07
CO ₂	0,18
N ₂	5,68

2.2.2. Réaction de combustion

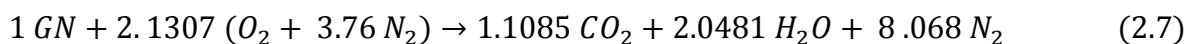
Comme le pourcentage d'excès d'air dans la combustion qui a lieu dans les chambres de combustion d'une turbine à gaz est en général très important, on peut considérer que la combustion sera complète et que, les niveaux de température obtenus étant relativement bas (< 1500 °C), on négligera toute dissociation au sein de la chambre de combustion.

La réaction de combustion à laquelle nous avons affaire est une réaction qui peut être obtenue à partir des réactions de combustion de chaque constituant du gaz naturel pris à part :

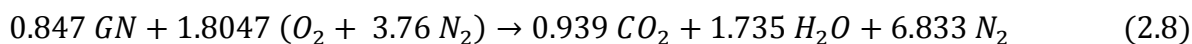




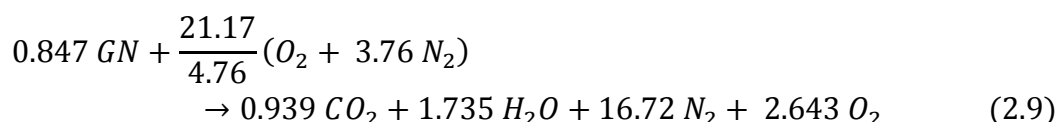
Ce qui nous donne la réaction de combustion globale suivante faisant intervenir 1 *kmole* de gaz naturel:



En multipliant la réaction (2.7) par le débit molaire du combustible nous arrivons à la réaction stœchiométrique de la combustion qui est donnée ci-dessous :

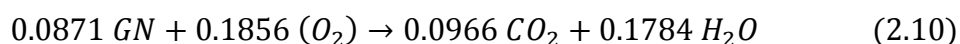


Ayant le débit molaire d'air de combustion qui est égale à 21.17 *kmol/s* la réaction (2.8) devient :



La quantité d'azote présente dans les réactifs reste inchangée puisque l'azote n'entre pas en jeu dans la réaction. Quant à la quantité d'oxygène présente dans les produits est égale à la quantité initiale d'oxygène diminué de celle consommée lors de la réaction stœchiométrique (2.8).

De même pour la réaction de postcombustion, si l'on multiplie la réaction (2.8) par le débit molaire de combustible admis dans les brûleurs de la chaudière de récupération, nous obtenons la réaction stœchiométrique suivante :



La réaction utilisant dans ce cas les gaz d'échappement de la turbine à gaz comme comburant, le CO₂ et le H₂O vont augmenter des quantités ci-dessus, l'oxygène va diminuer de la quantité nécessaire à la postcombustion et l'azote va augmenter de la quantité supplémentaire introduite avec le GN, soit de (0.0871 · 0.0568 = 0.0049 *kmol/s*). La constitution des gaz d'échappement dans la chaudière de récupération (en *kmol/s*) après la postcombustion sera donc comme suit :

$$O_2 : 2.643 - 0.1856 = 2.4574 \quad CO_2 : 0.939 + 0.0966 = 1.0356$$

$$H_2O : 1.735 + 0.1784 = 1.9134 \quad N_2 : 16.72 + 0.0049 = 16.725$$

2.2.3. Exergie du combustible

L'exergie du combustible calculée à l'entrée des chambres de combustion est égale à la somme de l'exergie physique du combustible à *T* et *p* et de son exergie chimique.

$$\bar{\psi}_{GN} = \bar{\psi}_{GN}^{ch} + \bar{\psi}_{GN}^{ph} \quad (2.11)$$

Calcul de l'exergie chimique du combustible

L'exergie chimique du gaz naturel est obtenue par application de l'équation (1.11) (voir chapitre 1) :

$$\bar{\psi}_{GN}^{ch} = \sum_i y_i \bar{\psi}_i^{ch} + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.12)$$

Où :

y_i : fraction molaire de l'espèce i du gaz naturel ;

$\bar{\psi}_i^{ch}$: exergie chimique molaire de l'espèce i donnée par les tables thermodynamiques à T_0 et p_0 ;

Calcul de l'exergie physique du combustible

L'expression de l'exergie physique du combustible, qui est considéré comme un mélange de gaz parfaits, est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{\psi}_{GN}^{ph} = \sum_i y_i \left[\left(\bar{h}_{f,i}^0 + \bar{C}_p \Delta T \right) - T_0 \left(\bar{C}_p \ln \frac{T}{T_0} - \bar{R} \ln \frac{y_i p}{p_0} \right) \right] \quad (2.13)$$

Où :

$\bar{h}_{f,i}^0$: est l'enthalpie standard de formation du composant i

\bar{C}_p : est la chaleur spécifique molaire du composant i

ΔT : est la différence de température $T - T_0$

T et p : étant la température et la pression auxquelles le combustible est introduit dans les chambres de combustion.

L'équation (2.11) permet ainsi de calculer l'exergie du combustible à l'entrée de la chambre de combustion de la turbine à gaz et également au niveau des brûleurs de la postcombustion au sein de la chaudière de récupération.

2.3. Exergie de l'air de combustion

Nous considérerons pour les calculs qui suivront l'air comme un mélange d'oxygène et d'azote avec des fractions molaires respectives de 21% et 79%. L'air est également considéré comme un mélange de gaz parfaits. L'air à l'entrée du compresseur est à la pression standard, ses composants sont dans des proportions qui correspondent quasiment à la composition de référence pour les calculs d'exergie, on négligera donc l'exergie chimique de l'air et on retiendra seulement son exergie physique donnée par l'expression :

$$\bar{\psi}_{air}^{ph} = \sum_i y_i \left[\Delta \bar{h} - T_0 (\bar{s}_i - \bar{s}_i^0) \right] \quad (2.14)$$

Où $\Delta \bar{h} = \bar{h}_{i,T} - \bar{h}_{i,T_0}$ représente la variation d'enthalpie entre les températures T et T_0 de l'espèce i .

En rappelant la procédure développée au chapitre 1 pour le calcul de l'exergie physique d'un mélange de gaz parfaits (équations 1.3 à 1.9), l'expression de l'exergie physique de l'air peut se mettre sous la forme:

$$\bar{\psi}_{air}^{ph} = \sum_i y_i \left[\Delta \bar{h} - T_0 \left(\Delta \bar{s} - \bar{R} \ln \frac{p_i}{p_0} \right) \right] \quad (2.15)$$

2.4. Exergie des gaz d'échappement

La composition des gaz d'échappement étant déterminée par la réaction de combustion, l'exergie totale de ces derniers, est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{\psi}_{gaz} = \sum_i y_i \left[\Delta \bar{h}^T - T_0 \left(\Delta \bar{s}^T - \bar{R} \ln \frac{p_i}{p_0} \right) + \bar{\psi}_i^{ch} + \bar{R} T_0 \sum y_i \ln y_i \right] \quad (2.17)$$

Les variations d'enthalpie et d'entropie sont obtenues à partir des tables de la thermodynamique à la température T des gaz d'échappement et à la pression de référence p_0 .

2.5. Exergie de l'eau

L'exergie de l'eau liquide et de la vapeur d'eau aux différents endroits pertinents du circuit eau-vapeur d'eau du cycle à vapeur est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{\psi}_{eau} = \Delta \bar{h}^T - T_0 \Delta \bar{s}^T \quad (2.18)$$

Une fois tous les termes que nous venons de définir sont calculés séparément pour chaque système, le calcul de la destruction d'exergie se fera à travers les différents bilans d'exergie appliqués aux composants de la centrale.

2.6. Bilans d'exergie des différents composants

La quantité d'exergie détruite dans la turbine à gaz, la chaudière de récupération, la turbine à vapeur ainsi que dans le condenseur est donnée par l'équation (2.19) ci-dessous :

$$\dot{\psi}^d = \dot{W}_r + \dot{\psi}_e - \dot{\psi}_s + \dot{Q}_c + \dot{W}_f - \dot{\psi}^p \quad (2.19)$$

Où :

$\dot{\psi}^d$: est le taux de destruction d'exergie

$\dot{\psi}^p$: est le taux de perte d'exergie associé à la dissipation de chaleur dans le milieu ambiant (nul dans tous les cas où les processus sont considérés adiabatiques).

$\dot{\psi}_e$ et $\dot{\psi}_s$: sont les taux d'exergie associés aux flux des fluides respectivement à l'entrée et à la sortie du composant considéré.

\dot{W}_f : est la puissance produite par le composant

\dot{W}_r :est la puissance reçue par le composant

\dot{Q}_c : est la quantité d'énergie thermique que fournit le combustible

Nous définissons donc les points suivants pour repérer les entrées/sorties des différents composants à étudier de l'installation :

Tableau 2.2 - Emplacements des différents points considérés

Point	Emplacement
a et b	Entrée et sortie du compresseur ;
c et d	Entrée et sortie de la turbine à gaz ;
i	Sortie des gaz d'échappement à la cheminée ;
1 et 2	Entrée et sortie du corps HP ;
4 et 5	Entrée et sortie du corps MP ;
7 et 8	Entrée et sortie du corps BP ;
9	Sortie du condenseur ;

Nous avons utilisé les volumes de contrôle suivants, illustrés dans les figures 2.1 jusqu'à 2.6 et les bilans d'exergie explicités sous chaque figure: Nous allons à présent prendre chaque composant, le représenter par un volume de contrôle et lui appliquer le bilan d'exergie en vue d'en déduire l'exergie détruite au sein du composant. Rappelons avant l'établissement de ces bilans que tous les composants ont été considérés comme adiabatiques, sauf les chambres de combustion et de postcombustion qui ont été supposées perdre 4% de l'énergie libérée par la combustion. Par ailleurs nous négligeons partout les exergies cinétiques et potentielle.

Le compresseur :Dans le compresseur, qui est représenté par le volume de contrôle de la figure 2.1 ci-dessous, nous avons une entrée et une sortie d'air auxquelles sont associées les flux d'exergie physique correspondants et la puissance de compression provenant de la turbine à gaz. Le bilan de ces trois quantités fournit le taux de destruction d'exergie au sein du compresseur selon l'équation (2.20).

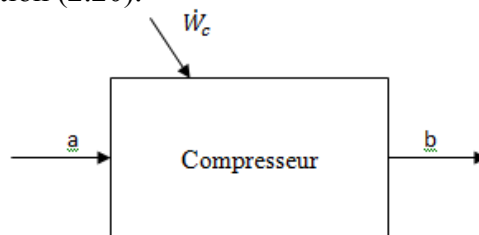


Figure 2.1 - Volume de contrôle compresseur

$$\dot{\psi}_c^d = \dot{W}_c + \dot{\psi}_a - \dot{\psi}_b \quad (2.20)$$

Les chambres de combustion : Ces dernières sont modélisées à l'aide d'un volume de contrôle avec deux entrées (air de combustion et combustible) et une sortie (gaz de combustion). A ces trois flux de matière sont associés trois flux d'exergie. Mais comme dans ce cas le système perd une certaine quantité de chaleur vers le milieu ambiant, il y aura une perte d'exergie associée. Le bilan qui donne le taux de destruction d'exergie dans ce cas est traduit par l'équation (2.21) ci-dessous.

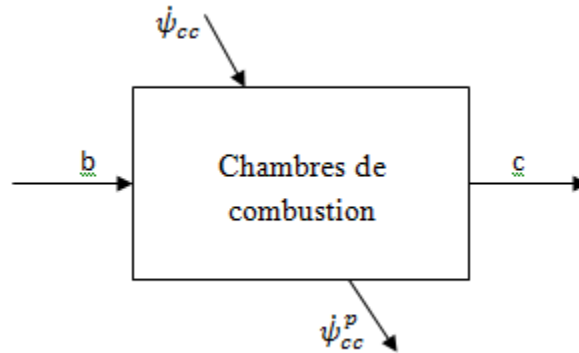


Figure 2.2 - Volume de contrôle chambres de combustion

$$\dot{\psi}_{cc}^d = \dot{\psi}_{cc} + \dot{\psi}_a - \dot{\psi}_b - \dot{\psi}_{cc}^p \quad (2.21)$$

La turbine à gaz : Pour la turbine à gaz représentée à la figure 2.5, il y a une entrée des gaz de combustion au point c et une sortie de ces mêmes gaz en d. La puissance développée par la turbine à gaz est notée \dot{W}_{tg} . Le bilan des flux d'exergie accompagnant les flux de gaz à l'entrée et à la sortie et de la puissance produite par la turbine permet de calculer la destruction d'exergie au sein de la turbine à gaz selon l'équation (2.24).

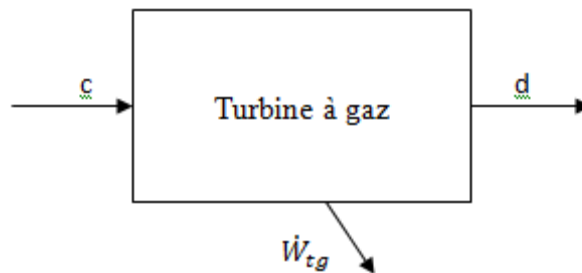


Figure 2.3 - La turbine à gaz

$$\dot{\psi}_{tg}^d = \dot{\psi}_c - \dot{\psi}_d - \dot{W}_{tg} \quad (2.24)$$

La chaudière de récupération : Au niveau de la chaudière de récupération, nous avons l'entrée des gaz d'échappement provenant de la turbine à gaz au point d, celle du condensat au point 9 et celle du retour de la vapeur détendue dans le corps haute pression de la turbine à vapeur au point 2. Quant aux sorties, nous en dénombrons quatre, la sortie de vapeur HP vers le corps HP en 1, celle de la vapeur MP en 4, celle de la vapeur BP en 6 et celle des gaz d'échappement au niveau de la cheminée en i. De plus nous devons introduire l'exergie du

combustible destiné à la postcombustion $\dot{\psi}_{pc}$ et l'exergie perdue qui accompagne la perte d'énergie sous forme de chaleur au niveau de la chaudière $\dot{\psi}_{pc}^p$.

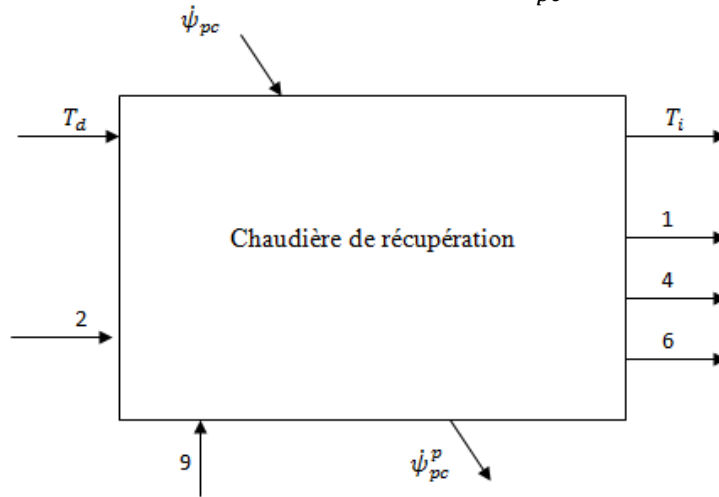


Figure 2.4 - Chaudière de récupération

$$\dot{\psi}_{ch}^d = \dot{\psi}_{pc} + \dot{\psi}_2 + \dot{\psi}_9 + \dot{\psi}_d - \dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_4 - \dot{\psi}_6 - \dot{\psi}_i - \dot{\psi}_{pc}^p \quad (2.22)$$

La turbine à vapeur : Dans ce volume de contrôle (figure 2.4) les corps HP, MP et BP sont regroupés et schématisé par la turbine à vapeur dans sa globalité. La vapeur HP entre donc au point 1, et sort au point 8 après avoir subi la détente dans le corps BP. Nous comptabilisons également la puissance produite par la turbine à vapeur \dot{W}_{tv} en tant qu'exergie sortie de la turbine pour obtenir la destruction d'exergie dans la turbine à vapeur d'après l'équation (2.23) ci-dessous.

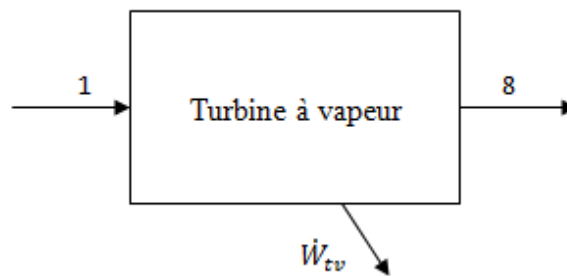


Figure 2.5 – La turbine à vapeur

$$\dot{\psi}_{tv}^d = \dot{\psi}_c - \dot{\psi}_d - \dot{W}_{tv} \quad (2.23)$$

Le condenseur : Pour le condenseur (figure 2.6), nous avons l'entrée de la vapeur provenant de la turbine à vapeur au point 8 et la sortie du condensat vers la chaudière de récupération au point 9. Nous devons également prendre en compte l'exergie perdue $\dot{\psi}_{cd}^p$ correspondant au processus de transfert d'énergie sous forme de chaleur vers l'eau de refroidissement.

L'exergie détruite au sein du condenseur sera par conséquent donnée par le bilan exprimé dans l'équation (2.25) ci-dessous.

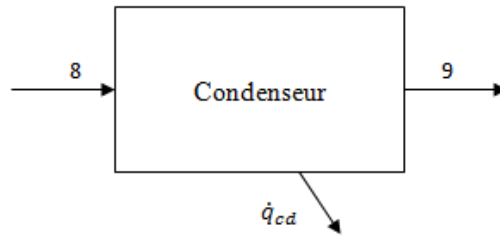


Figure 2.6 - Volume de contrôle condenseur

$$\dot{\psi}_{cd}^d = \dot{\psi}_8 - \dot{\psi}_9 - \dot{\psi}_{cd}^p \quad (2.25)$$

2.7. Conclusion

En appliquant les bilans d'exergie qui sont développés dans ce chapitre, nous allons déterminer l'exergie détruite à travers chacun des composants concernés de la centrale, pour le cas d'étude choisi et qui correspond, comme il a été dit en introduction, à la journée du 21 Août 2016. Les résultats de ces calculs sont présentés, illustrés et analysés au chapitre 3.

CHAPITRE 3

Résultats des bilans d'exergie et tracé du diagramme de Grassmann

3.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présenterons donc les différents résultats obtenus suite aux calculs exposés au chapitre 2 que nous illustrerons par le diagramme de Grassmann pour le cas d'étude traité.

3.2. Présentation des résultats et tracé du diagramme de Grassmann

Les calculs préliminaires des différents termes qui interviennent dans les équations donnant les taux de destruction d'exergie dans les différents composants sont présentés au tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1- Les différents termes d'exergie intervenant dans les équations des bilans

Point	Exergie (kW)	
	Entrée compresseur	ψ_a
Puissance consommée par le compresseur	\dot{W}_c	250051,7
Sortie compresseur	ψ_b	237028,9
Entrée turbine à gaz	ψ_c	792537,3
Puissance fournie par la TG	\dot{W}_{tg}	533486,4
Sortie turbine à gaz	ψ_d	191131,6
Entrée combustible CC	ψ_{cc}	766065,3
Pertes dans la combustion	ψ_{cc}^p	26287,4
Entrée corps HP	ψ_1	151316
Sortie corps HP	ψ_2	111270,5
Entrée corps MP	ψ_4	147957,2
Sortie corps MP	ψ_5	86985,1
Entrée corps BP	ψ_7	92865,9
Sortie corps BP	ψ_8	14484,7
Puissance fournie par la TV	\dot{W}_{tv}	163043,1
Sortie des gaz à la cheminée	ψ_i	20223,01
Entrée combustible PC	ψ_{pc}	78903,3
Sortie condenseur	ψ_9	212,6
Pertes postcombustion	ψ_{pc}^p	2328,5
Pertes condenseur	ψ_{cd}^p	12072,1

Avec les flux d'exergie, les pertes d'exergie et les puissances figurant au tableau 3.1 ci-dessus, les équations des bilans exergétiques, établies pour les différents composants au chapitre 2, sont utilisées pour calculer les différents taux de destruction d'exergie. Ces derniers sont présentés au tableau 3.2 ci-dessous. :

Tableau 3.2–Taux de destruction d'exergie dans les différents composants

Composant	Destruction d'exergie (kW)	Pourcentage (%)
Compresseur	13093,1	1,1
Turbine à gaz	67919,3	8,0
Chambres de combustion	184269,5	21,8
Turbine à vapeur	16355,7	1,9
Chaudière de récupération	59657,1	7,1
Total	341294,7	40,4

Dans la troisième colonne du tableau 3.2 ainsi que celle du tableau 3.3 ci-dessous figurent le pourcentage des exergies citées dans la deuxième colonne, rapportées à l'exergie totale fournie par le combustible au système dans les chambres de combustion et les brûleurs de la chaudière de récupération.

A présent, le bilan d'exergie à travers l'installation peut être illustré sur un diagramme de Grassmann, mais auparavant nous devons rassembler toutes les données utiles pour un tel tracé. Ces données sont présentées au tableau 3.3 ci-dessous avec les pourcentages d'exergie primaire qu'elles représentent figurant à la dernière colonne de ce tableau.

Tableau 3.3 - Bilan exergétique du cycle combiné Hadjret Ennous

Bilan exergétique (kW)		Pourcentage (%)
Puissance nette de la turbine à gaz	283434,7	33,5
Puissance nette de la turbine à vapeur	163043,1	19,3
Sortie des gaz par la cheminée	20223,1	2,4
Perte totale d'exergie	40688	5,0
Destruction totale d'exergie	341294,7	39,9
Total	844683,6	100
Apport du combustible dans les CC	766065,3	90,7
Apport du combustible dans la PC	78903,3	9,3
Apport exergétique total du combustible	844968,6	100

Analyse : Nous rappelons dans les deux premières lignes du tableau 3.3 précédent la puissance nette fournie par la turbine à gaz ainsi que celle de la turbine à vapeur qui représentent ensemble 52.8 % de la quantité d'exergie apportée par le combustible dans les chambres de combustion et les brûleurs de la chaudière de récupération. Cette valeur représente donc le rendement exergetique du cycle combiné. Le reste de l'exergie primaire fournie au système avec le combustible, est soit détruit par les irréversibilités, soit perdu avec l'énergie dissipée par transfert de chaleur vers le milieu ambiant ou bien avec les gaz évacués dans l'atmosphère à la cheminée.

Le total des pertes d'exergie est évalué à 5 %. Ceci comprend la perte associée à la chaleur dissipée dans le milieu ambiant à partir de la chambre de combustion, celle associée à la chaleur dissipée à partir des brûleurs de postcombustion et celle associée à la chaleur dissipée dans l'eau de refroidissement au niveau du condenseur. Celle qui est de loin la plus importante parmi ces trois composantes des pertes, est celle associée à la combustion, parce qu'elle accompagne une énergie perdue à partir d'une source de très forte intensité (chambre de combustion à plus de 1600 K). En dépit du fait que la perte d'énergie au niveau du condenseur est considérable, la perte d'exergie qui l'accompagne est anecdotique, car la condensation de la vapeur a lieu à une température très proche de la température de référence pour les calculs concernant l'exergie.

L'exergie véhiculée par les gaz à la cheminée représente seulement 2.4 %, alors que si le cycle à vapeur n'était pas là, les gaz auraient emporté dans l'atmosphère 31% de l'exergie primaire du combustible. Le cycle à vapeur valorise en puissance 19.3 % de cette exergie disponible dans les gaz à leur échappement de la turbine à gaz, ce qui représente pour le cycle à vapeur seul un rendement exergetique de 62.2%. Cette grande efficacité de conversion a été rendue possible grâce à la conception sophistiquée de la chaudière de récupération avec ses trois niveaux de pression qui en maximise les performances.

La destruction d'exergie cumulée pour tous les composants s'élève à 39.9 % (1.1 % dans le compresseur, 21.8 % dans les chambres de combustion, 8 % dans la turbine à gaz, 7.1 % dans la chaudière de récupération et enfin 1.9 % dans la turbine à vapeur). Notons que les combustions sont à l'origine de la plus grande destruction d'exergie, vient ensuite la turbine à gaz qui est le siège d'une détente à un niveau de température élevé et la chaudière de récupération au sein de laquelle les échanges de chaleur introduisent des irréversibilités relativement importantes, en dépit du fait que la conception avec trois niveaux de pression réduit les écarts de température entre les fluides à travers les échangeurs et minimise donc les irréversibilités associées aux transferts de chaleur qui sont, à l'intérieur de la chaudière de récupération, la cause principale de destruction d'exergie. Les autres causes étant les pertes de pression côté air et surtout côté eau avec la multiplication de singularités (surtout les vannes) dans le circuit d'eau. La turbine à vapeur avec ses trois corps provoque moins de 2% de destruction d'exergie. Le condenseur ne détruit pas d'exergie, parce que nous avons négligé la chute de pression lors du processus de condensation, ce qui élimine le frottement visqueux comme cause d'irréversibilité, et la condensation se faisant à température constante, le processus est endoréversible ; il ne s'accompagne pas d'une destruction d'exergie, mais seulement d'une perte associée à l'énergie transférée à l'eau de refroidissement.

Les résultats portés au tableau 3.3 ci-dessus permettent de tracer le diagramme de Grassmann de la figure 3.1 ci-dessous, qui est une représentation graphique astucieuse du bilan d'exergie de l'installation à cycle combiné de Hadjret-Ennous.

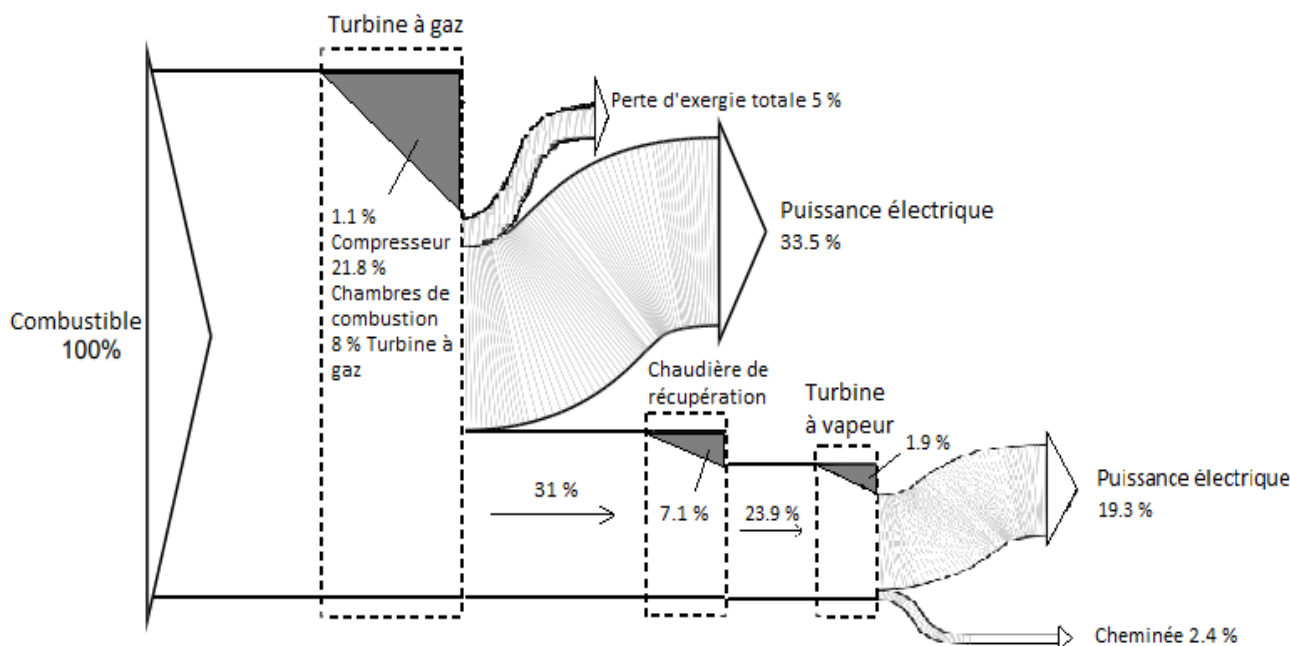


Figure 3.1 - Diagramme de Grassmann appliqué au cycle combiné de la centrale de Hadjret Ennous

3.3. Conclusion

Dans ce chapitre, grâce aux équations des bilans d'exergie appliqués aux différents composants de l'installation à cycle combiné de Hadjret Ennous, nous avons pu en déterminer les taux de destruction d'exergie et représenter graphiquement le bilan général de l'installation à l'aide d'un diagramme de Grassmann. Nous avons constaté sur la base des résultats obtenus que la combustion est le phénomène le plus exergivore et qu'en général la destruction est plus importante quand elle touche un composant qui opère à haute température.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse exergetique est une approche intéressante pour caractériser de manière appropriée la performance d'un système énergétique. Elle est en relation avec la qualité de l'énergie, elle met en évidence les pertes d'énergie utilisable dans les différents équipements composant un système. Elle permet ainsi de localiser les endroits qui offrent les plus grandes possibilités d'amélioration.

Dans la présente étude, nous avons procédé à l'analyse exergetique du cycle combiné de la centrale électrique de Hadjret Ennous. Cette analyse fait suite logiquement à l'analyse énergétique menée dans mon travail de projet de fin d'études.

Nous avons établi les réactions de combustion en les considérant complètes et sans dissociation. Ceci nous a permis de déterminer la composition des gaz en aval des combustions, composition qui nous a été nécessaire pour calculer les différents flux d'exergie côté gaz, puis d'appliquer les bilans d'exergie aux composants et de déterminer les taux de destruction d'exergie.

A travers le diagramme de Grassmann, qui est une représentation très explicite du bilan d'exergie de l'installation dans son ensemble, nous avons remarqué que la destruction d'exergie la plus importante a lieu lors du processus de combustion et que plus un composant sera exposé à une plus haute température durant son fonctionnement, plus grande sera la destruction d'exergie dont il sera le siège.

Quant aux pertes d'exergie avec le milieu ambiant, leur valeur représente 5% de l'exergie primaire fournie au système avec le combustible. Ce pourcentage étant la somme des pertes survenant dans les chambres de combustion, la chaudière de récupération et le condenseur (3.1%, 0.3% et 1.7% respectivement). En plus de cette perte d'exergie, nous relevons également que les gaz évacuent à la cheminée une exergie de (2.4%) qui est négligeable devant celle qu'on aurait perdu si la turbine à gaz n'était pas combinée à une turbine à vapeur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Boutira, «Analyse des performances du système de refroidissement d'air et de son rôle sur le maintien des niveaux de performances de la centrale de Hadjret Ennous,» Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie mécanique, Alger, 2017.
- [2] H. Hagi, *Optimisation rationnelle des performances énergétiques et environnementales d'une centrale à charbon pulvérisé fonctionnant en oxy-combustion*, Paris: MINES ParisTech, Département Énergétique et Procédés, 2014.
- [3] M. J. Moran et H. N. Shapiro, *Fundamentals of engineering thermodynamics*, John Wiley and Sons, Inc, 2006.
- [4] CREDEG, SONELGAZ, «Analyse de la composition molaire du gaz naturel,» 2012.
- [5] J. Szargut, D. Morris et F. Steward, *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, New York: Hemisphere, 1988.
- [6] M. A. Korobitsyn, «New and Advanced Energy Conversion Technologies, Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles,» Amsterdam, 1998.
- [7] J. Ahrendts, *Die exergie Chemisch ReaktionsFähiger Systeme*, Dusseldorf : VDI-Verlag, 1977.

ANNEXES

ANNEXE A

Tableau des exergies chimiques molaires des espèces présentes dans les fluides traités : [5]

TABLE A-26

Standard Molar Chemical Exergy, \bar{e}^{ch} (kJ/kmol), of Selected Substances at 298 K and p_0

Substance	Formula	Model I ^a	Model II ^b
Nitrogen	N ₂ (g)	640	720
Oxygen	O ₂ (g)	3,950	3,970
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	14,175	19,870
Water	H ₂ O(g)	8,635	9,500
Water	H ₂ O(l)	45	900
Carbon (graphite)	C(s)	404,590	410,260
Hydrogen	H ₂ (g)	235,250	236,100
Sulfur	S(s)	598,160	609,600
Carbon monoxide	CO(g)	269,410	275,100
Sulfur dioxide	SO ₂ (g)	301,940	313,400
Nitrogen monoxide	NO(g)	88,850	88,900
Nitrogen dioxide	NO ₂ (g)	55,565	55,600
Hydrogen sulfide	H ₂ S(g)	799,890	812,000
Ammonia	NH ₃ (g)	336,685	337,900
Methane	CH ₄ (g)	824,350	831,650
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	—	1,265,800
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	—	1,361,100
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	1,482,035	1,495,840
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	—	2,003,900
Propane	C ₃ H ₈ (g)	—	2,154,000
Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	—	2,805,800
Pentane	C ₅ H ₁₂ (g)	—	3,463,300
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	—	3,303,600
Octane	C ₈ H ₁₈ (l)	—	5,413,100
Methanol	CH ₃ OH(g)	715,070	722,300
Methanol	CH ₃ OH(l)	710,745	718,000
Ethanol	C ₂ H ₅ OH(g)	1,348,330	1,363,900
Ethanol	C ₂ H ₅ OH(l)	1,342,085	1,357,700