



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering

كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2026

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GÉNIE DES PROCÉDÉS
Option: GÉNIE CHIMIQUE

Thème

**Optimisation Energétique du Système d'Huile Chaude
par Récupération de Chaleur au Complexe GNL3/Z**

- 1- Benosmane Khadidja Rania
- 2- Belameiri Maroua

Soutenu le 15/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	BOUBEGRA. Naima	Grade MCA	Université de Mostaganem.
Examineur :	BENDENIA Souhila	Grade Pr	Université de Mostaganem.
Rapporteur :	BENDENIA Chahrazed	Grade MCA	Université de Mostaganem.
Co-Encadreur	MERAD-DIB Hanae	Grade MCA	Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2025/2026

Dédicaces

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la santé, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien constant tout au long de notre parcours. Que Dieu les bénisse et les protège.

*Nous adressons également notre profonde gratitude à **Madame BENDENIA Chahrazad**, notre encadrante, pour ses précieux conseils, son accompagnement, sa disponibilité et son soutien qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.*

Enfin, nous exprimons nos sincères remerciements à nos familles, à nos amis ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenues de près ou de loin durant cette aventure académique.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante, **Madame Dr. BENDENIA Chahrazed** Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien constant et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury, **Dr. BOUBEGRA** Maître de conférences A, et **Professeur BENDENIA Souhila**, à l'Université de Mostaganem, qui ont accepté d'évaluer ce travail et de participer à sa soutenance.*

*Nous remercions également **Dr. MERAD-DIB Hanaa** Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, notre co-encadrante, pour son aide, ses orientations et ses conseils constructifs.*

*Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble des enseignants du département de **Génie des Procédés**, qui ont contribué à notre formation universitaire et à l'acquisition de nos connaissances.*

Liste des figures

Figure I.1: Chaîne d'approvisionnement en gaz du projet GL3/Z

Figure I.2: Situation géographique du complexe GL3 /Z

Figure I.3 : Maquette 3D vue d'ensemble de l'usine

Figure II.1 : Système d'huile chaude

Figure II.2 : Principe de fonctionnement de la turbine

Figure III .1 : Présentation des données de base du logiciel ASPEN HYSYS

Figure III .2 : Configuration du système four seul

Figure III .3 : Schéma de simulation du système d'huile chaude avec récupération de chaleur existant

Figure III.4 : Représentation du système d'huile chaude intégrant deux dispositifs de récupération thermique

Figure III.5 : Évolution de la consommation spécifique de combustible selon la configuration du système

Figure III.5 : Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Installation de stockage

Tableau III.1: Résultats de simulation du système en mode four seul

Tableau III.2 : Données opérationnelles du système thermique en présence du récupérateur existant

Tableau III.3 : Condition opératoire du système intégrant un récupérateur existant et un nouveau récupérateur de chaleur

Tableau III.4 : Consommation spécifique de combustible pour les différentes configurations

Tableau III.5 : Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible

Liste des abréviations

APCI	Air Product & Chemicals INC.
BOG	Boil Of Gas
BP	Basse pression
HP	Haut pression
BT	Basse température
HT	Haut température
C1	Méthane
C2	Ethane
C3	Propane
C4	butane
CO2	Dioxyde de carbone
GN	Gaz naturel
GNL	Gaz naturel liquéfié
GNT	Gaz naturel traité
GPL	Gaz pétroliers liquéfiés
MCHE	Echangeur cryogénique principal (Main Cryogenic Heat Exchanger)
MDEA	Méthyl Di Etanol Amine
MR	Réfrigérant mixte
CS	Consommation spécifique de combustible
$I_{eff,rel}$	Indicateur d'efficacité énergétique relative
n-C6	n-Hexane
PCS	Pouvoir calorifique supérieure
ppm	partie par million
GT	Turbine à Gaz

ملخص

تتناول هذه المذكرة تحسين كفاءة الطاقة داخل مركب تمييع الغاز الطبيعي GL3/Z (سوناطراك). تتمحور الدراسة حول تجميع الطاقة الحرارية لغازات العادم الصادرة عن التوربينات الغازية، والتي تُطرح حالياً في الغلاف الجوي، وذلك لدعم نظام الزيت الساخن. من خلال محاكاة أجريت باستخدام برنامج Aspen HYSYS، قمنا بمقارنة التشغيل الحالي للنظام مع وضعية محسنة تتضمن وحدة جديدة لاسترجاع الحرارة. أظهرت النتائج أن هذا الحل يسمح بتقليل الاعتماد على الفرن الرئيسي بشكل كبير وخفض استهلاك وقود الغاز. وبالإضافة إلى الفائدة الاقتصادية المرتبطة بتوفير الطاقة، يندرج هذا المشروع ضمن مسعى التنمية المستدامة من خلال تقليل البصمة الكربونية وانبعاثات الغازات الدفينة للمركب.

الكلمات المفتاحية : GL3/Z ، استرجاع الحرارة، Aspen HYSYS، كفاءة الطاقة، انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، الغاز الطبيعي المميع.

Résumé

Ce mémoire traite de l'optimisation de l'efficacité énergétique au sein du complexe de liquéfaction de gaz naturel GL3/Z (Sonatrach). L'étude porte sur la valorisation de l'énergie thermique des gaz d'échappement d'une turbine à gaz, actuellement rejetée dans l'atmosphère, pour soutenir le système d'huile chaude. À travers une simulation réalisée avec le logiciel Aspen HYSYS, nous avons comparé le fonctionnement actuel du système avec une configuration améliorée intégrant une nouvelle unité de récupération de chaleur. Les résultats démontrent que cette solution permet de réduire significativement la dépendance vis-à-vis du four principal et de diminuer la consommation de gaz combustible. Outre l'intérêt économique lié à l'économie d'énergie, ce projet s'inscrit dans une démarche de développement durable en réduisant l'empreinte carbone et les émissions de gaz à effet de serre du complexe.

Mots-clés : GL3/Z, Récupération de chaleur, Aspen HYSYS, Efficacité énergétique, Émissions de CO₂, Gaz Naturel Liquéfié.

Abstract

This thesis focuses on optimizing energy efficiency within the GL3/Z natural gas liquefaction complex (Sonatrach). The study explores the recovery of thermal energy from gas turbine exhaust gases, which are currently released into the atmosphere, to support the hot oil system. Using Aspen HYSYS software, a simulation was conducted to compare the current

system's operation with an improved configuration incorporating a new heat recovery unit. The findings demonstrate that this solution significantly reduces reliance on the main furnace and lowers fuel gas consumption. Beyond the economic benefits of energy savings, this project contributes to sustainable development by reducing the complex's carbon footprint and greenhouse gas emissions.

Keywords: GL3/Z, Heat Recovery, Aspen HYSYS, Energy Efficiency, CO₂ Emissions, Liquefied Natural Gas.

SOMMAIRE

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des abréviations.....	iii
Résumé.....	iv

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE.I. Le Complexe GL3/Z : Présentation

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. DESCRIPTIF DU COMPLEXE GL3/Z.....	3
I.2.1. Emplacement de l'usine.....	4
I.2.2.Objectifs Stratégiques et Capacités de Production du Complexe.....	5
1.2.2.a. Volumes de Production Annuelle et Valorisation des Sous-produits.....	5
1.2.2.b.Infrastructures de Stockage et d'Expédition.....	5
I.3.STRUCTURE GENERAL, CONFIGURATION ET RÉPARTITION OPÉRATIONNELLE DES INSTALLATIONS.....	6
I.3.1. Plan de Masse et Architecture Industrielle des Installations.....	6
I.3.2. Répartition Opérationnelle et Flexibilité du Site.....	7
I.3.2.a. Unités principales du procédé.....	7
I.3.2.b. Unités des utilités.....	8
I.3.2.c. Unités de procédé.....	8
I.3.2.d. Unités off-sites.....	8
I.3.2.e. Zone anti-incendie.....	9
I.4. SYSTÈME THERMIQUE DU COMPLEXE GL3/Z.....	9
I.4.1. Sources de chaleur et récupération énergétique (Unité 18).....	9
I.4.2. Puits thermiques et niveaux de température du procédé (Unité 17).....	10
I.4.3. Synergie et interconnexion entre réseau thermique et fractionnement.....	10
I.5. DESCRIPTION ET FONCTIONEMENT DES UNITÉS 17 ET 18.....	10

I.5.1. Unité 17 (Fractionnement)	10
I.5.2.L'unité 18	11
I. 6.CONCLUSION.....	12

CHAPITRE.II Équipements du Système Thermique: Description et Fonctionnement

II.1. INTRODUCTION.....	14
II.2. LE FOUR 18-MB01.....	15
II.2.1. Présentation générale du four 18-MB01.....	15
II.2.2. Rôle du four 18-MB01.....	16
II.2.3. Principe de fonctionnement du four.....	16
II.2.4. Conditions de sécurité et d'exploitation.....	17
II.3. RÉCUPÉRATION DE CHALEUR 18-ML02 (WHRU-WASTE HEATRECOVERY UNIT).....	17
II.3.1. Description générale de l'unité 18-ML02.....	17
II.3.2. Rôle de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02.....	17
II.3.3. Principe de fonctionnement du récupérateur 18-ML02.....	18
II.3.3.1. Principe thermodynamique.....	18
II.3.3.2. Circuit des gaz de carneau.....	18
II.3.3.3. Circuit de l'huile chaude	19
II.3.3.4. Performances thermiques.....	19
II.4. TURBINE À GAZ 17-MJ08-GT.....	19
II.4.1. Présentation générale de la turbine 17-MJ08-GT.....	19

II.4.2. Rôle de la turbine 17-MJ08-GT dans le complexe GL3/Z.....	19
II.4.3. Principe de fonctionnement de la turbine 17-MJ08-GT.....	20
II.4.4. Caractéristiques des gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT.....	21
II.5. CONCLUSION.....	21

CHAPITRE.III Impact de Récupération de Chaleur sur la Consommation Énergétique du Système d'Huile Chaude

III.1. INTRODUCTION.....	23
III.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DU PROJET.....	23
III.3.PRESENTATION DU LOGICIEL ASPEN HYSYS.....	24
III.4.DONNEES DE BASE DE L'ETUDE ET HYPOTHESES DE SIMULATION.....	25
III.5. ÉTUDE DU FOUR SEUL (CAS DE REFERENCE THEORIQUE).....	26
III.5.1. Données de fonctionnement issu de la simulation.....	27
III.6. EVALUATION DU FOUR AVEC LE RECUPERATEUR DE CHALEUR EXISTANT (SYSTEME REEL).....	28
III.6.1. Données de fonctionnement du système réel.....	29
III.7. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU FOUR AVEC SYSTEME ACTUEL ET AMELIORATION PAR NOUVEAU RECUPERATEUR.....	31
III.7.1. Données de fonctionnement de la configuration améliorée.....	32
III.8. ANALYSE ENERGETIQUE BASEE SUR DES INDICATEURS SPECIFIQUES.....	34
III.8.1. Consommation spécifique de combustible.....	34

III.8.2. Analyse graphique de la consommation spécifique de combustible.....	35
III.8.3. Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible.....	36
III.8.4. Indicateur d'efficacité énergétique relative.....	38
III.9. CONCLUSION.....	39

CHAPITRE.IV. Étude Énergétique Économique et Environnementale

IV.1. INTRODUCTION.....	41
IV.2. ÉTUDE ÉCONOMIQUE.....	41
IV.2.1. Objectif de l'étude économique.....	41
IV.2.2. Hypothèses et données de base.....	41
IV.2.3. Gain économique.....	42
IV.2.4. Conversion en gain économique annuel.....	42
IV.2.5. Quantification du gain économique annuel en volume de combustible économisé.....	42
IV.3. GAIN ÉNERGÉTIQUE ANNUELLE.....	43
IV.4. GAIN ÉCONOMIQUE EN ÉQUIVALENT DU GN.....	43
IV.5. GAIN FINANCIER ANNUEL.....	44
IV.6. PART DU GAIN ÉNERGÉTIQUE DANS L'AUTO CONSOMMATION GLOBALE.....	45
IV.7.ETUDE ENVIRONNEMENTALE.....	46
IV.7.1. Principe de l'analyse environnementale.....	46
IV.7.2. Base de calcul et hypothèses.....	46
IV.7.3. Principe de calcul des émissions de CO ₂	46
IV.8. CONCLUSION.....	47

Conclusion Générale et Recommandations.....	48
Bibliographies.....	50
Annexes.....	53

Introduction générale

L'énergie constitue aujourd'hui un élément fondamental du développement industriel, économique et technologique des nations [1]. Avec l'augmentation continue de la demande énergétique mondiale et les préoccupations croissantes liées à la préservation de l'environnement, les industries sont appelées à améliorer leurs performances énergétiques tout en réduisant leurs émissions polluantes [2]. Dans ce contexte, l'optimisation des procédés industriels et la valorisation des pertes énergétiques deviennent des enjeux stratégiques majeurs, notamment dans les secteurs fortement consommateurs d'énergie comme l'industrie pétrolière et gazière [3].

L'Algérie, à travers la société nationale Sonatrach occupe une place importante sur le marché mondial des hydrocarbures, particulièrement dans le domaine de la production et de l'exportation du gaz naturel liquéfié (GNL). Parmi les complexes industriels les plus importants figurent le complexe GL3/Z, situé dans la zone industrielle d'Arzew, spécialisé dans la liquéfaction du gaz naturel destiné principalement à l'exportation. Ce complexe joue un rôle essentiel dans la valorisation des ressources gazières nationales et contribue de manière significative à l'économie algérienne [4].

Cependant, les procédés de liquéfaction du gaz naturel nécessitent une consommation énergétique très importante. Les différentes installations industrielles du complexe, notamment les turbines à gaz, les compresseurs et les équipements thermiques génèrent des pertes considérables sous forme de chaleur rejetée dans l'atmosphère [5]. Une grande partie de cette énergie thermique résiduelle reste inexploitée, malgré son potentiel important de récupération et de valorisation [6]. Cette situation conduit non seulement à une baisse du rendement global des installations, mais également à une augmentation des coûts énergétiques et des impacts environnementaux.

Face à ces enjeux, la récupération de chaleur constitue une solution technique et économique particulièrement intéressante. Elle permet de réutiliser l'énergie perdue afin d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels, de réduire la consommation de combustible et de limiter les émissions de gaz à effet de serre [3]. Dans les complexes de

liquéfaction du gaz naturel, les gaz d'échappement issus des turbines représentent une source importante d'énergie récupérable grâce à leur température croissante et à leur débit considérable [5].

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail, qui porte sur l'étude énergétique, économique et environnementale de la récupération de chaleur au niveau du complexe GL3/Z. L'originalité et l'intérêt majeur de cette étude est d'évaluer les performances d'un système de récupération thermique appliqué aux gaz d'échappement des turbines à gaz, afin de valoriser l'énergie perdue et d'améliorer le rendement global des installations industrielles [6].

Cette étude vise également à analyser l'impact de cette récupération sur plusieurs aspects essentiels, notamment la réduction de la consommation énergétique, l'amélioration des performances thermiques, la diminution des coûts d'exploitation ainsi que la réduction des émissions polluantes rejetées dans l'environnement [2]. Une telle approche s'inscrit parfaitement dans les orientations actuelles de l'industrie énergétique, basées sur le développement durable, l'efficacité énergétique et la transition vers des procédés industriels plus propres et plus performants [3].

Pour atteindre ces objectifs, une analyse détaillée du fonctionnement des équipements concernés sera réalisée. La simulation du système sera effectuée à l'aide du logiciel Aspen HYSYS, largement utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière pour l'analyse et l'optimisation des procédés. Cette simulation permettra d'évaluer les performances du système proposé et de déterminer les gains énergétiques potentiels pouvant être obtenus grâce à la récupération de chaleur.

Enfin, ce mémoire mettra en évidence l'importance de la valorisation énergétique dans les complexes industriels modernes et démontrera que la récupération des pertes thermiques représente une solution efficace pour améliorer les performances industrielles tout en répondant aux exigences économiques et environnementales actuelles [6].

CHAPITRE I

Le Complexe GL3/Z: Présentation

I.1. INTRODUCTION

Le secteur de la production du gaz naturel liquéfié occupe une place stratégique dans l'économie algérienne, notamment grâce au complexe industriel GL3/Z, considéré comme l'une des réalisations majeure de la chaîne de transformation des hydrocarbures exploitée par la société SONATRACH. Ce site contribue fortement à la valorisation des ressources gazières, au développement de l'économie nationale ainsi qu'à la création d'emplois dans la région. Il participe également à l'approvisionnement en gaz destiné à la production d'électricité, aux activités industrielles, aux usages domestiques et à l'exportation, tout en soutenant le développement des infrastructures nationales. [7].

I.2. DESCRIPTIF DU COMPLEXE GL3/Z

Le projet développé par la société SONATRACH pour l'exploitation des réserves de gaz situées dans le bassin de Berkine comprend les installations suivantes (voir figure I.1) :

- Un réseau de pipelines destiné au transport du gaz naturel (GN).
- Une unité de production de gaz naturel liquéfié (GNL).

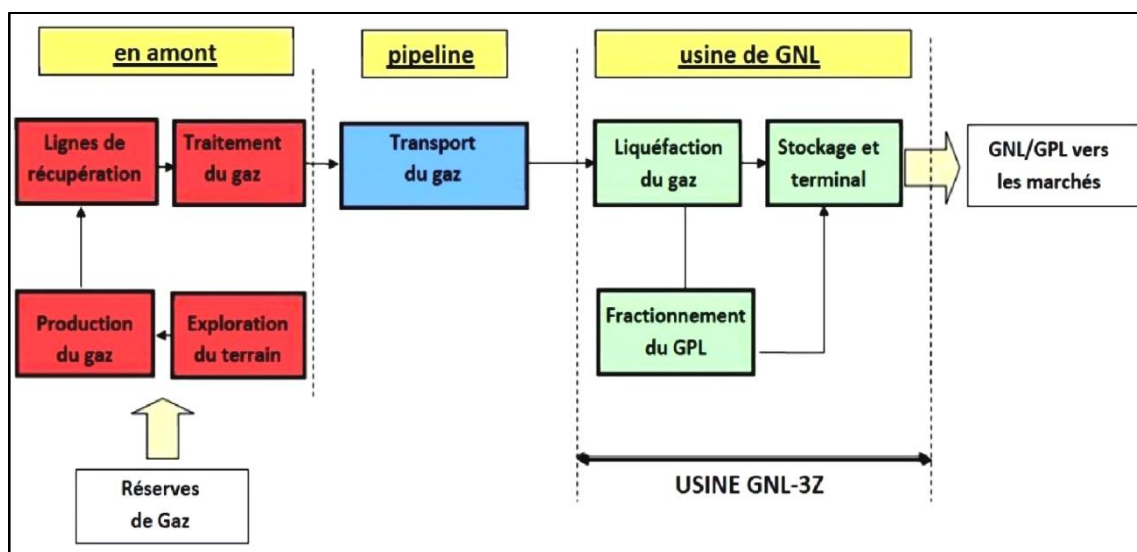


Figure I.1. Chaîne d'approvisionnement en gaz du projet GL3/Z [8].

Le complexe GL3/Z, étant le dernier site de liquéfaction construit, a bénéficié d'une ingénierie réalisée par la société italo-japonaise "Joint-venture, SAIPEM-CHIYODA". Cette entreprise était responsable des études nécessaires à la construction et à la mise en service des diverses installations [9].

I.2.1. Emplacement de l'usine

Sur le littoral méditerranéen, à Bethioua, l'usine est implantée dans la zone industrielle du port d'Arzew El-Djedid, comme l'illustre la figure I.2. Le complexe s'étend sur une superficie de 54,6 ha. Il est entouré par l'usine GP1/Z à l'est et à l'ouest par l'unité de dessalement ainsi que l'usine GL2/Z. Au nord du site se trouvent la mer et la route portuaire, tandis que la route principale de la zone industrielle est située au sud.

Le site est également raccordé à plusieurs infrastructures industrielles, notamment le pipeline de gaz d'alimentation, les jetées M6 et D1 destinées au chargement du GPL produit par l'usine GL3/Z, ainsi que le pipeline de gazoline reliant la production de GL3/Z au réseau existant de l'usine GL2/Z. Par ailleurs, l'alimentation en azote du complexe est assurée par une ligne connectée au collecteur d'azote existant (pipe-way côtier). Enfin, l'approvisionnement en eau potable provient d'EGZIA, tandis que l'eau dessalée est fournie par KAHRAMA [10].

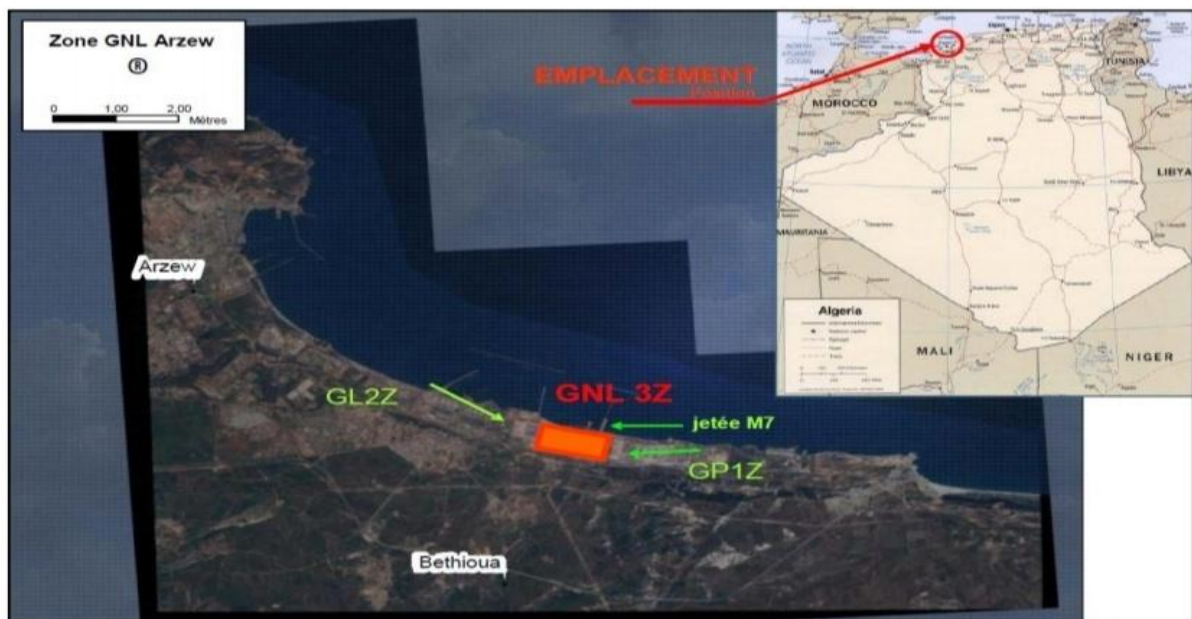


Figure I.2. Situation géographique du complexe GL3 /Z [10].

I.2.2. Objectifs Stratégiques et Capacités de Production du Complexe

L'unité du GL3/Z vise essentiellement à liquéfier le gaz naturel (GNL) afin de réduire son volume et d'optimiser son transport, notamment par voie maritime.

Sur le plan stratégique, cette unité permet à l'Algérie d'accroître ses capacités d'exportation et de consolider son rang parmi les principaux acteurs du marché gazier. Elle répond ainsi à la demande énergétique croissante des marchés internationaux, en particulier en Europe et en Asie. Au-delà de la valorisation des ressources nationales et à de la génération de revenus substantiels, le complexe dynamise l'économie et l'emploi à l'échelle locale et nationale [11,9].

1.2.2.a. Volumes de Production Annuelle et Valorisation des Sous-produits

La capacité nominale du train GL3/Z reflète son importance industrielle a savoir;

- **GNL net (cargos) :** 4,7 millions de tonnes
- **Éthane :** 300 000 tonnes
- **Propane :** 275 000 tonnes
- **Butane :** 58 000 tonnes
- **Gazoline :** 47 000 tonnes

Par ailleurs, le procédé permet de récupérer l'hélium brut en vue de son extraction ultérieure, tandis que l'éthane est utilisé à la fois dans une unité d'hydrocraquage voisine et pour couvrir les besoins internes du complexe. Cette gestion des sous-produits participe à l'optimisation [11].

1.2.2.b. Infrastructures de Stockage et d'Expédition

Pour gérer la production du GNL, le complexe intègre des installations de stockage de type "rétention totale" interconnectées aux terminaux maritimes telles déterminées dans le tableau I.1:

Tableau I.1. installations de stockage

Produit	Type de Réservoir	Capacité de Stockage	Logistique et Expédition
GNL	2 bacs à rétention totale	160 000 m ³ chacun	Exporté via une nouvelle jetée dédiée (M7)
Propane (C₃)	Rétention totale séparée	56 000 m ³	Expédié par les jetées existantes (M6 et D1 via le réseau GPL)
Butane (C₄)	Rétention totale séparée	12 000 m ³	Expédié par les jetées existantes (M6 et D1 via le réseau GPL)
Gazoline	Sphère (produit stabilisé)	1 800 m ³	Stockage sur site

I.3. STRUCTURE GENERAL, CONFIGURATION ET RÉPARTITION OPÉRATIONNELLE DES INSTALLATIONS

I.3.1. Plan de Masse et Architecture Industrielle des Installations

L'usine indiquée sur la figure I.3 est constituée d'un train technique, des utilités associées ainsi que des installations off-site. Le train de procédé inclut un compresseur de gaz d'alimentation, une unité d'élimination du mercure, une unité de traitement du CO₂ sous licence BASF, un système de déshydratation, une unité de récupération et de fractionnement des liquides de gaz naturel (NGL) équipée d'un cycle de réfrigération au propane dédié, ainsi qu'une section de liquéfaction et de réfrigération utilisant le procédé C₃MR (C₃ Split Mixed Refrigerant) sous licence APCI.

Les utilités et les installations off-sites englobent notamment le système de génération d'énergie, les installations de stockage et de chargement du GNL et du GPL sur méthaniers, le circuit d'huile chaude, le système d'eau de refroidissement, les réseaux d'air de service et d'instrumentation, la production et la distribution d'azote, le réseau de gaz combustible, les systèmes de torchage, les unités de traitement des eaux usées, les réseaux d'eau de service et

d'eau potable, les installations de stockage du diesel, ainsi que les capacités de stockage des fluides frigorigènes et de la gazoline [11].

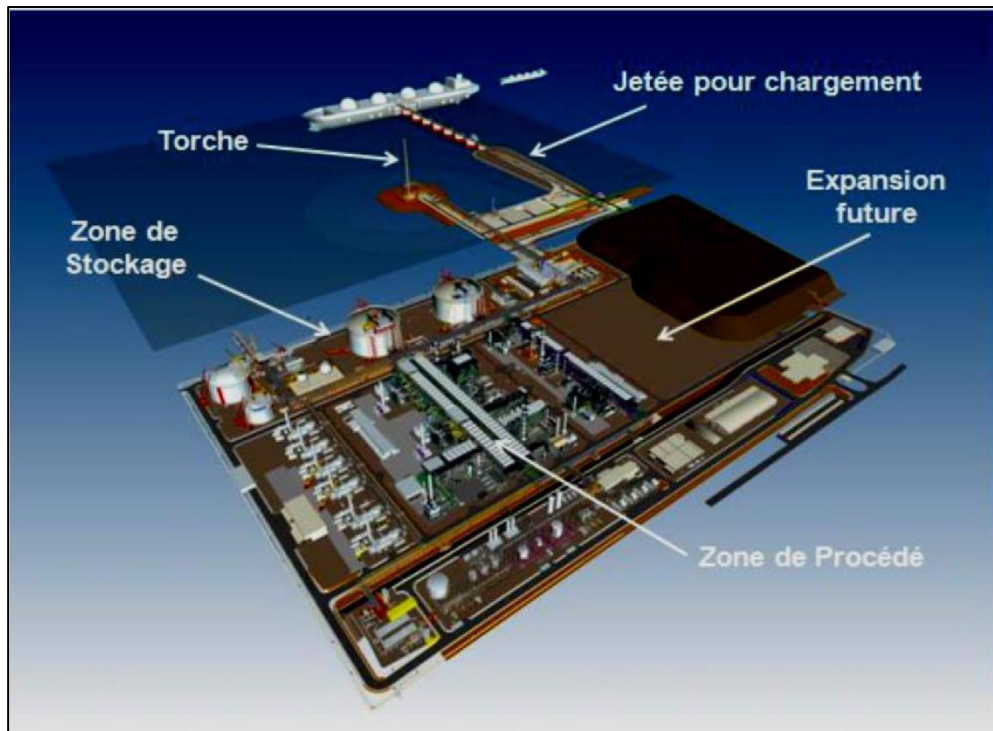


Figure I.3. Maquette 3D vue d'ensemble de l'usine [11].

I.3.2. Répartition Opérationnelle et Flexibilité du Site

Le bon fonctionnement et l'adaptation de l'usine reposent sur un découpage précis de ses installations. Cela permet de mieux gérer les flux et de s'adapter facilement aux variations de production. L'ensemble du processus est assuré aux niveaux opérationnels suivants [9,11,12]:

I.3.2.a. Unités principales du procédé

- Unité 11 : Conditionnement du gaz d'alimentation
- Unité 12 : Elimination du gaz acide
- Unité 13: Déshydratation du gaz
- Unité 14 : Système du gaz combustible (Train 1)
- Unité 15 : Liquéfaction
- Unité 16 : Réfrigération

- Unité 17 : Récupération et fractionnement du GNL
- Unité 18 : Système de l'huile chaude
- Unité 19 : Système d'Eau de refroidissement

I.3.2.b. Unités des utilités

- UNITE 01 Installation d'Entrée
- UNITE 02 Stockage de l'Amine
- UNITE 08 Stockage d'Huile Chaude
- UNITE 51 Génération d'Energie
- UNITE 53 Diesel de Secours
- UNITE 55 Système de Gaz Combustible Commun
- UNITE 56 Système d'Air de Service et d'Air Instrument
- UNITE 57 Système d'Azote
- UNITE 58 Circuit d'Eau Potable
- UNITE 59 Système d'Eau de Service et d'Eau Déminéralisée
- UNITE 64 Système des Eaux Usées

I.3.2.c. Unités de procédé

- UNITE 11 Conditionnement du Gaz d'Alimentation
- UNITE 12 Elimination des Gaz Acides
- UNITE 13 Déshydratation
- UNITE 14 Système de Gaz Combustible
- UNITE 15 ET 16 Liquéfaction et Réfrigération
- UNITE 17 Récupération et Fractionnement Des GNL
- UNITE 18 Système de l'Huile Chaude
- UNITE 19 Système d'eau de Refroidissement

I.3.2.d. Unités off-sites

- UNITE 71 Stockage et de Chargement de GNL et Récupération des BOG

- UNITE 72 Stockage et Chargement du GPL
- UNITE 73 Stockage du Réfrigérant
- UNITE 75 Système de Torche
- UNITE 76 Système de Stockage de la Gazoline

I.3.2.e. Zone anti-incendie

- UNITE 63 Système d'Eau Anti-incendie
- UNITE 77 Lutte Anti-incendie

Chaque unité a un rôle spécifique dans le processus [08,12].

I.4. SYSTÈME THERMIQUE DU COMPLEXE GL3/Z

Le caractère opérationnel et la continuité du processus de liquéfaction dépendent de manière cruciale de la stabilité des apports énergétiques et calorifiques du site. Sur ce plan d'exploitation, le système thermique du complexe GL3/Z occupe une fonction transversale déterminante. Conçu pour transporter et distribuer de l'énergie calorifique en circuit fermé, il alimente les unités clés du procédé tout en évitant l'utilisation de flammes directes dans les zones de traitement hautement sécurisées.

L'efficacité thermodynamique et la viabilité de ce système thermique reposent sur l'interaction directe entre deux entités majeures du bloc procédé : la section de séparation des fluides (**Unité 17**) et la boucle de génération de chaleur (**Unité 18**). Dès lors, l'étude conjointe de leur description et de leur mécanisme de fonctionnement s'avère indispensable pour comprendre l'équilibre énergétique du train de liquéfaction.

Cette dynamique opérationnelle s'articule plus précisément autour de trois aspects fondamentaux : la génération et la récupération de la chaleur en Unité 18, sa distribution en Unité 17, avec une interdépendance des deux unités, garantissant ainsi l'équilibre énergétique intégral du train de liquéfaction [13-15].

I.4.1. Sources de chaleur et récupération énergétique (Unité 18)

L'infrastructure thermique repose sur l'Unité 18 (Système d'Huile Chaude), véritable centrale calorifique du complexe qui utilise une stratégie de cogénération performante afin d'optimiser le rendement thermodynamique global de l'usine [14, 15].

I.4.2. Puits thermiques et niveaux de température du procédé (Unité 17)

La récupération et le fractionnement des liquides de gaz naturel (GNL) contenus dans le gaz sec provenant de l'Unité 13 de déshydratation se procèdent au niveau des Puits thermiques appelés Unité 17. Cette unité constitue le principal pôle de consommation thermique à travers les opérations de fractionnement des hydrocarbures [13, 14].

I.4.3. Synergie et interconnexion entre réseau thermique et fractionnement

Cette configuration technique crée un couplage indissociable. D'un côté, l'Unité 17 dépend entièrement de l'énergie calorifique stable fournie par l'Unité 18 pour réaliser une distillation fractionnée efficace et extraire successivement le méthane, l'éthane, le propane et le butane. De l'autre côté, l'Unité 18 requiert le fonctionnement optimal de l'Unité 17 car les sous-produits du fractionnement comme le pentane vaporisé ou le gaz combustible servent de combustibles d'appoint pour alimenter ses propres fours de chauffage.

L'analyse du système thermique met en évidence le rôle central des deux Unités 17 et 18 dans le maintien de l'équilibre énergétique du complexe GL3/Z. Leur forte interdépendance opérationnelle garantit à la fois l'efficacité des séparations et l'optimisation de la récupération énergétique. Afin de mieux comprendre les mécanismes qui régissent cette synergie, il convient désormais de présenter en détail la configuration, les équipements principaux et le fonctionnement de chacune de ces deux unités [16].

I.5. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES UNITÉS 17 ET 18

I.5.1. Unité 17 (Fractionnement)

L'Unité 17 du complexe GL3/Z d'Arzew est destinée à préparer une alimentation en gaz naturel conforme aux exigences de la section de liquéfaction, en éliminant les hydrocarbures lourds susceptibles de se solidifier aux températures extrêmement basses et de compromettre le fonctionnement de l'échangeur de chaleur principal [11]. Elle permet également de séparer les liquides de gaz naturel en différentes fractions d'hydrocarbures de grande valeur, telles que l'éthane, le propane, le butane, le pentane et la gazoline.

Le procédé s'appuie sur une série de distillations partielles séparant les hydrocarbures présents dans le mélange en différents produits commerciaux ou intermédiaires purifiés (du méthane aux composés lourds). Le flux liquide issu des étapes amont est d'abord envoyé vers le

déméthaniseur, où le méthane (C_1) est récupéré en tête de colonne sous forme de gaz résiduel. Après compression, ce gaz est réintégré dans le circuit principal de liquéfaction ou dirigé vers le réseau de gaz combustible. Le méthane séparé constitue ainsi l'alimentation principale de la section de liquéfaction [17,13,14].

Le produit de sortie du déméthaniseur est alors envoyé au déséthaniseur, qui récupère l'éthane (C_2) en tête de colonne pour l'utiliser comme gaz combustible, réfrigérant de reflux ou aliment d'appoint afin d'ajuster la teneur en mélange frigorigène (MR) dans la boucle cryogénique. Les composés plus lourds terminent leur traitement dans les colonnes de dépropanisation et de débutanisation. Le propane (C_3), collecté en tête de colonne, sert de cryogène et est stocké, tandis que le butane (C_4) est stocké ou réinjecté dans l'échangeur de chaleur cryogénique principal. Enfin, le produit de fond du débutaniseur est composé d'essence (C_5) ou de condensats lourds stabilisés, qu'on envoie aux unités de traitement et aux installations de stockage dédiées [18].

L'unité 17 permet ainsi une extraction séquentielle de l'éthane, du propane, du butane, du pentane et de l'essence, tout en assurant une valorisation optimale des différentes fractions d'hydrocarbures. Elle intègre également un circuit auxiliaire de propane en boucle fermée fournissant le refroidissement nécessaire à différents niveaux de pression pour le gaz d'alimentation et les reflux de la colonne [19].

Sur le plan énergétique, elle constitue le principal consommateur de chaleur des installations. Elle utilise un circuit d'huile chaude à deux niveaux de pression en cascade. Le niveau haute température (260 °C) alimente principalement les fours à gaz, ainsi que les rebouilleurs des colonnes de dépropanisation et de débutanisation, avec des besoins importants en chaleur de vaporisation. Le circuit à basse température (160 °C), alimenté par le débit résiduel ou par une conduite de dérivation régulée par le refroidisseur 18-MC02, sert au réchauffeur du déméthaniseur ainsi qu'à la section de régénération du solvant amine de l'unité 12 pour l'élimination du CO_2 [20,13, 14].

I.5.2. L'unité 18

L'unité 18 sert de système principal de production et de distribution de chaleur pour le complexe GL3/Z. Elle fournit l'énergie thermique utile à divers procédés, dont les

réchauffeurs des colonnes de séparation, les réseaux de régénération et les réchauffeurs de gaz, tout en garantissant la sécurité de toutes les installations [20,21].

La chaleur est principalement récupérée à partir des gaz d'échappement de la turbine à gaz 11-MJ01 grâce à l'unité de récupération de chaleur 18-ML02. En complément, notamment lors des démarrages, le four d'huile chaude 18-MB01 assure l'appoint thermique en utilisant du gaz combustible ou du pentane vaporisé.

Après chauffage, l'huile est distribuée selon deux niveaux de température : 260 °C pour les équipements à forte demande thermique, notamment les rebouilleurs de l'Unité 17, et 160 °C pour le déméthaniseur et la régénération des amines de l'Unité 12. Les principaux utilisateurs de cette énergie sont les unités de fractionnement, de traitement du CO₂ et de déshydratation [20-22,14].

Après avoir cédé sa chaleur, l'huile retourne vers le ballon tampon 18-MD01 pour être réchauffée et réutilisée. Une pompe d'urgence assure la circulation du fluide en cas de coupure électrique, tandis que des systèmes de récupération des drains garantissent une gestion sécurisée de l'huile thermique. Cette organisation contribue à l'efficacité énergétique et à la fiabilité opérationnelle du complexe [20-22,15].

1.6. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble du complexe GL3/Z à Arzew, tout en soulignant son importance stratégique dans la valorisation du gaz naturel et le secteur de l'exportation. La production visée, les capacités annuelles ainsi que les infrastructures de transport et de stockage démontrent le statut majeur de ce complexe au sein de l'industrie gazière nationale. Les analyses de la configuration générale des installations ont également permis de mieux cerner l'organisation opérationnelle du site et sa capacité à s'adapter pour répondre aux exigences de production et de sécurité.

Par ailleurs, l'analyse du circuit thermique a soulevé l'importance de la gestion énergétique dans le bon fonctionnement des installations. Enfin, la description des unités 17 et 18 a souligné l'importance du fractionnement des hydrocarbures et de la distribution de chaleur pour l'efficacité du processus de liquéfaction. Pris dans leur ensemble, ces éléments offrent

une vue d'ensemble complète du fonctionnement du complexe GL3/Z et constituent une base indispensable à l'étude technique présentée dans les chapitres suivants.

CHAPITRE.II

Equipements du Système Thermique: Description et Fonctionnement

II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude du système thermique du complexe GL3/Z à travers l'analyse du fonctionnement de ses équipements majeurs notamment le four d'huile chaude 18-MB01 et le récupérateur de chaleur existant 18-ML02 qui assurent conjointement l'alimentation thermique des différents consommateurs du procédé. L'évaluation des performances thermiques et des échanges énergétiques au sein de ces équipements met en évidence les limites de la configuration actuelle ainsi que les possibilités d'amélioration [16].

Dans ce contexte, la chaleur contenue dans les gaz d'échappement de la turbine constitue un potentiel énergétique important. Sa valorisation, par l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur, peut contribuer à alléger la charge du four et à renforcer l'efficacité énergétique globale du réseau d'huile chaude, tel qu'illustré sur la figure II.1 [17].

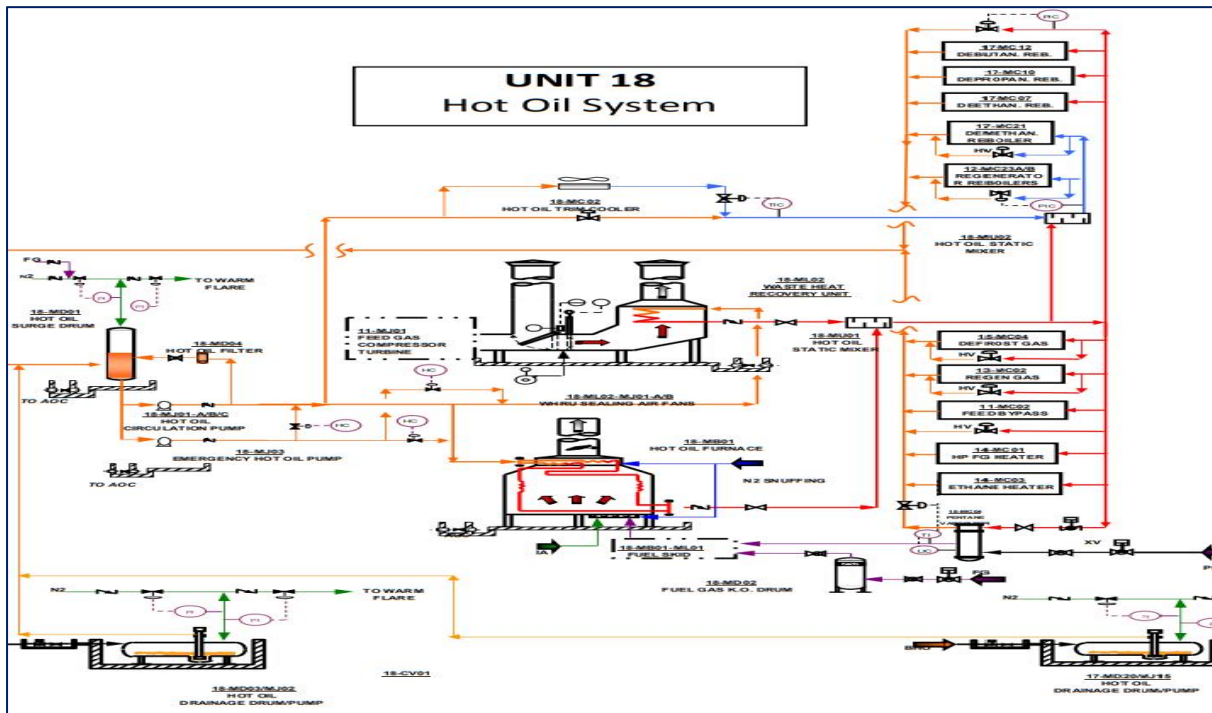


Figure II.1. Système d'huile chaude.

II.2. LE FOUR 18-MB01

II.2.1. Présentation générale du four 18-MB01

Le four d'huile chaude 18-MB01 appartient à la catégorie des fours industriels fonctionnant à tirage naturel. Il est conçu conformément aux exigences du code API560, garantissant ainsi un haut niveau de sécurité et de fiabilité en exploitation [18].

Ce four est destiné au chauffage d'un fluide caloporteur permettant le transfert indirect de l'énergie thermique vers les différentes unités du procédé. Le transfert de chaleur vers l'huile s'effectue par rayonnement et par convection, assurant un rendement thermique élevé et une répartition homogène de la chaleur. L'équipement est principalement constitué d'une section radiante de type boîte (box type) et d'une section convective complétées par un système de combustion à brûleurs multiples et un système d'évacuation des fumées via une cheminée équipée d'un registre de tirage (stack damper) [19].

La section radiante constitue le cœur thermique du four. Elle est équipée de tubes radiants supportés par le bas protégé par un revêtement réfractaire en fibres céramiques et chauffés par des brûleurs installés sur le plancher du four. Dans cette zone, la chaleur produite via combustion est transférée principalement par rayonnement direct des flammes et des gaz chauds vers les tubes contenant l'huile chaude. La température de conception des tubes de 377 °C est une valeur à ne jamais dépasser afin de préserver l'intégrité mécanique des matériaux. En conditions normales d'exploitation la température maximale de la peau des tubes ne dépasse pas 310 °C.

La section convective, située au-dessus de la section radiante, est composée de tubes horizontaux supportés par des plaques tubulaires et protégés par un réfractaire en béton (castable). Elle permet de récupérer la chaleur résiduelle des gaz de combustion par convection, ce qui contribue à l'amélioration du rendement global du four et à la réduction des pertes thermiques par la cheminée. Les serpentins sont divisés en huit passes dans la section radiante et huit passes dans la section convective reliées entre elles par des collecteurs et des croisements externes.

Le système de combustion comprend 30 brûleurs à gaz de type SRX-040-ND à tirage naturel et de technologie Low NOx. Les brûleurs peuvent fonctionner au gaz combustible ou au pentane (lance séparée). La puissance thermique unitaire est de 4,09 MW en régime maximal, 3,72 MW en régime nominal et 1,02 MW en régime minimal avec un excès d'air de 15 % et un rapport de modulation de 4 : 1. Chaque brûleur est équipé d'un pilote à gaz permanent, d'un

dispositif de réglage de l'air, d'une sonde d'ionisation pour la détection de la flamme pilote et d'un scanner UV pour la surveillance de la flamme principale. Leur disposition assure une répartition homogène du flux thermique et évite tout impact direct de flamme sur les tubes, une condition essentielle pour la sécurité du four [20].

II.2.2. Rôle du four 18-MB01

Le four d'huile chaude 18-MB01 a pour rôle principal de fournir l'énergie thermique nécessaire aux procédés du complexe par le chauffage indirect d'un fluide caloporteur. Ce fluide qui peut être Mobiltherm 605 ou Torada TC32 permet le transfert de chaleur vers différents consommateurs du procédé sans contact direct avec la flamme.

L'usage d'un système d'huile chaude présente plusieurs avantages :

- Un fonctionnement à haute température sans pression excessive.
- Une stabilité thermique et sécurité accrue.
- La protection des équipements de procédé contre les points chauds.
- Une meilleure maîtrise des gradients thermiques.

En conditions de design, le four fournit une puissance thermique de 93,65 MW pour un débit d'huile chaude de 1 250 000 kg/h. permettant d'élever la température du fluide de 159,2 °C à 263 °C[20].

II.2.3. Principe de fonctionnement du four

Le principe de fonctionnement du four d'huile chaude repose sur les étapes suivantes :

- Circulation de l'huile chaude

L'huile est mise en circulation continue dans les serpentins radiants puis convectifs assurant un refroidissement permanent des tubes.

- Combustion contrôlée

Le gaz combustible ou le pentane est brûlé dans les brûleurs avec un excès d'air contrôlé de 15 %correspondant à environ 3 % d'oxygène dans les fumées.

- Transfert de chaleur

Le four assure le transfert de chaleur par rayonnement dans sa section radiante et par convection dans sa section convective.

- Évacuation des fumées

Les gaz brûlés sont évacués vers l'atmosphère par la cheminée. Le registre de cheminée assure un tirage correct et maintient en permanence le four dépression [20].

II.2.4. Conditions de sécurité et d'exploitation

Le four est conçu pour fonctionner exclusivement en pression négative côté fumées, avec une valeur minimale de $-2,5$ mmCE mesurée par les transmetteurs 18-PT-5004 A/B/C.

Les règles fondamentales d'exploitation incluent :

- La variation progressive des conditions de marche.
- Le respect strict des données de conception.
- Le contrôle permanent de l'excès d'air.
- La surveillance des températures de peau des tubes.
- l'exploitation sous la supervision de personnel qualifié [20].

II.3. RÉCUPÉRATION DE CHALEUR 18-ML02 (WHRU-WASTE HEATRECOVERY UNIT)

II.3.1. Description générale de l'unité 18-ML02

L'unité 18-ML02 également appelée WHRU (Waste HeatRecovery Unit) est intégrée au système d'Huile Chaude – Unité 18. Elle fonctionne en complément du four d'huile chaude 18-MB01 permettant ainsi de réduire la charge thermique de ce dernier.

La WHRU récupère la chaleur des gaz de carneau à haute température produits par la turbine à gaz et la transfère à une huile thermique circulant dans un serpentin tubulaire. Cette huile constitue le fluide caloporteur principal pour l'alimentation des utilisateurs thermiques du complexe [20].

II.3.2. Rôle de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02

Les objectifs essentiels de l'unité 18-ML02 peuvent être résumés comme suit :

- Valorisation de l'énergie résiduelle contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz.
- Réduction de la consommation de combustible du four d'huile chaude principal.
- Amélioration du rendement énergétique global du complexe GL.
- Fourniture fiable de chaleur aux différents consommateurs thermiques du site.

Afin d'optimiser la distribution thermique, le système d'huile chaude est conçu pour fonctionner avec deux niveaux de température distincts :

- Un niveau haut température d'environ 260 °C.
- = Un niveau bas température d'environ 160 °C.

II.3.3. Principe de fonctionnement du récupérateur 18-ML02

II.3.3.1. Principe thermodynamique

Le fonctionnement de l'unité 18-ML02 repose sur un échange thermique indirect entre deux fluides :

- Les gaz chauds de combustion issus de la turbine à gaz.
- L'huile thermique (Torada TC32) circulant à l'intérieur des tubes.

Il n'existe aucun contact direct entre les deux fluides ce qui garantit la sécurité du procédé et la pureté de l'huile thermique.

Le transfert de chaleur s'effectue successivement par :

- Convection des gaz chauds vers la surface externe des tubes.
- Conduction thermique à travers la paroi des tubes.
- Convection de la paroi interne des tubes vers l'huile thermique.

II.3.3.2. Circuit des gaz de carneau

Les gaz d'échappement quittent la turbine à une température pouvant dépasser 530 °C. Ils sont ensuite dirigés :

- Soit vers l'unité de récupération de chaleur 18-ML02.
- Soit vers la cheminée de by-pass lorsque la WHRU est hors service.

La distribution des gaz est assurée par un système de volet (damper) de type marche-arrêt et une guillotine d'isolement. Pour des raisons de sécurité, ces deux dispositifs ne

peuvent jamais être fermés simultanément évitant ainsi tout risque de surpression dans le circuit des fumées.

II.3.3.3. Circuit de l'huile chaude

L'huile thermique pénètre dans la WHRU à une température moyenne d'environ 166 °C et sous une pression de l'ordre de 14,8 bars. En circulant dans le serpentin tubulaire elle absorbe la chaleur issue des gaz de carneau et atteint en sortie une température pouvant aller jusqu'à 277 °C pour une pression avoisinant 11,9 bars. L'huile chauffée est ensuite distribuée vers les différents utilisateurs du complexe selon les besoins thermiques du procédé[3, 18-20].

II.3.3.4. Performances thermiques

Dans les conditions opératoires de base (température ambiante de 21 °C) la puissance thermique récupérée par l'unité 18-ML02 est de l'ordre de 36,4 MW.

Selon les conditions de fonctionnement de la turbine (cas Lean, Riche, Base) la puissance récupérée varie généralement entre 30 et 36 MW. Ces performances permettent une contribution significative à la couverture des besoins thermiques du complexe, tout en limitant les pertes d'énergie[3, 18-20].

II.4. TURBINE À GAZ 17-MJ08-GT

II.4.1. Présentation générale de la turbine 17-MJ08-GT

La turbine 17-MJ08-GT est une turbine à gaz industrielle du modèle MS-5002C utilisée pour entraîner un compresseur centrifuge. Elle fonctionne en cycle simple à deux arbres indépendants (HP et BP) et en régime continu. L'air admis est filtré puis comprimé dans un compresseur axial à 16 étages avant d'être envoyé dans les chambres de combustion. L'ensemble est contrôlé et surveillé par le système SPEEDTRONIC Mark VI garantissant la sécurité de performance et de stabilité. La turbine fournit une puissance nominale de 38 000 HP sous conditions ISO [21].

II.4.2. Rôle de la turbine 17-MJ08-GT dans le complexe GL3/Z

La turbine à gaz 17-MJ08-GT constitue l'un des équipements clés du complexe. Elle assure la production de puissance mécanique nécessaire au fonctionnement de compresseur 17-MJ08 de la boucle propane auxiliaire et représente en même temps une source importante

d'énergie thermique à travers ses gaz d'échappement à haute température. Cette chaleur souvent non valorisée constitue un potentiel considérable d'amélioration énergétique.

II.4.3. Principe de fonctionnement de la turbine 17-MJ08-GT

Le fonctionnement de la turbine 17-MJ08-GT se déroule en trois étapes principales (voir figure II.2) :

-Compression de l'air

L'air atmosphérique traverse le système d'admission filtré puis est comprimé dans le compresseur axial à 16 étages. Ce processus augmente significativement la pression et la température de l'air.

-Combustion

L'air comprimé est distribué dans les douze chambres de combustion. Le combustible gazeux y est injecté sous pression et allumé par les bougies d'allumage. La combustion est ensuite auto-entretenue produisant des gaz très chauds et sous haute pression.

-Détente dans les turbines

Les gaz brûlés se détendent successivement :

- D'abord dans la turbine haute pression qui entraîne le compresseur axial.
 - Puis dans la turbine basse pression qui entraîne le compresseur centrifuge du procédé.
- Cette détente produit le couple mécanique nécessaire à l'entraînement des charges. Les gaz d'échappement sont ensuite dirigés vers le silencieux avant leur évacuation.

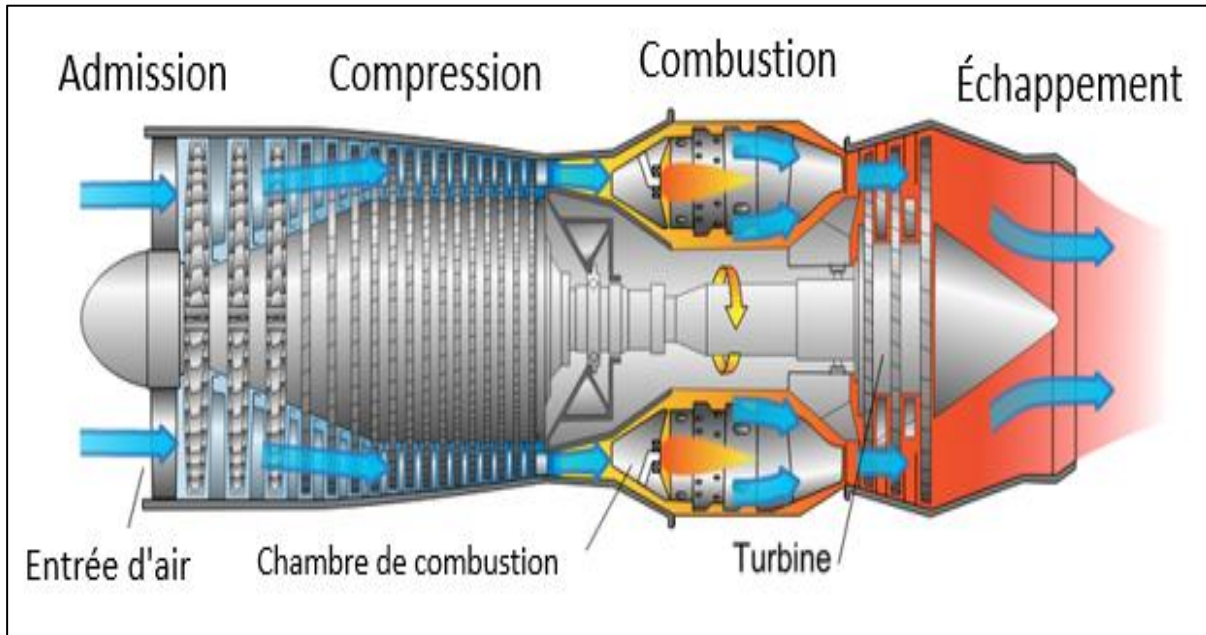


Figure II.2. Principe de fonctionnement de la turbine [2].

II.4.4. Caractéristiques des gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT

Les gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT constituent un flux thermique de haute valeur souvent sous-exploité dans les installations industrielles. À la sortie de la turbine, ces gaz conservent une énergie sensible importante due à leur température élevée et à leur débit continu caractéristique typique des turbines industrielles fonctionnant en régime stable.

Cette énergie actuellement rejetée directement dans l'atmosphère peut être récupérée à travers un échangeur ou un récupérateur disposé sur la ligne d'échappement. Une telle récupération permettrait de transférer une partie de la chaleur disponible vers le réseau d'huile chaude diminuant ainsi l'appel énergétique sur le four et permettant une réduction notable de la consommation en combustible. La valorisation de ces gaz constitue donc une opportunité stratégique pour améliorer l'efficacité énergétique globale du complexe et pour réduire l'impact environnemental des rejets thermiques[17-20].

II.5. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la description et à l'analyse du fonctionnement des principaux équipements intervenant dans le système thermique du complexe GL3/Z, à savoir le four d'huile chaude 18-MB01, l'unité de récupération de chaleur existante 18-ML02 et la turbine à gaz 17-MJ08-GT.

L'analyse du fonctionnement de la turbine à gaz 17-MJ08-GT met en évidence que les gaz d'échappement sont caractérisés par une température élevée, traduisant la présence d'un gisement thermique significatif. Dans la configuration actuelle du procédé, cette énergie est totalement dissipée vers l'atmosphère sans valorisation, engendrant ainsi des pertes énergétiques importantes à l'échelle du complexe.

Dans une démarche d'optimisation énergétique et d'amélioration du rendement global, la récupération de la chaleur sensible contenue dans les gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT constitue une opportunité stratégique. L'intégration d'un système de récupération thermique permettrait de transférer cette énergie vers le réseau d'huile chaude, contribuant ainsi à une réduction de la charge thermique du four 18-MB01. Par conséquent, une diminution de la consommation spécifique en combustible ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique globale du système sont attendues.

Le chapitre suivant sera dédié à l'évaluation de l'impact de la récupération de chaleur des gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT sur le fonctionnement du réseau d'huile chaude du complexe GL3/Z. L'étude portera notamment sur la quantification du potentiel énergétique récupérable, ainsi que sur l'analyse de ses répercussions sur les performances thermiques et opérationnelles du système, dans une optique d'optimisation énergétique intégrée.

CHAPITRE.III

Impact de Récupération de Chaleur sur la Consommation Énergétique du Système d'Huile Chaude

III.1. INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, une étude énergétique du système sera abordée, cette étude s'inscrit dans un contexte où la turbine à gaz 17-MJ08-GT émet des gaz d'échappement à température élevée, porteurs d'un potentiel thermique important, actuellement non valorisé et évacué vers l'atmosphère, constituant ainsi une source notable de pertes énergétiques à l'échelle du complexe.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur sur la consommation de gaz combustible du four d'huile chaude, ainsi que d'évaluer les gains en termes de performance énergétique et de réduction des besoins en combustible. Pour cela, une approche comparative a été adoptée en considérant trois configurations de fonctionnement ; un premier cas correspond à un régime de fonctionnement basé exclusivement sur le four, retenu comme référence théorique. Le deuxième cas reflète l'état opérationnel actuel du système, caractérisé par la présence d'un dispositif de récupération de chaleur. Enfin, le troisième cas repose sur l'intégration conjointe du récupérateur existant et d'un nouveau système de valorisation thermique.

III.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DU PROJET

Dans un contexte marqué par la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire la consommation de combustible au sein du complexe GL3/Z, la valorisation des sources de chaleur perdues constitue un enjeu majeur. Les gaz d'échappement de la turbine à gaz 17MJ08-GT représentent un potentiel thermique important qui n'est actuellement pas exploité et qui est rejeté vers l'atmosphère.

La problématique de ce travail réside dans l'évaluation des bénéfices thermiques issus des gaz d'échappement de la turbine 17MJ08-GT sur le fonctionnement du système d'huile chaude du complexe GL3/Z.

Il s'agit d'analyser dans quelle mesure cette récupération peut contribuer à réduire la sollicitation du four existant, à diminuer la consommation de fuel gaz et à améliorer la performance énergétique globale du système. Pour ce faire, il est suggéré d'installer une nouvelle unité de récupération de chaleur. L'objectif principal de ce projet est ainsi d'étudier le potentiel de valorisation de cette chaleur récupérable et d'en analyser les effets sur le réseau d'huile thermique, en termes de couverture des besoins thermiques, de rendement énergétique et de réduction des émissions de CO₂.

III.3. PRESENTATION DU LOGICIEL ASPEN HYSYS

Aspen HYSYS est un logiciel de simulation de procédés chimiques largement reconnu, développé par la société Hyprotech qui fait partie du groupe AspenTech.

À l'origine, il a été conçu pour répondre aux besoins des industries du pétrole, du gaz naturel et du raffinage mais il s'est progressivement imposé comme un outil incontournable dans le domaine de l'ingénierie des procédés.

Ce logiciel se distingue notamment par sa capacité à effectuer à la fois des simulations en régime statique et dynamique à partir d'un même modèle. Cette particularité permet de passer facilement d'un mode à l'autre sans perte d'informations, ce qui représente un avantage considérable pour l'analyse des procédés.

Grâce à son interface conviviale, à son organisation modulaire et à une base de données thermodynamiques fiable HYSYS offre la possibilité de simuler avec précision une grande variété de procédés industriels, tels que le traitement du gaz, les procédés cryogéniques, le raffinage ou encore la production chimique. Sa flexibilité, la précision de ses résultats ainsi que ses fonctionnalités avancées, comme le dimensionnement, l'analyse, l'optimisation et la planification, en font un outil très utilisé aussi bien dans le milieu industriel que dans le domaine académique.

Par ailleurs, le simulateur HYSYS est fréquemment introduit dans les universités et les écoles d'ingénieurs comme premier logiciel de simulation, notamment dans le cadre de l'enseignement et de la recherche. Malgré un nombre parfois limité de ressources pédagogiques, il est aujourd'hui considéré comme une référence dans la simulation des procédés. Il contribue à faciliter le travail des ingénieurs en améliorant la compréhension des systèmes et en assurant une meilleure gestion des données tout au long du cycle de développement [23, 24].

III.4. DONNEES DE BASE DE L'ETUDE ET HYPOTHESES DE SIMULATION

Les données utilisées dans cette étude sont obtenues à partir de la simulation du système d'huile chaude sous Aspen HYSYS (voir figure III.1). Le modèle de simulation a été construit en tenant compte des caractéristiques réelles des équipements et des conditions opératoires du procédé.

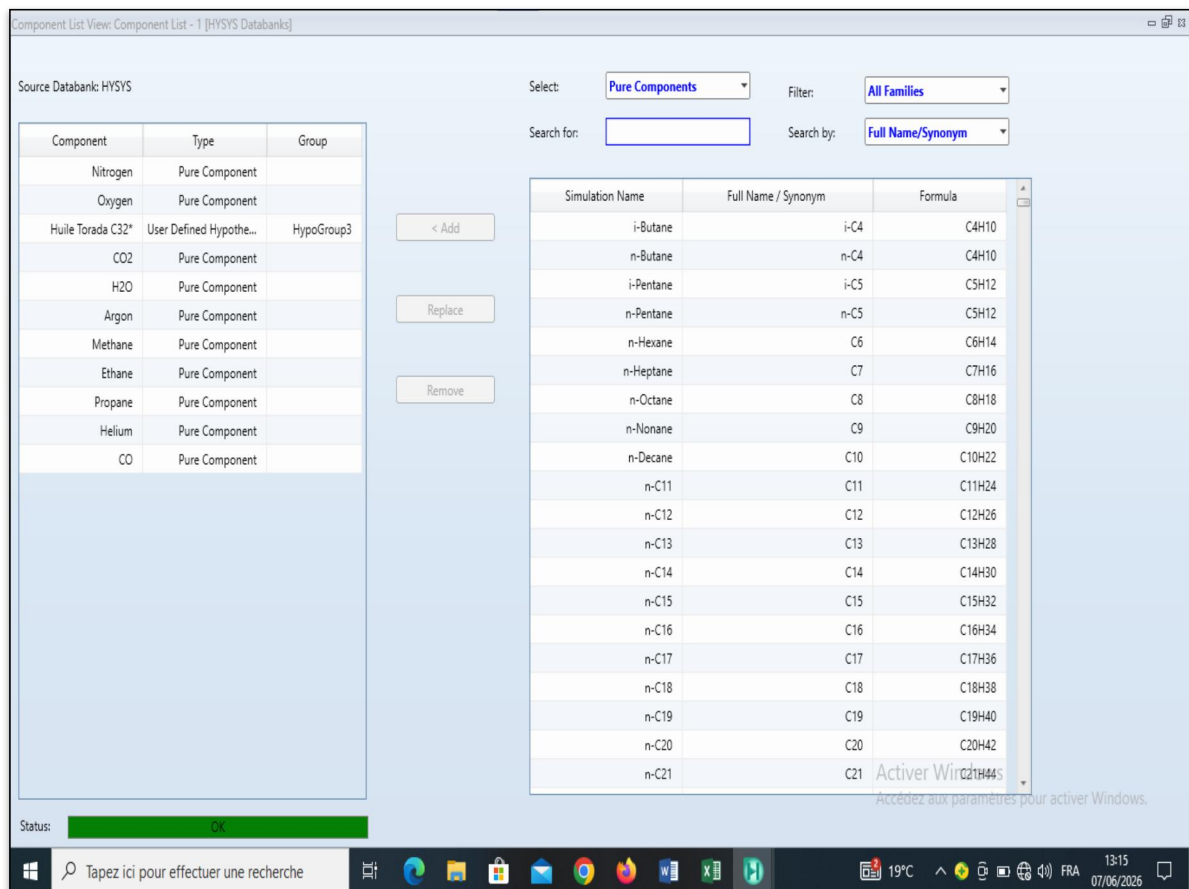


Figure III.1. Présentation des données de base du logiciel ASPEN HYSYS.

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Fonctionnement en régime permanent,
- Le modèle thermodynamique Peng Robinson est utilisé dans la simulation du circuit d'huile chaude.
- Propriétés thermo-physiques des fluides supposés constantes.
- Conditions opératoires comparables pour les trois configurations étudiées.
- L'analyse énergétique est basée principalement sur la consommation de gaz combustible du four considérée comme l'indicateur principal de performance énergétique.

Les résultats de simulation sont présentés sous forme de tableaux pour chaque configuration étudiée.

III.5. ÉTUDE DU FOUR SEUL (CAS DE REFERENCE THEORIQUE)

Dans ce cas, le système d'huile chaude fonctionne exclusivement à partir du four, en l'absence de tout dispositif de récupération de chaleur comme illustré sur la figure III.2..

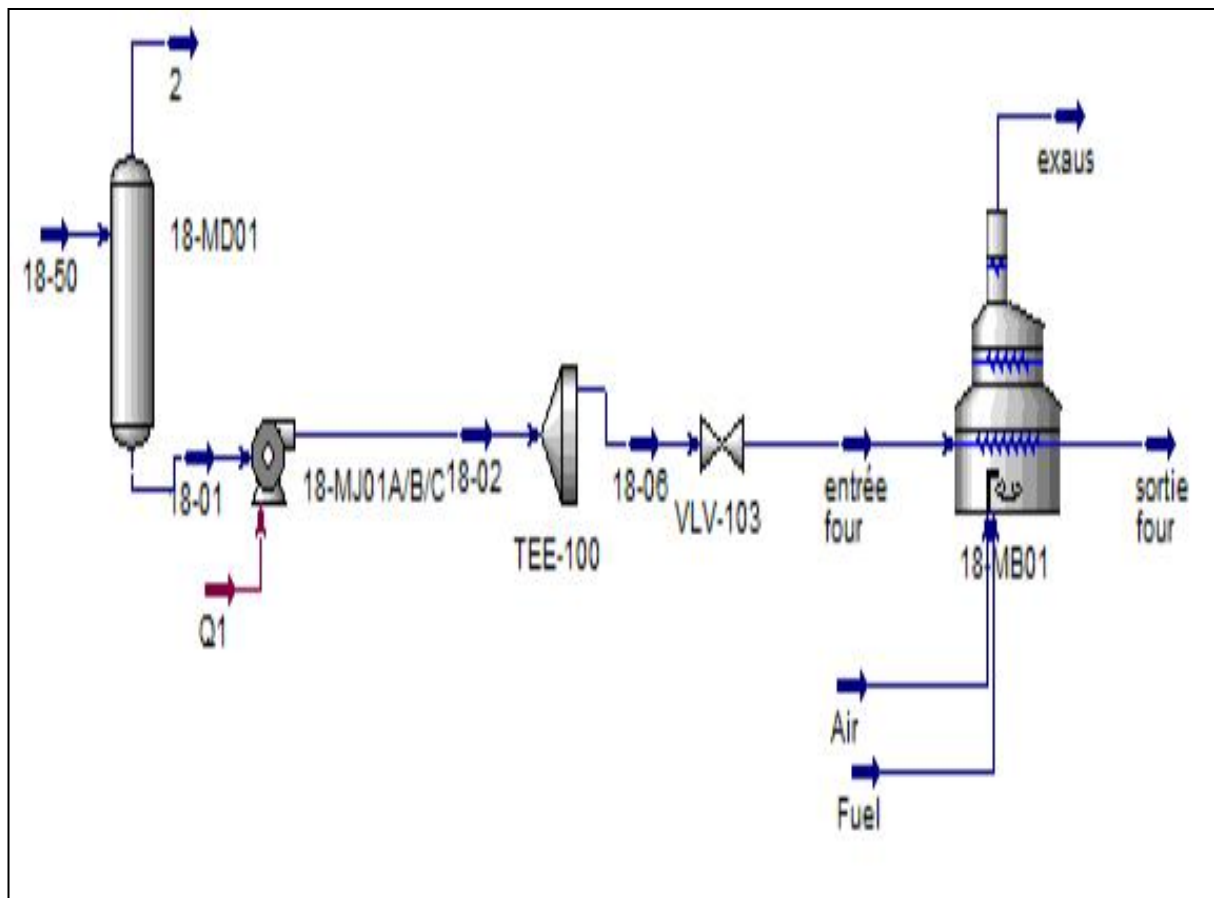


Figure III .2.Configuration du système four seul.

III.5.1. Données de fonctionnement issues de la simulation

Les données opérationnelles obtenues par simulation pour le cas de référence sont reportées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Résultats de simulation du système en mode four seul.

Paramètre	Valeur	Unité
Type de combustible	Gaz C2(Ethane)	/
Débit de fuel gaz	7864	kg/h
Débit d'huile à l'entrée du four 18-MB01	1785	m^3/h
T d'huile à l'entrée du four 18-MB01	166	°C
T d'huile à la sortie du four 18-MB01	260	°C
Régime	Permanent	/

D'après les résultats obtenus, il est indiqué que pour assurer la température requise de l'huile chaude, le four consomme un débit de gaz combustible de :

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = 7864 \text{ kg/h}$$

Le débit total d'huile chauffée est :

$$\dot{m}_{\text{huile}} = 1350000 \text{ kg/h}$$

Cette valeur est retenue comme base de référence pour l'évaluation des gains énergétiques associés aux systèmes intégrant la récupération de chaleur. Le fonctionnement du four en mode isolé se traduit par une consommation importante de gaz combustible afin de satisfaire les besoins thermiques du réseau d'huile chaude. L'absence de valorisation de la chaleur issue des gaz d'échappement se traduit par un niveau d'efficacité énergétique relativement faible.

Dans ce contexte, ce cas constitue une référence théorique, servant de support comparatif pour l'analyse des performances énergétiques des systèmes intégrant des dispositifs de récupération thermique.

III.6. EVALUATION DU FOUR AVEC LE RECUPERATEUR DE CHALEUR EXISTANT (SYSTEME REEL)

Dans ce mode de fonctionnement, une partie des besoins thermiques du système est assurée par le récupérateur de chaleur existant (voir figure III.3), ce qui permet de réduire la charge thermique du four.

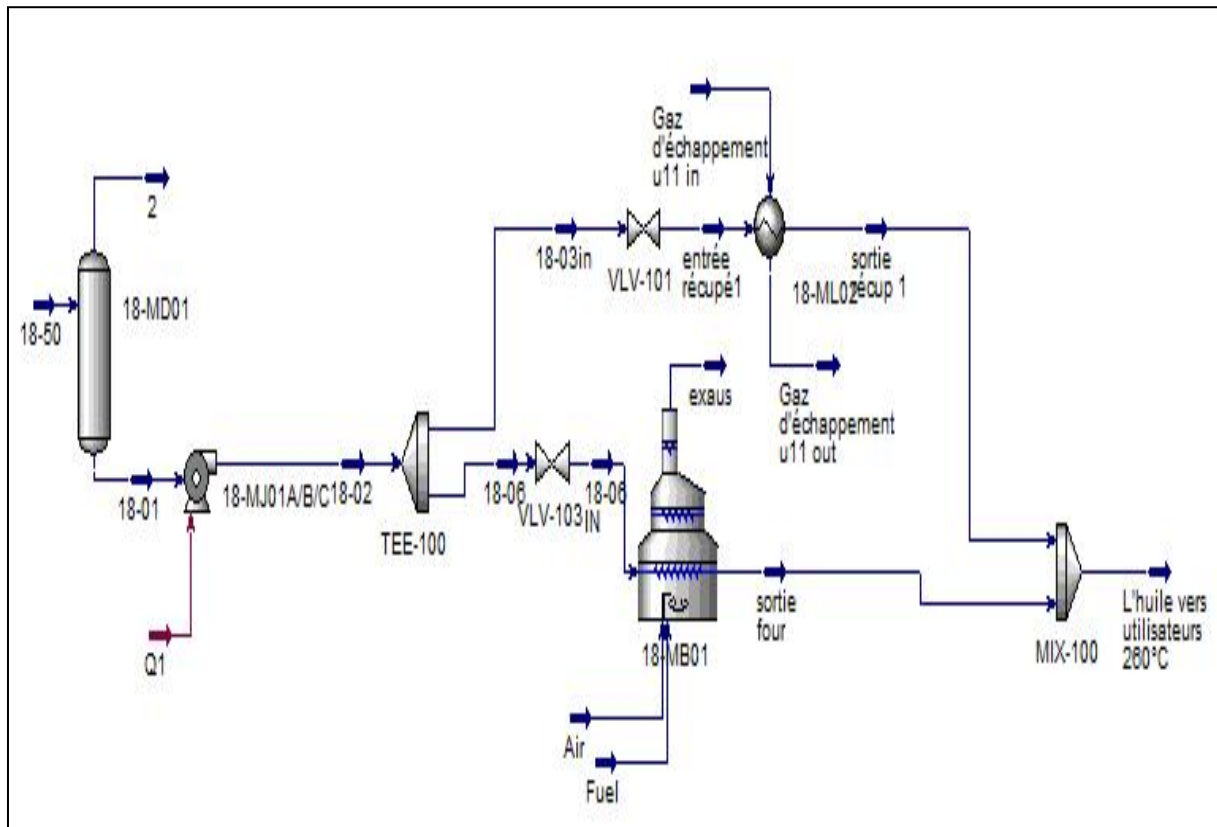


Figure III .3. Schéma de simulation du système d'huile chaude avec récupérateur de chaleur existant.

III.6.1. Données de fonctionnement du système réel

Les résultats de simulation correspondant à cette configuration sont présentés dans le tableau associé III.2.

Tableau III.2.Données opérationnelles du système thermique en présence du récupérateur existant.

Paramètre	Valeur	Unité
Type de combustible	Gaz C2(Ethane)	/
Débit de fuel gaz	4730	kg/h
Débit d'huile à l'entrée du four 18-MB01	1190	m ³ /h
T d'huile à l'entrée du four 18-MB01	166	°C
T d'huile à la sortie du four 18-MB01	251,5	°C
Débit d'huile à l'entrée du récupérateur 18-ML02	595	m ³ /h
Td' huile à l'entrée du récupérateur 18-ML02	166	°C
T d'huile à la sortie du récupérateur 18-ML02	277	°C
Débit du gaz d'échappement	354051	kg/h
T du gaz d'échappement à entrer du récupérateur 18-ML02	560	°C
T du gaz d'échappement à la sortie du récupérateur 18-ML02	238.5	°C
La chaleur spécifique moyenne de l'huile	2,82	kJ/kg·K
Régime	Permanent	/

L'analyse des résultats présentés dans le tableau montre que la mise en œuvre du récupérateur de chaleur existant s'accompagne d'une baisse appréciable du débit de gaz combustible requis par le four, en comparaison avec le mode de référence.

Cette évolution traduit l'efficacité énergétique associée à la valorisation de la chaleur contenue dans les gaz d'échappement, contribuant ainsi à une amélioration du rendement global du système.

Le débit de gaz combustible consommé par le four devient :

$$m_{2\text{fuel}} = 4730\text{kg/h}$$

La réduction de consommation absolue de gaz combustible par rapport au mode de référence (cas1) est donc :

$$\Delta \dot{m}_{\text{fuel}} = 7864 - 4730 = 3134 \text{ kg/h(III.1)}$$

La mise en œuvre du récupérateur de chaleur existant s'accompagne d'une réduction notable de la consommation de gaz combustible du four par rapport au mode de référence. Cette évolution s'explique par la valorisation partielle de l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement. Le mode deux correspond ainsi à l'état opérationnel actuel du système et constitue une référence réelle pour l'appréciation des gains énergétiques susceptibles d'être obtenus par l'ajout d'un nouveau dispositif de récupération thermique.

III.7. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU FOUR AVEC SYSTEME ACTUEL ET AMELIORATION PAR NOUVEAU RECUPERATEUR

Cette configuration, schématisée dans la figure III.3, représente l'optimum systémique, intégrant un nouveau récupérateur de chaleur destiné à valoriser l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement de la turbine 17-MJ08-GT.

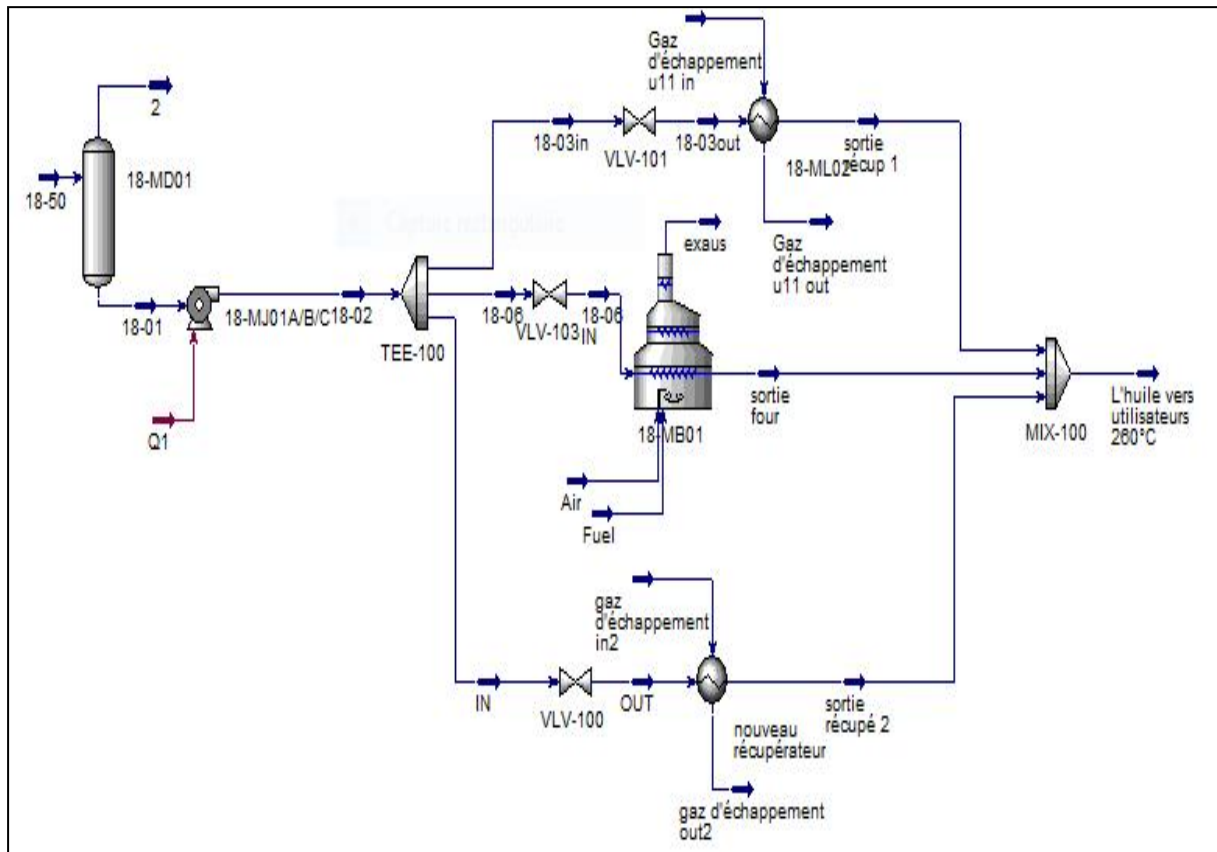


Figure III .3. Représentation du système d'huile chaude intégrant deux dispositifs de récupération thermique.

III.7.1. Données de fonctionnement de la configuration améliorée

Les résultats numériques générés par le simulateur pour cette configuration sont consignés dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Conditions opératoires du système intégrant un récupérateur existant et un nouveau récupérateur de chaleur.

Paramètre	Valeur	Unité
Type de combustible	Gaz C2 (Ethane)	/
Débit de fuel gaz	2737	kg/h
Débit d'huile à l'entrée du four 18-MB01	910	m ³ /h
T d'huile à l'entrée du four 18-MB01	166	°C
T d'huile à la sortie du four 18-MB01	232	°C
Débit d'huile à l'entrée du récupérateur 18-ML02	595	m ³ /h
T d'huile à l'entrée du récupérateur 18-ML02	166	°C
T d'huile à la sortie du récupérateur 18-ML02	277	°C
Débit du gaz d'échappement	354051	kg/h
T de gaz d'échappement à entrer du récupérateur 18-ML02	560	°C
T de gaz d'échappement à la sortie du récupérateur 18-ML02	238.5	°C
Débit d'huile à l'entrée du nouveau récupérateur	280	m ³ /h
Td' huile à l'entrée du nouveau récupérateur	166	°C
T d'huile à la sortie du nouveau récupérateur	310	°C
T de gaz d'échappement à entrer du nouveau récupérateur	560	°C
T de gaz d'échappement à la sortie du nouveau récupérateur	350	°C
La chaleur spécifique moyenne de l'huile	2,82	kJ/kg·K
Régime	Permanent	/

Les résultats montrent une diminution très importante du débit de gaz combustible consommé par le four. L'ajout du nouveau récupérateur permet de couvrir une part supplémentaire des besoins thermiques du système d'huile chaude.

Le débit de gaz combustible consommé par le four est alors réduit à :

$$\dot{m}_{3,fuel} = 2737 \text{ kg/h}$$

La réduction de consommation absolue de gaz combustible par rapport au système réel (cas2) est donc :

$$\Delta \dot{m}_{2,fuel} = 4730 - 2737 = 1993 \text{ kg/h} \dots\dots\dots \text{III.2}$$

La réduction de consommation absolue de gaz combustible par rapport au mode de référence (cas1) est donc :

$$\Delta \dot{m}_{fuel} = 7864 - 2737 = 5127 \text{ kg/h} \dots\dots\dots \text{III.3}$$

L'ajout du nouveau récupérateur de chaleur permet de couvrir une part supplémentaire des besoins thermiques du système d'huile chaude. Les résultats de simulation montrent une réduction très importante de la consommation de gaz combustible du four par rapport au système réel. Cette configuration améliorée présente ainsi les meilleures performances énergétiques parmi les cas étudiés.

III.8. ANALYSE ENERGETIQUE BASEE SUR DES INDICATEURS SPECIFIQUES

III.8.1. Consommation spécifique de combustible

La consommation spécifique de combustible constitue un indicateur pertinent pour comparer l'efficacité énergétique des différentes configurations de fonctionnement. Elle est définie comme le rapport entre le débit de gaz combustible consommé et le débit total d'huile thermique chauffée :

$$CS = \dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{huile} \dots\dots\dots \text{III.4}$$

- **Mode four seul:**

$$CS_1 = \frac{7864}{1350000} = 5,83 \times 10^{-3} \left(\frac{\text{kgfuel}}{\text{kghuile}} \right) \dots\dots\dots \text{III.5}$$

- **Mode avec récupérateur existant :**

$$CS_2 = \frac{4730}{1350000} = 3.50 \times 10^{-3} \left(\frac{kg_{fuel}}{kg_{huile}} \right) \dots\dots\dots \text{III.6}$$

- **Mode avec récupération renforcée:**

$$CS_3 = \frac{2737}{1350000} = 2.02 \times 10^{-3} \left(\frac{kg_{fuel}}{kg_{huile}} \right) \dots\dots\dots \text{III.7}$$

Les valeurs obtenues de la consommation spécifique pour les trois configurations sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau III.4. Consommation spécifique de combustible pour les différentes configurations.

Mode	Débit fuel gaz (kg/h)	Débit total huile chauffée (kg/h)	CS = fuel/huile (kg/kg)
Mode four seul	7864	1350000	$5,83 \times 10^{-3}$
Mode avec récupérateur existant	4730	1350000	3.50×10^{-3}
Mode avec récupération renforcée	2737	1350000	2.02×10^{-3}

III.8.2. Analyse graphique de la consommation spécifique de combustible

Afin de mieux visualiser l'évolution de la consommation spécifique de combustible selon la structure du système, une analyse graphique a été réalisée.

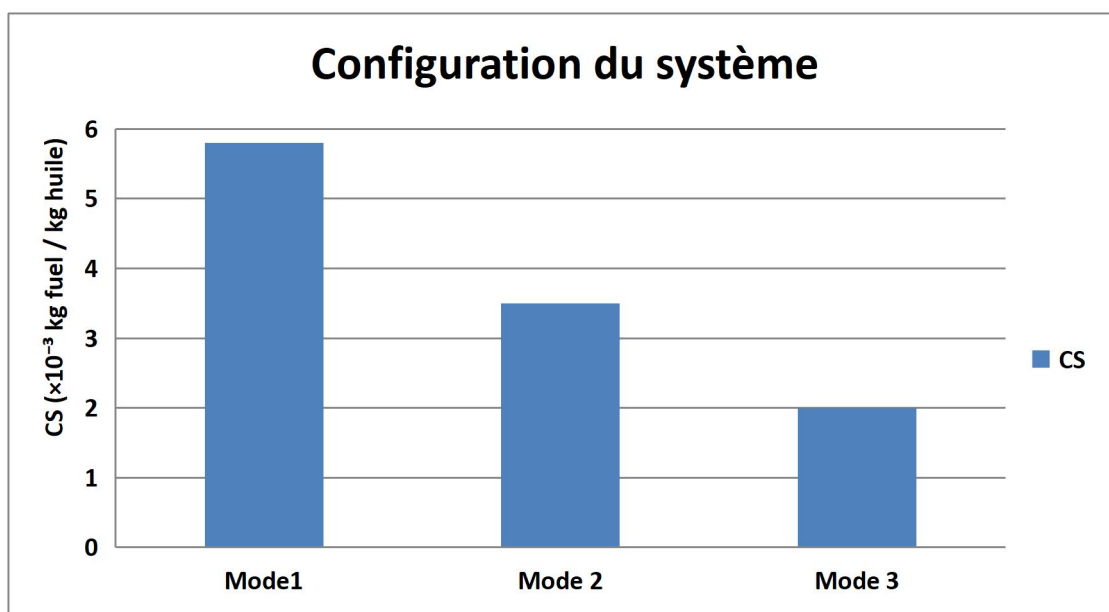


Figure III.4. Évolution de la consommation spécifique de combustible selon la configuration du système.

La figure illustre l'évolution de la consommation spécifique de combustible (CS) en fonction de la configuration du système thermique.

Il est observé que la consommation spécifique atteint sa valeur maximale en mode four seul, ce qui reflète une faible valorisation énergétique et une consommation importante de combustible.

En revanche, l'intégration d'un récupérateur de chaleur permet de réduire significativement cette consommation spécifique grâce à la récupération d'une partie de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement.

Dans le troisième mode (récupération renforcée avec deux récupérateurs), la consommation spécifique est allée jusqu'à sa valeur minimale. Cela implique une amélioration significative de l'efficacité énergétique en dépit de l'optimisation de la récupération de chaleur.

Ces résultats confirment que la récupération de chaleur constitue une solution efficace pour une amélioration croissante des performances énergétiques et une réduction des besoins en combustible.

III.8.3. Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible

Le taux de réduction de la consommation spécifique révèle la diminution relative de la consommation spécifique de combustible en passant d'un état de référence à un état amélioré.

Formule générale :

$$\text{Taux de réduction (\%)} = \frac{CS_{\text{référence}} - CS_{\text{nouveau}}}{CS_{\text{référence}}} \times 100 \dots\dots\dots \text{III.8}$$

a) Réduction entre les modes 1 et 2 :

$$\frac{5.83 - 3.50}{5.83} \times 100 = 39.96\% \approx 40\% \dots\dots\dots \text{III.9}$$

b) Réduction entre les modes 1 et 3 :

$$\frac{5.83 - 2.02}{5.83} \times 100 = 65.35\% \dots\dots\dots \text{III.10}$$

c) Réduction entre les modes 2 et 3 (cas réel → amélioré) :

$$\frac{3.50 - 2.02}{3.50} \times 100 = 42.28\% \dots\dots\dots \text{III.11}$$

Afin de synthétiser les résultats acquis et de faciliter la comparaison entre les différentes configurations étudiées, les taux de réduction de consommation spécifique de combustible sont présentés dans le tableau III.5 et sous forme d'analyse graphique indiquée sur la figure III.6.

Tableau III.5.Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible.

Comparaison	Taux de réduction (%)
Mode 1 → mode 2	39,85
Mode 2 → Mode 3	42,28
Mode 1 → Mode 3	65,35

Le tableau montre une baisse progressive de la consommation particulière de carburant à mesure que le système passe d'une configuration à une autre. Les valeurs obtenues confirment l'impact positif de l'intégration de dispositifs récupérateurs de chaleur sur la rentabilité thermique du système.

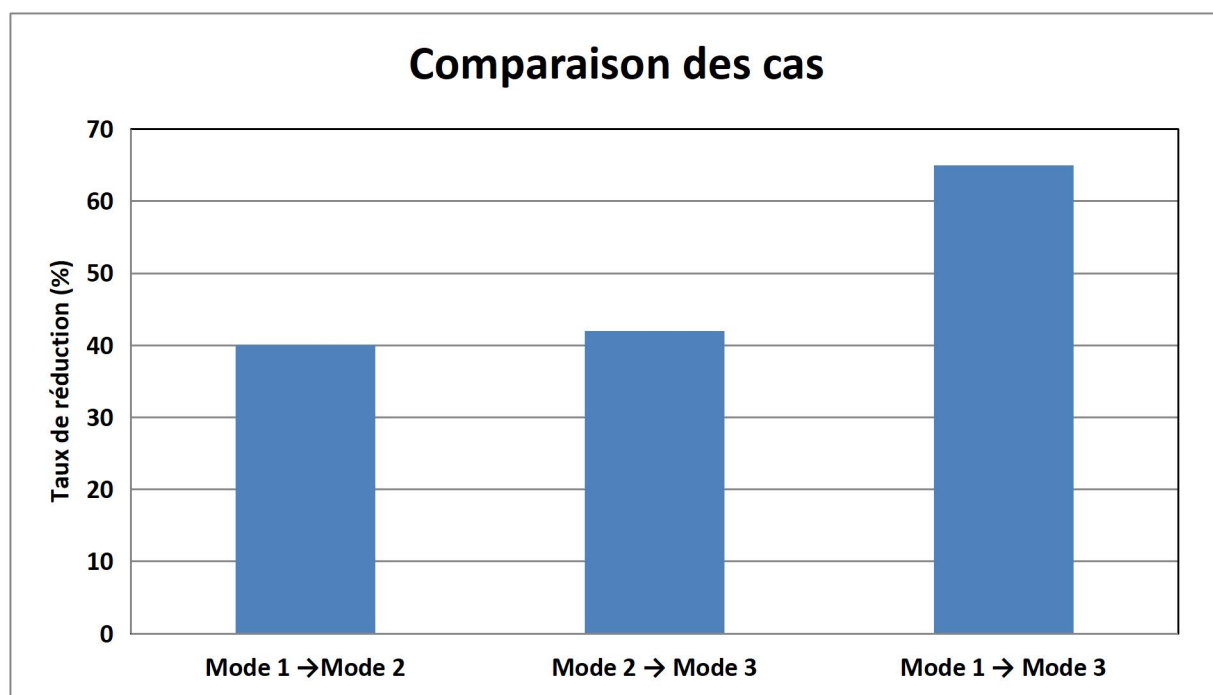


Figure III.6. Taux de réduction de la consommation spécifique de combustible.

La représentation graphique ci-dessus fournit un aperçu plus précis comment les taux de réduction varient selon les différentes configurations.

L'analyse de la figure met en évidence une diminution de 40 % de la consommation spécifique lors du passage du mode four seul au mode avec récupérateur existant, ce qui confirme l'efficacité du premier système de récupération. Par ailleurs, la comparaison entre le mode four seul et le mode à récupération renforcée montre une diminution globale de 65,35 %, traduisant l'impact significatif de la combinaison des deux récupérateurs.

Enfin, l'écart entre la configuration réelle et la configuration optimisée détermine un gain énergétique de 42,28 %, soulignant l'intérêt opérationnel de l'ajout d'un second système de récupération de chaleur.

III.8.4. Indicateur d'efficacité énergétique relative

À titre de complément à l'analyse énergétique et afin d'évaluer une amélioration des fonctionnalités du système, un nouveau paramètre relatif à l'efficacité énergétique fut introduit. Ce paramètre permet de comparer efficacement le système amélioré au système actuel, en se basant sur la consommation spécifique de combustible.

Le nouvel indicateur énergétique correspondant aux performances énergétiques est établi en rapportant la consommation d'énergie spécifique du système de référence (cas réel) à celle du système amélioré :

$$I_{eff,rel} = \frac{CS_{référence}}{CS_{amélioré}}III.12.$$

Où :

- **CS_{référence}**: correspond à la consommation spécifique du système réel.
- **CS_{amélioré}**: correspond à la consommation spécifique du système amélioré.

Cet indicateur est de :

$$I_{eff,rel} = \frac{3.50 \times 10^{-3}}{2.02 \times 10^{-3}} = 1.73 III.13$$

Cette valeur, supérieure à l'unité, indique que la configuration intégrant le nouveau récupérateur de chaleur est environ 72 % plus efficace que le système actuellement en service. Cet indicateur confirme les résultats obtenus à partir de la consommation spécifique et du taux de réduction, et traduit une amélioration significative de l'efficacité énergétique globale du système.

III.9. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'étude énergétique du système d'huile chaude, basée sur une approche comparative entre trois configurations de fonctionnement : le fonctionnement du four seul, le système réel intégrant un récupérateur de chaleur existant et une configuration améliorée incluant un nouveau récupérateur de chaleur.

Les résultats issus des simulations réalisées sous Aspen HYSYS ont permis de mettre en évidence une diminution progressive de la consommation de gaz combustible du four lors de l'intégration des dispositifs de récupération de chaleur. L'analyse à l'aide de la consommation spécifique de combustible a montré une amélioration significative de l'efficacité énergétique du système, confirmée par les taux de réduction obtenus entre les différentes configurations.

La comparaison entre le système réel et la configuration améliorée révèle que l'ajout du nouveau récupérateur de chaleur permet une réduction importante de la consommation

spécifique de combustible, traduisant une meilleure valorisation de l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement. L'introduction de l'indicateur d'efficacité énergétique relative a également confirmé cette amélioration, en mettant en évidence une performance énergétique nettement supérieure du système optimisé par rapport au système actuellement en service.

Les résultats de ce chapitre démontrent ainsi l'intérêt énergétique de l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur dans le système d'huile chaude. Les gains énergétiques mis en évidence constituent une base solide pour l'évaluation économique et environnementale de la solution proposée, qui sera abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Étude Énergétique, Économique et Environnementale

IV.1. INTRODUCTION

Le chapitre III a montré qu'il est possible de réduire significativement la consommation de gaz combustible grâce à l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur, ce qui permet d'évaluer les performances énergétiques, économiques et environnementales de la solution simulée.

Dans cette d'ordre d'idée, le présent chapitre est consacré à l'analyse de l'impact économique du combustible réalisées, ainsi qu'à l'évaluation de son effet environnemental, notamment en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'analyse repose principalement sur une comparaison entre le système existant et la configuration optimisée proposée.

IV.2. ÉTUDE ÉCONOMIQUE

IV.2.1. Objectif de l'étude économique

Cette étude vise à analyser la rentabilité de l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur au sein du système d'huile chaude. Cette évaluation s'appuie sur la réduction de la consommation de combustible identifiée dans l'étude énergétique du chapitre précédent et a pour objectif de quantifier les économies annuelles réalisables.

IV.2.2. Hypothèses et données de base

Les calculs économiques sont réalisés sur la base des hypothèses suivantes :

- Le combustible utilisé est produit et auto consommé au niveau du complexe.
- L'évaluation économique est effectuée sur une base énergétique équivalente en gaz naturel (GN), combustible de référence du complexe.

- Les consommations de combustible sont exprimées sur une base horaire et annuelle.
- Le système fonctionne en régime continu, soit 24 heures par jour et 330 jours par an.
- Les pouvoirs calorifiques sont exprimés sur une base volumique (Thermie/Cm³).

IV.2.3. Gain économique

La réduction de la consommation de combustible est déterminée à partir de la différence entre le débit massique d'éthane consommé par le système réel (mode 2) et celui du système amélioré (mode 3) :

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_{\text{mode}_2} - \dot{m}_{\text{mode}_3} \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

$$\Delta \dot{m} = 4730 - 2737 = 1993 \text{ kg/h}$$

La valeur trouvée (**1993 kg/h**) représente le débit massique d'éthane économisé suite à l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur.

IV.2.4. Conversion en gain économique annuel

Afin d'évaluer l'impact réel de cette réduction sur une base annuelle, le débit massique économisé est converti en quantité annuelle d'éthane économisée.

$$\Delta \dot{m}_{\text{annuelle}} = \Delta \dot{m} \times 24 \times 330$$

$$\Delta \dot{m}_{\text{annuelle}} = 1993 \times 24 \times 330 = 15784560 \text{ kg/an} \approx 15784.56 \text{ tonne/an}$$

IV.2.5. Quantification du gain économique annuel en volume de combustible économisé

La quantification volumique est calculée comme suit:

$$\Delta V_{\text{annuelle}} = \frac{P_r \times V_r \times T_n}{P_n \times T_r \times 10689} \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

Où:

P_r et T_r et V_r : sont les paramètres à la condition réelle.

- P_n et T_n : sont les paramètres à la condition normale.
- 1.0689: facteur de conversion de Nm³ au Cm³.

Tableau IV.1. Les paramètres intervenants pour le calcul du gain économique annuel en volume de combustible économisé

P_r	T_r	V_r	P_n	T_n
6 bars	318 K	$2.322 \times 10^6 \text{ Cm}^3/\text{an}$	1.01325 bar	273 K

$$\Delta V_{\text{annuel}} = 11.045 \times 10^6 \text{ Cm}^3/\text{an}$$

IV.3. GAIN ÉNERGÉTIQUE ANNUELLE

Le gain énergétique annuel est défini comme la quantité d'énergie thermique économisée grâce à la réduction de la consommation d'éthane suite à l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur.

Le calcul du gain énergétique est basé sur le volume annuel d'éthane économisé et sur le pouvoir calorifique supérieur (PCS) de ce combustible.

$$\text{Gain Énergétique}_{\text{annuel}} = \Delta V_{\text{annuel}} \times \text{PCS}_{\text{C}_2} \dots\dots\dots \text{IV.3}$$

Avec

$$\text{PCS}_{\text{C}_2} = 15.76 \text{ Thermie/Cm}^3$$

$$\text{Gain Énergétique}_{\text{annuel}} = 11.045 \times 10^6 \times 15.76 = 174 \times 10^6 \text{ (Thermie/an)}$$

Ce gain énergétique annuel reflète la quantité importante d'énergie thermique économisée grâce à l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur. Il souligne l'amélioration notable de l'efficacité énergétique du système d'huile chaude et constitue un indicateur essentiel pour l'évaluation économique et environnementale de la solution proposée.

IV.4. GAIN ÉCONOMIQUE EN ÉQUIVALENT DU GN

Pour évaluer les avantages économiques du système étudié, il convient d'exprimer l'énergie économisée ou produite en équivalents gaz naturel (GN). Cette approche permet de quantifier les économies réalisées en termes de consommation de combustible conventionnel et de traduire ces économies en valeur monétaire. L'avantage économique en équivalents GN

est ainsi déterminé en fonction de l'énergie substituée et du coût unitaire du gaz naturel, selon l'équation suivante :

$$\text{Gain économique en équivalent GN} = \frac{\text{Gain énergétique annuel}}{\text{PCS}_{\text{GN}}} \dots\dots\dots \text{IV.4}$$

Avec

- $\text{PCS}_{\text{GN}} = 9.33 \text{ Thermie/Cm}^3$

$$\text{Gain économique en équivalent GN} = 18.65 \times 10^6 \text{ Cm}^3 \text{ éq GN/an}$$

IV.5. GAIN FINANCIER ANNUEL

Le gain financier annuel correspond à l'économie monétaire réalisée grâce à la réduction de la consommation de combustible résultant de l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur. Il est déterminé à partir de la quantité annuelle de combustible économisée, exprimée en équivalent gaz naturel, et du coût unitaire du gaz naturel de référence.

Ce gain traduit directement la diminution des coûts d'exploitation énergétiques du système d'huile chaude et constitue un indicateur clé de la rentabilité économique de la solution proposée.

Avec :

$$\text{Gain financière} = \text{Gain économique en équivalent GN} \times \text{prix}_{\text{GN}}$$

- $\text{prix}_{\text{GN}} = 6.675 \text{ DA pour } 1 \text{ Cm}^3 \text{ éq GN.}$

$$\text{Gain financière} = 18.65 \times 10^6 \times 6.675 = 124.5 \text{ million DA}$$

Le gain financier annuel est directement proportionnel au coût unitaire du gaz naturel de référence. Il traduit l'économie réalisée sur les coûts d'exploitation énergétiques du système d'huile chaude grâce à la réduction de la consommation de combustible. Ce gain financier met en évidence la rentabilité économique de la solution proposée et constitue un argument majeur en faveur de l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur.

IV.6. PART DU GAIN ÉNERGÉTIQUE DANS L'AUTO CONSOMMATION GLOBALE

La part du gain énergétique réalisé par la réduction de la consommation de gaz combustible par rapport à l'autoconsommation énergétique totale du complexe est exprimée en pourcentage selon la relation suivante :

$$\text{Gain}_{\text{autoconsommation}} = \frac{E_{\text{gain}}}{E_{\text{auto total}}} \times 100 \dots\dots\dots \text{IV.5}$$

Où: E_{gain} : gain économisé.

- $E_{\text{auto, total}}$: auto consommation totale du complexe.

Cet indicateur permet d'évaluer la contribution de la solution proposée à la réduction globale de l'autoconsommation énergétique du complexe.

$$\text{Gain}_{\text{autoconsommation}} = \frac{18.65 \times 10^6}{770473152} \times 100 = 2.42\%$$

Le pourcentage obtenu montre que le gain énergétique réalisé représente une part importante de l'autoconsommation énergétique globale du complexe, traduisant ainsi l'impact positif du projet sur l'optimisation énergétique interne.

L'analyse des résultats économiques indique que l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur permet de réduire considérablement la consommation interne de mélange gazeux, ce qui se traduit par une économie annuelle importante de combustible. Cette réduction engendre une diminution directe des coûts énergétiques liés au fonctionnement du four et contribue à l'amélioration de l'efficacité énergétique globale du système d'huile chaude.

Le gain énergétique annuel obtenu illustre une meilleure valorisation de l'énergie thermique récupérée, permettant ainsi de limiter l'autoconsommation énergétique du complexe.

Ces résultats confirment que la solution proposée présente un intérêt économique important et constitue un moyen efficace pour l'optimisation énergétique et la valorisation des ressources internes du complexe industriel.

IV.7.ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE

IV.7.1. Principe de l'analyse environnementale

L'étude environnementale vise à analyser l'impact de l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur sur les émissions polluantes associées au fonctionnement du système d'huile chaude. Cette analyse repose principalement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), directement liée à la diminution de la consommation de combustible observée dans les études énergétique et économique.

IV.7.2. Base de calcul et hypothèses

L'évaluation environnementale est réalisée sur la base des hypothèses suivantes :

- Les émissions de CO₂ sont proportionnelles à la quantité de combustible consommée.
- La réduction de consommation est exprimée en équivalent gaz naturel (GN), combustible de référence du complexe.
- Le système fonctionne en régime continu, soit 24 heures par jour et 330 jours par an.
- Un facteur d'émission constant du gaz naturel est adopté pour l'estimation des émissions de CO₂.

IV.7.3. Principe de calcul des émissions de CO₂

Les émissions de dioxyde de carbone issues de la combustion du gaz naturel peuvent être estimées à l'aide d'un facteur d'émission exprimé en kilogrammes de CO₂ par unité d'énergie consommée.

Le calcul des émissions de CO₂ est basé sur la relation suivante :

$$m_{CO_2} = E \times FE_{CO_2} \dots \dots \dots IV.6$$

Où :

- m_{CO_2} : émissions annuelles de dioxyde de carbone (kg/an).
- E : énergie consommée ou économisée (Thermie/an).
- FE_{CO_2} : facteur d'émission du gaz naturel (kgCO₂/Thermie).

Dans le cadre de la présente étude, l'analyse porte sur les émissions de CO₂ évitées grâce à la réduction de la consommation de combustible résultant de l'intégration du nouveau

récupérateur de chaleur. Les émissions évitées sont donc calculées à partir du gain énergétique annuel selon la relation suivante :

$$m_{CO2\text{évitée}} = E_{\text{gain}} \times FE_{CO2} \dots \dots \dots \text{IV.7}$$

Dans cette étude, le facteur d'émission du gaz naturel est pris égal à :

- $FE_{CO2} = 0.234 \text{ Kg } CO_2 / \text{Thermie}$
 $m_{CO2\text{évitée}} = 174 \times 10^6 \times 0.234 = 40.716 \times 10^6 \text{ Kg } CO_2 / \text{an} = 40716 \text{ tonne de } CO_2 / \text{an}$

Cette réduction importante des émissions de dioxyde de carbone souligne l'impact environnemental positif de la solution proposée et confirme la contribution du projet à l'amélioration de la performance environnementale globale du complexe industriel.

Les résultats de l'étude environnementale montrent que la réduction de la consommation de combustible entraîne une diminution proportionnelle des émissions de CO_2 . Cette réduction contribue à améliorer la performance environnementale du complexe et s'inscrit dans une démarche de développement durable.

IV.8. CONCLUSION

En conclusion, l'analyse réalisée dans ce chapitre a montré que l'intégration du nouveau récupérateur de chaleur constitue une solution performante pour l'optimisation du système d'huile chaude. Les résultats obtenus traduisent une réduction importante de la consommation de combustible ainsi qu'une diminution des émissions de dioxyde de carbone, générant à la fois des bénéfices économiques et environnementaux. Ainsi, la solution proposée contribue à l'amélioration de l'efficacité énergétique du complexe industriel tout en favorisant une meilleure valorisation des ressources énergétiques internes.

Conclusion Générale et Recommendations

Ce mémoire a porté sur l'étude de la récupération et de la valorisation de la chaleur perdue des gaz d'échappement de la turbine à gaz 17MJ08-GT au niveau du complexe de liquéfaction du gaz naturel GL3/Z, dans le but d'améliorer les performances énergétiques du système d'huile chaude et de réduire la consommation de combustible. Une présentation générale du complexe et des différentes unités thermiques a permis de mettre en évidence le rôle essentiel du système d'huile chaude dans le bon fonctionnement des procédés.

L'étude énergétique, réalisée à l'aide du logiciel **Aspen HYSYS**, a reposé sur une comparaison entre trois configurations de fonctionnement. Les résultats obtenus ont montré que l'intégration d'un nouveau récupérateur de chaleur permet de réduire de manière significative la consommation de gaz combustible du four d'huile chaude, tout en améliorant le rendement énergétique global du système. Ces résultats confirment l'intérêt de la valorisation de l'énergie thermique perdue au sein du complexe.

L'analyse économique a mis en évidence que la réduction de la consommation de combustible se traduit par des économies annuelles importantes, ce qui confirme la rentabilité économique de la solution proposée. Sur le plan environnemental, la diminution de la consommation énergétique entraîne une réduction notable des émissions de dioxyde de carbone, contribuant ainsi à l'amélioration de la performance environnementale du complexe et à la réduction de son empreinte carbone.

Au vu des résultats obtenus, il est recommandé d'envisager la mise en œuvre industrielle du nouveau récupérateur de chaleur, en tenant compte des contraintes techniques, opérationnelles et des exigences de sécurité. Il est également conseillé de réaliser une étude technico-économique détaillée intégrant les coûts d'investissement, d'exploitation, de maintenance ainsi que le temps de retour sur investissement.

Par ailleurs, il est fortement recommandé de valoriser le combustible économisé grâce à la réduction de la consommation, soit par sa commercialisation en tant que produit énergétique supplémentaire, soit par son utilisation comme ressource énergétique ou matière

première dans les industries pétrochimiques. Cette orientation permettrait d'accroître la valeur ajoutée des ressources hydrocarbonées, de renforcer l'intégration industrielle entre les activités de liquéfaction du gaz naturel et les industries pétrochimiques, et d'améliorer la rentabilité globale du complexe.

Enfin, il est recommandé d'optimiser les systèmes de régulation et de contrôle du réseau d'huile chaude afin de maximiser l'exploitation de l'énergie récupérée, et d'étudier la possibilité d'étendre la récupération de chaleur à d'autres turbines ou unités du complexe, en vue de maximiser les gains énergétiques, économiques et environnementaux à moyen et long termes.

Références Bibliographiques

- [1] Ambassade d'Algérie à Moscou. (s.d.). Le complexe GL3Z : un maillon important dans l'activité de liquéfaction du gaz de Sonatrach.
- [2] Séminaire de projet « nouveau train de GNL d'Arzew », la cérémonie d'ouverture des Plis commerciaux, Présidée par Monsieur le Ministre de l'Energie et des Mines, Alger le 12 juillet 2008).
- [3] Cours IAP, description du complexe GL3/Z.
- [4] Manuel opératoire 318800-GNL3Z-MO-PR-00-04000-A
- [5] GPSA. *Engineering Data Book*, 14th Edition, Gas Processors Suppliers Association, 2018.
- [6] Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of natural gas processing* (2nd ed.). CRC Press.
- [7] Economides, M. J., & Wood, D. A. *The fundamentals of natural gas and LNG processing*. John Wiley & Sons, 2012.
- [08] BENALI Ouenzar Oussama, AGROUCHE Tawfiq, Étude et maîtrise des risques physiques dans une installation, Cas d'étude : Complexe GL3/Z, Master en Hygiène et Sécurité Industrielle, juin 2024.
- [9] Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J. V., & Wood, D. A. *Handbook of liquefied natural gas*. Elsevier, 2014.
- [10] Kehlhofer, R. (2009). *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. PennWell Corporation.
- [11] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015.
- [12] Boyce, M. P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier, 2017.
- [13] Djamel Ghernaout & all, A multi-heat recovery approach integrated with LNG regasification in a geothermal-driven multigeneration system: Techno-economic insights and machine learning-based optimization, *Applied Thermal Engineering*, 126557, Volume 274, Part A, 1 September 2025.

- [14] Nguyen, T.-V., & Junior, S. D. O. (2017). Thermodynamic analysis of oil and gas platforms over various production profiles and feed compositions. In Proceedings of ECOS : 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2017.
- [15] Christopher Wright, Managing heat transfer fluid and system performance in industrial applications, Thermal Science and Engineering, 8(4), 11788, 2025.
- [16] Thermodynamic analysis of an LNG fuelled combined cycle power plant with waste heat recovery and utilization system, International Journal of Energy Research, 31(10):975 - 998, August 2007.
- [17] American Petroleum Institute (API). *API Standard 560: Fired heaters for general refinery service*. API Publishing Services, 2018.
- [18] Muhammad Islam, Saad A. Al-Sobhi, Ahmad Naquash, Muhammad Abdul Qyyum, Moonyong Lee, Optimal Process Selection For Natural Gas Liquids Recovery: Energy, Exergy, Economic, And Environmental Perspectives, Energy, Volume 289, 129757, 02/2024.
- [19] Haili Hu, Hong Jiang, Jiaqiang Jing, Hongyu Pu, Jiatong Tan, Nanjiang Leng, Optimization and Exergy Analysis of Natural Gas Liquid Recovery Processes for the Maximization of Plant Profits, Chemical Engineering & Technology 42(1):182-195, November 2018.
- [20] Cosmas S. Mwanakaba, Zachary Siagia, Paul Maina, Mwansa Kaoma, Techno-Economic Stepwise Analysis Approach for Optimization of Bioethanol Production from Zambian Corn Stover: Environmental and Economic Implications, Journal of Sustainable Bioenergy Systems, Vol.15 No.3, September 2, 2025.
- [21] Nnadikwe Johnson, Elevating Natural Gas Liquid (NGL) Extraction and Fractionation Train Performance: a Synergetic Approach of Simulation Analysis, Advanced Modification, and Vertical Advancement, Energy journal, 2024.
- [22] Narjes Sabeghi, Behrooz Kiani, Reza Ghanbari, Khatere Ghorbani-Moghadam, Optimization of NGL separation process with maximum quality and energy reduction, ISSN 2693-5015, Research Square, 2026.

- [23] HysysProcessDocumentation, Hyprotech, Ing, AEA Groupe, Calgary, CD.ROM, 2000.
- [24] DJEZZAR Mohamed, DAMENE Radhwane, « Approche Et Modélisation De La Modification Du Solvant MEA Dans La Partie Décarbonatation Du Complexe GL2/Z Sur La Base D'un Alliage D'amines MDEA/MEA », Memoire de fin d'études de master, Génie des procédés, Génie chimique, Juin 2024.

Annexe A

