



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

THÈME

Optimisation des paramètres de fonctionnement du four de l'unité 18 (18-MB01)
au sein du complexe GL3/Z

Présenté par

1. MEDJAHED Asma
2. LATTAB Samira

Soutenu le 03/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	Prof. MAROUF Reda	Université de Mostaganem
Examineur :	Prof. ABSAR Belkacem	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Prof. SAIDJ Merzouk	Université de Mostaganem

Remerciements

Nous remercions avant tout **ALLAH, le Tout-Puissant**, de nous avoir accordé la santé, la volonté, le courage ainsi que la patience nécessaire pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **Dr. SAIDJ Merzouk** maitre de conférences A à l'Université de Abd El Hamid Ibn Badis-Mostaganem, pour l'honneur qu'il nous a accordé en acceptant d'encadrer ce mémoire. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour sa confiance, sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son accompagnement tout au long de ce travail. Son soutien et son expérience ont été d'une grande importance pour la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury, Pr. Marouf Reda Et Pr. ABSAR Belkacem, qui nous ont fait l'honneur d'accepter de présider et d'examiner ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel du Complexe GL3/Z pour leur accueil, leur disponibilité et leur soutien durant cette expérience professionnelle. Nous remercions particulièrement à **l'équipe de production et de technique**, notamment à **M. Zidi Rached, M. Beloufa Mohamed, Mme Khelifa Ikram, Mme Boukhris Mounia** et **Mme Soufi Nouria**, ainsi que les opérateurs et les tableautistes de la salle de contrôle, pour leur professionnalisme, leur collaboration, leurs conseils précieux et leur accompagnement, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail et à la compréhension des aspects techniques et opérationnels liés à notre étude.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à **Mme Semaoun Amel**, qui a toujours été présente pour nous apporter son aide, ses orientations et son soutien. Sa disponibilité et ses conseils avisés ont constitué un apport précieux à la réalisation de ce travail et à l'approfondissement de nos compétences en tant qu'ingénieurs procédés.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce travail. Leur soutien et leur collaboration ont été d'une grande valeur et ont marqué positivement mon parcours professionnel.



Dédicace

À celui qui a travaillé dur pour nous élever, à celui qui nous a appris que le succès ne vient qu'avec la patience et la persévérance, à celui dont nous portons le nom avec fierté et honneur,
à celui de qui nous tirons notre force et notre confiance,
Nous prions Dieu que votre voix soit présente toute notre vie. **Nos chers pères.**

À celle pour qui Dieu a placé le paradis sous ses pieds, à celle qui a été notre soutien premier et éternel, celle dont la présence nous a poussées à persévérer sans fatigue et qui nous a facilité les épreuves par ses prières, à ces femmes extraordinaires, notre inspiration et notre lumière,

Nous remercions Dieu de vous avoir choisies parmi les humains pour être nos mères. **Nos chères mamans.**

Aux meilleures et aux plus belles personnes, A nos chères sœurs et nos chers frères.

À ceux qui ont cru en nous quand nous avons le plus besoin. À celles qui nous ont fait sourire dans les moments difficiles À celles qui nous ont rappelé à quel point nous sommes fortes et capables, **À nos amies fidèles et compagnons de toujours.**

À celles qui connaissent nos silences avant nos mots, à celles qui a partagé nos doutes comme nos victoires, à celles dont la présence a transformé la fatigue en courage, à celles qui ont toujours été là, sans condition ni attente, **MOSTEFAOUI FATIMA ZAHRA, YAKRELAF SARA, BOUNOUAR OUIAM, AMIRI AYA.**



RESUME

Cette étude porte sur l'optimisation du système d'huile chaude de l'unité 18, utilisant l'huile thermique Torada TC32 comme fluide caloporteur. À l'aide d'une modélisation sous Aspen HYSYS, l'étude montre que la température nominale du niveau élevé (260 °C) dépasse les besoins réels des utilisateurs. Une réduction optimisée à environ 240 °C permet de diminuer la consommation de gaz combustible, d'améliorer le rendement thermique du four et de réduire les émissions de CO₂, tout en garantissant la stabilité du procédé et sans investissement supplémentaire.

Mots-clés : Fluide caloporteur ; Huile thermique Torada TC32 ; Optimisation énergétique ; Système d'huile chaude ; Four industriel ; Aspen HYSYS ; Gaz combustible ; Émissions de CO₂ ; GL3/Z.

ABSTRACT

This work focuses on the optimization of the hot oil system of Unit 18 at the GL3/Z industrial complex, using Torada TC32 thermal oil as a heat transfer fluid. Using Aspen HYSYS modeling, the study shows that the nominal high-level temperature (260 °C) exceeds the actual requirements of the users. An optimized reduction to approximately 240 °C enables the reduction of fuel gas consumption, improvement of furnace thermal efficiency, and a decrease in CO₂ emissions, while ensuring process stability without requiring any additional investment.

Key words: Heat transfer fluid; Torada TC32 thermal oil; Energy optimization; Hot oil system; Industrial furnace; Aspen HYSYS; Fuel gas; CO₂ emissions; GL3/Z.

ملخص

يتناول هذا العمل تحسين نظام الزيت الحراري للوحدة 18 بمركب GL3/Z، حيث يُستخدم زيت Torada TC32 كسائل ناقل للحرارة. وبالاعتماد على نمذجة باستخدام برنامج Aspen HYSYS، تُظهر الدراسة أن درجة الحرارة الاسمية للمستوى العالي 260 °C تفوق الاحتياجات الفعلية للوحدات المستهلكة. ويسمح خفضها بشكل أمثل إلى حوالي 240 °C بتقليل استهلاك الغاز الوقود، وتحسين الكفاءة الحرارية للفرن، وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مع ضمان استقرار العملية ودون الحاجة إلى أي استثمار إضافي.

الكلمات المفتاحية : سائل ناقل للحرارة؛ زيت Torada TC32 الحراري؛ تحسين طاقي؛ نظام الزيت الساخن؛ فرن صناعي؛ Aspen HYSYS؛ غاز وقودي؛ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون؛ GL3/Z.

Table des matières

RESUME	i
Sommaire	ii
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Description générale du complexe GL3/Z	
I-1- Introduction	3
I-2- Présentation du complexe GL3/Z	3
I-3- Position géographique de l'usine	4
I-4- But des Installations du Complexe GL3/Z	5
I-5- Description du procédé	7
I-5-1- Zone des utilités	7
I-5-2- Zone de procédé	7
I-5-3- Zone de stockage	9
I-6- Description d'Unité 18	10
I-6-1- Description de la boucle d'huile chaude	10
I-6-2- Propriétés de l'huile Torada TC32	13
Chapitre II : Généralités Techniques	
II-1- Introduction	15
II-2- Description générale du four 18-MB01	15
II-2-1- Dimensions	16
II-2-2- Brûleurs	17
II-2-3- Arrangement des tubes	18
II-2-4- Description de la surface étendue	20

II-3- Échangeurs de chaleur	21
II-3-1- Principe de fonctionnement des échangeurs.....	21
II-3-2- Description du Système WHRU dans la turbine 11-MJ01.....	22
II-3-3- Principaux éléments de WHRU.....	23

Chapitre III : Résultats de Simulation et Discussion

III-1- Introduction et problématique.....	24
III-2- Description du logiciel de simulation HYSYS	26
III-3- Présentation du logiciel ASPEN EDR.....	26
III-4- CHOIX DU MODELE THERMODYNAMIQUE	27
III-5- Simulation du four 18-MB01 par le simulateur ASPEN EDR.....	28
III-6- Vérification du modèle de l'unité 18 par le simulateur Aspen HYSYS.....	31
III-6-1- Évaluation des écarts entre la conception initiale et les résultats de simulation HYSYS	31
III-7- Analyse de l'effet de la diminution de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude	36
III-7-1- - Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Température de sortie du Four (18-TI0050)	37
III-7-2- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Températures internes de four	39
III-7-3- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Débit de gaz combustible.....	41
III-7-4- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Débits d'huile des utilisateurs	44
III-7-5- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Température de retour	46
III-8- Choix de la température optimale du niveau élevé	49
III-9- Influence de la charge d'exploitation sur le fonctionnement de la boucle d'huile chaude	50

Chapitre IV: Analyse Technico-Economique

IV-1- Analyse de l'impact environnemental.....	52
IV-1-1- Réduction des émissions de gaz à effet de serre	52
IV-2- Analyse énergétique comparative	54
IV-2-1- Rendement thermique du four	54
IV-2-2- Analyse de l'autoconsommation énergétique du four.....	56
IV-3- Analyse de l'impact économique.....	58
IV-3-1- Évaluation du gain financier lié à la réduction de l'autoconsommation énergétique	58
IV-3-2- Quantification du gain énergétique journalier et valorisation économique du gaz combustible économisé	59
Conclusion et recommandations	60
Références bibliographiques.....	62
Annexes	63

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Schéma global de l'usine GL3/Z	3
Figure I-2 : Vue générale du complexe GL3/Z.....	4
Figure I-3 : Situation géographique de l'usine	5
Figure I-4 : Schéma de procédé de traitement.	8
Figure I-5 : Schéma de procédé de fractionnement	8
Figure I-6 : Schéma de procédé de liquéfaction	9
Figure I-7 : Système d'huile chaude	12
Figure II-1 : Four 18-MB01	16
Figure II-2 : Arrangement des brûleurs sur le sol du four.....	18
Figure II-3 : Représentation en 3D de l'arrangement des tubes de la zone de radiation. (Logiciel de simulation HTR)	20
Figure II-4 : Récupérateur au niveau de l'échappement de la turbine	22
Figure II-5 : Faisceaux de tubes et les collecteurs de la centrale WHRU	23
Figure III-1 : Schéma de simulation du procédé de système d'huile chaude GL3/Z (Unité 18)	25
Figure III-2 : Choix du modèle thermodynamique.....	27
Figure III-3 : Les propriétés de l'huile Torada TC32	28
Figure III-4 : Conditions des courants du four (huile, combustible, comburant et fumées). ..	29
Figure III-5 : Composition des courants du four (huile, combustible, comburant et fumées)	29
Figure III-6 : La géométrie du four 18-MB01.....	30
Figure III-7 : Les résultats de la simulation	30

Figure III-8 : Localisation de Température du niveau élevé (18-TIC0023), Température de sortie du four (18-TIC0051), Température du niveau bas et Température de retour dans la boucle d’huile chaude.	36
Figure III-9 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de sortie du four	37
Figure III-10 : Variation de Température du niveau élevé avec Température internes de four	39
Figure III-11 : Variation de Température du niveau élevé avec débit de gaz combustible	42
Figure III-12 : Variation de Température du niveau élevé avec Débits d’huile des utilisateurs	44
Figure III-13 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de retour	47
Figure III-14 : Variation des débits d’huile des utilisateurs et du fuel gaz avec la charge d’exploitation	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Différentes compositions du gaz d'alimentation	6
Tableau I-2 : Débit du fluide de transfert de chaleur à niveau bas /élevé	12
Tableau I-3 : Caractéristiques de l'huile Torada TC32.....	14
Tableau I-4 : Propriétés de l'huile Torada TC32.....	14
Tableau II-1 : Description des brûleurs	17
Tableau II-2 : Dimensions des tubes du four	19
Tableau II-3 : Caractéristiques des ailettes	20
Tableau III-1 : Paramètres d'entrée et de sortie du Ballon 18-MD01	32
Tableau III-2 : Paramètres de sortie du Four 18-MB01, l'unité de récupération de chaleur de chaleur 18-ML02 et Moulure de Refroidisseur 18-MC02.....	33
Tableau III-3 : Paramètres de sortie du réchauffeur de gaz de régénération 13-MC02 et rebouilleur du Déméthaniseur 17-MC21	34
Tableau III-4 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de sortie du four	37
Tableau III-5 : Variation de Température du niveau élevé avec Températures internes de four	39
Tableau III-6 : Variation de Température du niveau élevé avec débit de gaz combustible....	41
Tableau III-7 : Variation de Température du niveau élevé avec Débits d'huile des utilisateurs	44
Tableau III-8 : Variation de température du niveau élevé avec Température de retour.....	46
Tableau III-9 : Variation des débits d'huile des utilisateurs et du fuel gaz avec la charge	50
Tableau IV-1 : Les facteurs d'émission estimés pour le gaz de combustion C_2H_6	53
Tableau IV-2 : Résultats du calcul du rendement pour les cas nominal et optimisée.....	55
Tableau IV-3 : Résultats du calcul du gain d'autoconsommation énergétique	57
Tableau IV-4 : Gain financier journalier.....	59
Tableau IV-5 : Temps de récupération financière	59

LISTE DES ABREVIATIONS

- **APCI:** Société Air Products and Chemicals Incorporated.
- **API:** Institut Américain du Pétrole.
- **ASTM:** Société Américaine pour les Essais et les Matériaux.
- **BP:** Basse pression.
- **HP:** Haute pression.
- **C1:** Méthane.
- **C2 :** Éthane.
- **C3:** Propane.
- **C4:** Butane.
- **C₅⁺ :** Pentane et hydrocarbures plus lourds.
- **D.A :** Données d'activité.
- **DCS :** Système de contrôle distribué.
- **DTLM :** Différence de température logarithmique moyenne.
- **EDR :** Conception et évaluation des échangeurs de chaleur.
- **FE :** Facteur d'émission.
- **GES :** Gaz à effet de serre.
- **GL3/Z :** Complexe de liquéfaction du gaz naturel n°3.
- **ppm :** Parties par million.
- **HTFS :** Service de transfert de chaleur et d'écoulement des fluides.
- **kJ :** Kilojoule.
- **kWh :** Kilowattheure.
- **MBtu :** Mille unités thermiques britanniques.
- **MMBtu :** Million d'unités thermiques britanniques.
- **MMTPA :** Millions de tonnes par an.
- **MW :** Mégawatt.
- **cP :** Centipoise (unité de viscosité dynamique).
- **cSt :** Centistoke (unité de viscosité cinématique).
- **NO_x :** Oxydes d'azote.
- **aMDEA :** Méthyldiéthanolamine activée.
- **PCS :** Pouvoir calorifique supérieur.
- **PCI:** Régulateur indicateur de pression.
- **PR :** Équation d'état de Peng-Robinson.
- **SRK :** Équation d'état de Soave-Redlich-Kwong.
- **TIC :** Régulateur indicateur de température.
- **USD :** Dollar américain.
- **WHRU :** Unité de récupération de chaleur sur gaz résiduels.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Aujourd'hui, dans un contexte où la transition vers une économie plus durable et économe en énergie s'impose comme une priorité mondiale, la maîtrise de l'énergie représente un enjeu majeur pour l'industrie. Le développement durable, désormais au cœur des politiques industrielles, implique la préservation des ressources naturelles, la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration de la qualité de vie des générations futures.

Dans ce cadre, les unités industrielles sont appelées à optimiser en permanence leurs procédés. L'efficacité énergétique ne se limite plus à une simple réduction des coûts : elle devient un levier stratégique au service de la durabilité et de la transition énergétique.

Au sein du complexe de liquéfaction GL3/Z, l'huile thermique Torada TC32 joue un rôle crucial en tant que fluide caloporteur, en assurant l'apport de chaleur nécessaire à de nombreuses unités de procédés. Pour atteindre les températures élevées requises, cette huile est chauffée principalement au moyen d'un four industriel, avec l'appoint d'un économiseur intégré à une turbine. Toutefois, ce dispositif présente un coût énergétique non négligeable, notamment en termes de consommation de gaz combustible (éthane), et génère des émissions importantes de gaz à effet de serre.

La problématique centrale de ce travail est de déterminer dans quelle mesure la température de sortie d'huile chaude peut être réduite sans dégrader les performances des unités utilisatrices de l'huile chaude, ni compromettre la stabilité thermique du fluide Torada TC32, tout en permettant de réaliser des économies significatives en gaz combustible.

L'objectif principal est donc de trouver un équilibre optimal entre performance opérationnelle et efficacité énergétique, en garantissant :

L'approche adoptée repose sur des analyses expérimentales menées sur site et sur une modélisation du système à l'aide d'Aspen HYSYS. Elle permet de simuler différents scénarios de température afin d'évaluer leur influence sur les températures de retour, les performances des réchauffeurs et des rebouilleurs, ainsi que sur la consommation de gaz combustible.

Cette étude s'inscrit dans les efforts plus larges menés à GL3/Z pour améliorer le rendement global des installations, réduire les émissions de CO₂ et tendre vers une production plus responsable. Elle se veut à la fois pragmatique, scientifique et prospective, en proposant

des recommandations concrètes pour la gestion énergétique du réseau d'huile chaude et la valorisation des économies potentielles, tant sur le plan économique qu'environnemental [1].

Le présent mémoire, est structuré comme suit :

- **Le premier chapitre** est consacré à une description générale du complexe GL3/Z, de ses principales installations ainsi que du fonctionnement du circuit d'huile chaude.
- **Le deuxième chapitre** présente les généralités techniques relatives au four industriel, aux échangeurs de chaleur et aux systèmes de récupération d'énergie utilisés au sein du complexe.
- **Le troisième chapitre** est dédié à la modélisation et à la simulation du système d'huile chaude à l'aide du logiciel Aspen HYSYS, ainsi qu'à l'analyse des différents scénarios de fonctionnement étudiés.
- **Le quatrième chapitre** porte sur l'analyse technico-économique de l'optimisation proposée, en évaluant ses impacts énergétiques, environnementaux et économiques.

CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE DU COMPLEXE GL3/Z

I-1- Introduction :

Les hydrocarbures ont toujours joué un rôle central dans le développement national. Ils constituent la source d'énergie la plus utilisée et indispensable à ce jour, tant dans la vie quotidienne que dans l'industrie. Il est donc essentiel de promouvoir une utilisation rationnelle de cette ressource, en minimisant les pertes.

Depuis 1964, l'Algérie occupe une position historique en tant que fournisseur de gaz naturel vers l'Europe, avec des exportations initiées vers l'Angleterre, puis étendues à la France, l'Italie, l'Espagne et le Portugal.

Sonatrach se classe parmi les treize plus grandes compagnies pétrolières mondiales. Elle est le deuxième producteur de GNL et de GPL, le troisième exportateur de gaz naturel et le premier exportateur de condensats.

I-2- Présentation du complexe GL3/Z :

Ce complexe est mis en place par Sonatrach pour exploiter les réserves de gaz du bassin Berkine, situé dans le Sahara. Le projet GL3/Z comprend la construction d'un réseau de pipelines destiné au transport du gaz, ainsi qu'une nouvelle usine de production de GNL. Cette usine intégrera un train de GNL initial et un deuxième train au future, dédiés au traitement du gaz entrant, au fractionnement et à la liquéfaction du méthane. Elle inclura également toutes les infrastructures requises : utilités, stockage, jetée pour le chargement des navires, etc. Le trajet du gaz depuis sa récupération jusqu'à son expédition est représenté sur la figure I-1 [2].

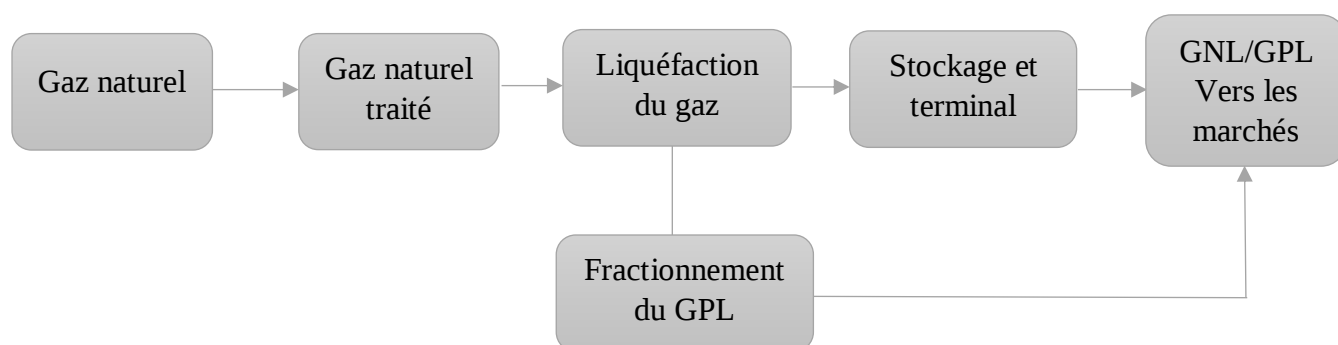


Figure I-1 : Schéma global de l'usine GL3/Z.

Cette usine est conçue pour une durée de vie opérationnelle de 30 ans et doit fonctionner au moins 330 jours par année. Sa disponibilité joue un rôle clé dans le calcul de la production de GNL. L'usine GL3/Z comprend trois zones principales :

- Zone utilités,
- Zone de procédé,
- Zone terminal (jetée, stockage et torches).

Ces zones essentielles sont représentées sur la figure I-2.

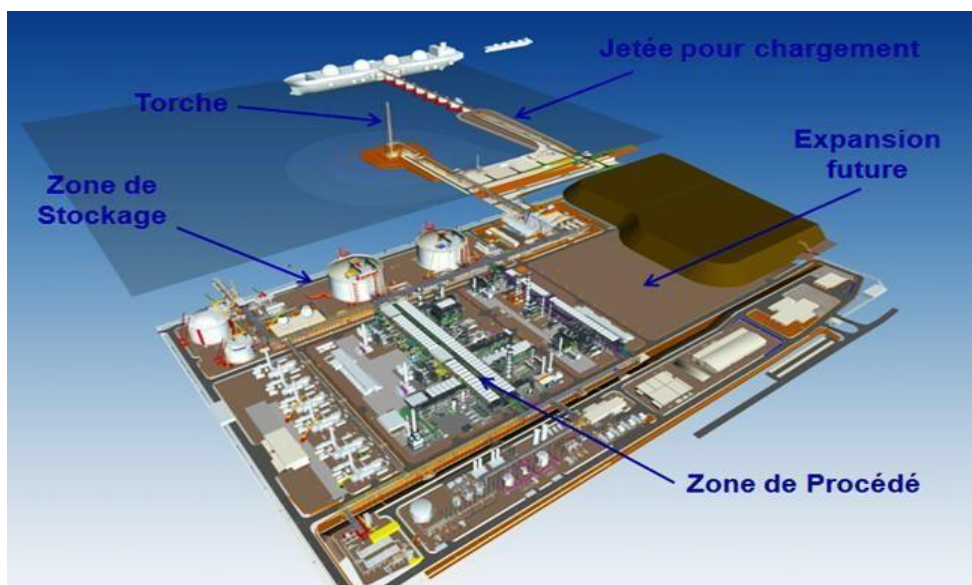


Figure I-2 : Vue générale du complexe GL3/Z.

I-3- Position géographique de l'usine :

Le site est situé à Bethioua, à l'est d'Arzew, dans la zone du port industriel, le long de la côte méditerranéenne. Il s'étend sur une superficie de 54,6 hectares. Son emplacement exact :

- Le complexe GP1/Z (ou Jumbo GPL) est situé à l'est du complexe GL3/Z ;
- L'unité de dessalement de Kahrama et le Complexe GL2/Z sont situés à l'ouest ;
- La mer Méditerranée et la route portuaire se trouvent au nord du site, tandis que la route principale de la zone industrielle se trouve au sud.



Figure I-3 : Situation géographique de l'usine.

I-4- But des Installations du Complexe GL3/Z :

L'usine est conçue pour fonctionner avec différentes compositions du gaz d'alimentation. Trois cas ont été pris en compte pendant la phase de conception pour le dimensionnement des différentes unités :

- **Cas de base :**

Le gaz avec une masse moléculaire intermédiaire, l'usine produit dans ce cas 4,7 MMTPA de GNL.

- **Cas riche :**

Le gaz avec une masse moléculaire élevée, utilisé pour dimensionner l'unité de fractionnement et les unités de récupération du GPL, l'usine produit 4 MMTPA de GNL.

- **Cas pauvre/léger :**

Le gaz avec une masse moléculaire basse, utilisé pour dimensionner les parties.

De plus, trois cas de fonctionnement sont pris en compte :

Cas A : Production de GNL avec extraction d'éthane et de GPL.

Cas B : Production de GNL sans extraction d'éthane ni de GPL.

Cas C : Production de GNL sans extraction d'éthane mais avec extraction de GPL.

Dans les trois cas le complexe, permettra de produire :

- ✓ 4,7 millions de tonnes / an de GNL exporté vers les marchés internationaux.
- ✓ Éthane pour la consommation interne (réintégration au réfrigérant mixte et injection dans le gaz combustible) et pour l'exportation.
- ✓ Propane et Butane (GPL) pour l'exportation, Gazoline pour l'exportation.
- ✓ Gaz riche en Hélium.

		Base		Pauvre		Lourd	
		21°C	38°C	21°C	38°C	21°C	38°C
Débits massique	tonnes/h	887	590	752	621	773	618
Hélium	mol %	0.07		0.10		0.00	
Azote	mol %	1.18		5.53		0.20	
Dioxyde de carbone	mol %	2.00		2.00		0.30	
Méthane	mol %	84.20		85.87		83.62	
Ethane	mol %	10.19		6.00		12.00	
Propane	mol %	2.00		0.50		2.73	
Iso butane	mol %	0.14		0.00		0.30	
n-butane	mol %	0.19		0.00		0.51	
Iso pentane	mol %	0.02		0.00		0.11	
n-pentane	mol %	0.01		0.00		0.12	
n-Hexane+	mol %	0.00		0.00		0.11	
Eau	ppm	50 (±15)		50 (±15)		50 (±15)	
Teneur en mercure	µg/Nm ³	50		50		50	

Tableau I-1 : Différentes compositions du gaz d'alimentation

I-5- Description du procédé :

Le train GL3/Z comprend :

- Une zone utilités.
- Une zone procédée : traitement, fractionnement et liquéfaction.
- Une zone stockage.
- Quai de chargement du GNL.

I-5-1- Zone des utilités :

Cette zone comprend :

- 04 turbines à gaz génératrices
- 04 générateurs Diesel de secours de 2 MW chacun
- 01 section de production d'air instrument et de service.
- 01 section de préparation et de stockage de la solution Amine (aMDEA).
- 01 section de stockage d'huile chaude.
- 01 section de stockage et de vaporisation de l'azote.
- 01 section de déminéralisation.
- 01 section d'eau de service.
- 01 unité de traitement des eaux usées.

I-5-2- Zone de procédé :

Avant d'être liquéfié le GN doit être traité en passant par les étapes suivantes :

- Une Démercurisation : Elimination du mercure qui attaque l'aluminium dans les parties froides de l'usine.
- Une Décarbonatation : Elimination de CO₂ qui a tendance à se solidifier, et à créer des bouchons à basse température.
- Une Déshydratation : Elimination de l'eau qui a aussi tendance de se solidifier et à créer des bouchons à basse température.

La figure I-4 récapitule ces opérations de traitement que subit le gaz naturel avant sa liquéfaction.

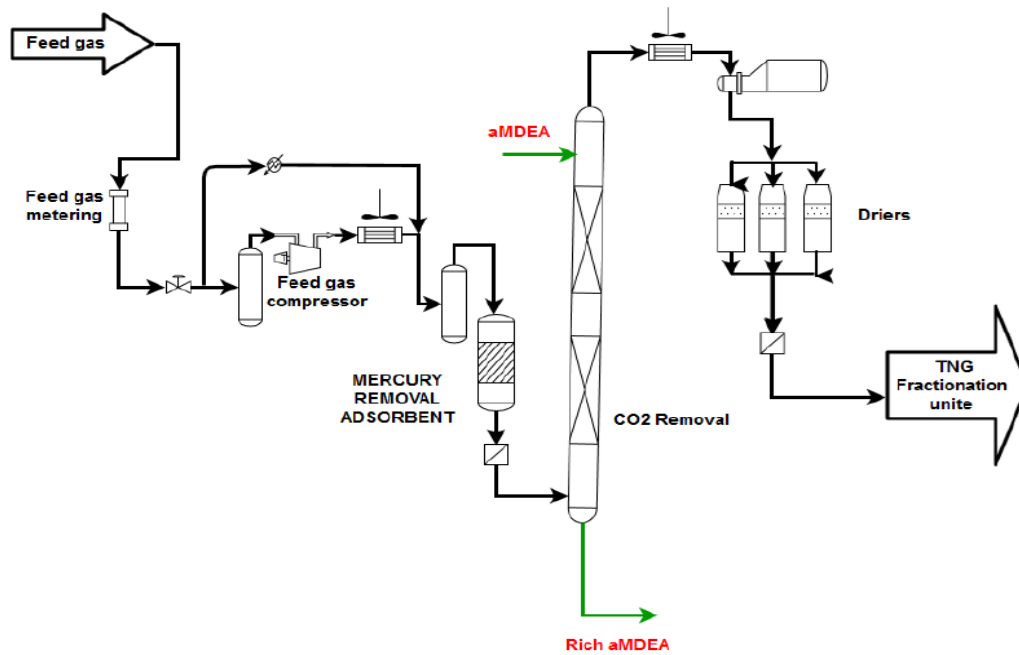


Figure I-4 : Schéma de procédé de traitement.

Une fois le gaz traité (GNT) sa partie lourde passe à la deuxième phase de fractionnement pour la séparation et la production des sous-produits GPL (C_2 , C_3 , C_4 & C_5^+) selon le schéma de la figure I-5.

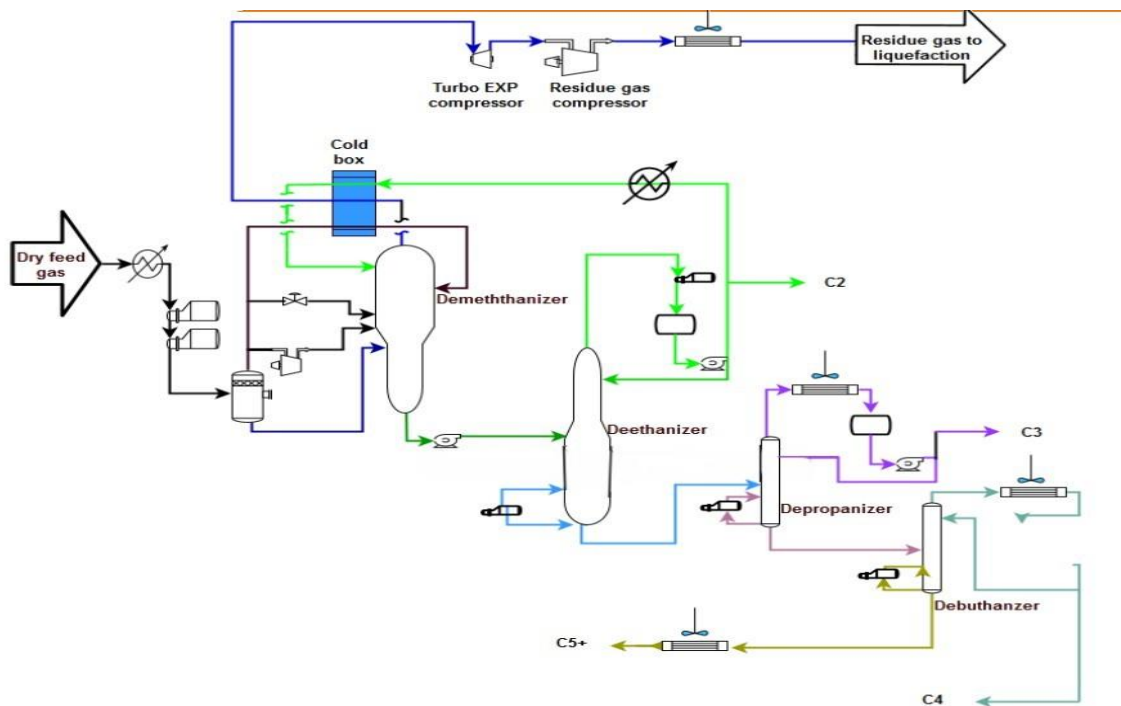


Figure I-5 : Schéma de procédé de fractionnement.

La phase légère du GNT quant à elle est dirigée vers la section liquéfaction.

La liquéfaction du gaz naturel traité est basée sur le procédé (C₃ SPLIT MR) sous la licence APCI fonctionnant selon le procédé illustre en figure I-6.

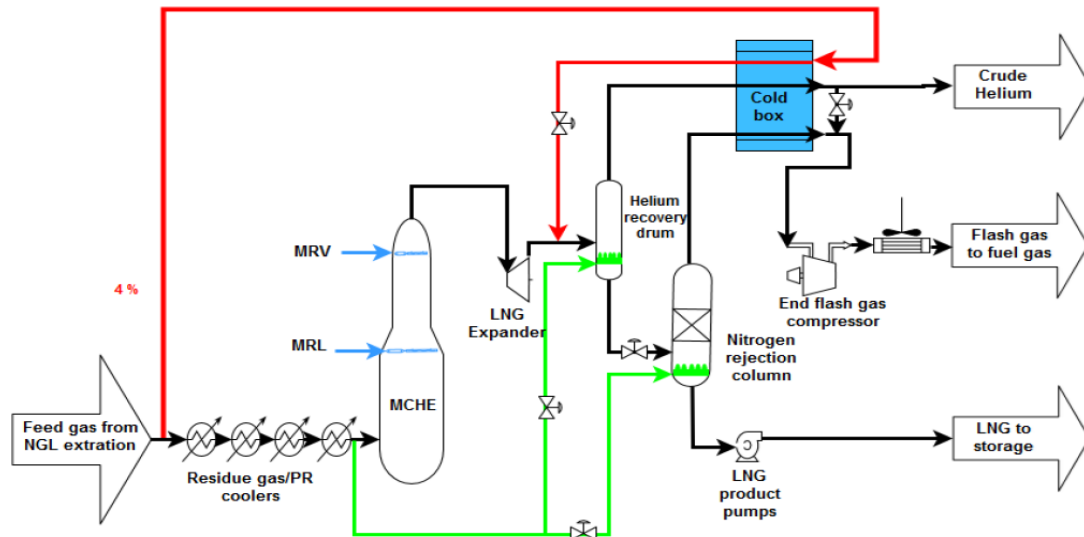


Figure I-6 : Schéma de procédé de liquéfaction.

I-5-3- Zone de stockage :

Une fois liquéfié, le GNL est envoyé vers la zone de stockage comprend :

- 2 bacs de GNL de 160 706 m³ (chacun).
- Un ballon d'éthane de 660 m³ de capacité.
- Un bac de propane 56 384m³ de capacité.
- Une sphère de propane de 2934 m³ de capacité.
- Un bac de butane de 12 238 m³ de capacité.
- D'une sphère de gazoline de 1800 m³ de capacité.

L'étude que nous faisons ici, porte essentiellement sur l'unité18.

L'unité 18 elle est utilisée pour le circuit d'huile chaude, fournissant ainsi l'énergie thermique nécessaire au complexe.

I-6- Description d'Unité 18 :**I-6-1- Description de la boucle d'huile chaude [3] :**

Le système de chauffage à huile chaude assure l'approvisionnement en chaleur aux utilisateurs par l'intermédiaire du four à huile chaude 18-MB01. Cet équipement est alimenté soit en gaz combustible BP provenant du collecteur via le ballon de gaz combustible 18-MD02, soit en pentane vaporisé issu du vaporiseur/surchauffeur de pentane 18-MC04. »

Une unité de récupération de chaleur 18-ML02, exploite les gaz d'échappement générés par la turbine à gaz du compresseur de gaz d'alimentation 11-MJ01. Cette unité est indispensable pour fournir la quantité maximale de chaleur requise par le système.

L'huile chaude provenant du four et de l'unité de récupération de chaleur est d'abord mélangée afin d'obtenir une température homogène, puis elle est distribuée aux différents utilisateurs du réseau. Cette configuration permet d'optimiser les performances énergétiques du système d'huile chaude.

Deux niveaux de température différents sont prévus afin d'optimiser le système d'huile chaude. Le niveau de température « élevé » fonctionne à 260 °C et le niveau de « bas » fonctionne à 160 °C :

➤ **Utilisateurs du niveau de température élevé :**

- By-pass du préchauffeur de gaz d'alimentation 11-MC02.
- Réchauffeur de gaz de dégivrage 15-MC04.
- Réchauffeur de gaz de régénération 13-MC02.
- Réchauffeur de gaz combustible HP principal 14-MC01.
- Réchauffeur d'éthane 14-MC03.
- Vaporiseur/surchauffeur de pentane 18-MC04.
- Rebouilleur du dééthaniseur 17-MC07.
- Rebouilleur du dépropaniseur 17-MC10.
- Rebouilleur du débutaniseur 17-MC12.

➤ **Utilisateurs du niveau de température bas :**

- Rebouilleurs du régénérateur d'amine (2 en parallèle) 12-MC23-A/B.

- Rebouilleur du déméthaniseur 17-MC21.

Chaque ligne de retour revient vers un collecteur commun dirigé vers le ballon tampon d'Huile chaude 18-MD01.

Une pompe auxiliaire (18-MJ03) est intégrée pour assurer la circulation de l'huile chaude en cas de défaillance électrique, minimisant ainsi la dégradation potentielle de l'huile due à l'inertie du matériau réfractaire du four.

Cette pompe reste normalement hors service ; elle est reliée à l'alimentation électrique de secours et s'active automatiquement lors d'une panne de courant.

Le ballon tampon d'huile chaude 18-MD01, situé en amont des pompes fournit un volume tampon afin de compenser toute variation du volume de l'huile chaude et permet l'élimination de tous les gaz générés. Le ballon est mis sous pression d'azote afin de garder une pression constante du système durant la variation de densité de l'huile chaude et également pour empêcher l'entrée d'air. Le ballon est connecté directement à la torche.

Un courant provenant du collecteur de refoulement des pompes by-pass les installations de chauffe 18-MB01 et 18-ML02 afin d'être distribué à un niveau de température bas. La température de ce courant est contrôlée à l'aide de la moulure de refroidisseur d'huile chaude 18-MC02 (pour diminuer la température du courant) ou par injection d'huile depuis le niveau chaud.

La moulure de refroidisseur d'huile chaude 18-MC02 baisse également la température durant les opérations transitoires (démarrage, arrêt, minimum technique) lorsque certains utilisateurs ne sont pas en ligne elle assure ainsi le fonctionnement correct du four à sa quantité minimale de chaleur échangée.

Deux systèmes fermés de collecte des drains, équipés d'installations de pompage 18-MD03 avec la pompe 18-MJ02 et 17-MD20 avec la pompe 17-MJ15, sont fournis pour permettre l'entretien d'un utilisateur. La collecte s'effectue par des lignes dures souterraines, rendant le système aussi auto-drainant que possible.

Sur la base des analyses de laboratoire, l'huile est récupérée dans le système ou éliminée à l'aide d'une pompe portative.

La figure I-7 illustre en détail cette boucle d'huile chaude.

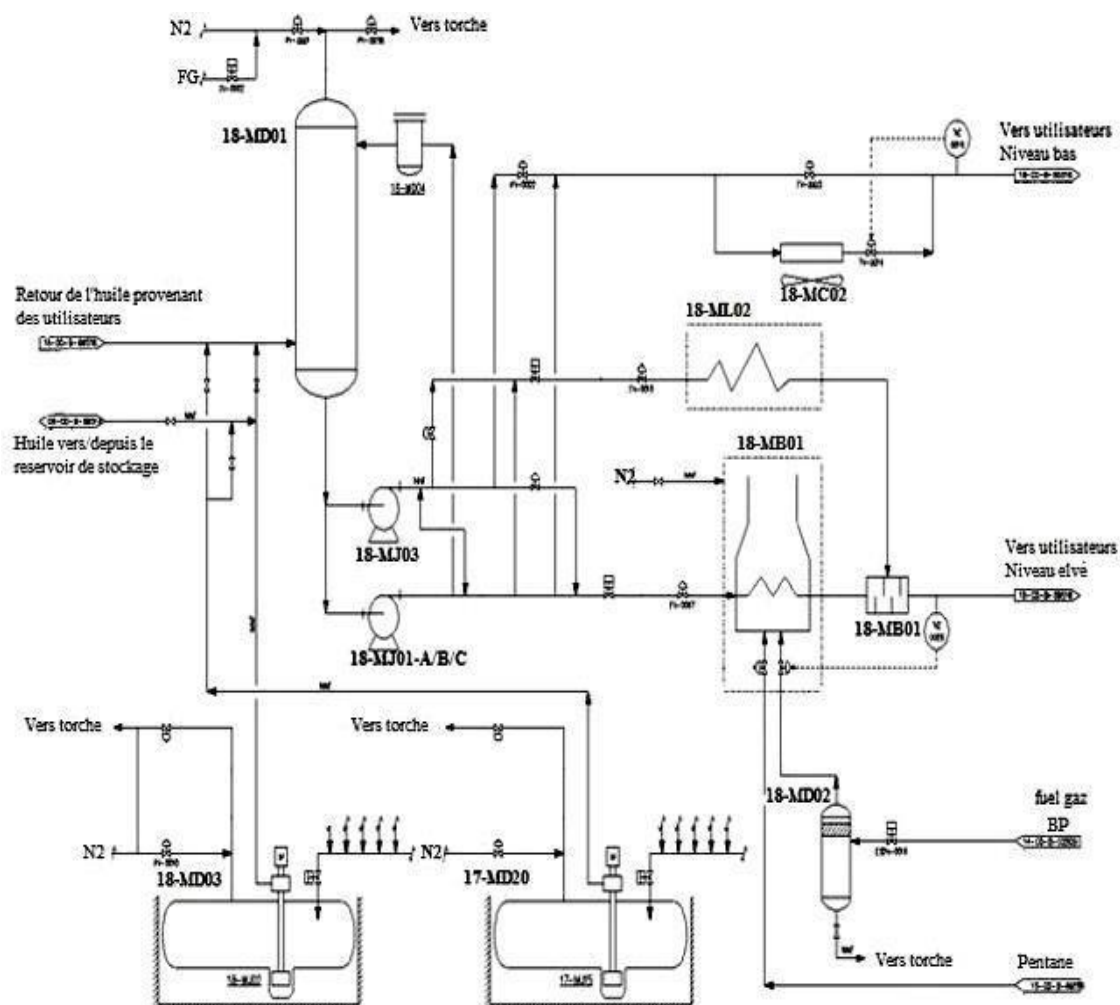


Figure I-7 : Système d'huile chaude.

Le débit volumique normal circulant dans la boucle de l'huile chaude est de 3500 T/h.

Le tableau ci-dessous indique le débit destiné à chaque niveau de température.

Tableau I-2 : Débit du fluide de transfert de chaleur à niveau bas /élevé [3]

Variable opératoire	Depuis l'unité 18 vers les utilisateurs au niveau de température bas	Depuis l'unité 18 vers les utilisateurs au Niveau de température élevé
---------------------	--	--

Débit volumique normal (m ³ /h)	1900 m ³ /h	1600 m ³ /h
--	------------------------	------------------------

Les principaux équipements de la boucle de l'huile chaude sont :

- **18-MD01** Ballon tampon d'huile chaude.
- **18-MJ01-A/B/C** Pompes de circulation d'huile chaude.
- **18-MB01** Four d'huile chaude.
- **18-ML02** Unité de récupération de chaleur.
- **18-MC02** Moulure de refroidisseur d'huile chaude.
- **18-MU01** Mélangeur statique d'huile chaude.
- **18-MD04** Filtre d'huile chaude.
- **18-MD02** Ballon de gaz combustible.
- **18-MC04** Vaporiseur/Surchauffeur de pentane.
- **18-MJ03** Pompe de circulation d'huile chaude de secours.
- **18-MD03** Ballon de drainage d'huile chaude.
- **18-MJ02** Pompe de ballon de drainage d'huile chaude.
- **17-MD20** Ballon de drainage d'huile chaude.
- **17-MJ15** Pompe du ballon de drainage d'huile chaude.

Les utilisateurs de l'huile chaude sont les rebouilleurs des colonnes de distillation et les réchauffeurs du gaz.

Chaque utilisateur en aval est équipé d'un système de contrôle dédié afin de réguler la quantité d'huile d'alimentation en fonction de la chaleur requise.

Donc le réseau est équipé de lignes de by-pass qui permettent l'élimination du débit en excès qui sera recyclé à l'intérieur du ballon tampon d'huile chaude.

I-6-2- Propriétés de l'huile Torada TC32 :

L'huile Torada TC32 est un lubrifiant industriel de haute performance, conçu spécifiquement pour répondre aux exigences rigoureuses des systèmes hydrauliques et des équipements nécessitant une lubrification précise et fiable. Elle se distingue par sa formulation avancée qui offre une protection supérieure contre l'usure, la corrosion et l'oxydation, tout en garantissant une performance optimale même dans des conditions de fonctionnement extrêmes.

Ce tableau présente les principales propriétés physico-chimiques de l'huile Torada TC32, mettant en évidence ses spécifications techniques et ses avantages pour une utilisation industrielle efficace.

Tableau I-3 : Caractéristiques de l'huile Torada TC32 [4]

Température (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	Viscosité (cP)	Conductivité thermique (W/m.K)
20	868,8798	1,8777	62,6534	0,1336
60	842,6394	2,0232	12,057	0,1308
80	829,5192	2,096	6,8737	0,1294
100	816,399	2,1688	4,352	0,128
140	790,1586	2,3143	2,1512	0,1252
160	777,0384	2,3871	1,6261	0,1238
240	724,5576	2,6782	0,7046	0,1182
260	711,4374	2,7509	0,5991	0,1168
280	698,3172	2,8237	0,5159	0,1154
300	685,197	2,8965	0,4491	0,114

Autres propriétés extraites de la fiche de spécification de la raffinerie :

Tableau I-4 : Propriétés de l'huile Torada TC32 [4]

Caractéristiques	Méthode d'analyse	Valeurs limites	
		Min	Max
Viscosité à 40°C (cSt)	ASTM D-445	29	-
Indice de viscosité	ASTM D-2270	92	-
Point d'écoulement (°C)	ASTM D-97	-	-9
Point d'éclair (°C)	ASTM D-92	210	-
Chaleur spécifique à 20°C (kcal/kg °C)	-	0,434	0,451

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS TECHNIQUES

II-1- Introduction :

Dans les processus industriels complexes, le four 18-MB01 joue un rôle central en tant que source de chaleur précise et régulée. Il est indispensable dans les unités de séparation, où il fournit l'énergie nécessaire aux rebouilleurs des colonnes de fractionnement (ou de distillation) ainsi qu'aux échangeurs thermiques utilisant un fluide caloporteur à haute température, généralement une huile chaude de procédé.

Ce chapitre propose une analyse approfondie de ce four performant, en présentant son principe de fonctionnement, ses avantages techniques et sa contribution essentielle aux procédés de séparation industrielle. L'étude débutera par une description rigoureuse de son mode opératoire, en mettant l'accent sur les mécanismes de transfert thermique rayonnement et convection qui assurent son efficacité énergétique élevée.

II-2- Description générale du four 18-MB01 :

Le four de l'unité 18-MB01, fabriqué par *Kirchner Italia SpA en 2009*, a été conçu conformément aux exigences du code *API 560*. Il s'agit d'un four à tirage naturel fonctionnant en pression négative, comprenant une zone de radiation de type cabine équipée de tubes verticaux, ainsi qu'une zone de convection avec des tubes horizontaux.

L'équipement est doté de 30 brûleurs accompagnés de 30 pilotes permanents, d'un registre d'air garantissant un tirage optimal, ainsi que d'un ensemble complet de vannes manuelles, d'électrovannes, d'instruments de contrôle, de mesure et de dispositifs de sécurité.

Le revêtement réfractaire de l'enceinte est composé :

- De fibres céramiques (Ceramic Fibers) dans la zone de radiation, offrant une excellente isolation à haute température.
- De mortier coulable (Castable Refractory) dans la zone de convection et la cheminée (Stack).

La puissance thermique nominale du four est déterminée selon le scénario opératoire le plus défavorable, prenant en compte l'indisponibilité de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02 et intégrant les pertes thermiques à chaque niveau d'exploitation de l'huile chaude. Ce cas critique correspond à la condition de base à 21 °C, pour laquelle la puissance thermique est estimée à environ 94 MW [5].

II-2-1- Dimensions [5] :

- **Zone de radiation :**

Longueur =12,328 m ; Largeur =11,573 m ; Hauteur =14,250 m.

Elévation du sol : 3 m.

- **Zone de convection :**

Longueur =12,787 m ; Largeur =2,955 m ; Hauteur =5,576 m

- **Cheminée :**

Partie inférieure de forme carrée : Coté = 4,7 m.

Partie supérieure de forme cylindrique : Diamètre extérieur =3,825 m

Hauteur de la cheminée = 69,530 m.

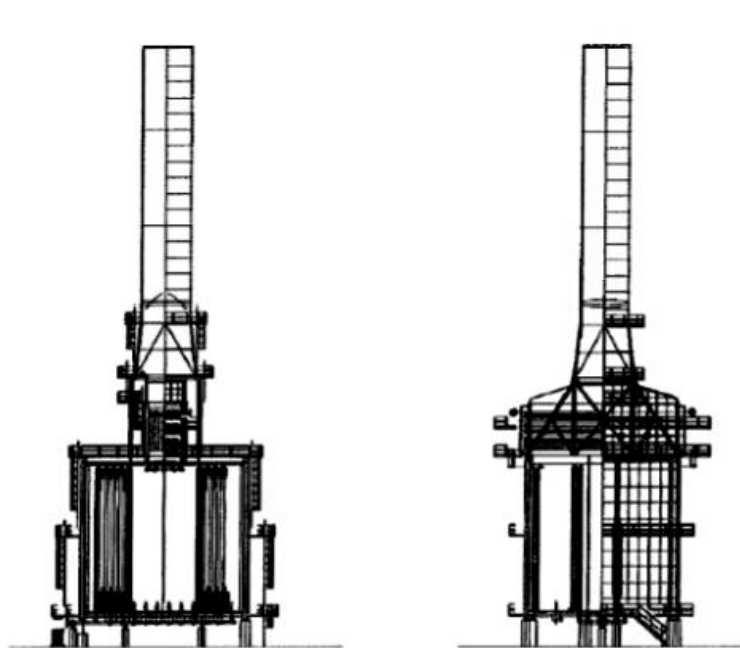


Figure II-1 : Four 18-MB01[5] .

II-2-2- Brûleurs :

Le système de combustion comprend 30 brûleurs disposés en trois rangées au niveau du sol, chacun étant de type à faibles émissions NOx et fonctionnant en tirage naturel. Chaque brûleur est équipé d'un volet de réglage d'air, d'une porte de vision, d'un pilote permanent, ainsi que de lignes distinctes pour le fuel gaz et le pentane vaporisé.

Les brûleurs comportent un détecteur à anode d'ionisation pour le pilote et un détecteur UV destiné à la surveillance de la flamme principale [5].

Les caractéristiques des brûleurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II-1 : Description des brûleurs [5]

Type de brûleur	NOx
Emplacement	bas
Espacement	Sol
Centre du brûleur au centre du tube (mm)	1617
Centre du brûleur au centre du brûleur adjacent (mm)	925
Centre du brûleur au mur non couvert (mm)	1847
Modèle du pilote	Permanent auto-aspirant
Méthode d'allumage	Etincelle électrique
Type de fuel	Gaz
Chaleur dégagée maximale par brûleur (MW)	4,09
Longueur de flamme (m)	4,4

Le schéma présenté ci-dessous illustre le positionnement des 30 brûleurs, avec en noir l'indication du nombre minimal de brûleurs allumés. Cette configuration garantit une distribution thermique équilibrée au niveau des tubes internes du four.

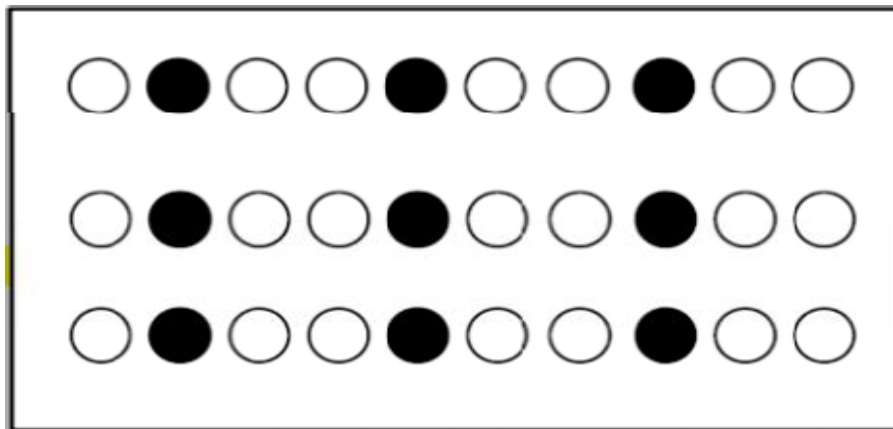


Figure II-2 : Arrangement des brûleurs sur le sol du four [5].

II-2-3- Arrangement des tubes [5] :

La conception des tubes du four 18-MB01 est élaborée selon des critères stricts de sécurité et de performance. Leur fabrication respecte les prescriptions du code API 530, assurant ainsi une robustesse et une longévité adaptées aux conditions extrêmes de haute température et de pression.

L'acier au carbone A106 Gr. B, conforme au standard ASTM, a été retenu pour ses qualités optimales alliant résistance mécanique, ductilité et soudabilité, ce qui en fait un matériau adapté à cette application. Les tubes du four 18-MB01 sont agencés avec précision en deux sections distinctes, chacune étant conçue pour maximiser l'efficacité du mode spécifique de transfert thermique qu'elle exploite :

1. Tubes de la section de radiation :

8 passes verticales conçues pour maximiser la surface d'exposition au rayonnement infrarouge émis par les flammes des brûleurs.

La sortie est équipée d'un collecteur à brides de 20 pouces de diamètre, assurant une collecte efficace du fluide caloporteur chauffé.

La configuration comprend 6 rangées de tubes agencées stratégiquement : 4 rangées positionnées entre les brûleurs et le mur pour optimiser l'absorption du rayonnement direct, et 2 rangées situées entre les rangées de brûleurs afin d'assurer une distribution homogène de la chaleur.

Chaque passe est composée de 25 tubes lisses en acier au carbone, garantissant un compromis optimal entre transfert thermique et perte de charge.

2. Tubes de la section de convection :

8 passes horizontales conçues pour favoriser un écoulement uniforme du fluide caloporteur et optimiser le transfert thermique par convection.

L'entrée est équipée d'un collecteur à brides de 20 pouces de diamètre, assurant une distribution homogène du fluide à l'intérieur des tubes.

Chaque passe comprend 3 rangées de tubes lisses de protection (tubes de choc ou shield), destinées à préserver les rangées suivantes des flux gazeux les plus chauds.

Par ailleurs, 9 rangées de tubes à ailettes par passe augmentent significativement la surface d'échange thermique, maximisant ainsi le transfert de chaleur par convection.

Cette configuration précise des tubes garantit une efficacité thermique optimale tout en assurant la sécurité et la longévité du four 18-MB01.

Tableau II-2 : Dimensions des tubes du four

Section	Radiation	Shield	Convection
Orientation	Vertical	Horizontal	Horizontal
Diamètre extérieur (mm)	168,3	168,3	168,3
Epaisseur moyenne (mm)	7,11	7,11	7,11
Nombre de tubes	200	24	72
Surface exposée (m ²)	1 438	142	4 372
Longueur effective des tubes (mm)	13 599	11 224	11 224
Espacement moyen entre tubes (mm)	305	305	305
Distance de la paroi du four (mm)	229	-	-

II-2-4- Description de la surface étendue :

Les ailettes fixées sur les tubes de la zone de convection augmentent significativement la surface d'échange thermique avec les gaz de combustion, optimisant ainsi le transfert de chaleur par convection. Les spécifications détaillées de ces ailettes sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Caractéristiques des ailettes [5]

Type d'ailette	Ailette solide
Matériau	13 Cr acier allié
Dimensions (hauteur/épaisseur)	25 / 1,5
Espacement entre ailettes (mm)	157
Facteur d'extension (surface totale/surface lisse)	10,25

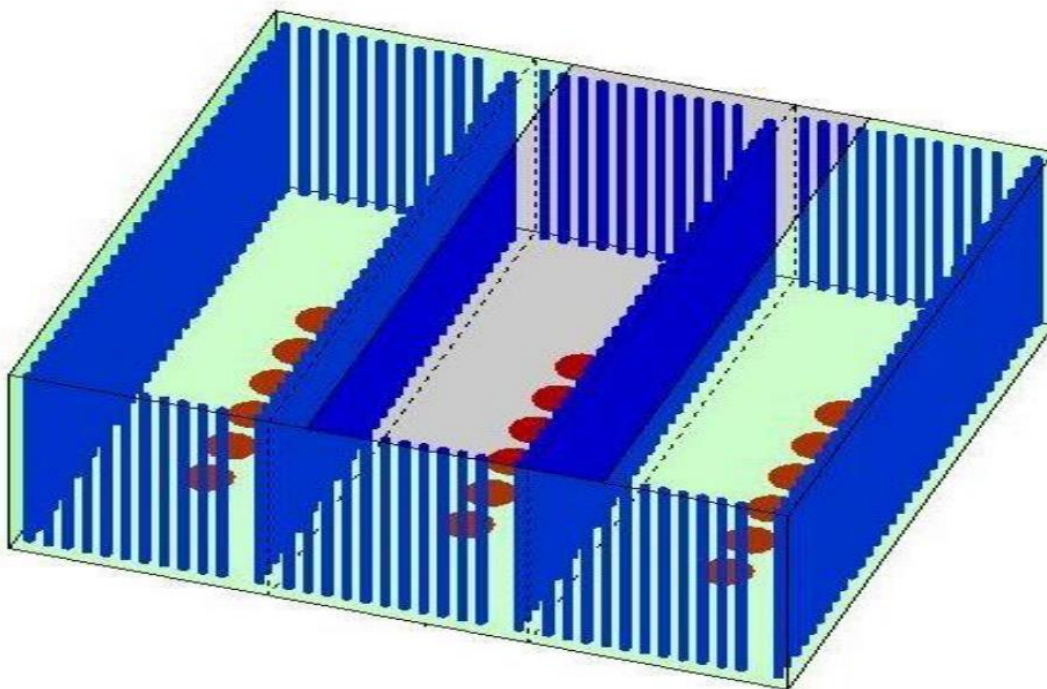


Figure II-3 : Représentation 3D de l'arrangement des tubes de la zone de rayonnement (Logiciel de simulation HTR).

II-3- Échangeurs de chaleur :

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur [6].

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur entre deux fluides, chaud et froid, sans qu'il ait un contact direct entre ces derniers. Ce transfert de chaleur est peut-être effectué sans changement de phase (c'est-à-dire que le fluide à refroidir peut conserver son état physique, liquide ou gazeux) ou avec un changement de phase, c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, rebouilleurs, ou des tours de refroidissement [7].

II-3-1- Principe de fonctionnement des échangeurs :

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduites qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi, qui est le plus souvent métallique, ce qui favorise les échanges de chaleur (le fluide chaud se refroidit et par conséquent le fluide froid se réchauffe).

Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire [6].

La quantité de chaleur échangée dépend de :

- La surface d'échange entre les deux fluides (le fluide frigorigène et le fluide à refroidir).
- La température d'entrée du fluide à refroidir ou à réchauffer.
- Le débit des fluides.
- Les caractéristiques thermiques des fluides (chaleur spécifique, conductivité thermique...).
- Le coefficient d'échange par convection.

L'étude des échangeurs de chaleur est, d'après ce qui précède, très compliquée et doit tenir compte de plusieurs paramètres cités auparavant.

Plusieurs méthodes d'études globales, qui seront abordées dans cette partie, et moyennant quelques hypothèses simples peuvent aboutir à des résultats certes approximatifs mais suffisants dans la plupart des cas [7].

II-3-2- Description du Système WHRU dans la turbine 11-MJ01 :

- Le système de récupération thermique WHRU est utilisé pour fournir de la chaleur au circuit d'huile chaude de la plateforme.
- Le circuit d'huile chaude fournit à son tour de la chaleur à d'autres éléments du site.
- Les gaz chauds provenant de l'échappement de la turbine à gaz sont utilisés pour réchauffer l'huile thermique dans un système de récupération de la chaleur, comprenant des serpentins à ailettes.
- L'huile chaude est pompée à travers les tubes de la centrale WHRU.
- L'huile chaude peut bypasser par le conduit bypass externe - le serpentin de la centrale WHRU si le circuit d'huile chaude n'a pas besoin de chaleur [8].

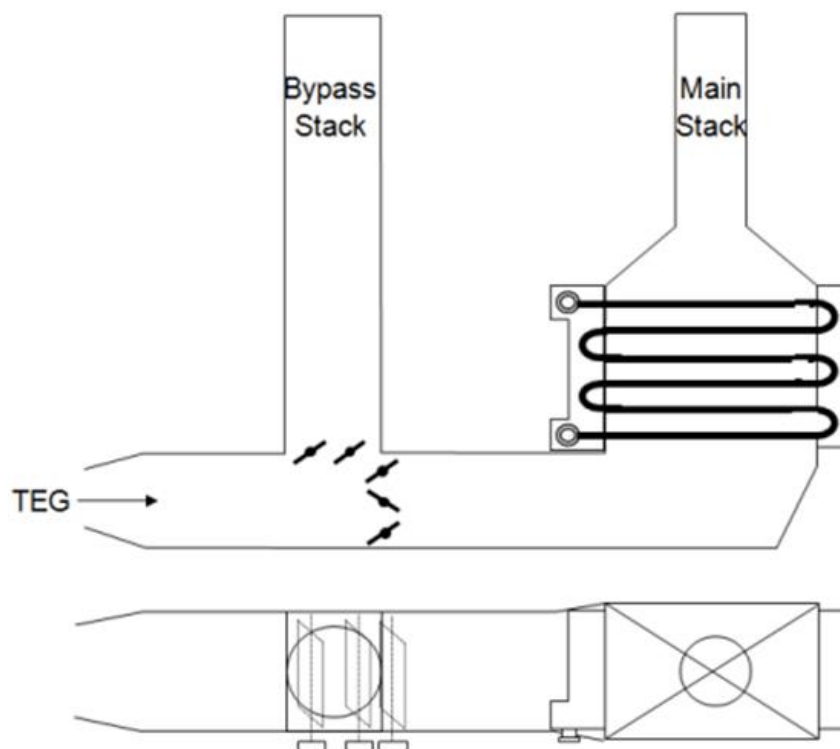


Figure II-4 : Récupérateur au niveau de l'échappement de la turbine.

II-3-3- Principaux éléments de WHRU :

Chaque centrale WHRU comprend :

- Un conduit d'admission dans la WHRU.
- Les registres d'entrée et le bypasse de la WHRU.
- Le faisceau de tubes et les collecteurs de la WHRU.
- Le conduit de bypasse externe de la WHRU.
- La cheminée d'évacuation de la WHRU.
- L'isolation et les revêtements internes.

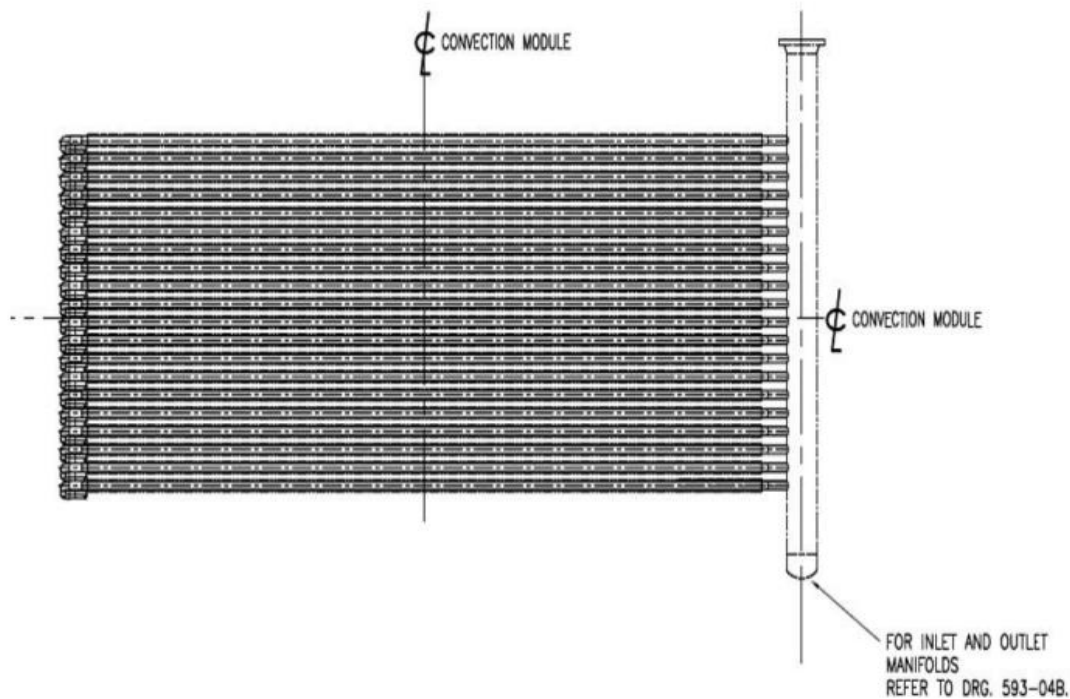


Figure II-5 : Faisceaux de tubes et les collecteurs de la centrale WHRU [8].

CHAPITRE III :
RESULTATS DE SIMULATION
ET DISCUSSION

III-1- Introduction et problématique :

Dans un contexte mondial où l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction de l'empreinte carbone constituent des priorités majeures, les industries sont appelées à optimiser leurs procédés afin de réduire leur consommation d'énergie et leurs émissions associées. Au sein du complexe GL3/Z, l'unité 18 occupe une place centrale en assurant le chauffage de l'huile thermique Torada TC32 au moyen du four industriel 18-MB01. Ce fluide caloporteur est indispensable au fonctionnement de plusieurs équipements, tels que les rebouilleurs et les réchauffeurs, qui exigent un apport thermique stable et contrôlé.

Cependant, le fonctionnement actuel du système de chauffage met en évidence certaines limites en matière de performance énergétique. En effet, la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude, correspondant à la température de l'huile après mélange des flux issus du four 18-MB01 et de l'économiseur 18-ML02, est actuellement réglée à 260 °C, semble excéder les besoins réels des unités consommatrices. Cette situation peut entraîner une surconsommation de fuel gaz (éthane) et générer des retours d'huile à des températures supérieures à celles réellement nécessaires, compromettant ainsi l'efficacité globale du système thermique.

Pour répondre à cette problématique, une étude de simulation numérique du four 18-MB01 et de la boucle d'huile chaude constitue un outil essentiel.

Dans ce travail, un modèle détaillé du système est développé sous Aspen HYSYS afin de reproduire fidèlement les conditions industrielles réelles. Cette modélisation permet ensuite de tester différents scénarios de réduction de la température du niveau élevé (température après mélange), d'évaluer leurs impacts thermiques, et d'analyser leur influence sur la consommation de gaz combustible ainsi que sur la stabilité thermique du fluide Torada TC32.

Ce chapitre présente ainsi la démarche de modélisation adoptée, les résultats issus des simulations effectuées sous HYSYS, ainsi que leur interprétation critique. L'objectif final est d'identifier un point de fonctionnement optimal, conciliant réduction de la consommation de fuel gaz, maintien des performances des unités utilisatrices et garantie d'une stabilité thermique adéquate de l'huile thermique.

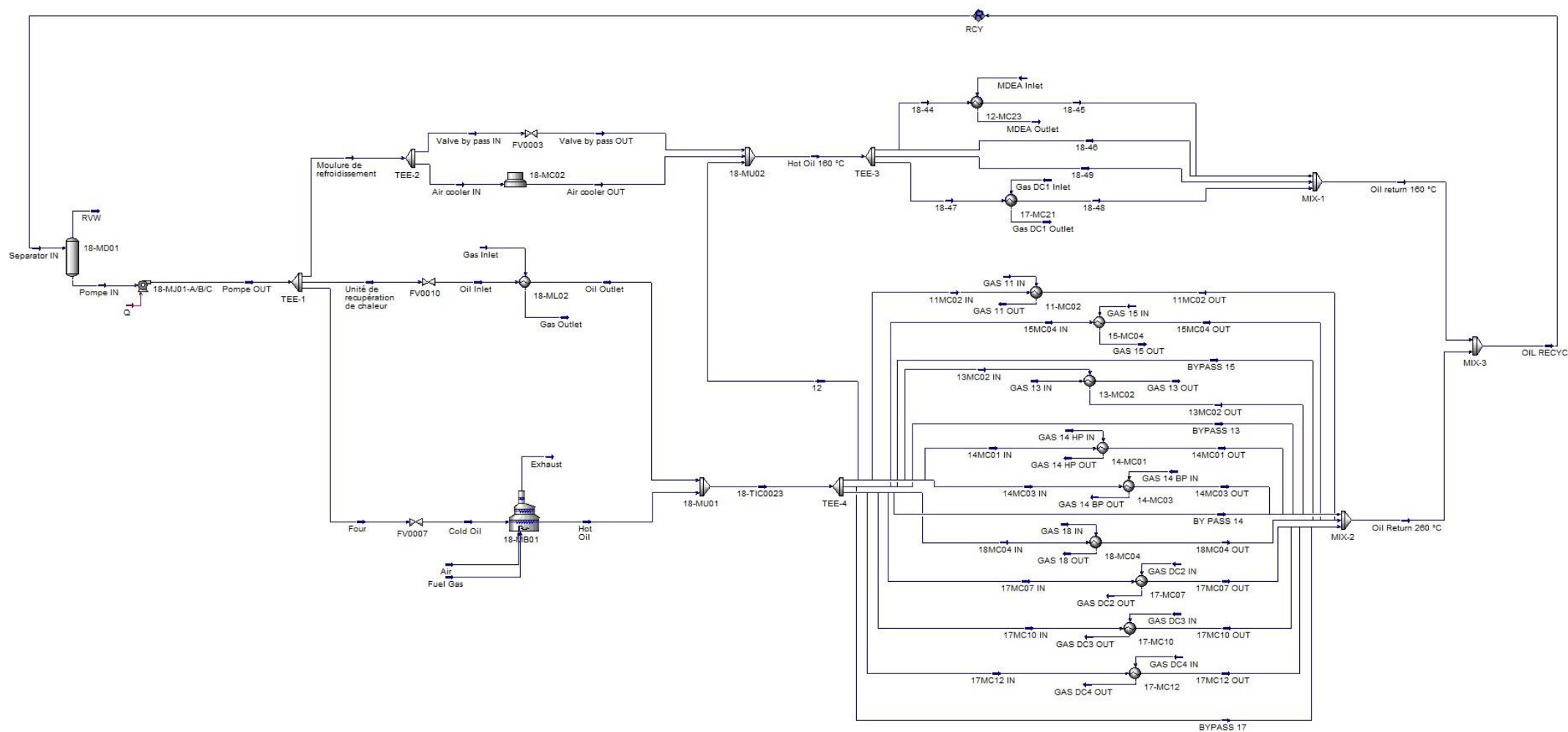


Figure III-1 : Schéma de simulation du procédé de système d'huile chaude GL3/Z (Unité 18).

III-2- Description du logiciel de simulation HYSYS :

Aspen HYSYS est un logiciel de référence en génie des procédés, largement utilisé pour la modélisation et la simulation des opérations industrielles. Grâce à ses modèles thermodynamiques rigoureux, il permet de réaliser avec précision les bilans matière et énergie, le dimensionnement des équipements et l'évaluation des performances de procédé.

Basé sur une architecture séquentielle-modulaire développée au MIT, Aspen HYSYS représente chaque unité de procédé sous forme de bloc indépendant, ce qui facilite la construction, la modification et l'interconnexion de modèles complexes.

Dans ce travail, Aspen HYSYS a été utilisé pour simuler l'ensemble de l'unité 18, incluant le four industriel 18-MB01, l'unité de récupération de chaleur 18-ML02 ainsi que la boucle complète d'huile chaude utilisant l'huile thermique Torada TC32. Ce modèle a permis d'analyser le profil de température et les bilans énergétiques du système dans le but d'abaisser la température du niveau élevé (température après mélange) et de réduire la consommation énergétique tout en garantissant la sécurité et la performance des unités aval.

Par ailleurs, Aspen HYSYS offre la possibilité d'intégrer le module Aspen Exchanger Design & Rating (EDR), ce qui permet d'affiner la précision des calculs thermiques associés à la modélisation du four.

III-3- Présentation du logiciel ASPEN EDR :

Le module Aspen Exchanger Design & Rating (EDR), intégré à Aspen HYSYS, regroupe un ensemble d'outils spécialisés dans la conception, l'analyse et l'évaluation thermique des équipements de transfert de chaleur. Il constitue une extension précieuse pour améliorer la précision et la fiabilité des résultats de simulation obtenus dans HYSYS.

Issu des technologies HTFS et B-JAC, Aspen EDR bénéficie de plus de 40 ans d'expertise dans la modélisation thermique des échangeurs de chaleur. Bien que conçu initialement pour ces derniers, le module peut également être utilisé pour caractériser les performances thermiques des fours industriels, en évaluant la charge thermique, les pertes de chaleur, ainsi que les températures de paroi [10].

Ainsi, l'utilisation conjointe de HYSYS et EDR permet d'obtenir une simulation plus complète et plus précise du four 18-MB01, en intégrant les calculs détaillés de transfert de chaleur fournis par EDR. Cette approche améliore non seulement la qualité des résultats thermiques, mais aussi la validation des conditions de sécurité et d'efficacité énergétique du système.

III-4- CHOIX DU MODELE THERMODYNAMIQUE :

Un modèle thermodynamique regroupe un ensemble d'équations permettant de décrire le comportement d'un système ou d'un sous-système (opération unitaire, ballon, échangeur de chaleur, compresseur, etc.). Ces équations traduisent principalement les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Parmi les modèles thermodynamiques les plus utilisés figurent :

- Peng-Robinson (PR),
- Peng-Robinson Styjek-Vera (PRSV),
- Soave-Redlich-Kwong (SRK),
- Lee-Kessler-Plöcker (LKP).

Pour les mélanges d'hydrocarbures légers, les équations d'état de Peng-Robinson et de Soave-Redlich-Kwong sont les plus couramment employées, car elles offrent un bon compromis entre précision et simplicité de calcul.

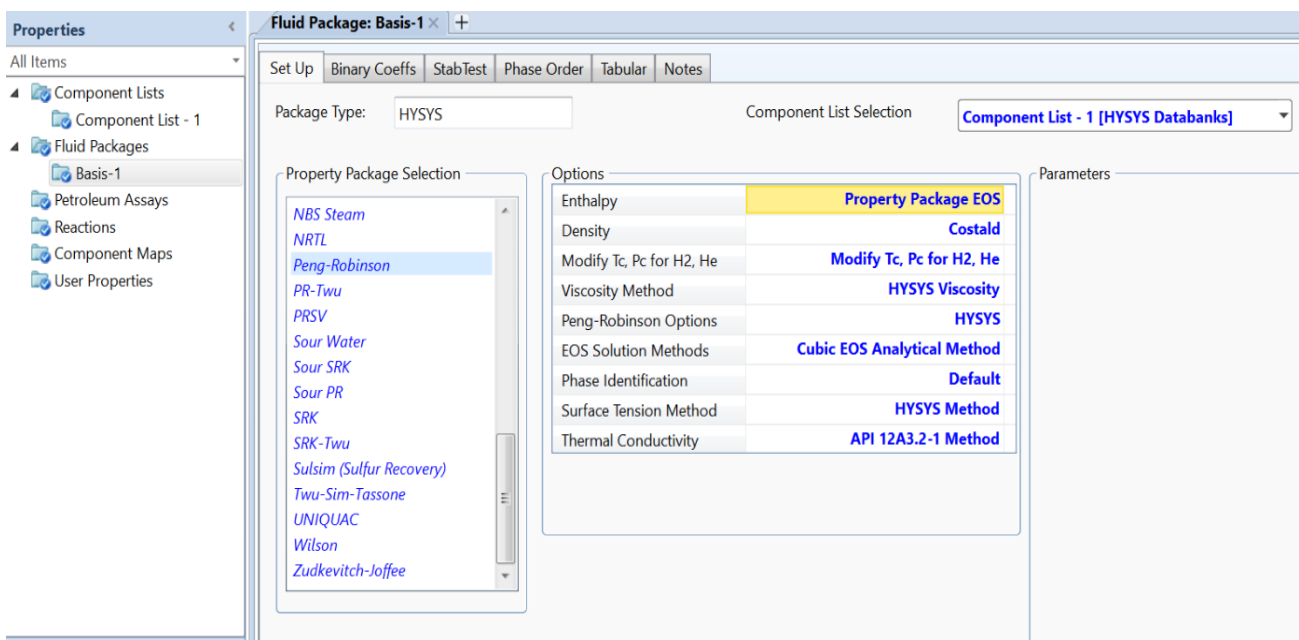


Figure III-2 : Choix du modèle thermodynamique.

III-5- Simulation du four 18-MB01 par le simulateur ASPEN EDR :

La modélisation d'un four industriel présente une complexité élevée et nécessite l'utilisation de simulateurs spécialisés capables de traiter un grand volume de données d'entrée.

Le logiciel Aspen EDR propose deux modes de calcul principaux :

- Mode "Simulation" : Le débit de combustible est spécifié, et le simulateur détermine la température de sortie du fluide chauffé.
- Mode "Évaluation" ou "Rating" : Les températures d'entrée et de sortie du fluide sont connues, et le simulateur calcule alors le débit de combustible requis pour atteindre ces conditions.

Données d'entrée pour le mode "Rating" :

Les principales données nécessaires à la configuration du modèle "Rating" sont les suivantes :

Propriétés physiques du fluide : les caractéristiques de l'huile thermique Torada TC32 ont été intégrées dans Aspen HYSYS.

ID	Critical	Point	TDep	UserProp	Type
Base Properties					
Molecular Weight				218,0	
Normal Boiling Pt [C]				330,0	
Ideal Liq Density [kg/m3]				865,0	
Critical Properties					
Temperature [C]				513,8	
Pressure [kPa]				1565	
Volume [m3/kgmole]				0,9594	
Acentricity				0,7007	

Figure III-3 : Les propriétés de l'huile Torada TC32.

Variables du procédé : Le débit massique du fluide, sa température d'entrée, sa température de sortie, ainsi que sa pression d'opération.

Données relatives au combustible et au comburant : Les compositions respectives, les températures d'entrée, et le taux d'excès d'air.

Géométrie du four : Cette section décrit la configuration interne complète, incluant la zone de rayonnement, la zone de convection, et la cheminée.

Fired Heater: 18-MB01

Design	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics	EDR FiredHeater		
		Worksheet					
Conditions		Name	Cold Oil	Air	Fuel Gas	Hot Oil	Exhaust
Properties		Vapour	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
Composition		Temperature [C]	167,0	25,00	48,00	251,0	129,3
PF Specs		Pressure [kPa]	1224	101,3	600,0	1294	101,3
		Molar Flow [kgmole/h]	4128	2673	148,7	4128	2896
		Mass Flow [kg/h]	9,000e+005	7,723e+004	3700	9,000e+005	8,170e+004
		LiqVol Flow [m3/h]	1040	88,98	12,57	1040	98,25
		Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-4,125e+005	-8,202	-8,381e+004	-3,638e+005	-7,445e+004
		Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	577,7	151,8	183,9	679,0	170,8
		Heat Flow [kJ/h]	-1,703e+009	-2,193e+004	-1,246e+007	-1,502e+009	-2,156e+008

Figure III-4 : Conditions des courants du four (huile, combustible, comburant et fumées).

Fired Heater: 18-MB01

Design	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics	EDR FiredHeater			
Worksheet Conditions Properties Composition PF Specs			Cold Oil	Air	Fuel Gas	Hot Oil	Exhaust	
		Argon	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		Nitrogen	0,0000	0,7800	0,0000	0,0000	0,7199	
		Oxygen	0,0000	0,2200	0,0000	0,0000	0,0234	
		CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1027	
		H2O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1540	
		Torada TC32*	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	
		Toluene	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		Benzene	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		n-Hexane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		n-Pentane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		i-Pentane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		n-Butane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		i-Butane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		Propane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		Ethane	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	
		Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		Helium	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
	MDEAmine	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		

Figure III-5 : Composition des courants du four (huile, combustible, comburant et fumées).

Flowsheet Template Case (Main) - Solver Active | Exchanger Details: 18-MB01

EDR Navigation << >>

Layout Main Tube Rows Roof Tube Rows Tube Details Gas Offtake Firebox Diagram

Fired heater type: box

Tube row layout: multi-line

Firebox Dimensions

Height: 14250 mm

Length: 12328 mm

Width: 11573 mm

Inner diameter: mm

Number of cells in multi-cell firebox: 3

Elevation of floor of firebox: 3000 mm

Elevation of top of firebox: 14250 mm

Burner Details

Burner location: bottom

Type of burner: natural draught, low NOX (AF)

Figure III-6 : La géométrie du four 18-MB01.

Les résultats de la simulation peuvent être présentés soit sous forme de tableaux, soit sous forme de fiches de spécifications conformes aux normes API.

Flowsheet Template Case (Main) - Solver Active | Exchanger Details: 18-MB01

EDR Navigation << >>

Fired Heater Summary

Heater duty	MW	43,985
Overall efficiency (%)	-	85,93
Firebox efficiency (%)	-	67,54
Fuel efficiency (%)	-	90,09
Fuel flowrate	kg/h	3700
Oxidant flowrate	kg/h	63906
% Excess air		13
Heat from combustion of fuel	MW	48,826
Firebox well-stirred gas temperature	°C	680
Bridgwall gas temperature	°C	547
Stack flue gas inlet temperature	°C	162
Stack flue gas outlet temperature	°C	122
Stack oxygen, mass percent, dry	-	2,94
Estimated draught loss	bar	0,00102

	Firebox	Bank 1	Bank 2
Process stream number	1	1	1

Figure III-7 : Les résultats de la simulation.

Commentaire :

D'après ce tableau nous extrayons que l'énergie du four est de 43,985 MW, le rendement du four 67,54 % et le débit de fuel gaz 3700 kg/h.

III-6- Vérification du modèle de l'unité 18 par le simulateur Aspen HYSYS :

Afin de confirmer la fiabilité du modèle de simulation développé sous Aspen HYSYS, la démarche consiste d'abord à le valider sur le fonctionnement réel de l'unité 18 du complexe GL3/Z, pour laquelle on dispose des données d'exploitation nécessaires (températures huile, débits, consommation de gaz combustible, températures des principaux utilisateurs).

L'objectif est de vérifier que le simulateur reproduit correctement le comportement du four 18-MB01 et de la boucle d'huile chaude, avant d'utiliser ce modèle pour l'étude de scénarios et l'optimisation de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude.

III-6-1- Évaluation des écarts entre la conception initiale et les résultats de simulation HYSYS :

Les résultats des simulations ont été réalisées à partir des données techniques fournies par le constructeur, correspondant au cas opératoire de référence BASE C 21 °C.

Les tableaux (III-1, III-2, III-3) synthétisent les résultats obtenus lors de la modélisation de l'unité du système d'huile chaude.

Tableau III-1 : Paramètres d'entrée et de sortie du Ballon 18-MD01

	Entrée de Ballon 18-MD01			Sortie de Ballon 18-MD01		
	Design	HYSYS	Erreur %	Design	HYSYS	Erreur %
Fraction Vapeur	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Température (°C)	166,2	166,5	0,18%	166,2	166,5	0,18%
Pression (kPa)	557	557	0,00%	555	555	0,00%
Débit massique (kg/h)	3 500 000	3 500 000	0,00%	3 500 000	3 500 000	0,00%
Fraction Molaires						
Torsada TC32	1	1	0,00%	1	1	0,00%
Hélium	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Argon	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Nitrogen	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Oxygen	0	0	0,00%	0	0	0,00%
CO2	0	0	0,00%	0	0	0,00%
H2O	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C1	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C2	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C3	0	0	0,00%	0	0	0,00%

L'huile chaude refroidie revient des utilisateurs vers le collecteur de retour, puis est envoyée au ballon tampon 18-MD01, où elle est dégazée et où les variations de volume dues à la température sont absorbées. À partir de la sortie de ce ballon, l'huile est ensuite aspirée et refoulée par les pompes de circulation 18-MJ01-A/B/C vers le reste de la boucle d'huile chaude. Le tableau III-1 montre que le modèle HYSYS reproduit correctement température, pression et débit à l'entrée et à la sortie du ballon, ce qui valide l'inventaire global de la boucle.

Tableau III-2 : Paramètres de sortie du Four 18-MB01, l'unité de récupération de chaleur de chaleur 18-ML02 et Moulure de Refroidisseur 18-MC02

	Sortie de Four 18-MB01			Sortie l'unité de récupération de chaleur 18-ML02			Sortie de Moulure de refroidisseur 18-MC02		
	Design	HYSYS	Erreur %	Design	HYSYS	Erreur %	Design	HYSYS	Erreur %
Fraction Vapeur	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Température (°C)	255	251	1,56%	277	277	0,00%	80	80	0,00%
Pression (kPa)	1 294	1 294	0,00%	1 294	1 294	0,00%	992	992	0,00%
Débit massique (kg/h)	900 000	900 000	0,00%	450 000	450 000	0,00%	84 578	84 578	0,00%
Fraction Molaires									
Torada TC32	1	1	0,00%	1	1	0,00%	1	1	0,00%
Helium	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Argon	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Nitrogen	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Oxygen	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
CO2	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
H2O	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C1	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C2	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C3	0	0	0,00%	0	0	0,00%	0	0	0,00%

Depuis les pompes 18-MJ01-A/B/C, l'huile chaude est refoulée vers le four 18-MB01 et l'unité de récupération de chaleur 18-ML02 via des vannes de contrôle qui assurent la détente de pression avant l'entrée, avec des débits d'environ 900 000 kg/h et 450 000 kg/h respectivement.

Les courants d'huile chaude issus du four 18-MB01 et de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02 sont ensuite mélangés dans le mélangeur statique 18-MU01, afin d'obtenir une température homogène correspondant **au niveau de température élevé de la boucle d'huile chaude**, qui alimente l'ensemble des utilisateurs du niveau haut.

Après élévation au niveau de température élevé, une partie du débit est dérivée vers la branche bas niveau, où un courant de l'ordre de 2 065 422 kg/h circule sur la ligne de bypass, tandis qu'environ 84 578 kg/h sont envoyés vers le refroidisseur 18-MC02, refroidis, puis mélangés à la ligne de bypass de manière à ajuster la température globale du circuit niveau bas.

Le tableau III-2 montre que le modèle HYSYS reproduit correctement les températures, pressions et débits aux sorties du four 18-MB01, de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02 et du refroidisseur 18-MC02, ce qui confirme la bonne représentation globale du comportement thermique de la boucle d'huile chaude.

Tableau III-3 : Paramètres de sortie du réchauffeur de gaz de régénération 13-MC02 et rebouilleur du Déméthaniseur 17-MC21

	Sortie d'échangeur 13-MC02			Sortie d'échangeur 17-MC21		
	Design	HYSYS	Erreur %	Design	HYSYS	Erreur %
Fraction Vapeur	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Température (°C)	150	150	0,00%	100	100	0,00%
Pression (kPa)	580	580	0,00%	641	641	0,00%
Débit massique (kg/h)	69 448	69 610	0,23%	217 533	217 000	0,25%
Fraction Molaires						
Torada TC32	1	1	0,00%	1	1	0,00%
Helium	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Argon	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Nitrogen	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Oxygen	0	0	0,00%	0	0	0,00%
CO2	0	0	0,00%	0	0	0,00%
H2O	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C1	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C2	0	0	0,00%	0	0	0,00%
C3	0	0	0,00%	0	0	0,00%

Les rebouilleurs et réchauffeurs reçoivent chacun un débit réglé par vanne de contrôle et renvoient l'huile refroidie au collecteur de retour vers 18-MD01, ce qui ferme la boucle.

Pour la validation du modèle, seuls les tableaux construits pour 13-MC02 au niveau de température élevé et 17-MC21 au niveau de température bas ont été exploités, et les faibles écarts de température et de débit observés sur ces deux équipements suffisent à confirmer la cohérence globale du modèle de la boucle d'huile chaude entre le ballon 18-MD01, le four 18-MB01, 18-ML02, 18-MC02 et la ligne de bypass.

Le tableau III-3 montre que le modèle HYSYS reproduit fidèlement les paramètres de sortie du réchauffeur de gaz de régénération 13-MC02 et du rebouilleur du Dééthaniseur 17-MC21, avec des écarts minimes de débit.

- Depuis les tableaux (III-1, III-2 et III-3), il apparaît que les simulations HYSYS reproduisent fidèlement le comportement du système d'huile chaude de l'unité 18, avec des écarts très faibles par rapport aux données de conception. Ces différences, généralement inférieures à 1-2 % sur les paramètres critiques tels que les débits, les températures et les pressions, confirment la robustesse du modèle thermodynamique sélectionné.
- Les tableaux comparatifs mettent également en évidence quelques divergences mineures, principalement liées à la complexité des équations physiques intégrées dans HYSYS ainsi qu'aux approximations propres à tout modèle de procédé. Toutefois, ces écarts restent négligeables et n'affectent en rien la validité globale du modèle établi. Par conséquent, une comparaison avec les données de conception s'avère suffisante pour lancer les simulations et aborder en toute confiance la phase d'optimisation.

III-7- Analyse de l'effet de la diminution de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude :

L'étude porte sur la température effective du niveau élevé de la boucle d'huile chaude, régulée par la consigne 18-TIC0023 et résultant du mélange de l'huile chauffée dans le four 18-MB01 et de celle issue de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02. Cette température constitue la variable de conduite principale du réseau, puisqu'elle conditionne directement l'alimentation thermique des utilisateurs du niveau élevé et, par cascade le comportement de la boucle au niveau bas.

La variation de cette température est obtenue par un ajustement maîtrisé de la température de sortie du four, tout en tenant compte de l'apport thermique de la WHRU. Les scénarios de simulation consistent à faire varier la consigne du niveau élevé et à analyser, pour chaque cas, l'impact de cette variation sur les principaux indicateurs de performance du système, notamment la consommation de fuel gaz du four, les températures et débits d'huile alimentant les principaux utilisateurs du niveau élevé, ainsi que la température de retour vers le ballon tampon 18-MD01. Cette démarche permet d'évaluer de manière quantitative les effets énergétiques, thermiques et opérationnels associés à la réduction de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude.

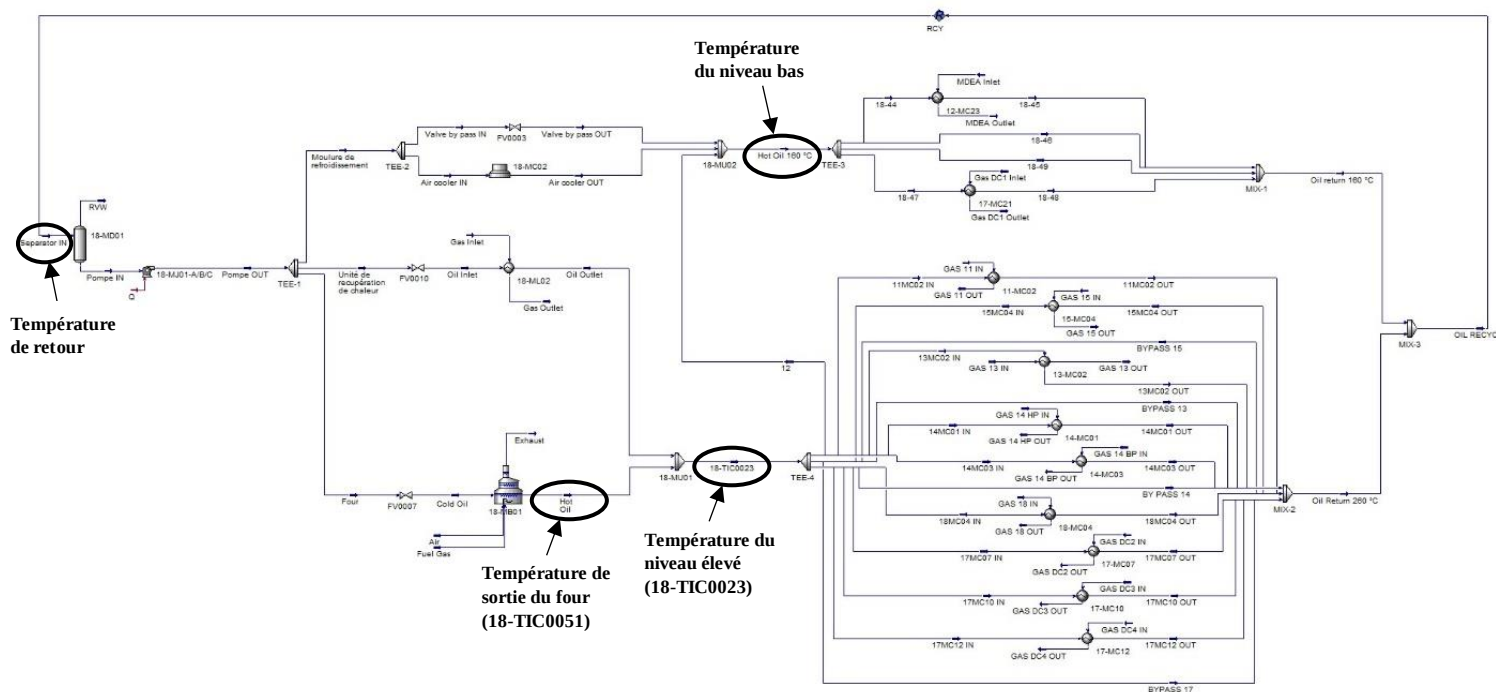


Figure III-8 : Localisation de Température du niveau élevé (18-TIC0023), Température de sortie du four (18-TIC0051), Température du niveau bas et Température de retour dans la boucle d'huile chaude.

III-7-1- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Température de sortie du Four (18-TI0050) :

Tableau III-4 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de sortie du four

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Température de sortie du Four 18-TI0050 (°C)
260	245
258	250,48
255	249,78
250	242,17
245	236,11
243	235,32
240	230,7
235	229,04
233	228

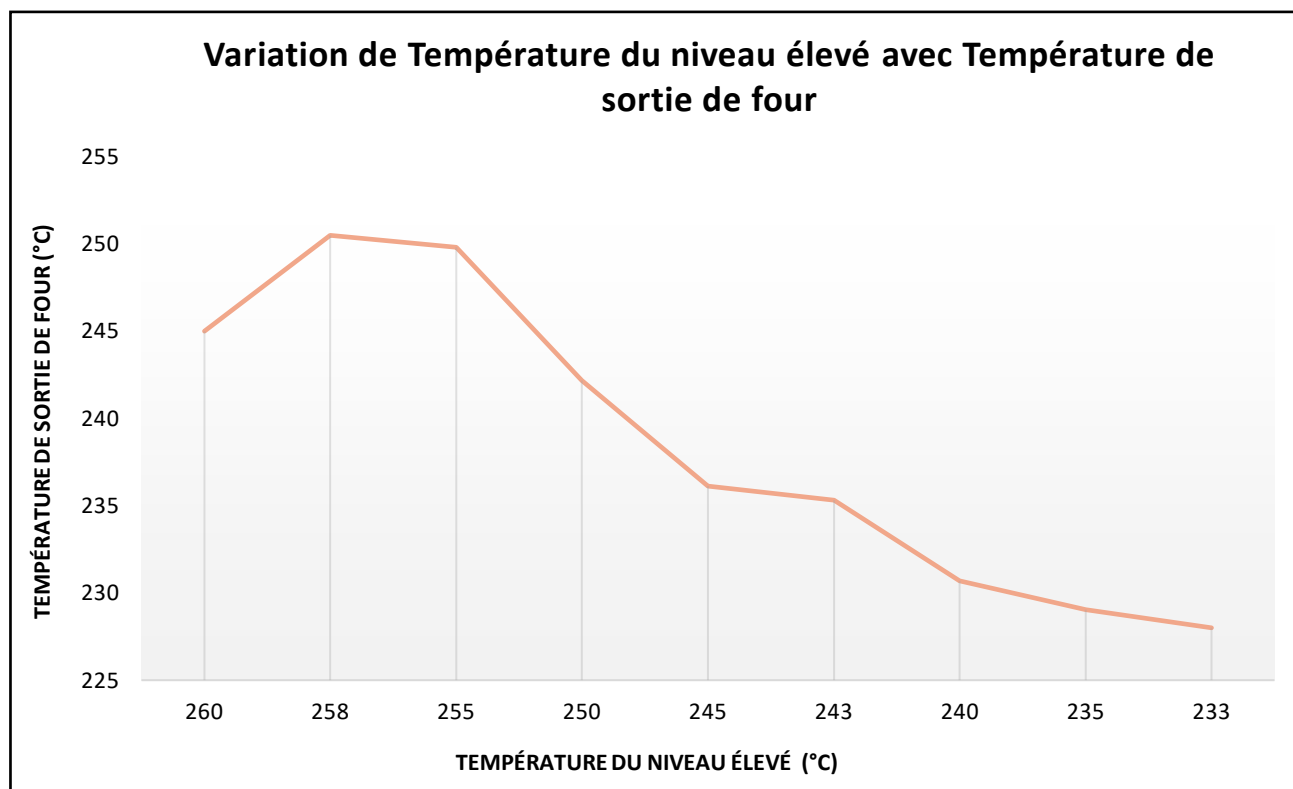


Figure III-9 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de sortie du four.

Le tableau et le graphe présentent l'évolution de la température de sortie du four 18-MB01 (18-TI0050) en fonction de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude, régulée par 18-TIC0023. Les valeurs analysées couvrent une plage comprise entre 260 °C et 233 °C, correspondant à des scénarios progressifs de réduction de la consigne thermique du niveau élevé, obtenus par ajustement des conditions opératoires du four et en tenant compte de la contribution de l'unité de récupération de chaleur. Les résultats montrent une relation directe et monotone entre la température du niveau élevé et la température de sortie du four. La diminution progressive de la consigne du niveau élevé se traduit par une baisse continue de la température de sortie du four, ce qui apparaît clairement sur le graphe par une courbe globalement décroissante. Cette évolution confirme que la réduction de la température demandée au niveau élevé conduit à une diminution de la charge thermique imposée au four.

Dans la plage comprise entre 260 °C et 250 °C, la baisse de la température du niveau élevé entraîne une diminution marquée de la température de sortie du four, traduisant une forte sensibilité du système de régulation dans cette zone de fonctionnement, où le four reste le principal contributeur thermique de la boucle d'huile chaude. En revanche, pour des températures du niveau élevé inférieures à 245 °C, la pente de la courbe devient moins prononcée, indiquant une atténuation de l'impact de la baisse de consigne sur la température de sortie du four. Ce comportement s'explique par une contribution plus importante de la récupération de chaleur, notamment via l'économiseur, ainsi que par l'action du système de contrôle visant à préserver la stabilité thermique de la boucle.

Ce comportement est conforme à la stratégie de régulation en cascade du système, dans laquelle le régulateur 18-TIC0023 adapte les conditions de fonctionnement du four afin de satisfaire les besoins thermiques réels des utilisateurs du niveau élevé tout en limitant les excès de température en sortie du four. La réduction de la température de sortie du four permet ainsi de diminuer les contraintes thermiques sur les équipements, tout en maintenant un fonctionnement stable de la boucle d'huile chaude.

Sur le plan opérationnel, l'ensemble des résultats met en évidence que la réduction progressive de la température du niveau élevé contribue à une diminution de la charge thermique du four, tout en restant compatible avec les exigences thermiques des utilisateurs du niveau élevé et les limites admissibles de l'huile thermique Torada TC32. Cette évolution participe à l'amélioration du comportement énergétique et opérationnel global de l'unité.

III-7-2- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Températures internes de four:

Tableau III-5 : Variation de Température du niveau élevé avec Températures internes de four

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	18TI5002A (°C)	18TI5005B (°C)	18TI5007A (°C)	18TI5008B (°C)
260	248,4	334,96	265,82	321,87
258	248,72	336,03	267,08	325,06
255	243,62	352,36	262,7	333,54
250	238,17	330,94	256,14	329,67
245	235,21	320,44	254,09	315,06
243	234,6	307,2	246,5	305,5
240	233,94	286,57	238,43	287,57
235	228,1	288,3	236,1	292,7
233	226,5	283,6	233,5	289,5

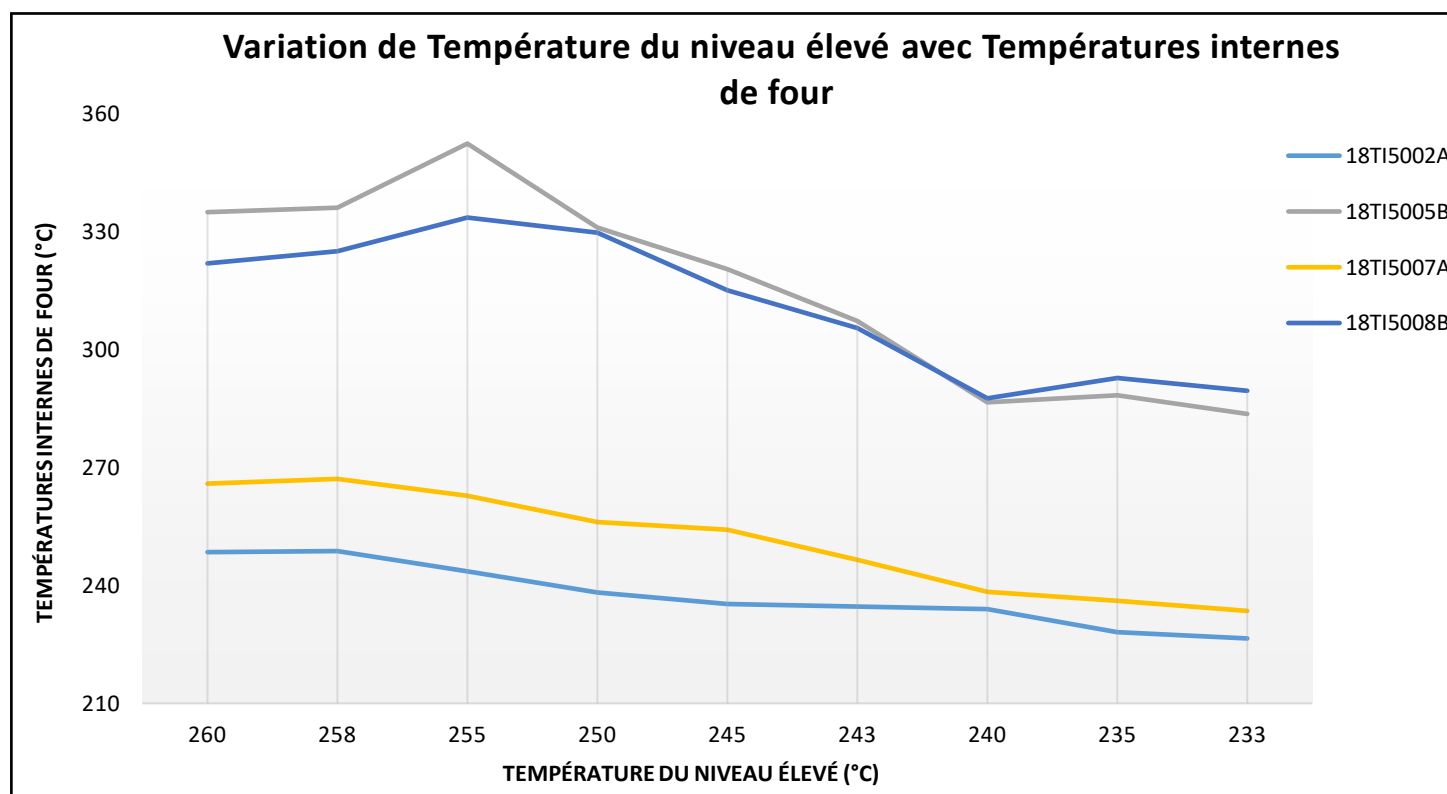


Figure III-10 : Variation de Température du niveau élevé avec Température internes de four.

Le tableau et le graphe présentent l'évolution des températures internes du four, communément appelées températures de pots, en fonction de la température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude (18-TIC0023). Ces températures internes correspondent aux températures mesurées au niveau des parois internes du four et des tubes, et constituent des indicateurs critiques du comportement de la flamme à l'intérieur du foyer. Une élévation excessive d'une température de pot traduit un rapprochement de la flamme vers les tubes, ce qui représente un risque accru de surchauffe locale et de fissuration des tubes, pouvant compromettre l'intégrité mécanique du four.

Plusieurs points de mesure de températures internes sont disponibles sur le four. Toutefois, dans le cadre de cette étude, quatre températures de pots représentatives ont été retenues (18TI5002A, 18TI5005B, 18TI5007A et 18TI5008B), afin d'analyser de manière synthétique l'impact de la réduction de la température du niveau élevé sur le comportement thermique interne du four.

Les résultats montrent une tendance globale à la diminution des températures internes du four lorsque la température du niveau élevé est progressivement abaissée de 260 °C à 233 °C. Cette évolution apparaît clairement sur le graphe, où l'ensemble des courbes associées aux températures de pots présente une allure globalement décroissante, bien que chaque point de mesure conserve une dynamique propre liée à sa position dans le foyer et à la distribution locale de la flamme.

Dans la plage de températures du niveau élevé comprise entre 260 °C et environ 250 °C, certaines températures de pots présentent des valeurs élevées, traduisant une sollicitation thermique importante des parois et des tubes, caractéristique d'un fonctionnement du four à charge thermique élevée. À mesure que la consigne du niveau élevé diminue, une réduction progressive des températures internes est observée, indiquant un éloignement relatif de la flamme par rapport aux tubes et une répartition thermique plus homogène à l'intérieur du foyer.

Pour des températures du niveau élevé inférieures à 245 °C, les températures de pots continuent de diminuer ou se stabilisent à des niveaux plus modérés, traduisant un fonctionnement thermique plus maîtrisé du four. Cette évolution reflète l'action combinée de la réduction de la charge thermique du brûleur et de l'adaptation du système de régulation, visant à maintenir la stabilité de la boucle d'huile chaude tout en limitant les contraintes thermiques internes.

Ce comportement est cohérent avec la stratégie de régulation en cascade du système, dans laquelle le régulateur 18-TIC0023 ajuste indirectement la puissance du four en fonction des besoins thermiques réels du niveau élevé. La diminution des températures de pots constitue ainsi un indicateur direct de l'amélioration des conditions de fonctionnement interne du four, en réduisant les risques de points chauds, de rapprochement excessif de la flamme et par conséquent, de dégradation prématurée des tubes.

Sur le plan opérationnel, ces résultats montrent que la réduction progressive de la température du niveau élevé a un impact favorable sur les températures internes du four, contribuant à un fonctionnement plus sûr et plus stable de l'équipement. La maîtrise des températures de pots constitue un levier essentiel pour la prévention des alarmes de surchauffe, l'allongement de la durée de vie des tubes et l'amélioration du comportement thermique global du four, tout en restant compatible avec les exigences de fonctionnement de la boucle d'huile chaude.

III-7-3- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Débit de gaz combustible :

Tableau III-6 : Variation de Température du niveau élevé avec débit de gaz combustible

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Débit de gaz combustible (kg/h)
260	3569,41
258	3561,69
255	3496,32
250	3246,2
245	3321,49
243	3107,97
240	2927,04
235	2980,19
233	2910,66

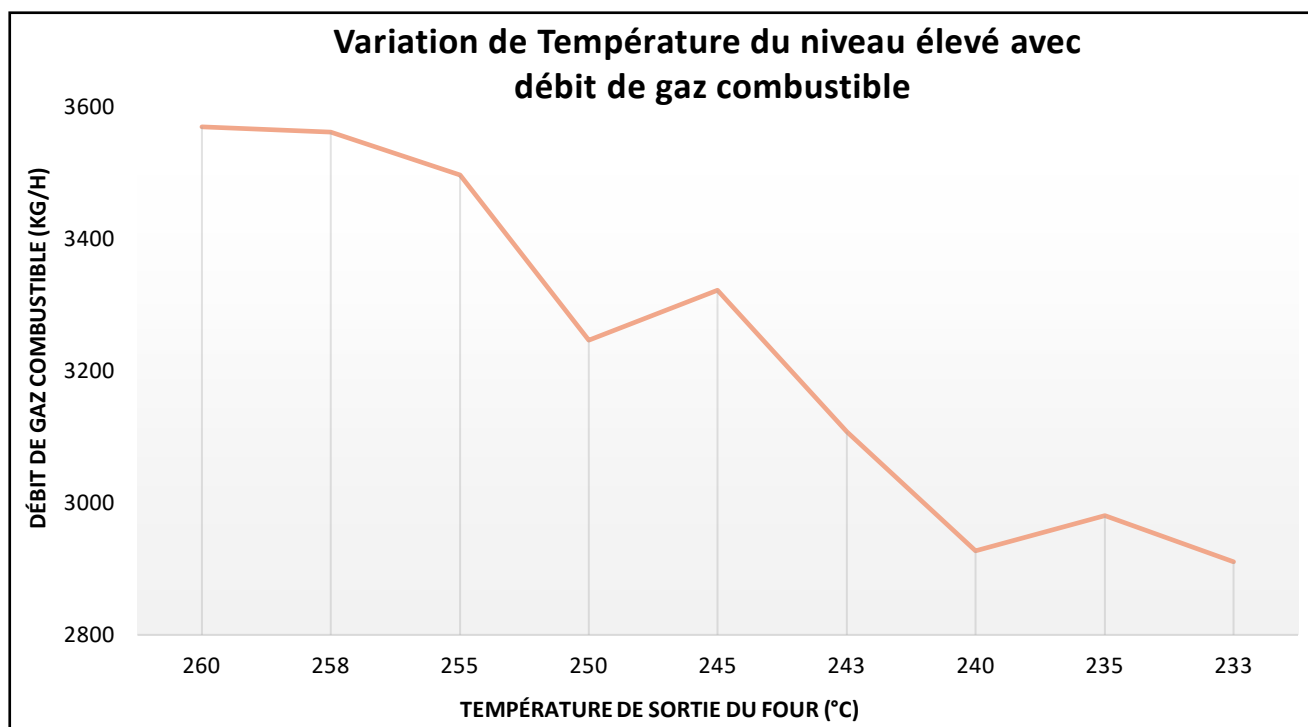


Figure III-11 : Variation de Température du niveau élevé avec débit de gaz combustible.

Le graphe et le tableau présentent l'évolution du débit de fuel gaz consommé en fonction de la température de sortie du four 18-MB01, correspondant à la température d'alimentation des utilisateurs du niveau élevé de la boucle d'huile chaude (régulée par 18-TIC0023). Les températures étudiées couvrent une plage comprise entre 260 °C et 233 °C, obtenue par ajustement des conditions opératoires du four et par l'optimisation de la récupération de chaleur au niveau de l'économiseur 18-ML02.

L'analyse des résultats met en évidence une tendance globale décroissante du débit de fuel gaz lorsque la température de sortie du four diminue. En effet, pour une température de 260 °C, le débit de fuel gaz atteint environ 3 569 kg/h, tandis qu'il diminue progressivement pour atteindre une valeur minimale d'environ 2 927 kg/h à 240 °C, soit une réduction de l'ordre de 640 kg/h, représentant un gain énergétique significatif.

Cette diminution traduit le fait qu'une réduction maîtrisée de la température du niveau élevé permet de satisfaire les besoins thermiques des utilisateurs avec une charge thermique plus faible du four, grâce notamment à la contribution accrue de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02. Le graphe illustre ainsi l'amélioration de l'efficacité énergétique globale de l'installation lorsque la température de sortie du four est abaissée.

Toutefois, la relation entre la température de sortie du four et le débit de fuel gaz n'est pas strictement linéaire. On observe notamment une augmentation ponctuelle du débit à 245 °C (3 321 kg/h) par rapport à 250 °C (3 246 kg/h), ainsi qu'une légère remontée du débit à 235 °C (2 980 kg/h) après le minimum observé à 240 °C. Ces fluctuations modérées peuvent s'expliquer par les ajustements dynamiques du système de régulation, qui cherche à maintenir la stabilité thermique de la boucle d'huile chaude, à garantir une bonne répartition des débits et à respecter les contraintes de sécurité et de conception de l'installation.

À partir de 240 °C, la courbe tend à s'aplatir, indiquant que la poursuite de la baisse de température ne se traduit plus par une réduction proportionnelle du débit de fuel gaz. Cette zone de fonctionnement correspond à un compromis optimal entre la réduction de la consommation énergétique du four et le maintien de marges de fonctionnement suffisantes pour assurer la stabilité et la fiabilité de la boucle d'huile chaude.

Sur le plan opérationnel, ces résultats confirment que l'abaissement de la température de sortie du four depuis la valeur nominale de 260 °C jusqu'à une valeur optimale d'environ 240 °C permet de minimiser la consommation de fuel gaz, tout en conservant un fonctionnement sûr et stable de la boucle d'huile chaude. Cette optimisation reste conditionnée au respect des limites thermiques de l'huile Torada TC32 (318 °C en mélange et 341 °C en film) et à la surveillance régulière des paramètres critiques, tels que les débits d'huile à l'entrée du four et de l'économiseur, les températures de sortie du four et de la WHRU, ainsi que la teneur en O₂ dans les fumées.

D'un point de vue énergétique et environnemental, la réduction du débit de fuel gaz observée se traduit directement par une diminution de la consommation de gaz combustible BP et, par conséquent, par une réduction des émissions de CO₂ associées à la combustion dans le four 18-MB01, ce qui s'inscrit pleinement dans l'objectif global d'optimisation énergétique de l'unité 18.

III-7-4- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Débits d'huile des utilisateurs:

Tableau III-7 : Variation de Température du niveau élevé avec Débits d'huile des utilisateurs

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Débit d'huile 13-MC02 (m ³ /h)	Débit de gaz de régénération 13-MC02 (kg/h)	Débit d'huile 14-MC01 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC07 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC10 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC12 (m ³ /h)
260	200	44 000	68,08	255,88	143,05	41,76
258	200	44 000	69,03	255,27	141,81	44,25
255	200	43 000	74,58	249,78	140,94	49,23
250	200	43 000	75,57	258,17	174,97	55,74
245	200	46 000	67,06	248,62	159,72	54,59
243	200	4 600	70,32	249,23	160,08	55,93
240	200	43 000	77,87	258,44	160,41	57,79
235	200	44 000	83,52	266,74	165,71	61,6
233	200	46 000	94,31	289,69	168,02	79,96

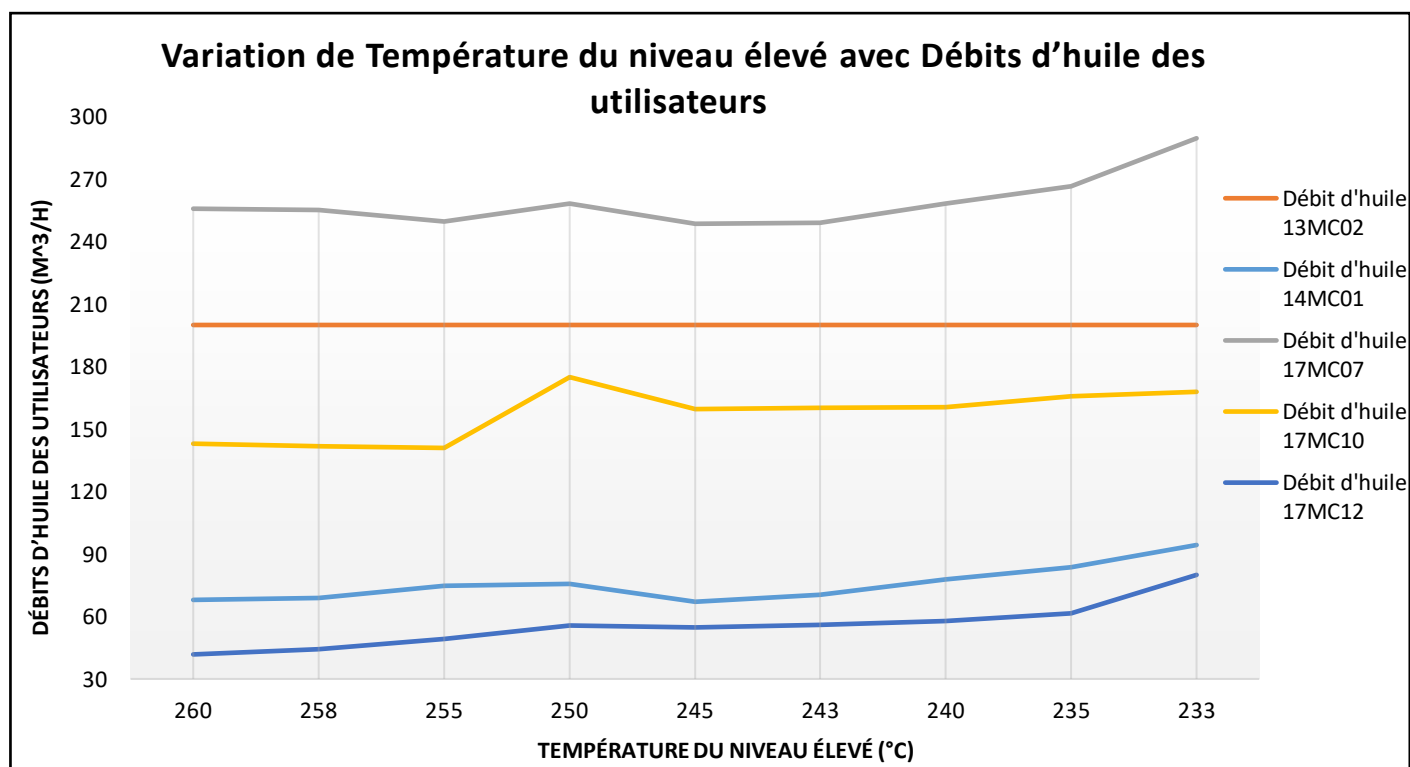


Figure III-12 : Variation de Température du niveau élevé avec Débits d'huile des utilisateurs.

Le tableau et le graphe présentent, pour différents scénarios de température du niveau élevé de la boucle d'huile chaude, les débits d'huile alimentant les principaux utilisateurs du niveau haut, à savoir le réchauffeur de gaz 13-MC02, le réchauffeur de gaz combustible 14-MC01, ainsi que les rebouilleurs 17-MC07, 17-MC10 et 17-MC12. Les températures étudiées varient autour de la valeur nominale de 260 °C, avec une diminution progressive jusqu'aux scénarios les plus bas, afin d'évaluer l'impact de l'ajustement de la consigne 18-TIC0023 sur la répartition hydraulique du réseau d'huile chaude.

Pour le réchauffeur 13-MC02, le débit d'huile est maintenu constant à 200 m³/h pour l'ensemble des cas étudiés, tandis que le débit de gaz traité varie selon les besoins du cycle de régénération. Ce choix opérationnel traduit la volonté de garantir un fonctionnement thermique stable de cet équipement critique, sans solliciter davantage le réseau d'huile chaude.

Pour les autres utilisateurs, les résultats mettent en évidence une tendance globale à l'augmentation des débits d'huile lorsque la température du niveau élevé diminue, ce qui se traduit sur le graphe par des courbes globalement croissantes. À titre d'exemple, le débit vers 14-MC01 et les rebouilleurs 17-MC07 et 17-MC10 augmente sensiblement dans les scénarios de température basse, traduisant une compensation hydraulique de la baisse du niveau thermique disponible.

Ce comportement est cohérent avec les principes du transfert thermique : en réduisant la température d'alimentation de l'huile, le gradient de température disponible au niveau de chaque échangeur diminue, ce qui impose d'augmenter le débit de fluide caloporteur pour transmettre la même puissance thermique aux gaz ou liquides de procédé et maintenir les températures de sortie dans les spécifications des unités aval. Le comportement observé est cohérent avec la philosophie de contrôle décrite : chaque utilisateur du niveau élevé dispose de sa propre boucle de régulation de débit d'huile, commandée par vanne de contrôle, de sorte que la quantité d'huile admise s'ajuste automatiquement en fonction de la charge thermique demandée, tandis que l'excédent éventuel est recyclé vers le ballon tampon 18-MD01 via les lignes de bypass et les vannes de régulation de pression prévues en bout de collecteurs.

L'analyse détaillée montre néanmoins que cette augmentation n'est pas strictement linéaire, avec des zones de relative stabilisation autour de certaines températures intermédiaires. Cela traduit un équilibre favorable entre la contribution thermique du four 18-MB01 et celle de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02, dont l'apport permet de limiter les besoins supplémentaires en débit d'huile lorsque la consigne du niveau élevé est abaissée.

Du point de vue opérationnel, ces résultats confirment que la réduction modérée de la température du niveau élevé peut être compensée par une redistribution intelligente des débits d'huile vers les utilisateurs, grâce au système de pompes 18-MJ01-A/B/C régulées à débit quasi constant et au jeu de boucles de contrôle locales qui ajustent automatiquement le débit sur chaque branche en fonction de la chaleur requise. La présence de lignes de bypass manuelles et automatiques au bout de chaque sous-collecteur évite la création de bras morts lorsque certains échangeurs sont hors service et permet de renvoyer vers 18-MD01 la fraction d'huile non utilisée, ce qui contribue à stabiliser la température de retour et à protéger l'huile Torada TC32 contre les surchauffes localisées ou les vitesses trop faibles dans les tubes du four. En résumé, le tableau et le graphe démontrent que le réseau d'huile chaude a la flexibilité hydraulique nécessaire pour absorber la baisse de consigne du niveau haut en augmentant les débits d'huile dans les échangeurs les plus sollicités, tout en maintenant les conditions de fonctionnement dans les limites de design fixées de l'unité 18.

III-7-5- Température du niveau élevé (18-TIC0023) vs Température de retour :

Tableau III-8 : Variation de température du niveau élevé avec Température de retour

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Température de retour 18-TI0002 (°C)
260	176,01
258	170,43
255	171,06
250	168,07
245	166,36
243	167,02
240	164,08
235	165,76
233	165,13

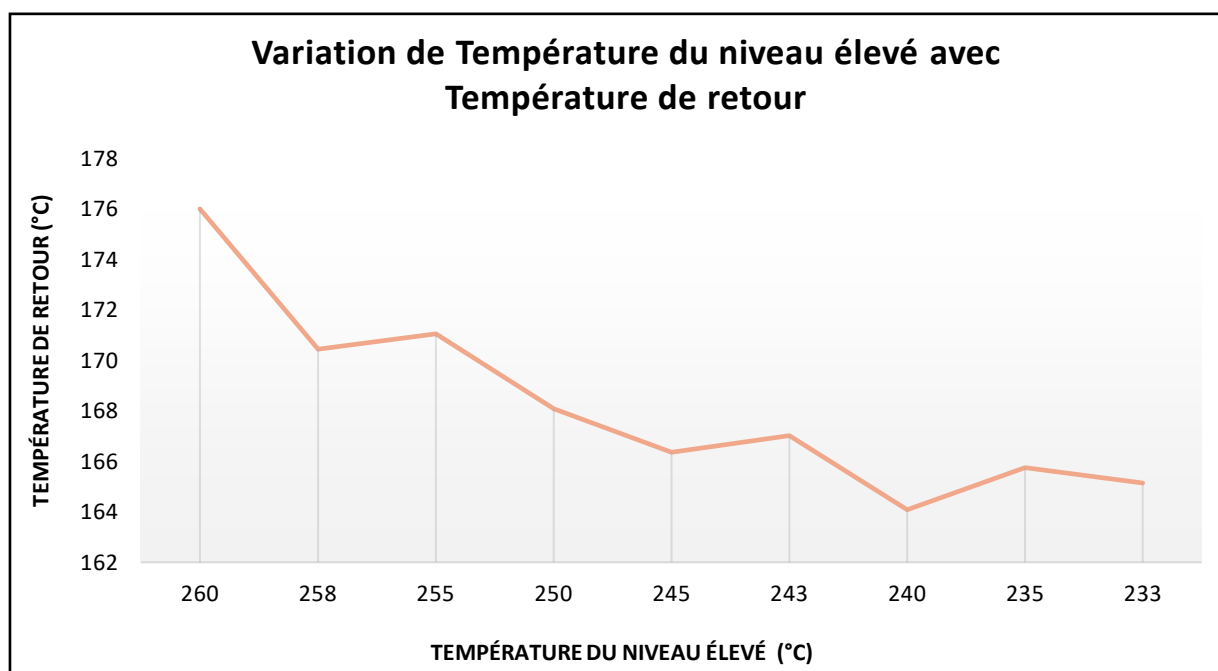


Figure III-13 : Variation de Température du niveau élevé avec Température de retour.

Le tableau et le graphe présentent l'évolution conjointe de la température de sortie du niveau élevé de la boucle d'huile chaude et de la température de retour vers le ballon tampon 18-MD01 pour différents scénarios de fonctionnement de l'unité 18. Les températures du niveau élevé étudiées se situent dans une plage relativement restreinte, comprise entre 260 °C et 233 °C, autour de la valeur nominale de 260 °C, ce qui permet d'analyser avec précision l'impact de variations modérées de consigne sur le bilan thermique global du réseau d'huile chaude.

Les résultats mettent en évidence une tendance générale à la diminution de la température de retour (18-TI0002) lorsque la température du niveau élevé est abaissée. En effet, la température de retour passe d'environ 176–168 °C pour les consignes les plus élevées à une plage comprise entre 164 et 166 °C pour les scénarios de température basse. Cette évolution se traduit sur le graphe par une courbe globalement décroissante, illustrant que la réduction de la consigne du niveau haut conduit à une charge thermique globale moindre extraite par les utilisateurs, avec une température de retour qui se rapproche progressivement de celle du niveau bas, située autour de 160 °C.

Ce comportement est cohérent avec la philosophie de conception et d'exploitation de la boucle d'huile chaude : les pompes 18-MJ01-A/B/C assurent un débit global quasi constant, tandis que chaque utilisateur ajuste localement sa consommation thermique via des boucles de régulation dédiées. L'huile non consommée ou partiellement refroidie est ensuite recyclée vers le ballon tampon 18-MD01, de sorte que la température de retour résulte d'un équilibre global entre les puissances échangées au niveau des utilisateurs du niveau élevé, l'apport thermique du four 18-MB01 et celui de l'unité de récupération de chaleur 18-ML02.

L'analyse détaillée met toutefois en évidence une relation non strictement linéaire entre la température du niveau élevé et la température de retour. Un palier est notamment observé autour de la plage 240–235 °C, où la température de retour se stabilise autour de 166–165 °C. Cette zone traduit un point de fonctionnement favorable, dans lequel l'équilibre entre la contribution du four, l'apport de la WHRU et les besoins thermiques des échangeurs du niveau élevé limite les variations de la température de retour malgré la poursuite de la baisse de consigne.

Du point de vue opérationnel, la baisse progressive de la température de retour rapproche l'huile des conditions du niveau bas, ce qui permet de réduire significativement l'effort de refroidissement requis au niveau de la moulure 18-MC02. Lorsque la température de retour descend en dessous d'environ 168 °C, il devient possible de ne pas mettre en service les aéro-refroidisseurs (ventilateurs d'air étanche), en s'appuyant sur une circulation naturelle ou sur un mélange minimal avec le niveau chaud. Cette configuration permet d'optimiser la consommation électrique associée au refroidissement (jusqu'à 3 ventilateurs de 11 kW par baie), tout en respectant les spécifications thermiques des utilisateurs du niveau bas (notamment 12-MC23-A/B et 17-MC21) et en contribuant à la protection de l'huile Torada TC32 contre les risques de surchauffes localisées.

En résumé, le tableau et le graphe mettent clairement en évidence la flexibilité thermique de la boucle d'huile chaude de l'unité 18. Une réduction modérée et maîtrisée de la consigne de température du niveau élevé entraîne un abaissement progressif de la température de retour vers le niveau bas, ce qui autorise l'arrêt des aéro-refroidisseurs et génère des gains énergétiques significatifs, sans compromettre la stabilité du réseau ni les limites de conception de l'installation.

III-8- Choix de la température optimale du niveau élevé :

L'analyse conjointe des cinq tableaux et graphes issus des simulations Aspen HYSYS permet d'identifier une température optimale du niveau élevé de la boucle d'huile chaude égale à 240 °C, correspondant au meilleur compromis entre réduction de la consommation de fuel gaz, flexibilité hydraulique du réseau et optimisation des auxiliaires du niveau bas.

Sur le plan hydraulique, la diminution de la température du niveau élevé à 240 °C entraîne une augmentation maîtrisée des débits d'huile vers les utilisateurs du niveau élevé, permettant de compenser la réduction du gradient thermique disponible. Les débits observés à cette température (14-MC01 $\approx$ 78 m³/h, 17-MC07 $\approx$ 258 m³/h, 17-MC10 $\approx$ 160 m³/h) demeurent inférieurs aux capacités nominales des pompes de circulation 18-MJ01-A/B/C, confirmant la capacité du réseau d'huile chaude à absorber cette redistribution sans surcharge hydraulique ni perte de stabilité.

La température de retour se stabilise autour de 164–165 °C, valeur proche de la consigne du niveau bas (160 °C), permettant l'arrêt des aéro-refroidisseurs de la moulure 18-MC02 et la réduction de la consommation électrique associée (jusqu'à 3 × 11 kW par baie). Ce point de fonctionnement respecte l'ensemble des contraintes de design du manuel opératoire et maintient un ΔT efficace au niveau du four, avec un gain net de l'ordre de 10 à 12 °C en sortie pour une baisse limitée de la température de retour.

Le choix de 240 °C repose sur une approche d'optimisation multicritères, visant la minimisation de la consommation énergétique globale (fuel gaz + auxiliaires électriques) sous contraintes techniques (débits utilisateurs < 110 % du nominal, température de retour $\approx$ 160 °C, température de film < 341 °C), validée par les simulations Aspen HYSYS et la confrontation aux données d'exploitation de l'unité 18.

Sur le plan opérationnel, l'optimisation consiste à ajuster la consigne 18-TIC0023 à 240 °C en cascade sur 18-PIC5005, à surveiller la stabilisation des débits du four et de la WHRU, puis à confirmer l'arrêt des ventilateurs lorsque la température de retour devient inférieure à 168 °C, générant des économies énergétiques globales estimées entre 3 et 5 %.

En résumé, le réglage optimal à 240 °C démontre la capacité du système d'huile chaude à absorber une réduction contrôlée de consigne (-20 °C par rapport au nominal) tout en garantissant des gains énergétiques significatifs, une stabilité hydraulique satisfaisante et le respect des limites de conception de l'unité 18.

III-9- Influence de la charge d'exploitation sur le fonctionnement de la boucle d'huile chaude :

Après avoir défini la température optimale de fonctionnement du niveau élevé à 240 °C, il est nécessaire d'analyser l'influence de la charge d'exploitation sur le comportement thermique et hydraulique de la boucle d'huile chaude, afin d'évaluer la robustesse de ce réglage dans différentes conditions opératoires.

Tableau III-9 : Variation des débits d'huile des utilisateurs et du fuel gaz avec la charge

Charge d'exploitation (tonne/jour)	Débit de gaz combustible 18FI0012	Débit d'huile 13-MC02 (m ³ /h)	Débit de gaz de régénération 13-MC02 (kg/h)	Débit d'huile 14-MC01 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC07 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC10 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC12 (m ³ /h)
238,05	3320,39	200	4000	52,78	177,25	134,82	47,63
510,66	3482,36	200	44000	66,27	232,67	138,4	48,69
666,68	3569,41	200	44000	68,08	255,88	143,05	41,76
709,76	3940,72	200	43000	71,97	263,41	148,96	52,9

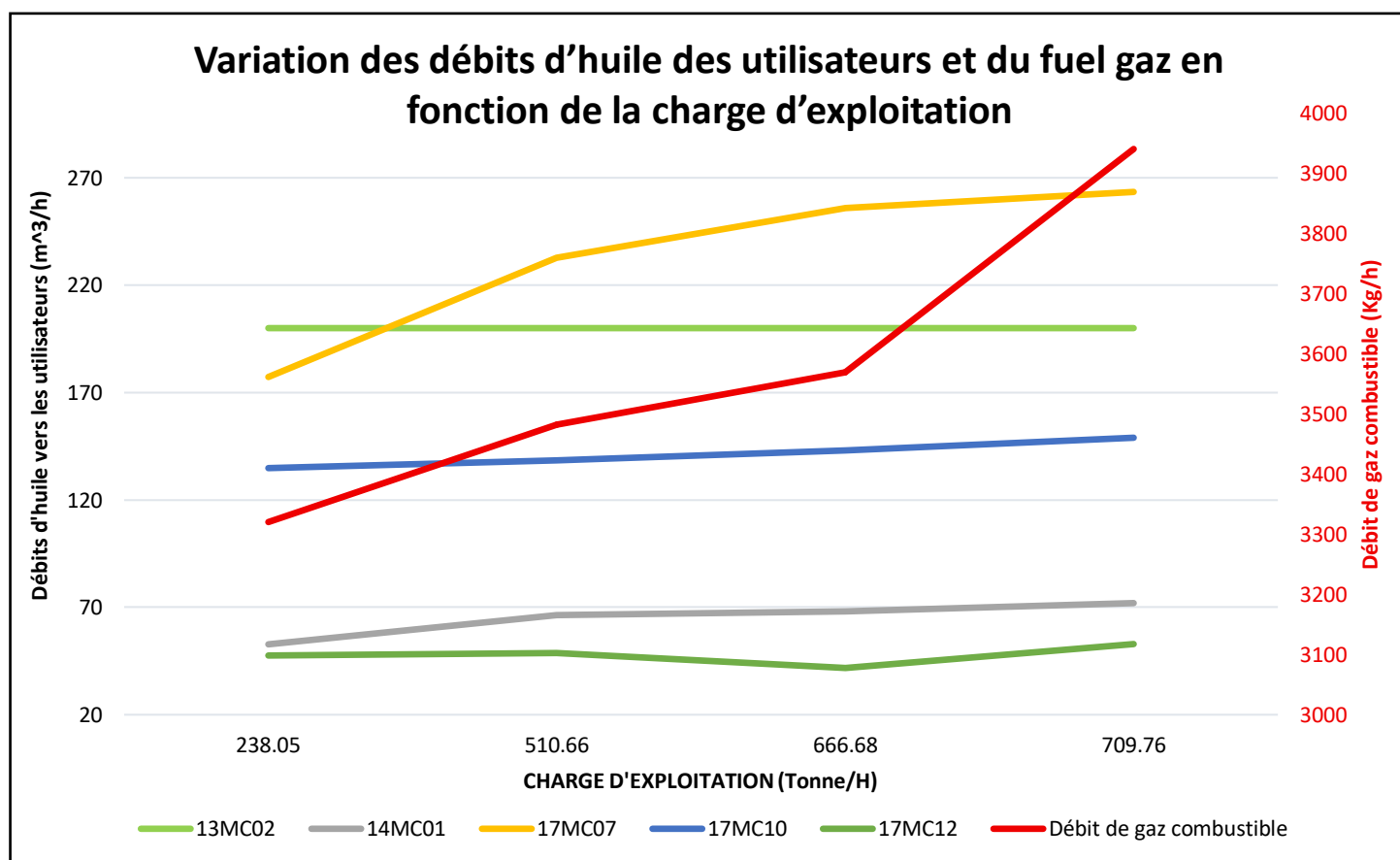


Figure III-14 : Variation des débits d'huile des utilisateurs et du fuel gaz avec la charge

Le tableau et le graphe illustrent l'évolution des débits d'huile chaude alimentant les utilisateurs du niveau élevé ainsi que du débit de fuel gaz consommé par le four 18-MB01, en fonction de la charge d'exploitation, pour une température du niveau élevé maintenue constante à 260 °C (consigne 18-TIC0023). Les charges d'exploitation considérées dans cette analyse sont issues de l'historique de fonctionnement de l'unité sur la période comprise entre le 01/03/2025 et le 01/05/2025.

En effet, lorsque la charge d'exploitation augmente de 238 t/j à environ 710 t/j, le débit de fuel gaz passe d'environ 3 320 kg/h à près de 3 940 kg/h, traduisant l'effort thermique supplémentaire requis pour satisfaire les besoins des échangeurs du niveau élevé. Cette augmentation est accompagnée d'une élévation progressive des débits d'huile vers les principaux utilisateurs, notamment 14-MC01 et les rebouilleurs 17-MC07, 17-MC10 et 17-MC12, confirmant que les charges procédées plus élevées exigent une puissance thermique plus importante pour maintenir les conditions de fonctionnement aval.

Ce comportement est conforme aux principes thermodynamiques et à la philosophie de régulation du système : pour une température de niveau élevé donnée, l'augmentation des charges procédé impose soit une augmentation du débit d'huile chaude, soit une sollicitation accrue du four par augmentation du débit de fuel gaz, afin de maintenir les températures de sortie requises au niveau des utilisateurs. Les pompes 18-MJ01-A/B/C assurent ainsi un débit global quasi constant, tandis que les boucles locales de régulation ajustent la répartition des débits en fonction de la demande thermique réelle.

Dans le cadre de cette étude, les simulations et analyses ont été volontairement réalisées en conditions de charge d'exploitation élevée, correspondant à un scénario pénalisant du point de vue énergétique. Ce choix renforce la robustesse des conclusions obtenues : malgré une charge élevée, il a été démontré qu'une réduction maîtrisée de la température du niveau élevé jusqu'à 240 °C reste compatible avec le fonctionnement stable de la boucle d'huile chaude, tout en permettant une diminution significative de la consommation de fuel gaz et l'optimisation des auxiliaires du niveau bas.

Par conséquent, pour des charges d'exploitation plus légères, les besoins thermiques des utilisateurs étant réduits, il devient d'autant plus envisageable et même recommandé d'abaisser la consigne de température du niveau élevé à 240 °C, voire de disposer d'une marge opérationnelle supplémentaire, tout en respectant les contraintes de conception et en maximisant les gains énergétiques globaux de l'unité 18.

CHAPITRE IV :

ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE

IV-1- Analyse de l'impact environnemental :

IV-1-1- Réduction des émissions de gaz à effet de serre :

1- Définition des gaz à effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel dû à la présence de certains gaz dans l'atmosphère, appelés gaz à effet de serre (GES), capables d'absorber et de piéger une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre. Ce mécanisme permet de maintenir une température moyenne compatible avec la vie sur Terre.

Cependant, l'augmentation excessive de la concentration de ces gaz, principalement liée aux activités industrielles et à la combustion des combustibles fossiles, accentue l'effet de serre naturel et entraîne un réchauffement climatique, susceptible de perturber les équilibres environnementaux et de menacer les écosystèmes.

2- Approche méthodologique pour l'estimation des émissions de GES :

Les méthodes d'estimation des émissions des gaz à effet de serre consistent à combiner des informations sur l'étendue des activités ; appelées données sur les activités ou (D.A) avec les coefficients qui quantifient les émissions ou les absorptions par unité d'activité (appelées facteurs d'émissions FE). L'équation de base est la suivante :

$$\text{Emissions des GES (E)} = D.A \times FE$$

Dans cette étude, cette méthode est appliquée afin d'évaluer la réduction des émissions de GES résultant de l'optimisation du fonctionnement du four 18-MB01 par l'abaissement de la température de sortie de l'huile chaude.

L'optimisation étudiée consiste à réduire la température d'huile chaude du niveau élevé de 260 °C à 240 °C, ce qui entraîne une diminution du débit de gaz combustible (éthane) utilisé par le four.

Les débits de gaz combustible sont :

- Avant optimisation : 3 600 kg/h,
- Après optimisation : 2 900 kg/h
- L'énergie annuelle économisée est alors :

$$D.A = \Delta m_{an} \times PCS \text{ [11]}$$

- En considérant un fonctionnement annuel de 330 jours, la réduction du débit massique de combustible est :

$$\Delta m_{an} = 3600 - 2900 = 700 \frac{kg}{h} = 5\,544\,000 \frac{kg}{an}$$

- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) de l'éthane est pris égal à : $PCS_{C_2H_6} = 65\,860 \text{ kJ/kg}$

On obtient : $D.A = 5\,544\,000 \times 65\,860 = 365\,127\,840\,000 \frac{KJ}{an} = 365,127 \frac{TJ}{an}$

Tableau IV-1: Les facteurs d'émission estimés pour le gaz de combustion C_2H_6 (kg/TJ) [11]

FE CO₂	61600
FE CH₄	1
FE N₂O	0,1

Alors nous calculons les émissions des gaz suivants :

$$E_{CO_2} = 61600 \times 365,127 \times 10^{-3} = 22\,491,82 \text{ t CO}_2/an$$

$$E_{CH_4} = 1 \times 365,127 \times 10^{-3} = 0,3651 \text{ t CH}_4/an$$

$$E_{N_2O} = 0,1 \times 365,127 \times 10^{-3} = 0,03651 \text{ t N}_2O/an$$

La formule ci-après est utilisée pour le calcul de la quantité totale des émissions de CO_2 , CH_4 et N_2O en équivalent CO_2 [11] :

$\text{Emissions des gaz } (E_{GES}) = \text{Emission } CO_2 \times 1 + \text{Emission } CH_4 \times 25 + \text{Emission } N_2O \times 298$

$$E_{GES} = 22\,491,82 \times 1 + 0,3651 \times 25 + 0,03651 \times 298 = 22\,512 \text{ t eq CO}_2/an$$

Les résultats montrent que l'optimisation du fonctionnement du système d'huile chaude, par la réduction de la température de sortie, permet de diminuer significativement les émissions de gaz à effet de serre.

La réduction estimée à **22 512 t eq CO₂ par année** illustre qu'une action purement opérationnelle peut générer un bénéfice environnemental majeur, en cohérence avec les objectifs de transition énergétique et de réduction de l'empreinte carbone des installations industrielles.

IV-2- Analyse énergétique comparative :

IV-2-1- Rendement thermique du four :

L'analyse énergétique comparative vise à évaluer l'impact de la réduction de la température de sortie d'huile chaude sur son rendement thermique et sur la consommation de combustible.

Deux régimes de fonctionnement sont comparés :

- **Fonctionnement nominal** : Température de sortie du four = 260 °C
- **Fonctionnement optimisé** : Température de sortie du four = 240 °C

Afin d'obtenir une comparaison cohérente, le débit massique d'huile thermique circulant dans le four est maintenu constant dans les deux cas, soit : $Q_{huile} = 900\,000\text{ kg/h}$

De même, le rendement est calculé sur la base des températures réelles en sortie du four, et non sur la température après mélange avec l'huile issue de l'économiseur (WHRU), car l'objectif est d'évaluer la performance propre du four.

Le rendement thermique du four est défini par le rapport entre :

- La puissance utile transmise à l'huile thermique,
- La puissance thermique fournie par la combustion du gaz combustible.

$$\eta = \frac{Q_{utile}}{Q_{combustible}}$$

1- Puissance thermique utile transmise à l'huile :

La puissance utile est donnée par :

$$Q_{utile} = Q_{huile} \times Cp \times (T_2 - T_1)$$

Avec :

- ✓ Q_{huile} : Débit massique d'huile (kg/h),
- ✓ Cp : Chaleur spécifique de l'huile (kJ/kg.°C),
- ✓ T_2 : Température réelle de sortie du four (°C),
- ✓ T_1 : Température d'entrée du four (°C).

2- Puissance thermique fournie par le combustible :

La puissance thermique fournie par le gaz combustible est calculée à partir du PCS :

$$Q_{combustible} = Q_{fuel} \times PCS$$

Avec :

- ✓ Q_{fuel} : Débit massique de gaz combustible (kg/h),
- ✓ PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) de combustible **65860 kJ/kg**.

Après une application numérique on trouve les résultats suivants :

Tableau IV-2 : Résultats du calcul du rendement du four pour les cas nominal et optimisée

	Cas nominal (260 °C)	Cas optimisée (240 °C)
Q_{huile} (kg/h)	900 000	900 000
Cp (kJ/kg.°C)	2,5654	2,5319
T_2 (°C)	245	231
T_1 (°C)	176	164
Q_{fuel} (kg/h)	3600	2900
PCS (kJ/kg)	65 860	65 860
Rendement η (%)	67,19	79,93

Les résultats obtenus montrent clairement que l'abaissement de la température de sortie d'huile chaude du niveau élevé de 260 °C à 240 °C se traduit :

- Par une diminution significative du débit de gaz combustible,
- Par une augmentation sensible du rendement thermique du four.

Cette amélioration du rendement résulte d'une meilleure adéquation entre la charge thermique demandée et la puissance effectivement fournie par le four, ainsi que d'une réduction des pertes thermiques associées aux fumées et aux parois maintenues à haute température.

IV-2-2- Analyse de l'autoconsommation énergétique du four :

L'autoconsommation énergétique du complexe GL3/Z correspond à la quantité d'énergie consommée par les équipements internes du complexe pour assurer la production du GNL et des sous-produits, notamment les turbines à gaz, les fours industriels et les utilités.

Le four 18-MB01 constitue l'un des principaux contributeurs à cette autoconsommation, du fait de la combustion du fuel gaz (éthane ou gaz naturel équivalent).

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'impact de l'optimisation de la température de sortie d'huile chaude sur la réduction de l'autoconsommation énergétique, exprimée en gaz naturel équivalent (m^3 eq GN), conformément à la méthode de suivi de performance du complexe.

Les résultats de l'analyse énergétique ont montré une diminution du débit de combustible consommé par le four après optimisation :

- Avant optimisation (260 °C) : $Q_{fuel} = 3\,600\text{ kg/h}$
- Après optimisation (240 °C) : $Q_{fuel} = 2\,900\text{ kg/h}$
- La réduction horaire de consommation est donc : $\Delta Q = 700\text{ kg/h}$
- Sur une journée de fonctionnement continu : $\Delta Q = 16\,800\text{ kg/j}$

L'économie annuelle d'énergie est d'abord calculée sous forme de volume équivalent de gaz naturel ΔAC :

$$\Delta AC = \frac{\Delta Q}{\rho_{C_2}} \times \frac{PCS_{C_2}}{PCS_{GN}} \times 330$$

- Ensuite, le gain relatif est obtenu en rapportant cette économie à l'autoconsommation énergétique annuelle totale du complexe

$$Gain_{(AC)} = \frac{\Delta AC}{AC_{total}} \times 100$$

ΔAC : Economie annuelles d'énergie exprimée en gaz naturel équivalent (m^3 eq GN/an)

$Gain_{AC}$: Gain relatif sur l'autoconsommation énergétique annuelle du complexe GL3/Z (%),

ΔQ : Réduction journalière de la quantité d'éthane consommée par le four suite à l'optimisation du régime de fonctionnement (kg/j),

ρ_{C_2} : Masse volumique de l'éthane, utilisée pour convertir la masse économisée en volume équivalent (kg/m^3),

PCS_{C_2} : Pouvoir calorifique supérieur de l'éthane ($\text{thermie}/\text{m}^3$),

PCS_{GN} : Pouvoir calorifique supérieur du gaz naturel de référence, utilisé pour exprimer l'énergie sous forme de volume équivalent en gaz naturel ($\text{thermie}/\text{m}^3$),

330 : Nombre de jours de fonctionnement annuel du complexe GL3/Z,

AC_{total} : Autoconsommation énergétique annuelle totale du complexe, exprimée en volume équivalent gaz naturel ($\text{m}^3 \text{ eq GN/an}$).

Après une application numérique on trouve les résultats suivants :

Tableau IV-3 : Résultats du calcul du gain d'autoconsommation énergétique

Indicateur	Valeur
ΔQ (kg/j)	16 800
ρ_{C_2} (kg/m ³)	1,2684
PCS_{C_2} (thermie/m ³)	15,7373
PCS_{GN} (thermie/m ³)	9,3808
AC_{total} (m ³ eq GN/an)	770 473 152
$Gain_{AC}$ (%)	0,952

Sur une autoconsommation annuelle totale du complexe de **770 473 152 cm³ eq GN/an**, l'optimisation génère un gain de **0,952 %**. Bien que ce pourcentage puisse paraître modéré à l'échelle globale du complexe, ce gain est particulièrement pertinent au regard de la simplicité de la mesure mise en œuvre et de son effet direct sur la consommation énergétique globale.

Cette mesure optimise non seulement la consommation de combustible, mais aussi :

- Les émissions de gaz à effet de serre proportionnelles à la combustion réduite,
- Les charges thermiques sur les parois et fumées du four, prolongeant sa durée de vie,
- La flexibilité opérationnelle, facilitant une intégration avec d'autres optimisations (ex. : récupération WHRU),
- La contribution à des objectifs ESG du complexe, via une efficacité énergétique accrue sans compromettre la production.

IV-3- Analyse de l'impact économique :

IV-3-1- Évaluation du gain financier lié à la réduction de l'autoconsommation énergétique :

L'optimisation du régime de fonctionnement du système d'huile chaude, ayant permis une réduction mesurable de l'autoconsommation énergétique du complexe GL3/Z, se traduit également par un gain financier significatif. Ce gain est évalué sur la base du volume annuel d'énergie économisé, exprimé en gaz naturel équivalent ($\text{m}^3 \text{ eq GN}$), et du coût unitaire de référence du gaz naturel.

L'autoconsommation énergétique annuelle totale du complexe est estimée à **770 473 152 $\text{m}^3 \text{ eq GN/an}$** . Le gain relatif obtenu à la suite de l'optimisation du système d'huile chaude est de **0,952 %**, ce qui correspond à une économie annuelle d'énergie équivalente à :

$$\Delta AC = 770\,473\,152 \times 0,00952$$

$$\Delta AC = 7\,334\,904,41 \text{ m}^3 \text{ eq GN/an}$$

En considérant un coût de référence du gaz naturel fixé à **6 675 DA** pour **1000 $\text{m}^3 \text{ eq GN}$** , le gain financier annuel généré par cette réduction de l'autoconsommation est calculé comme suit :

$$\text{Gain financier} = \frac{7\,334\,904,41 \times 6675}{1000}$$

$$\text{Gain financier} = 48\,960\,486,94 \text{ DA/an}$$

Ainsi, l'optimisation du fonctionnement de système d'huile chaude permet de générer un gain financier annuel estimé à environ **4,9 milliards de centimes par an**.

Ce résultat met en évidence l'impact économique positif de l'amélioration énergétique proposée, d'autant plus qu'elle est obtenue sans investissement supplémentaire, uniquement par l'ajustement des paramètres opératoires. Cette approche constitue donc un levier efficace pour l'amélioration de la performance énergétique et économique du complexe GL3/Z.

IV-3-2- Quantification du gain énergétique journalier et valorisation économique du gaz combustible économisé :

Sachant que la consommation énergétique **journalière** du four est égale à **1 733 853,34 kWh** et que sa consommation énergétique journalière après optimisation est de **1 701 183,41 kWh**, nous pouvons calculer le gain énergétique obtenu dû à cette modification :

$$1\,733\,853,34 \text{ kWh} - 1\,701\,183,41 \text{ kWh} = 32\,670 \text{ kWh/j} = 111,5 \text{ MM Btu/j}$$

Sachant que le prix du gaz combustible le 30/12/2025 est égal à **5,39 USD/MMBtu**, nous pouvons convertir cette énergie non brûlée du gaz combustible en bénéfice financier.

Tableau IV-4 : Gain financier journalier

Hydrocarbure	Gaz combustible	
Mesure (MM btu)	1	111,5
Prix (USD)	5,39	600,98

L'usine a été conçue pour une durée de vie nominale de 30 ans et fonctionne au moins 330 jours par année. Sur cette base, l'économie annuelle de gaz combustible est estimée à **198 323,4 USD**, ce qui met en évidence la rentabilité de l'optimisation proposée.

Par ailleurs, le montant de l'investissement total est égal à 0 DA (optimisation par simple réglage de consigne DCS 18-TIC0023, sans CAPEX majeur), ce qui conduit à un temps de retour immédiat. Le gain énergétique annuel, converti en dinars algériens, est donc :

$$198\,323,4 \text{ USD} = 25\,684\,864 \text{ DA (taux de change 129,51 DA/USD)}$$

Tableau IV-5 : Temps de récupération financière

Temps de récupération	Gain annuel (USD)	Gain annuel (DA)	Investissement (USD)	Durée
-----------------------	-------------------	------------------	----------------------	-------

Récupération immédiate	198 323,4	25 684 864	0	Immédiate
-----------------------------------	-----------	------------	---	-----------

Ce calcul financier met en évidence le fait qu'il faut absolument penser à créer une industrie pétrochimique de l'éthane pour le faire valoriser, plutôt que le brûler comme fuel gaz.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion et recommandations

Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique, de réduction des coûts d'exploitation et de limitation de l'impact environnemental, l'optimisation des paramètres de fonctionnement des équipements thermiques constitue un levier stratégique majeur. Le présent mémoire s'est inscrit dans cette démarche en s'intéressant à l'optimisation du fonctionnement du four d'huile chaude 18-MB01 de l'unité 18 du complexe GL3/Z, élément clé du réseau de chauffage à huile thermique Torada TC32.

L'étude a mis en évidence que la température nominale de sortie du niveau élevé de la boucle d'huile chaude, fixée à 260 °C, dépasse les besoins thermiques réels des unités utilisatrices. À travers une approche méthodique combinant l'analyse du procédé réel, la modélisation rigoureuse sous Aspen HYSYS et l'utilisation du module Aspen EDR, il a été possible de simuler différents scénarios de fonctionnement et d'évaluer leur impact sur la consommation de gaz combustible, la répartition des débits d'huile, la température de retour ainsi que la stabilité thermique du fluide caloporteur.

Les résultats obtenus montrent qu'une réduction maîtrisée de la température du niveau élevé à une valeur optimale de 240 °C, pour des charges d'exploitation élevées du complexe, permet de réaliser des gains énergétiques significatifs sans compromettre le bon fonctionnement des échangeurs, rebouilleurs et réchauffeurs alimentés par l'huile chaude. Ce réglage constitue un compromis optimal entre la diminution de la charge thermique du four, la flexibilité hydraulique du réseau et le respect des contraintes de conception.

Cette optimisation se traduit par une réduction significative de la consommation de fuel gaz du four 18-MB01, une amélioration du rendement thermique global ainsi qu'un abaissement de la température de retour vers le ballon tampon, rendant possible la réduction, voire l'arrêt, de l'utilisation des aéro-refroidisseurs du niveau bas. Par ailleurs, ce point de fonctionnement demeure largement en deçà des limites thermiques admissibles de l'huile Torada TC32, garantissant ainsi sa stabilité, la prévention des phénomènes de cokage et la prolongation de sa durée de vie.

Il convient toutefois de souligner que, bien que la réduction de la température du niveau élevé permette une diminution intrinsèque et mesurable de la consommation de fuel gaz du four 18-MB01, l'économie globale observée au niveau du réseau fuel gaz BP peut être partiellement influencée par l'état de fonctionnement de l'incinérateur. En effet, lorsque celui-ci est en service, une partie du gaz combustible est destinée à son alimentation, constituant une charge externe indépendante de la boucle d'huile chaude. Cette observation ne remet pas en cause les gains obtenus au niveau du four, mais permet une interprétation plus juste et globale des bilans énergétiques du réseau.

Sur le plan environnemental, l'abaissement de la charge thermique du four entraîne une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre, s'inscrivant pleinement dans les objectifs de transition énergétique et de développement durable du complexe GL3/Z. D'un point de vue technico-économique, cette optimisation présente un intérêt majeur puisqu'elle ne nécessite aucun investissement additionnel, tout en générant des économies financières substantielles liées à la réduction de l'autoconsommation énergétique et à la valorisation du gaz combustible économisé.

En outre, l'éthane économisé à la suite de cette optimisation peut être valorisé, soit par son intégration contrôlée dans le GNL afin d'augmenter son pouvoir calorifique supérieur (PCS) tout en respectant les spécifications commerciales du produit, soit dans une perspective de développement futur d'une industrie pétrochimique dédiée à l'éthane à proximité du complexe GL3/Z.

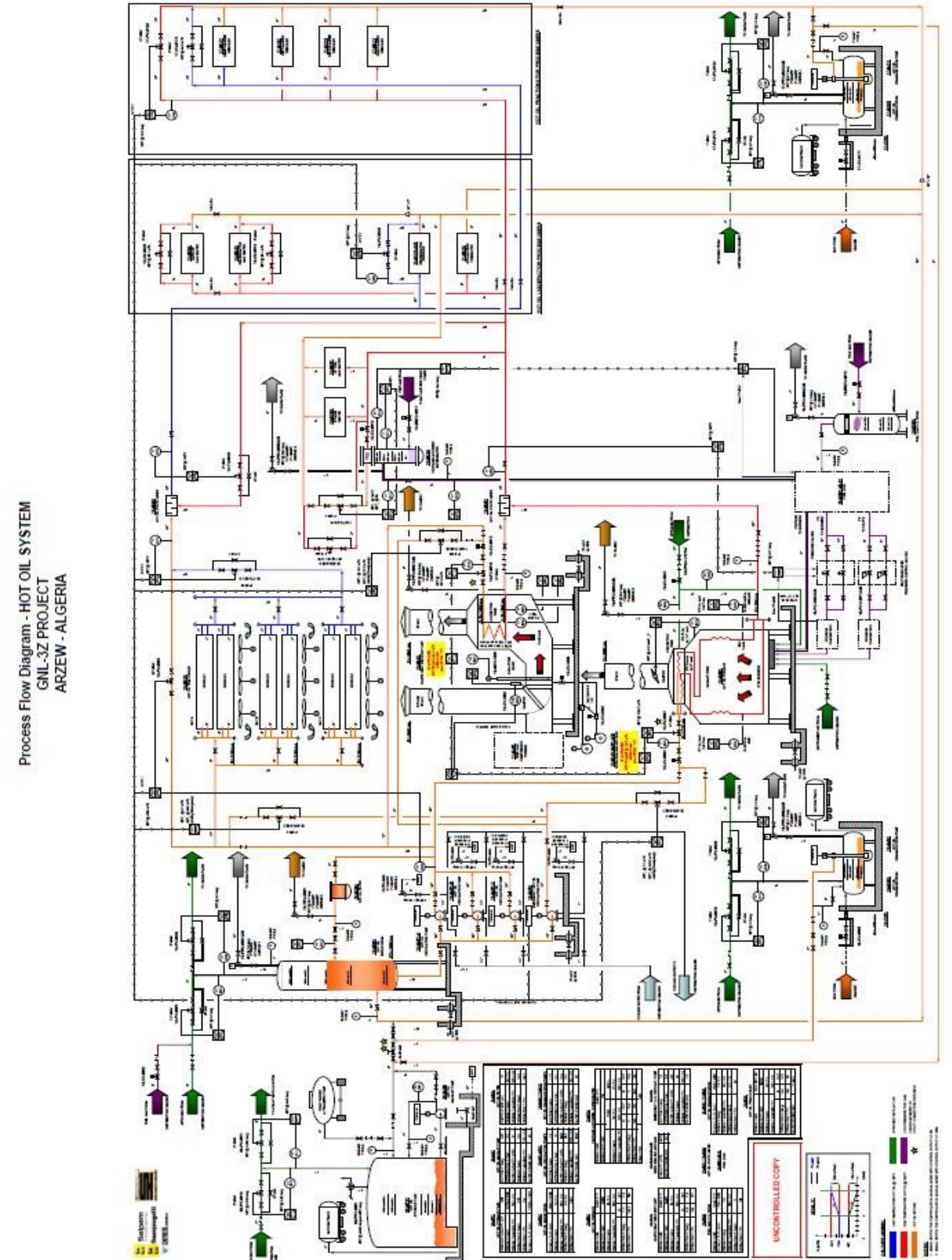
En conclusion, ce travail démontre que l'optimisation des paramètres de fonctionnement, basée sur une compréhension approfondie du procédé et appuyée par des outils de simulation performants, constitue une solution efficace, rentable et durable pour améliorer la performance énergétique des installations industrielles. Les résultats obtenus ouvrent également la voie à des perspectives futures, telles que l'optimisation dynamique des consignes en fonction des régimes de charge, l'intégration renforcée des systèmes de récupération de chaleur, ou encore la valorisation accrue des hydrocarbures légers au lieu de leur utilisation comme combustible. Ainsi, cette étude contribue concrètement à l'amélioration continue de l'efficacité énergétique et à la compétitivité industrielle du complexe GL3/Z.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

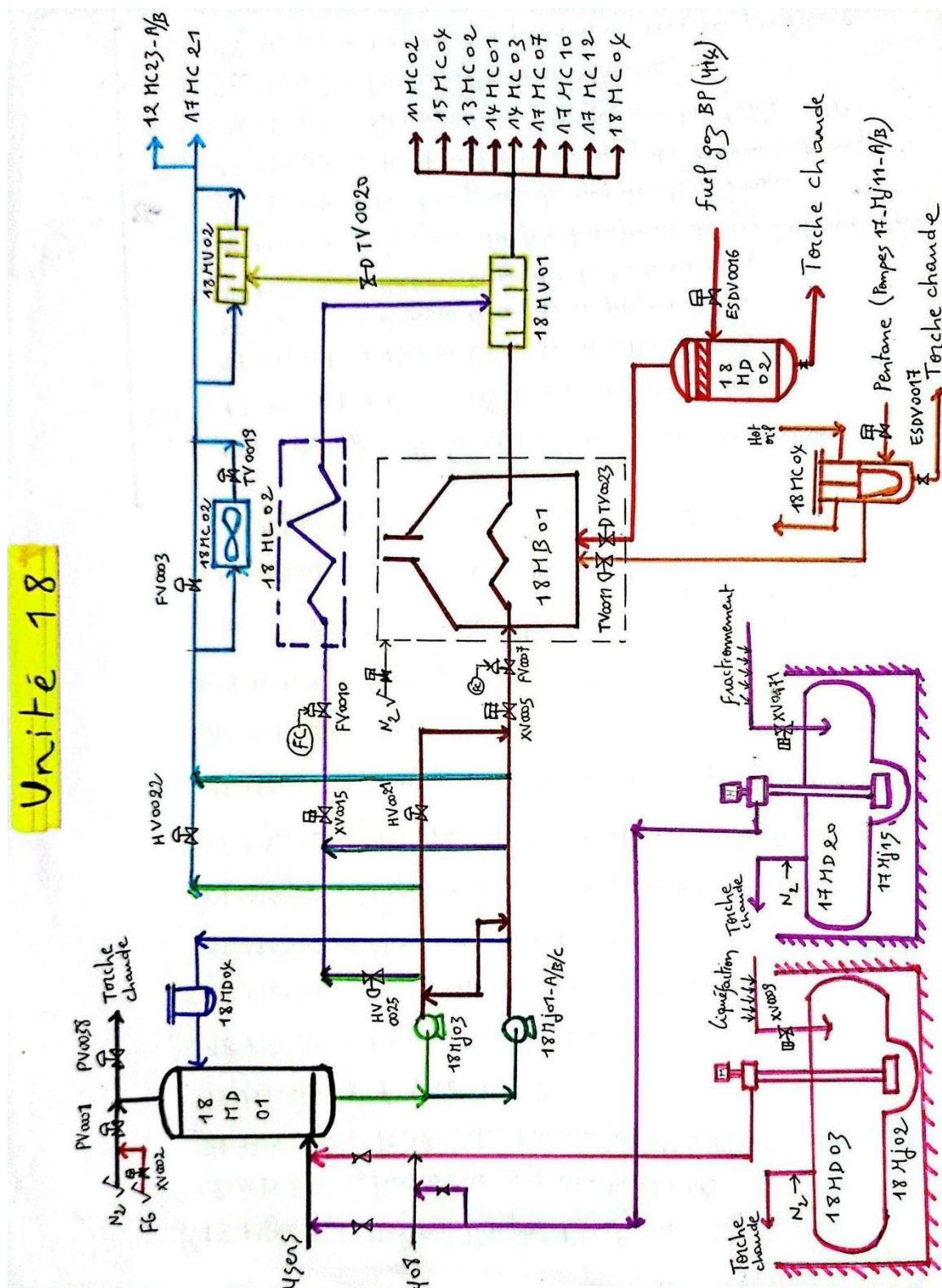
- [1] Gherasim I. Contributions à l'analyse de l'écoulement et du transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à plaques. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 2011, 200p.
- [2] Saipem-Manuel opératoire partie générale projet GNL-3Z, Principe fondamentaux du procédé et d'exploitation, document 318800-GNL3Z-MO-SY-18-86811. (2015).
- [3] Saipem Manuel opératoire document volume 2 unité 18 (Système d'huile chaude) (2013).
- [4] Fiche technique de TORADA TC 32 (NAFTEC)
- [5] Saipem-Operation and Maintenance Manual 18-MB01, document B-5441-CA-06, (2013).
- [6] Support de formation Sonatrach, "LES COMPRESSEURS". pp. 1–87
- [7] G. E. Oil and G. T. Training, "Manuel de formation Sonatrach pour la conduite et l'entretien"
- [8] Metallaoui N. Etude thermodynamique de la turbine à gaz MS7001EA au niveau du complexe GNL1K de Skikda. Mémoire de Master, Département de génie mécanique, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [9] Boyce, M. P. (2011). Gas Turbine Engineering Handbook (4th ed.). Elsevier.
- [10] Jump Start: Aspen Shell & Tube Exchanger V8. AspenTech. Guide d'utilisateur.
- [11] Abdelbari A. Evaluation et constat des GES des équipements stationnaires du complexe GL3Z durant les trois dernières années & Valorisation de la consommation énergétique de la STEP du complexe GL3Z. Mémoire de professionnalisation en management de l'énergie, Département pédagogique, Direction Ecole de Boumerdes, 2019.

ANNEXES



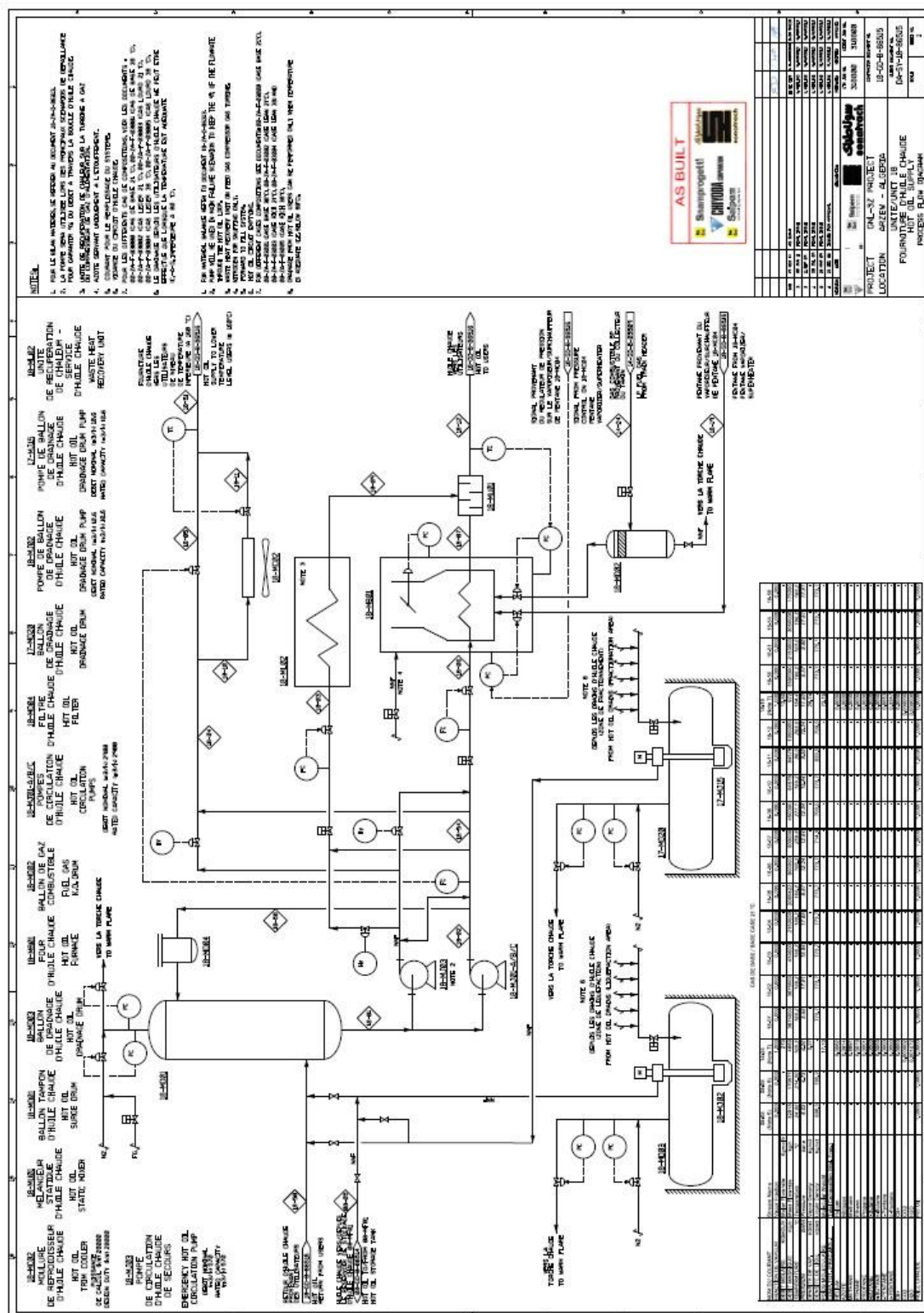
Annexe 2

Dessin représentatif de l'unité 18



Annexe 3

Schéma représentatif de l'unité 18



Annexe 4

Comparaison des résultats de simulation Aspen HYSYS avec les données réelles d'exploitation (suivi PIMEZ)

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Température de sortie du Four 18-TI0050 (°C)	Températures internes de four				Débit de gaz combustible (Kg/h)
		18TI5002A (°C)	18TI5005B (°C)	18TI5007A (°C)	18TI5008B (°C)	
260	259,38	248,14	348,79	266,76	331,9	3734,31
258	237,22	246,97	339,12	264,67	322,35	3732,84
250	243,24	251,25	320,91	273,01	335,89	3764,43
255	250,84	246,73	318,43	270,59	350,18	3744,96
245	239,97	236,21	327,04	258,75	311,73	3232,61
243	238,33	233,3	308,21	252,76	321,43	3141,9
240	231	233,83	272,43	236,88	280,85	2748,18

Annexe 5

Suite de Comparaison des résultats de simulation Aspen HYSYS avec les données réelles d'exploitation (suivi PIMEZ)

Température du niveau élevé 18-TIC0023 (°C)	Débits d'huile des utilisateurs						Température de retour 18-TI0002 (°C)
	Débit d'huile 13-MC02 (m ³ /h)	Débit de gaz de régénération 13-MC02 (Kg/h)	Débit d'huile 14-MC01 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC07 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC10 (m ³ /h)	Débit d'huile 17-MC12 (m ³ /h)	
260	200	44000	78,07	273,15	149,57	51,21	170,43
258	200	44000	76,61	222,03	154,16	43,69	168,54
250	200	44000	54,13	234,34	141,25	42,61	173,58
255	200	44000	72,3	268,08	148,63	45,9	168,77
245	200	43000	78,12	264,43	174,76	55,42	168,78
243	200	45000	82,91	275,16	151,22	54,26	166,96
240	200	42000	82,31	266,74	144,71	57,96	164