



Department of Process Engineering
Ref: _____/U.M/F.S.T./2024

قسم هندسة الطرائق
رقم: _____ / ج.م. / ك.ع.ت. / 2024

Mémoire de fin d'études de Master Académique

Filière : Génie des procédés
Option : Génie chimique

Thème

Intitule de sujet

Vérification de l'efficacité de chaudière 35-M-0511 au niveau du complexe GP1Z

Présenté par :

- Bettayeb Razane Zahra
- Benadda Amel

Soutenu le 10 /06 / 2024 devant le jury composé de :

Présidente :	Maned Karima	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Toumi Imene	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Belhouari Houria	MAA	Université de Mostaganem

Résumé

Cette étude se concentre sur l'analyse des problèmes de corrosion, de formation de dépôts et de tartre affectant les chaudières, en particulier la chaudière GP1/Z utilisée pour chauffer l'eau et produire de la vapeur. L'objectif de la recherche est de comprendre l'impact de ces problèmes sur l'efficacité et les performances de la chaudière, et de déterminer les solutions appropriées pour améliorer son fonctionnement dans diverses conditions.

Abstract

This study focuses on analyzing the corrosion, scaling, and calcium residue issues affecting boilers, specifically the GP1/Z boiler used for heating water and producing steam. The research aims to understand the impact of these issues on the efficiency and performance of the boiler and to determine appropriate solutions to enhance its operation under various conditions.

تلخيص

هذا البحث يركز على دراسة مشاكل التآكل والترسبات الكلسية في الغلايات، بالتحديد تلك المستخدمة في GP1/Z لتسخين المياه وإنتاج البخار. يهدف البحث إلى فهم تأثير هذه المشاكل على كفاءة الغلاية ومردوديتها، وتحديد الحلول المناسبة لتحسين أدائها في ظروف مختلفة.

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage :

*À mes chers et vénérés parents qui ont me motivé et m'appui dans cette vie, ainsi qu'à mes frères, en particulier à mon frère **B. Wael**, dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été mes piliers depuis le début de mon parcours académique jusqu'à ce jour mémorable où je m'apprête à recevoir mon diplôme d'ingénieur.*

*À la famille de mon binôme **Kaim**, en particulier à sa mère et à sa sœur.*

*Et à la famille **Lakher Foutaih**, notamment à son mari.*

A tous ce que nous aime.

Remerciements

Le présent travail a été réalisé Département de génie des procédés de l'Université de Mostaganem faculté des Sciences et de la Technologie.

Nous remercions Dieu, le tout puissant pour la volonté, la patience et le courage qu'ils nous ont accordés pour mener à terme ce travail.

*Nous tenons à exprimé notre sincère reconnaissance à **Mme BELHOUARI** à l'université des sciences et la technologie pour avoir accepté de nous encadrer, pour son attention discrète, ses recommandations mesurés et ses précieux conseils.*

Nous voudrions ensuite remercier tous les membres de jury qui juger ce modeste travail et nous faire profiter de leurs connaissances et remarques constructives :

***Mme. MENAD Karima** qui nous a fait l'honneur de présider le jury.*

***Mme. Toumi Imen** qui spontanément accepter d'examiner ce travail. Leur critiques et commentaires seront bénéfique pour enrichir nos connaissances dans ce domaine.*

Nos sincères remerciements à tous les responsables et agents de GPI/Z de SONATRACH de Arzew qui nous ont beaucoup aidés au cours des expériences.

Tous nos remerciements et notre estime vont à tous les enseignants du Faculté des Sciences et de la Technologie.

Enfin, nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou loin et à la réalisation de ce travail.

Razane et Amel

Sommaire

<i>Nomenclature</i>	<i>IX</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
<i>Problématique</i>	<i>2</i>
<i>I. Chapitre 1 : Présentation générale</i>	<i>4</i>
I.1. Introduction	4
I.2. Présentation de site	4
I.2.1. Historique	4
I.2.2. Organisation du complexe	5
I.2.3. Département sécurité.....	6
I.2.4. Département production.....	7
I.3. Principale installation du complexe	7
I.4. Traitement de GPL	8
I.4.1. Alimentation de l'usine	8
I.4.2. Section de Déshydratation	9
I.4.3. Section de séparation	10
I.4.4. Section de Réfrigération.....	11
I.4.5. Section de l'huile chaude	12
I.4.6. Récupération du gaz d'Évaporation (BOG).....	13
I.5. Matériel utilisé dans le procédé	14
I.6. Spécification d'état physique du GPL	16
I.7. Tableau de caractéristique d'explosivité	16
I.8. Commercialisation	17
I.9. Définition du gaz naturel	17
I.10. Généralités sur le GPL	17
I.10.1. Définition GPL	17
I.10.2. L'utilisation de GPL.....	17
I.11. Composition du GPL	18
I.12. Risques et sécurité des GPL	18
I.13. Différence entre GPL et GN	19
<i>II. Transfert de chaleur</i>	<i>21</i>
II.1. Les types de transfert de chaleur	21
II.2. La définition d'une Chaudière	22
II.3. Les types de chaudière	22
II.3.1. Chaudières à combustible solide	22
II.3.2. Chaudières à combustible liquide	23
II.3.3. Chaudières à condensation	23
II.3.4. Chaudières à tube d'eau	25
II.4. Les avantages de chaudière	26
II.5. Les inconvénients de chaudière	26

II.6. La chaudière étudiée	27
II.6.1. Description de la chaudière et le rôle de chaque équipement	28
II.6.2. Fonctionnement de la Chaudière	29
II.6.3. Consommateurs	30
II.6.4. Produits chimiques ajouter au l'eau	30
II.6.5. Les problèmes rencontrés dans la chaudière	31
II.7. La combustion	33
III. Chapitre 3 : Partie de calcul.....	35
III.1. Introduction	35
III.2. Pouvoir calorifique	35
III.2.1. Pouvoir Calorifique du Gaz.....	35
III.2.2. Pouvoir Calorifique d'Autres Combustibles.....	35
III.2.3. Importance du Pouvoir Calorifique.....	35
III.2.4. Les types de pouvoir calorifique	36
III.2.5. Différence entre PCS et PCI.....	36
III.3. Calcul de Rendement de la chaudière (35-M-0511)	36
III.4. Présentation des données collectées	37
III.5. Calcul de PCI.....	39
III.6. Calculs d'efficacité réalisés	41
III.6.1. Calculs d'efficacité dans le cas Design.....	41
III.6.2. Calculs d'efficacité dans le cas Réel (02-29 février 2024).....	41
III.7. Récapitulatif des résultats trouver.....	42
III.8. Interprétation des résultats	42
III.9. Perspective	42
III.10. Solutions potentielles	43
Conclusion Générale	44
Références Bibliography.....	50

Tables des Figures

Figure 1 : Plan de masse du complexe GP1Z.	5
Figure 2 : Organigramme du complexe.	6
Figure 3 : Alimentation de l'usine.....	8
Figure 4 : Déshydratation de charge train.....	9
Figure 5 : Section de séparation.....	11
Figure 6 : Section de Réfrigération.....	12
Figure 7 : Four d'huile chaude.....	13
Figure 8 : Section de récupération B.O.G.....	14
Figure 9 : Compresseur B.O.G Propane.....	15
Figure10 : Chaudière à bois.....	22
Figure 11 : Chaudière à granulés de bois.....	23
Figure 12 : Chaudière à granulés de bois.....	23
Figure 13 : Chaudière à condensation au fioul.....	23
Figure 14 : Chaudière à condensation au gaz.....	24
Figure 15 : Chaudière à accumulation.....	24
Figure 16 : Chaudière à air pulsé.....	25
Figure 17 : Chaudière à tube d'eau.....	25
Figure 18 : Chaudière à tube d'eau du complexe GP1/Z.....	28
Figure 19 : Section génératrice de vapeur.....	29
Figure 20 : Phosphate trisodique.....	31
Figure 21 : Elliminox.....	31
Figure 22 : Tableau de bord de Chaudière.....	46
Figure 23 : Tableau de bord de régulateur.....	46
Figure 24 : Registre technique de gaz.....	47

Tables des Tableaux

Tableau 1 : spécification d'état physique de GPL.	16
Tableau 2: Caractéristique d'explosivité.	16
Tableau 3 : la différence entre stockage bas et ambiant.	17
Tableau 4: La composition de GPL. [6].....	18
Tableau 5 : Caractéristique physique de GPL et GN.....	19
Tableau 6 : Pouvoir calorifique de gaz naturel/riche.	35
Tableau 7 : Pouvoir calorifique pour différent combustible.	35
Tableau 8: les compositions de GPL avec ces enthalpies et PCI.....	37
Tableau 9: Les paramètres de sortie de la chaudière.	37
Tableau 10: Les paramètres d'entrée de l'eau pour la production 19th/h.....	38
Tableau 11: : Les paramètres d'entrée du combustible.	38
Tableau 12: Les paramètres entrée d'eau.....	38
Tableau 13: Les paramètres d'entrée du combustible.....	38
Tableau 14: Les paramètres de sortie de la Chaudière.	38
Tableau 15: Récapitulatif des résultats trouver.....	42

Nomenclature

GPL	Gaz pétrole liquéfié
GP1/Z	Complexe de Gaz pétrole liquéfié à Arzew
GN	Gaz naturel
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
μ	Rendement de la chaudière (%)
Ds	Débit de l'eau entrante (kg/h)
De	Débit de vapeur sortante (kg/h)
D_{gaz}	Débit de combustible gaz en (Nm ³ /h)
H_e	Enthalpie de l'eau entrée
H_s	Enthalpie de vapeur sortie
Pu	Puissance utile (kW)
Pin	Puissance introduit (kW)
BOG	Boil off gas
COGIZ	Conditionnement et Commercialisation des gaz industriels zone

Introduction Générale

Notre pays possède de nombreuses ressources pétrolières et de gaz naturel, ce qui en fait la principale source d'énergie naturelle, en particulier dans le sud (Sahara). Le GPL, également connu sous le nom de gaz de pétrole liquéfié, est un des principaux producteurs mondiaux d'exportation. Il s'agit d'une combinaison d'hydrocarbures légers, principalement issus du raffinage du pétrole pour 40%, stockés sous forme liquide, et du traitement du gaz naturel pour 60%.

Il se compose principalement de propane et de butane.

Le marché international des carburants suscite une forte demande. Il est donc important de souligner que le gaz de pétrole liquéfié est un produit abordable, tout en réduisant la pollution, étant donné qu'il s'agit d'une forme d'énergie non renouvelable.

La chaudière est essentielle pour assurer le bon déroulement du complexe.

Nous avons réalisé une recherche sur la chaudière du complexe GP1/Z afin de préparer notre mémoire de fin d'études. Nous allons examiner et comparer les performances actuelles ainsi que le design.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons une brève description du complexe GP1/Z

Dans le deuxième chapitre représente Généralité sur le transfert de chaleur, les chaudières et les combustions

Le troisième chapitre représente la partie de calcul, Il inclut une estimation du rendement de la Chaudière et une comparaison avec les valeurs de conception.

Et présente une optimisation possible,

Nous concluons notre travail en établissant une conclusion générale suivie de quelques suggestions.

Problématique

La production de vapeur entraîne des problèmes de corrosion et des dépôts de tartre sur les tubes de la chaudière, ce qui entraîne une augmentation de la consommation de gaz naturel et donc une baisse du rendement de la chaudière.

L'objectif de cette étude consiste à examiner une chaudière à tubes d'eau de type GP1/Z, en analysant son rendement dans les conditions de design et réelles.

Chapitre I

*Présentation Générale du complexe de
GP1Z*

I. Chapitre 1 : Présentation générale

I.1. Introduction

Le sud de l'Algérie est riche en richesses naturelles, notamment le consortium GP1/Z de la société nationale SONATRACH s'appelle (jumbo GPL) La région d'ARZEW dispose d'une énorme capacité de production et de parcs industriels les plus modernes.

Le complexe GP1/Z est conçu pour traiter les mélanges bruts de GPL issus des industries suivantes :

- Plusieurs sources dans le sud de l'Algérie et produit du propane et du butane comme produits
- Les produits finis sont vendus par bateau ou par camion-citerne.
- Le complexe étant conçu pour lutter contre le gaspillage énergétique, nous visons à estimer et étudier la quantité de propane brûlée au démarrage de la section de réfrigération

La possibilité de recycler cette quantité de matière.

Les travaux sont suivis par quatre équipes (dont une au repos) et du personnel de maintenance travaillant normalement.

En 2010, la production du complexe a augmenté au fur et à mesure des commandes.

La phase 3 se compose de 3 trains produits par le même constructeur [1].

I.2. Présentation de site

I.2.1. Historique

Le complexe GP1/Z fait partie des six complexes de liquéfaction (AVAL) de l'entreprise nationale SONATRACH. Il s'étend sur une superficie de 120 hectares et est situé entre la centrale thermoélectrique de Marsa EL Hadjadj à l'Est et les complexes de GNL à l'Ouest (Figure 1). Il a été construit en trois phases dans le cadre d'un contrat clé en main avec le concours d'un consortium japonais IHI-ITOCHU. La première étape a été accueillie le 2 septembre 1984, la seconde étape le 20 novembre 1998 et la troisième étape le 24 février 2010.

En 1983, le complexe avait quatre trains capables de traiter le GPL, ce qui lui permettait de produire 4,8 millions de tonnes par an. Ensuite, deux trains supplémentaires ont été acquis (l'extension du complexe a eu lieu en 1998), et la production a augmenté pour atteindre 7,2 millions de tonnes annuellement. La production est prévue à 10,8 millions de tonnes par an après le début de la troisième phase. Pour produire du Propane et du Butane pour le marché national et international, le complexe est appelé JUMBO-GPL en raison de ses grandes capacités de production. Il traite une charge brute de GPL provenant de différents champs situés au Sud Algérien [1].

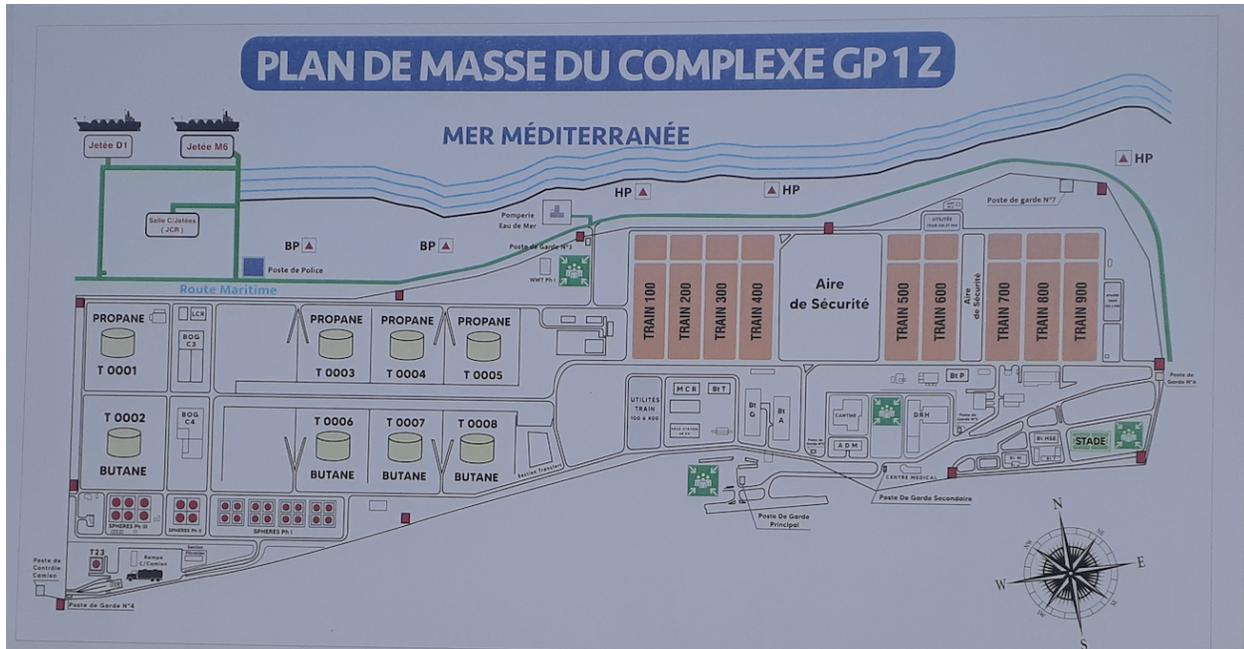


Figure 1 : Plan de masse du complexe GP1Z.

1.2.2. Organisation du complexe

La description des structures nous permet de connaître la situation géographique, l'effectif, les objectifs et le rôle de chaque département ainsi que de connaître tout le fonctionnement du complexe GP1/Z.

Le complexe GP1/Z est géré suivant un organigramme bien déterminé de façon à bien maîtriser les tâches, il est composé d'une direction générale et deux sous-directions et des départements de contrôle, comme le montre l'organigramme (Figure 2).

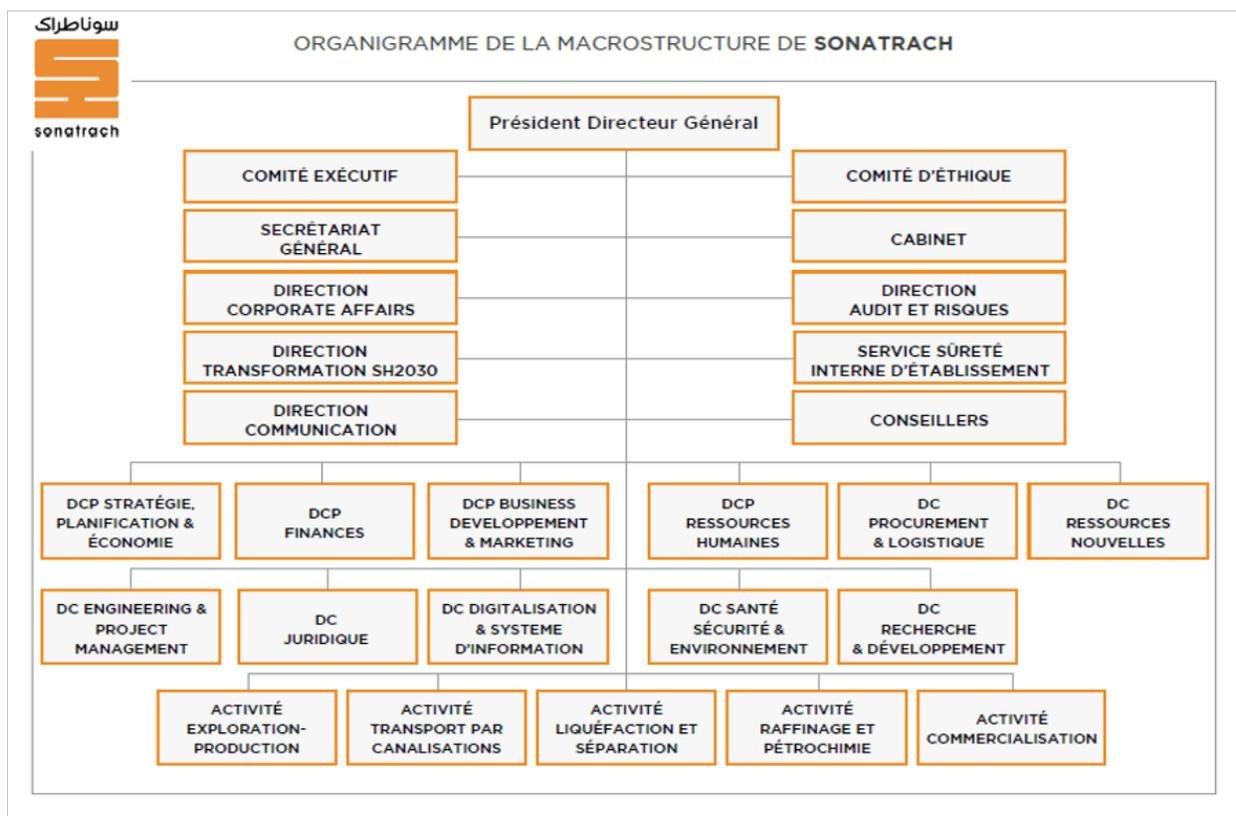


Figure 2 : Organigramme du complexe.

1.2.3. Département sécurité

Le département sécurité joue un rôle très important dans la sécurité au niveau d'un complexe où le danger peut survenir à tout moment. Le département est organisé comme suit :

1.2.3.1. Département sécurité

Ce service organise des contrats afin de réaliser une bonne surveillance au sein du complexe GP1/Z. Ces contrats consistent à effectuer une vérification du matériel entrant et sortant de l'enceinte ainsi que le mouvement de l'ensemble du personnel surtout ceux de production.

1.2.3.2. Service d'intervention

C'est un service très important car c'est sur lui que repose la charge en cas d'incident (feu comme exemple) pour cela et pour le risque que les agents courent pendant ces opérations en adaptant chez eux une devise qui est la rapidité d'intervention et l'efficacité d'exécution. Pour éviter ces incidents, ils effectuent quotidiennement des inspections et assurent une maintenance par personnel.

1.2.3.3. Service de prévention

Service de prévention est formé d'inspecteurs de sécurité affectés au niveau de chaque zone afin d'être le conseiller de chef de zone en matière de sécurité.

Leur travail est le contrôle des travaux au niveau de chaque zone et l'élaboration de statistiques intérieurs sur le travail effectué.

Ce service s'occupe d'offrir les équipements de sécurité recommandés aux travailleurs de chaque service tels que : combinaisons, casques, souliers de sécurité.

1.2.4. Département production

La sous-direction exploitation supervise le département de production, qui supervise toute la production de GPL (propane et butane) et dispose de trois services :

1.2.4.1. Service de fabrication

Il est responsable de la fabrication des produits finis :

- Le propane et le butane réfrigérés sont destinés à être exportés vers des marchés étrangers.
- Le propane et le butane ambiant sont destinés à être exportés au niveau national.

Chaque train est divisé en quatre parties : Section huile chaude, section déshydratation, section séparation et section réfrigération.

1.2.4.2. Service planning et programme

La planification des programmes mensuels de production, l'analyse des écarts de production entre prévisionnel et réalisation et l'élaboration des bilans de production sont les missions de ce service. Il sert de médiateur entre les deux services d'expédition et de fabrication.

1.2.4.3. Service stockage et expédition

Il s'occupe du stockage et de l'expédition des produits finis par navires et camions.

I.3. Principale installation du complexe

- 09 Trains de traitement du GPL
- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m^3 chacune
- 02 unités de liquéfaction des boil-off.
- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m^3 chacune.
- 03 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m^3 chacune.
- 01 Bacs de stockage de butane propane basse température de 70000 m^3 .
- 04 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe.
- 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variant entre 4000 et 5000 tonnes.
- 04 Sphères de stockage de produits ambiants (propane et Butane) de 500 m^3 chacune.
- 01 Sphères de stockage gazoline de 500 m^3 .
- Unité de démercurisation.
- 05 salles de contrôle.
- 01 Station électrique alimentée par SONELGAZ.
- Une rampe de chargement de camions.
- Une station de pompage d'eau de mer.

- Un système de télésurveillance. [2]

I.4. Traitement de GPL

D'après le stage nous avons conclu que le traitement de GPL passe par différentes sections qui se composent d'une boucle fermée. Pour traiter le GPL, il doit passer par la chaîne de production suivante :

I.4.1. Alimentation de l'usine

L'alimentation se fait à partir des champs gaziers et pétroliers de Hassi Rmel et de Hassi - Messaoud par un gazoduc 24 " via le terminal RTO situé sur le plateau de Bethioua. L'alimentation de la section de déshydratation est effectuée par huit pompes. Les seize (16) sphères sont réparties en quatre (04) groupes comportant chacun quatre (04) sphères et deux (02) pompes d'alimentations. Une fois introduit dans les trains, le GPL doit passer à travers les 04 sections suivantes (identiques pour tous les trains) (Figure 3).



Figure 3 : Alimentation de l'usine

I.4.2. Section de Déshydratation

Le but de cette section est de réduire la teneur d'eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à 5 ppm en poids, éviter ainsi la formation de glace et de bouchons de givre dans les parties froides de l'installation (réfrigération). Cette section comprend trois colonnes d'adsorption à tamis moléculaires, à tout instant on a une colonne en service (en adsorption), l'autre en régénération et la dernière en attente.

Le GPL passe dans le sécheur qui est en adsorption du bas vers le haut, l'humidité est extraite lors du passage du GPL à travers les tamis moléculaires. La durée de cette opération est de 36 heures, une fois cette durée dépassée le sécheur passe automatiquement en régénération, cette dernière comprend les séquences (Figure 4):

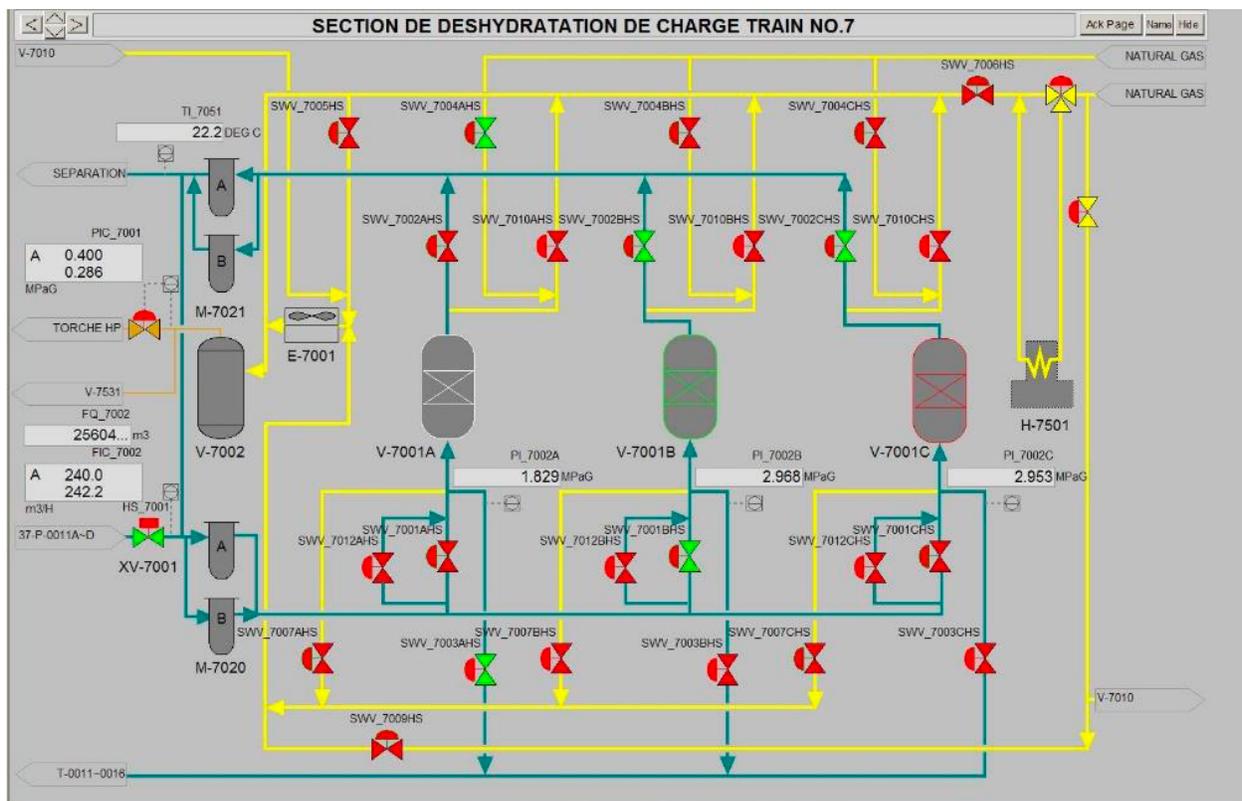


Figure 4 : Déshydratation de charge train.

- **Drainage (durée 1h)**

Le vidange du sécheur se fait par l'injection du gaz naturel sous une pression de 20 kg/cm². Le GPL restant est acheminé vers les sphères de charge.

- **Dépressurisation (durée 30 min)**

Cette séquence sert à réduire la pression du sécheur de 20 kg/cm² à 3 kg/cm² et cela se fait par l'évacuation de GN contenu dans le sécheur vers la section fuel gaz.

- **Réchauffage (durée 11h)**

Le réchauffage se fait par le GN chauffé dans le four à une température de 280°C, il passe dans le sécheur de haut en bas pour évaporer l'eau contenue dans les tamis moléculaires.

- **Refroidissement (durée 5h)**

Le secteur étant chaud après la séquence de réchauffage, il est refroidi par le GN porté à une température de 12 à 45 °c et une pression de 3 kg/cm²

- **Pressurisation (durée 30 min)**

Avant le remplissage de la colonne par le GPL, il faut avoir une pression de service qui est de 20 kg/cm², cette opération se fait par l'introduction de GN à haute pression.

- **Remplissage**

Cette opération consiste à mettre le sécheur en attente.

1.4.3. Section de séparation

C'est la section qui assure la séparation du GPL en deux produits finis, propane et butane en plus de très faibles quantités d'éthane et de pentane.

Le GPL déshydraté avant de passer au fractionniste, il doit être porté à sa température d'ébullition (71°C), en passant à travers trois préchauffeurs, le premier est chauffé par le produit de fond du déméthaniser, le second par les produits de fond du frictionneur et le dernier par l'huile chaude provenant du four. Le GPL ainsi préchauffé à 71 °C passe directement dans le frictionneur (il est constitué de 55 plateaux à clapets) où il est séparé en propane + éthane en tête de colonne et en (butane + pentane) au fond de la colonne.

Les produits de tête de colonne sont condensés et récupérés au niveau du ballon de reflux.

Les produits de fond de colonne sortent à une température de 110°C, préchauffent la charge GPL et passent vers le dépentaniser (Figure 5).

- **Déméthaniser :**

Dans le but de produire du propane commercial plus au moins pur.

Les produits de tête de colonne passent au déméthaniser, ce dernier est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. Le gaz riche en éthane sortant de la partie supérieure du dé-méthaniseur est utilisé comme combustible du four. Le propane sortant du fond de la colonne à une température de 62 °C se dirige directement vers le premier réchauffeur de frictionneur.

- **Dépentaniser :**

Il existe un seul Dépentaniser commun pour les 06 trains, son rôle est d'éliminer les traces de pentane contenues dans le butane.

Le Dépentaniser est une colonne constituée de 50 plateaux à clapets.

Le butane sortant de la tête du Dépentaniser, mélangé au reste du butane non dépentanisé, et est envoyé à la section de réfrigération.

Le pentane recueilli du fond du Dépentaniser sera refroidi par aéroréfrigérant, et envoyé vers le stockage ambiant.

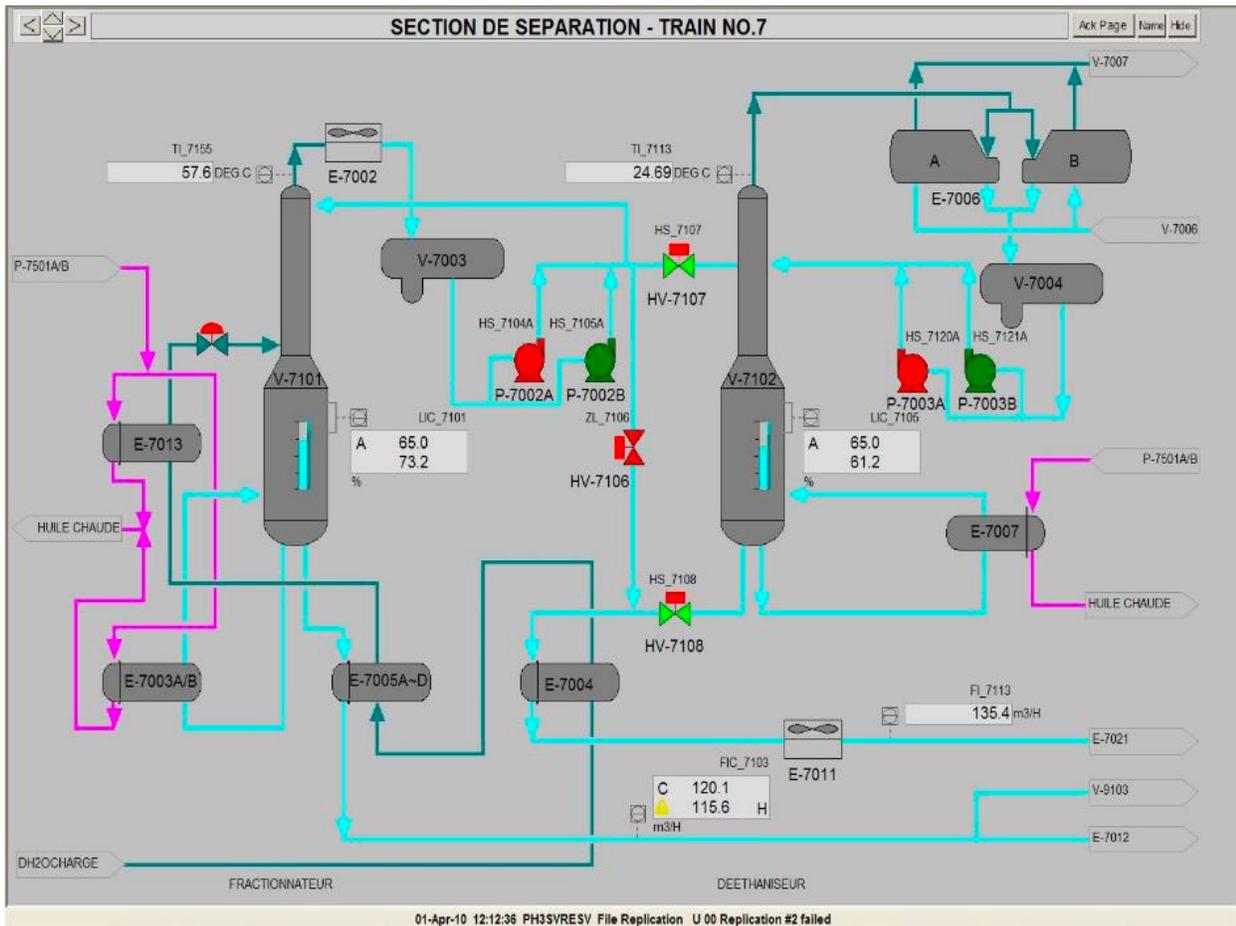


Figure 5 : Section de séparation.

I.4.4. Section de Réfrigération

Le but de cette section est de refroidir les produits finis à leur température de stockage (-42°C pour le propane et -6°C pour le butane). Les produits sont réfrigérés par trois (03) échangeurs suivant un cycle fermé formant une boucle de réfrigération au propane.

(Le fluide utilisé comme réfrigérant est le propane pur). Le propane est évaporé dans les échangeurs de chaleur, cette évaporation provoque l'abaissement de température du produit à réfrigérer. Une partie du propane réfrigéré sera comprimée et envoyée au déméthaniser de la section de séparation comme réfrigérant de tête de colonne. La vapeur de propane générée dans les ballons d'aspiration, les condenseurs de tête des déméthaniser et les dispositifs de réfrigération du butane, sont comprimés par un compresseur centrifuge à trois (03) étages entraînés par une turbine à gaz. Elle est ensuite condensée dans les condenseurs de type aéro-réfrigérant. Les produits finis sont ensuite canalisés vers les bacs de stockage (Figure 6).

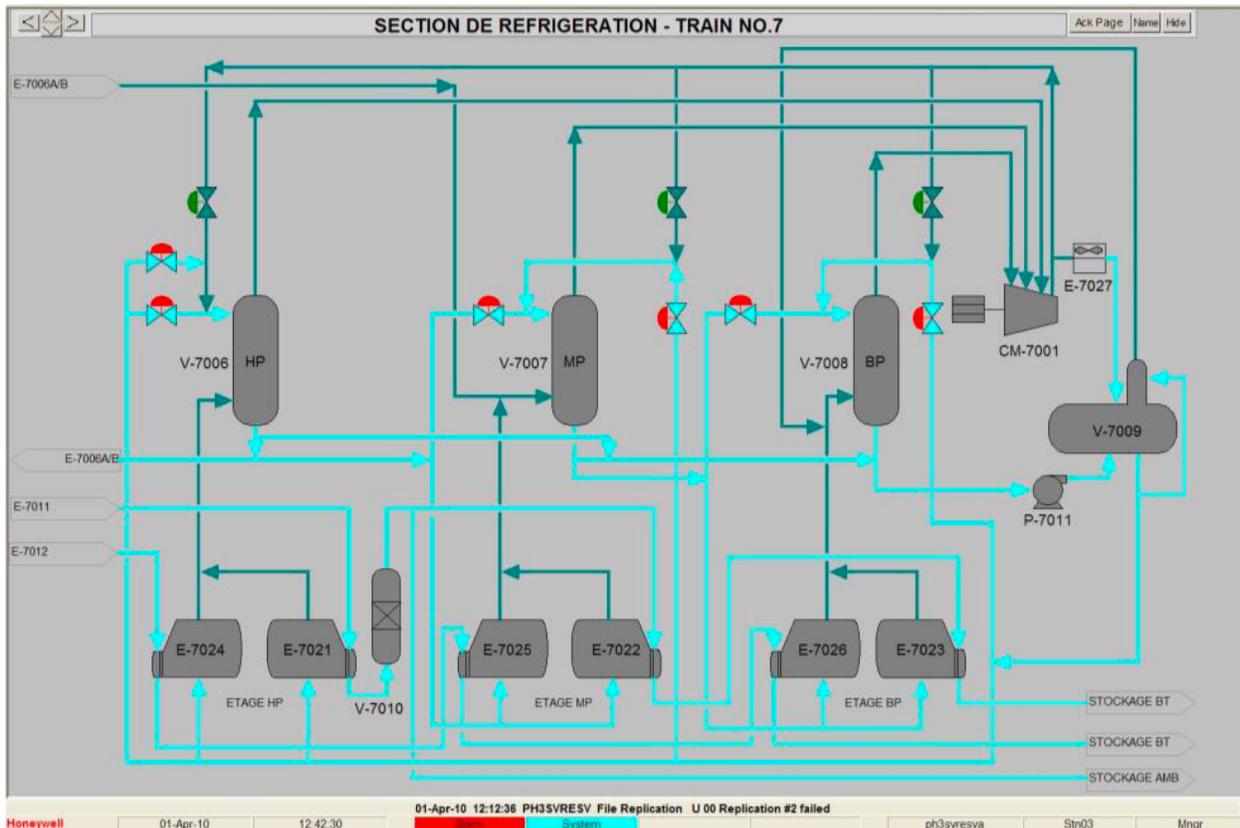


Figure 6 : Section de Réfrigération.

1.4.5. Section de l'huile chaude

Cette section est utilisée comme source de chaleur pour le troisième réchauffeur, les rebouilleurs et finalement pour le gaz naturel de régénération utilisé à la section de déshydratation. L'huile sort du four à une température de 180°C (Figure 7).

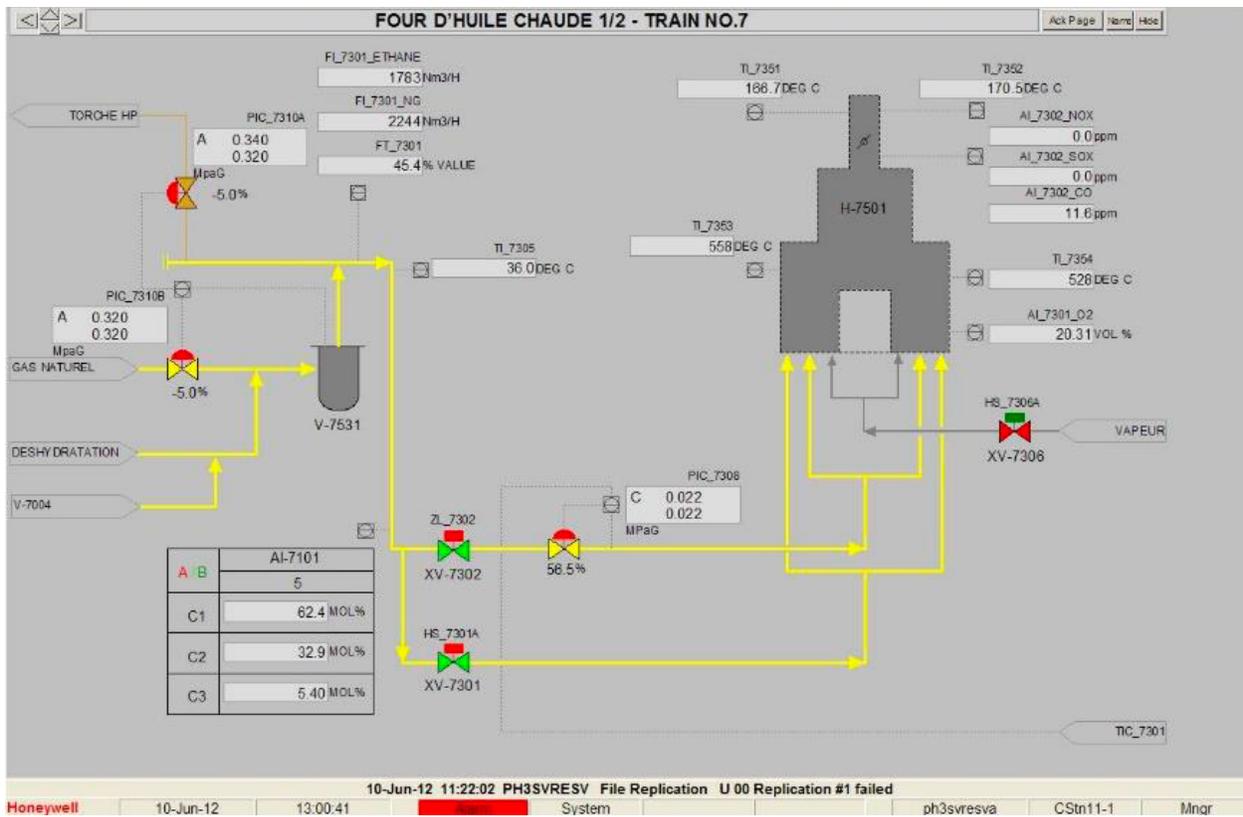


Figure 7 : Four d'huile chaude.

I.4.6. Récupération du gaz d'Évaporation (BOG)

Les gaz d'évaporation provenant des différentes capacités de l'usine (bacs de stockage, l'évaporation des gaz des citernes et des navires en chargement) sont récupérés, liquéfiés par pressurisation au moyen d'un compresseur, refroidis à travers des aéroréfrigérant et renvoyés vers les bacs de stockage. La section récupération se compose de deux (02) ensembles indépendants. Un pour le propane et un pour le butane (Figure 8).

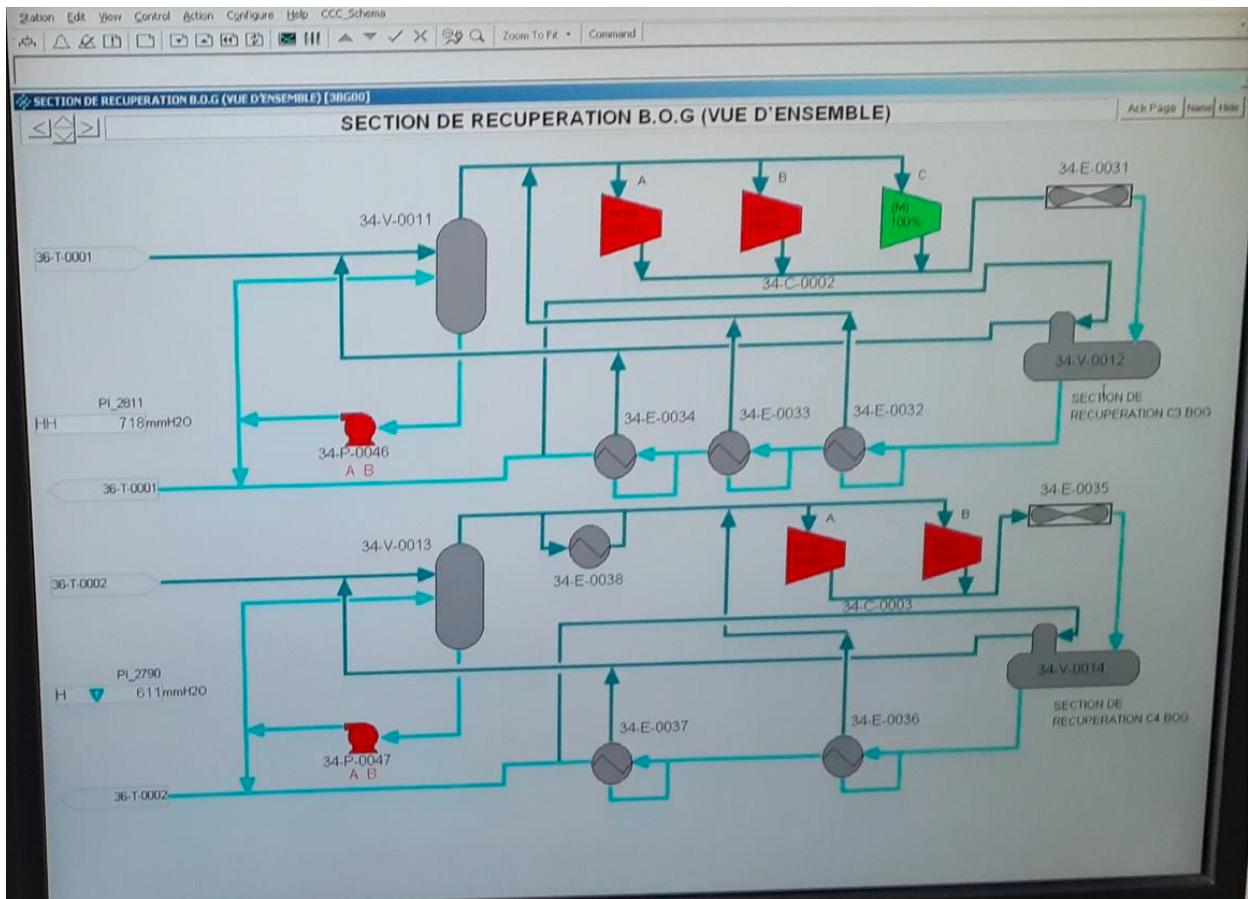


Figure 8 : Section de récupération B.O.G.

I.5. Matériel utilisé dans le procédé

- **Compresseur**

Il existe 05 compresseurs, 03 électriques et deux diesel utilisé en cas de coupure d'électricité.

Le compresseur est divisé en deux étages, il aspire l'air de l'atmosphère. Cet air se comprime et sort avec une pression de 8 bars et une température de 145°C puis entre dans un ballon amortisseur. Il est ensuite conduit vers un ballon cyclone après être refroidi par 04 aérons et purgé des gouttelettes qu'il peut contenir. En quittant ce dernier ballon, la ligne le conduisant est divisée en 02 (piquage) :

- Air service utilisé au nettoyage de différents équipements
- Air instrument utilisé pour les instruments ne supportant pas l'eau. Il est stocké dans un ballon de 286 m3. Il est obtenu à partir de l'air service après l'avoir passé par un filtre puis 02 sécheurs fonctionnant avec les tamis moléculaires (adsorption). Pour les deux sécheurs, on aura

toujours un en service et un en attente après avoir été en régénération, pour le rendre en attente on utilise l'air instrument pour faire évaporer les molécules d'eau greffées dans les tamis (Figure 9).

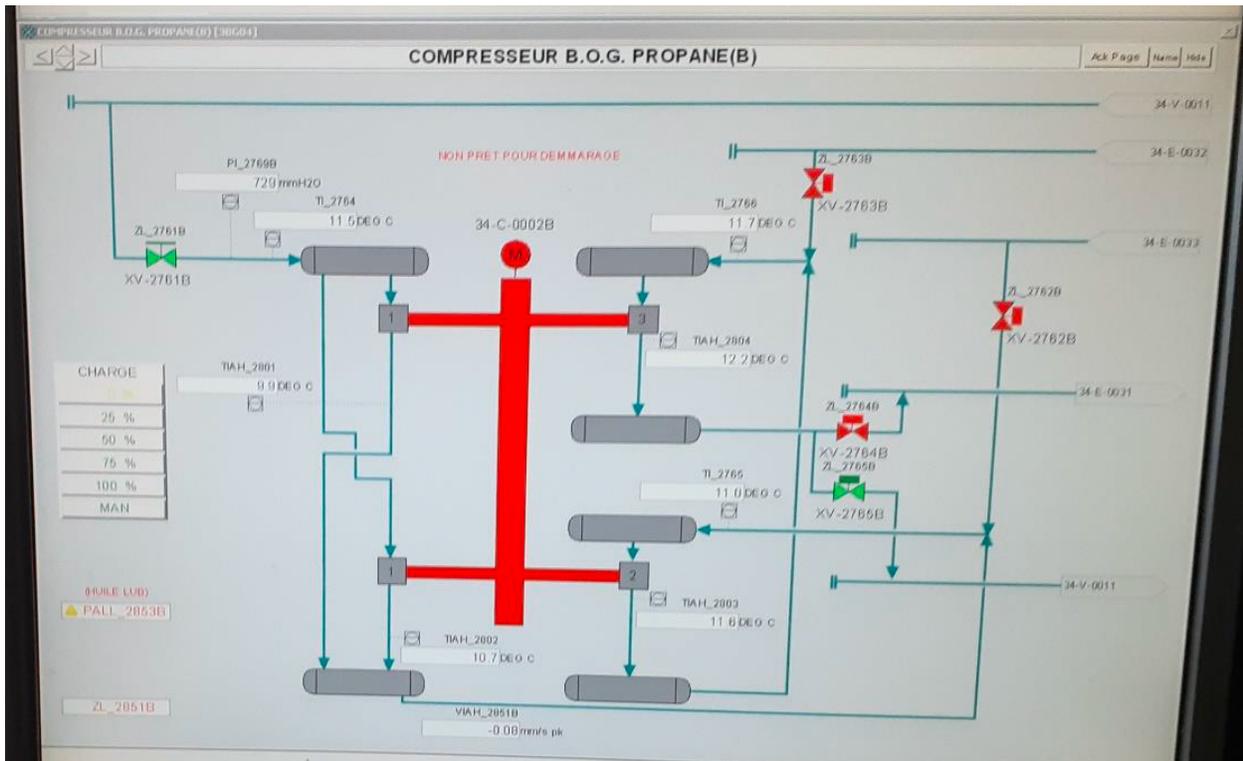


Figure 9 : Compresseur B.O.G Propane.

- **Chaudière**

Elle est composée de 02 ballons : un ballon inférieur rempli à 100% d'eau et un ballon supérieur rempli à 50% d'eau. On fait passer de l'eau dans les tubes de la chaudière après avoir allumé les brûleurs (source de feu), l'échange de chaleur entre l'eau dans les tubes et celle qui existe dans les ballons fait évaporer celle de ces derniers. Ainsi cette vapeur sort vers les installations telles que le réchauffage du GN, ou vers la torche pour réduire la fumée noire.

- **Section eau de refroidissement**

On trouve dans cette section 03 pompes, un réservoir et des aéros. L'eau de refroidissement vient essentiellement du bac eau distillée et est utilisée dans le refroidissement des équipements tels que les compresseurs. Cette eau réalise un circuit fermé du réservoir où elle est aspirée puis refoulée par des pompes vers des aérons et est conduite pour refroidir l'équipement désiré et retourne chaude au réservoir

- **Section gasoil**

Le gasoil est chargé par des camions dans un ballon de 81.5m³. Il est utilisé dans les générateurs de sécurité, les turbines à gaz, les moteurs diesels.

- **Section four**

Le four est composé de 02 cellules à 15 brûleurs chacune. Il contient un tank, un ballon d'expansion et 02 pompes.

Le tank est rempli préalablement d'huile (Torana TC). Cette huile est refoulée vers le ballon par une pompe. Deux autres pompes aspirent vers le four où elle sera réchauffée à une température de 180°C, pour être prête à l'utilisation dans les rebouilleurs puis revient au ballon en construisant ainsi son circuit fermé.

Concernant le GN, il vient de la zone utilité entre dans le four et est chauffé jusqu'à une température de 250°C pour être utilisé dans la phase régénération de la section déshydratation et revient au four comme combustible après être refroidi par des aérosol, sa pression devenant ainsi proche de celle du four.

On utilise aussi le C2 venant du déméthaniser et aussi du GN directement de la zone utilité comme combustible.

- **Section Azote (N2)**

L'azote est chargé par des camions à partir d'autres sociétés telles que COGIZ à l'état liquide, il est transformé en vapeur et est transporté vers les installations pour travaux divers tels que chasser les gaz pour éviter le déclenchement d'étincelles.

- **Section gasoil**

Le gasoil est chargé par des camions dans un ballon de 81.5 m3. Il est utilisé dans les générateurs de sécurité, les turbines à gaz, les moteurs diesels, ...

- **Section méthanol**

Le méthanol est chargé par des camions dans un ballon de 22.5m3, il est utilisé dans le dégivrage des conduites surtout pendant l'hiver.

- **Section eau distillée**

L'eau distillée est obtenue grâce à la société internationale de dessalement de l'eau de mer (SIDEM), elle est stockée dans un bac de 469m3 et est utilisée pour alimenter les chaudières à l'aide de 02 pompes.

I.6. Spécification d'état physique du GPL

Tableau 1 : spécification d'état physique de GPL.

Température d'ébullition du gaz liquide	T > 43°C (à 1013 mbar)
Température critique	T > 97°C
Point d'éclair	T < -50°C
Température d'auto inflammation	T > 400°C
Masse volumique	T > = 530 kg/m3 (à 15°C)

I.7. Tableau de caractéristique d'explosivité

Tableau 2: Caractéristique d'explosivité.

Limite d'inflammabilité dans l'air	[1,18% ; 9,5%] phase gazeuse dans l'air
Pression de vapeur relative	4 bars à 15°C (inférieure à 20 bars à 50°C)

I.8. Commercialisation

Pour faire entrer ces produits finis dans le circuit de la distribution commerciale. Les produits finis sont stockés en deux types de stockages différents : un stockage bas et un stockage ambiant.

Tableau 3 : la différence entre stockage bas et ambiant.

Stockage	Bas	Ambiant
Température	Basse	Ambiante
Pression	Basse	Haute
Marché	International	National
Expédition par	Navire en chargement	Camions ou les bouteilles de soudure.

I.9. Définition du gaz naturel

Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers comprenant du méthane (CH₄) en grande proportion ainsi que d'autres hydrocarbure gazeux tel que l'éthane, le propane, le butane, le pentane et l'hexane en proportion décroissante. Sa composition révèle en outre, suivant les cas, la présence d'hélium, d'azote, de gaz carbonique, de sulfure et de vapeur d'eau.

La genèse du gaz naturel est tout à fait analogue à la genèse du pétrole (qui est un mélange d'hydrocarbures lourds). Elle résulte de la décomposition de la matière organique essentiellement sous-marine, déposée au cours des époques géologiques. C'est la raison pour laquelle les couches dans lesquelles se trouve piégé le gaz naturel sont en général plus profondes [3].

I.10. Généralités sur le GPL

I.10.1. Définition GPL

Le GPL, également connu sous le nom de gaz de pétrole liquéfié, est un mélange d'hydrocarbures, Il est capable de passer dans des conditions normales de température et de pression.

Convertir le gaz en liquide en augmentant ou en abaissant la température de stress ou les deux à la fois. Il s'agit principalement de propane et de butane.

Le volume du chauffeur peut être réduit grâce à cette fonctionnalité (1 m³ de GPL liquide occupe 225 m³ de volume gazeux) [4].

I.10.2.L'utilisation de GPL

Le GPL est principalement utilisé pour la combustion (carburant pour véhicules).

Aération : Il existe deux principes qui peuvent être atteints :

Le GPL produit du froid tout en absorbant la chaleur de l'environnement.

Le moteur alimenté par du GPL peut faire fonctionner le compresseur pour comprimer le gaz, tandis que la gâchette absorbe la chaleur et produit du froid.

La source d'énergie domestique :

De nombreuses méthodes actuelles de conception d'équipements de cuisson et de chauffage s'adaptent à l'utilisation du gaz de pétrole liquéfié [5].

Cependant, à part le butane, qui a été largement utilisé dans le secteur résiduel, le propane a été utilisé très peu dans d'autres domaines potentiels, tels que le transport, l'industrie et l'agriculture.

I.11. Composition du GPL

Tableau 4: La composition de GPL. [6]

Butane	80 %
Propane	20%

I.12. Risques et sécurité des GPL

Dans la mesure où les mesures suivantes n'ont pas été prises en considération, le GPL peut constituer une source de danger :

- En raison de la lourdeur du GPL par rapport à l'air, il est possible qu'il s'accumule au sol et dans les zones basses, telles que les caves, en cas de fuite. Cela présente un risque d'explosion lorsque l'accumulation permet un mélange adéquat de GPL/air et qu'il y a une source d'une inflammation. Cela présente également un risque d'asphyxie, car les GPL remplacent l'air, réduisant ainsi la concentration en oxygène est donc nécessaire d'éviter les cavités, d'aérer et de ventiler les endroits pollués.
- Les réservoirs ne contiennent jamais de GPL à plus de 85 % (15% du réservoir est réservé pour la dilatation).
- Les GPL peuvent présenter un risque d'incendie dès qu'une fuite se produit ou dès que le gaz s'échappe dans l'atmosphère.
- Purger les canalisations de liquide après dépotage afin d'éviter les risques de rupture des réservoirs s'ils sont remplis [7].
- Les DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, l'Aménagement et du Logement) effectuent des vérifications régulières sur toutes les installations. Les réservoirs de GPL doivent respecter les normes de distance de sécurité vis-à-vis des maisons et de la voie publique, ainsi que les normes d'entretien de l'environnement réserve.
- Il y a eu plusieurs accidents impliquant des véhicules alimentés en GPL, ce qui a conduit à une modification de la réglementation qui impose l'installation d'une soupape de sécurité et d'un clapet anti-retour sur les réservoirs de GPL afin d'éviter leur explosion en cas de feu.

- Afin de faciliter la détection des fuites, un gaz odorant est ajouté aux gaz (naturel ou GPL). L'odeur distinctive de "œuf pourri" permet de détecter une concentration de gaz dans l'air nettement inférieure à la limite inférieure d'explosibilité grâce à cette odeur.
- Les GPL liquide par évaporation peuvent causer des brûlures.
- La dissipation de gaz est lente, il faut aérer.
- La limite inférieure d'inflammabilité du gaz est environ de 2% de gaz dans l'air et le mélange devient inflammable en cas de fuite.
- Des mesures de sûreté doivent être également prises par les usagers afin d'éviter tout risque. Les bouteilles de GPL doivent en particulier être placées bien droites verticalement et de façon stable à plus d'un mètre des ouvertures d'un bâtiment et sur un sol incombustible, c'est-à-dire exempt de papiers, chiffons, essences, herbes sèches et de tout autre produit facilitant un départ de feu [8] .

I.13. Différence entre GPL et GN

GPL et gaz naturel sont parfois confondus alors qu'ils présentent de vraies différences physiques :

Tableau 5 : Caractéristique physique de GPL et GN

/	GPL	GN
Densité	Plus lourd	Léger que l'air
Stockage	L'état liquide	L'état gazeux
La température d'auto-inflammation	420 °C (225 °C pour l'essence)	540 °C

Chapitre II

Transfert de chaleur

II. Transfert de chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc...., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée $\sim \phi$ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W / m^2). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection [9].

II.1. Les types de transfert de chaleur

Les types de transfert de chaleur sont principalement la conduction, la convection, et le rayonnement. Chacun de ces modes de transfert a des caractéristiques et des applications spécifiques.

- La convection est le transfert d'énergie thermique entre un objet et son environnement, dû à un mouvement fluide. Elle se produit dans les fluides (liquides ou gaz) et à l'interface entre un solide et un fluide. La convection peut être naturelle, où les particules des zones chaudes montent et laissent leur place à des particules plus froides, ou forcée, où le mouvement du fluide est accéléré par une action extérieure, comme un ventilateur. Un exemple de convection est le chauffage d'une casserole sur un poêle, où la chaleur est d'abord transférée par conduction du fond de la casserole aux molécules d'eau, qui commencent à se déplacer plus rapidement, créant un cycle circulaire de transfert de chaleur [9].
- La conduction est le transfert d'énergie thermique entre objets en contact physique. Elle se produit dans les solides et les fluides (liquides et gaz) et est due à la diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière. La conduction ne nécessite pas de mouvement macroscopique des particules et est le mode de transfert le plus courant dans les interactions quotidiennes, comme le transfert de chaleur d'une personne pieds nus à un carrelage très chaud [10].
- Le rayonnement est le transfert d'énergie par l'émission de rayonnement électromagnétique. Il se produit à partir d'un corps rayonnant vers un autre et peut se produire dans les solides, les fluides, et même dans le vide. Le rayonnement est le mode de transfert qui permet à la chaleur de se propager dans l'espace sans nécessiter de matériau

pour se propager. Un exemple de rayonnement est le chauffage d'une maison par le soleil, où la chaleur du soleil est transférée au toit de la maison et aux fenêtres [11].

II.2. La définition d'une Chaudière

Une chaudière est un appareil qui permet de transmettre en permanence de l'énergie thermique à un fluide caloporteur, généralement de l'eau.

C'est un équipement servant à la transformation de l'eau liquide en vapeur selon la température et la pression définies par la destination de cette vapeur sous l'effet d'apport de chaleur, généralement réalisé par la combustion d'un combustible dans le foyer de la chaudière. Il peut être aussi extérieur (gaz chauds de différents processus).

L'efficacité d'une chaudière dépend de la qualité de ces transferts de chaleur. Un bon échangeur thermique, par exemple, permet un transfert de chaleur efficace entre le fluide caloporteur et l'air ou l'espace à chauffer, minimisant ainsi les pertes de chaleur [12].

II.3. Les types de chaudière

Les types de chaudières peuvent être classés en fonction du combustible utilisé, de leur mécanisme de fonctionnement, et de leur efficacité énergétique. Voici une présentation des principaux types de chaudières :

II.3.1. Chaudières à combustible solide

Chaudière à bois : brûle du bois pour produire de la chaleur, utilisée pour chauffer de l'eau ou un fluide caloporteur (Figure 10).



Figure 10 : Chaudière à bois.

Chaudière à granulés de bois : appareil utilisant des pellets pour produire chauffage et eau chaude (Figure 11).



Figure 11 : Chaudière à granulés de bois.

II.3.2. Chaudières à combustible liquide

- **Chaudière au fioul** : appareil brûlant du fioul pour produire chauffage et eau chaude (Figure 12).



Figure 12 : Chaudière à granulés de bois.

II.3.3. Chaudières à condensation

- **Chaudière à condensation au fioul** : récupère chaleur fumée + eau chauffage = plus efficace et économique (Figure 13).



Figure 13 : Chaudière à condensation au fioul.

- **Chaudière à condensation au gaz** : même principe fioul à condensation = récupère chaleur + eau chauffage = plus économique, (Figure 14).



Figure 14 : Chaudière à condensation au gaz.

- **Chaudière à accumulation** : Ce type de chaudière stocke la chaleur produite pendant la journée pour la réutiliser la nuit, réduisant ainsi la consommation de combustible (Figure 15).



Figure 15 : Chaudière à accumulation.

- **Chaudière à air pulsé** : Utilise de l'air comprimé pour produire de la chaleur, ce qui la rend particulièrement adaptée aux climats froids (Figure 16).



Figure 16 : Chaudière à air pulsé.

II.3.4. Chaudières à tube d'eau

Dans ce type de chaudière l'eau circule à l'intérieur des tubes chauffés à l'extérieur par les fumées résultant de la combustion. La vapeur générée est collectée dans un réservoir.

La disposition des tubes et des réservoirs est variable et dépend de la capacité du générateur et du combustible utilisée. Le réservoir supérieur collecte la vapeur saturante. Le réservoir inférieur distribue l'eau d'alimentation dans les tubes [13] (Figure 17).

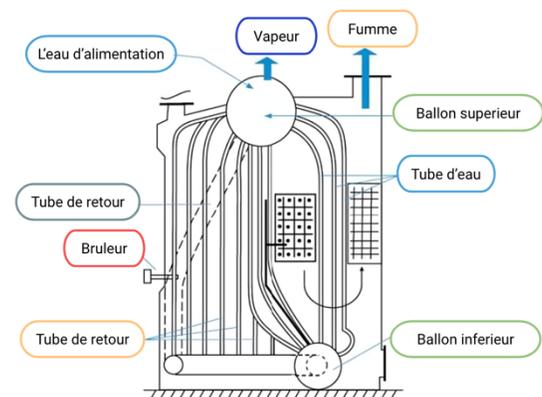


Figure 17 : Chaudière à tube d'eau.

Chaque type de chaudière a ses avantages et ses inconvénients en termes de coût, d'efficacité énergétique, et de contraintes d'installation. Le choix dépendra des besoins spécifiques de chauffage, des contraintes de budget, et des préoccupations environnementales.

II.4. Les avantages de chaudière

Production d'eau chaude sanitaire et de chauffage : Les chaudières fournissent un moyen efficace de chauffer l'eau pour vos besoins domestiques, y compris l'eau chaude pour les douches, les lavabos et les appareils électroménagers, ainsi que le chauffage de votre espace de vie [14].

Facilité d'entretien : La plupart des chaudières nécessitent un entretien annuel minimal pour garantir leur bon fonctionnement et leur efficacité [14].

Variété de combustibles : Les chaudières peuvent fonctionner avec différents combustibles, tels que le gaz naturel, le fioul, le bois, les granulés de bois et l'électricité, ce qui vous permet de choisir l'option la plus économique et la plus écologique pour votre région [15].

Durée de vie relativement longue : Les chaudières bien entretenues peuvent durer de 15 à 20 ans, voire plus, ce qui en fait un investissement rentable à long terme [16].

Chauffage performant : Les chaudières modernes, notamment les chaudières à condensation, sont très performantes et convertissent une grande partie du combustible en chaleur, ce qui se traduit par des économies d'énergie et des factures de chauffage plus basses [17].

II.5. Les inconvénients de chaudière

Les chaudières présentent de nombreux avantages, elles peuvent également présenter certains inconvénients dans le contexte industriel :

Coût d'installation : L'installation d'une chaudière peut être onéreuse, en particulier pour les modèles haut de gamme ou ceux qui nécessitent des modifications importantes de la plomberie ou des conduits d'évacuation [18].

Impact environnemental : Certaines chaudières, en particulier celles qui fonctionnent aux combustibles fossiles comme le fioul ou le gaz naturel, peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement en émettant des gaz à effet de serre [18].

Encombrement : Les chaudières industrielles nécessitent souvent un espace considérable pour leur installation, ainsi que des installations de stockage pour les combustibles nécessaires à leur fonctionnement, ce qui peut poser des défis en termes d'aménagement et de logistique. [18].

Pannes : Comme tout appareil électroménager, les chaudières peuvent tomber en panne, ce qui peut entraîner des réparations coûteuses et des désagréments [18].

Maintenance : Des entretiens annuels réguliers sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et l'efficacité de la chaudière, ce qui peut engendrer des coûts supplémentaires [19].

En résumé, bien que les chaudières soient largement utilisées dans de nombreuses industries pour leur capacité à fournir de la chaleur et de la vapeur, elles peuvent également présenter des inconvénients tels que des coûts élevés, des besoins en entretien, des émissions polluantes et des risques de sécurité. Il est important pour les entreprises de prendre en compte ces facteurs lors de la sélection et de l'utilisation de chaudières industrielles.

II.6. La chaudière étudiée

Le modèle à étudier est une chaudière LIONTEK-LKM-20 à circulation naturelle d'eau qui peut produire 60 tonnes de vapeur par heure en régime optimal, avec une température de surchauffe de 234°C et une pression de 9 bars, avec un rendement de 88,6%.

Ce genre de générateur de vapeur à écrans tubulaires, avec des tubes verticaux, présente l'avantage d'un taux de vaporisation très élevé et se distingue par un volume d'eau relativement limité par rapport à la surface de chauffe, qui est généralement beaucoup plus élevée.

Sa structure est constituée d'un réseau de tubes, à l'intérieur desquels l'eau circule et qui sont reliés à plusieurs collecteurs. L'eau s'écoule dans les tubes, tandis que les produits de combustion sont évacués à l'extérieur des tubes (Figure 18).



Figure 18 : Chaudière à tube d'eau du complexe GPI/Z.

II.6.1. Description de la chaudière et le rôle de chaque équipement

1. Un panneau de commande (Pour sélecteurs de démarrage, boutons de réarmement, signalisation des alarmes, instruments de contrôle...).
2. Un ensemble de vannes de GN (Détente de GN et alimentation pilote et brûleur).
3. Un master (Pour la régulation de combustion « Rapport air/gaz »).
4. Une cheminée (Pour échappement des gaz brûlés).
5. Deux refroidisseurs (Un pour refroidir la ligne de drainage du tambour et l'autre pour refroidir la ligne de prise d'analyse).
6. Kit d'injection de produits chimique (Pour purifier l'eau et maintenir un pH stable).
7. Deux soupapes vers atmosphère (Pour soulager la chaudière en cas de surpression).
8. Instruments de contrôle LIC-5770, PIC-5771, HIC-5770 (Pour avoir un fonctionnement stable et éviter toute perturbation de la section).

9. Lignes de distribution vapeur (Équipée de trois lignes sous distributrices pour alimenter le complexe en vapeur).
10. Un by-pass de maintien (Pour alimenter le réchauffeur de GN « E-0535 » en cas de coupure électrique et (Démarrage du Générateur de Secours).
11. Un ventilateur à tirage forcé muni d'un registre (Pour alimenter le brûleur en comburant à l'aide d'une couronne à ailettes réglables actionnées par le master).
12. Deux ballons superposés reliés entre eux par un ensemble de tubes ascendants et descendants (Pour le remplissage du ballon inférieur et ta production de vapeur).
13. Un dés-aérateur et évent (Pour chasser l'air et/ou l'O2 dissous dans l'eau (Tambour)) (Figure 19) [14].

SECTION GENERATRICE DE VAPEUR

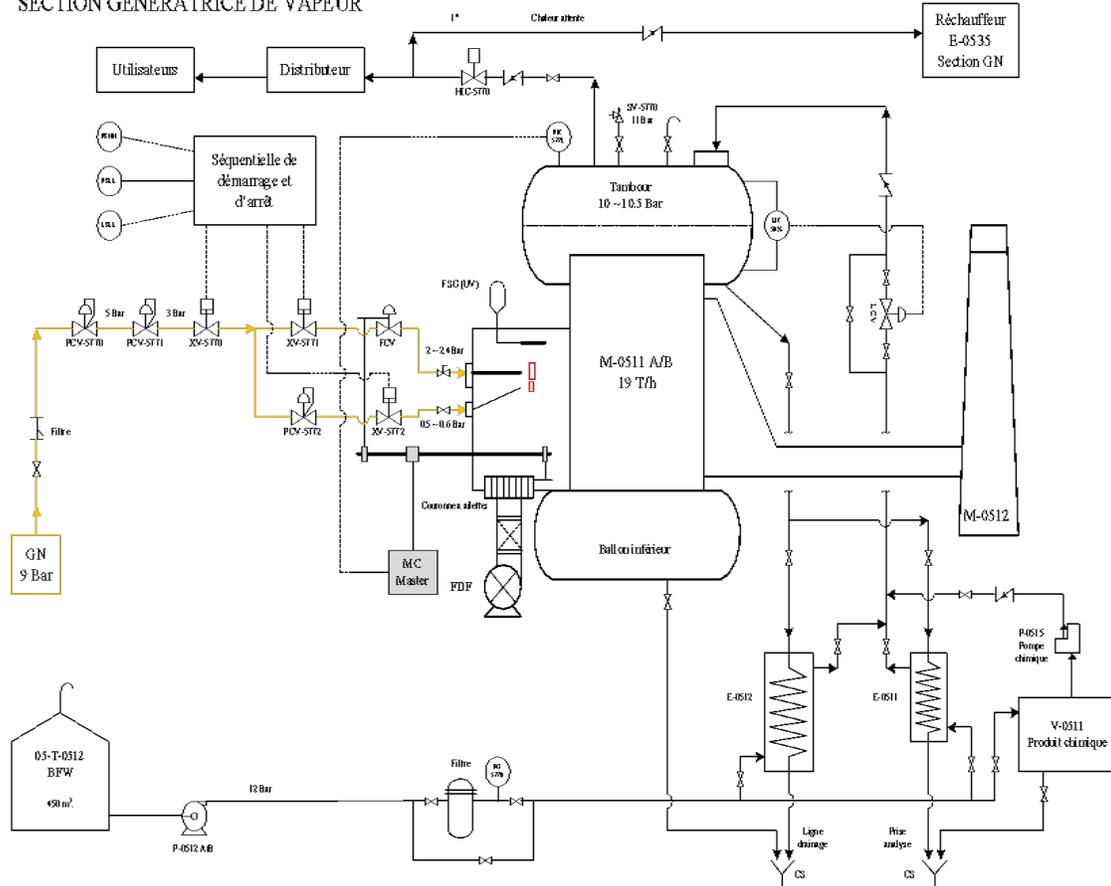


Figure 19 : Section génératrice de vapeur.

II.6.2. Fonctionnement de la Chaudière

La chaudière phase ½ reçoit de l'eau déminéralisée produite par les Sidems à travers les pompes d'eau de chaudière (P-0512 A/B) qui aspirent à partir d'un réservoir de stockage d'eau distillée (T-0512) d'une capacité de 450 m³.

Le DW est pompé par les P-0512 A/B et refoulé à une pression de 12 Kg/Cm2 afin d'alimenter la M-0511.

L'eau passe d'abord par un refroidisseur appelé « Blow Down Cooler » (E-0512) afin de récupérer l'énergie à partir de la ligne de drainage du tambour (Ballon supérieur) et passe par un deuxième refroidisseur (E-0511) pour refroidir la ligne de prélèvement des analyses d'eau drainée (SC-5509) ; ensuite elle pénètre du sommet, de la (M-0511) pour remplir d'abord le ballon inférieur à 100 % à l'aide des tubes d'eau reliant les deux capacités ensemble puis le ballon supérieur (Tambour) à 50 % sous contrôle de niveau LIC-5770.

L'eau à travers les tubes est chauffée par les gaz de combustion depuis l'extérieur puis se transforme en vapeur collectée dans le tambour sous contrôle de pression et enfin elle est distribuée par des lignes aux utilisateurs pour la consommation [14].

II.6.3. Consommateurs

1. Vapeurs de traçage (Lignes & Instruments de mesures).
2. Unités Sidems (Pour évaporer l'eau de mer pulvérisée dans les cellules).
3. Réchauffeur de GN (Pour augmenter la température du gaz à $>25^{\circ}\text{C}$).
4. Surchauffeur du BOG-C4 (Pour augmenter la température du butane à $>15^{\circ}\text{C}$).
5. Four (Pour démarrage, dé-cokage et étouffement).
6. Dégazeurs (Pour séparer les gaz dissous dans l'eau drainés des capacités B.D).
7. Torche (Pour diluer la fumée et refroidir le bec de torche).
8. Vaporisateurs de vide-vite (Pour évaporer les produits liquides drainés et les envoyer vers torches).
9. Réchauffeurs de C3 / C4 (Section de transfert pour chauffer le propane & butane BT) [14].

II.6.4. Produits chimiques ajouter au l'eau

Phosphate trisodique : (Maintien du pH) concentration de 1,5 à 3 g/l dans une tonne d'eau (Figure 20).

Liminaux : (Pour la désoxydation) concentration de 1,5 à 2,5 g/l pour une tonne d'eau (Figure 22).

II.6.4.1. Préparation de solutions :

Na₃PO₄ : Diluer 2 Kg dans 10 litres d'eau puis verser le contenu dans le bac et remplir le reste avec l'eau distillée. Mettez la pompe de dosage à une course de 40 % à 50 %.

Eliminox : Diluer 3 litres dans le bac avec agitateur et 100 % d'eau [14].



Figure 21 : Elliminox.



Figure 20 : Phosphate trisodique.

II.6.5. Les problèmes rencontrés dans la chaudière

Les générateurs de vapeur fonctionnent dans des conditions rigoureuses, caractérisées par des températures et des pressions élevées, un environnement corrosif, et un fonctionnement continu. En outre, ils rencontrent d'autres problèmes tels que :

II.6.5.1. Manque d'eau d'alimentation

Le manque d'eau d'alimentation est considéré comme l'accident de référence pour les installations thermiques équipées de chaudières. Il peut être causé par l'arrêt des pompes d'alimentation ou par le blocage de la vanne principale d'alimentation.

II.6.5.2. Corrosion

La corrosion est la dégradation d'un matériau sous l'action d'agents atmosphériques ou chimiques. Elle se définit comme la destruction des métaux résultant de réactions chimiques ou électrochimiques lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aqueux ou gazeux. Les métaux, élaborés industriellement à partir d'un minerai à travers des opérations souvent complexes, sont généralement affectés par la corrosion, perceptible notamment par la diminution de leur poids [15].

II.6.5.3. Détecteur de flamme

Un détecteur de flamme est un type de capteur capable de détecter et de réagir à la présence d'une flamme. Si le détecteur n'est pas nettoyé, la section de flamme du brûleur ne fonctionnera pas correctement au démarrage.

II.6.5.4. Entraînement de gaz dans la chambre de combustion

Avant le démarrage de la chaudière, on active le ventilateur de tirage forcé (FDF) pendant 30 minutes pour effectuer un balayage, afin d'éliminer tout gaz naturel présent dans la chaudière.

II.6.5.5. L'entartrage

La précipitation des sels sous forme cristalline directement sur les parois externes des tubes de la chaudière est appelée tartre. Le tartre agit comme un isolant thermique, entravant le transfert de chaleur. Les principaux types de tartre sont :

- Carbonate de calcium (CaCO_3).
- Carbonate de magnésium (MgCO_3).
- Phosphate de calcium $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)$.

II.6.5.6. Primage

Le primage est défini comme l'entraînement de gouttelettes d'eau dans la vapeur produite dans des conditions normales de fonctionnement. Il peut être dû à une conception inadéquate du séparateur eau/vapeur, à une forte salinité de l'eau ou à une concentration élevée en silice. Le phénomène de primage peut entraîner l'érosion des ailettes de la turbine.

II.6.5.7. Niveau d'eau dans le ballon de vapeur inférieur à 20%

Si le niveau d'eau diminue à 20%, le capteur de niveau (LSLL) envoie un signal aux vannes de sécurité pour couper l'alimentation en gaz naturel, afin de prévenir le déclenchement de la chaudière.

II.6.5.8. Incendie

Pour interrompre le courant, isoler le gaz naturel et alerter le service de sécurité tout en informant la hiérarchie.

II.6.5.9. Manque de Gaz Naturel

Isoler le circuit de gaz naturel à l'aide de vannes jusqu'à ce que celui-ci revienne.

II.6.5.10. Pression

La pression de vapeur est de 10 bars. Si cette pression augmente, le capteur de pression (PSLL) envoie un signal au régulateur (master) pour diminuer la pression. Si malgré cela la pression continue d'augmenter, la chaudière se déclenche.

II.6.5.11. Manque Air instrument

Isoler le circuit de gaz naturel à l'aide de vannes jusqu'à ce que celui-ci revienne.

II.6.5.12. Problème mécanique

Pour réaliser un arrêt rapide, il faut avertir immédiatement la hiérarchie.

II.6.5.13. Manque d'électricité

Dans ce scénario, le générateur de secours prend en charge le démarrage et l'alimentation, en procédant à un démarrage normal comme décrit précédemment. Tous ces problèmes menacent l'intégrité du système et peuvent, dans certains cas, entraîner l'explosion du générateur de vapeur. Généralement, les explosions des générateurs de vapeur se présentent sous deux formes :

- Explosion des parties sous pression.
- Explosion de la chambre de combustion.

II.7. La combustion

C'est un processus thermochimique d'oxydoréduction. Lorsqu'elle est intense, elle se manifeste par une flamme en cas de combustion ou par une déflagration si la vitesse de propagation de la flamme dépasse celle du son.

La combustion représente une transformation chimique où des composés complexes se fragmentent en composés plus simples et plus stables grâce à une réorganisation des liaisons entre les atomes. La chimie de la combustion constitue un élément clé de la chimie à haute température, principalement caractérisée par des réactions radicalaires. Toutefois, il est envisageable d'aborder la combustion à travers une réaction globale unique.

- La combustion est une réaction chimique qui se produit lors de la combustion d'une matière combustible et du dioxygène.
- Il se produit un dégagement de chaleur appelée réaction exothermique.

Combustible + carburant \rightarrow produits de combustions

Dans notre étude, le carburant utilisé est le gaz Naturel Algérien

Gaz naturel + air \rightarrow Fumées

Chapitre III

Partie de calcul

III. Chapitre 3 : Partie de calcul

III.1. Introduction

La chaleur générée par la combustion n'est jamais entièrement absorbée par le fluide que l'on souhaite chauffer, en raison des pertes inévitables causées par divers facteurs. De nombreux éléments influent sur l'efficacité de ce transfert de chaleur, tels que la température et la pression d'entrée de l'eau, du comburant et du combustible (comme le gaz naturel), les propriétés de l'eau introduite, le niveau d'eau dans la chaudière, ainsi que les fluctuations de la demande en vapeur.

III.2. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est une mesure de l'énergie thermique libérée lors de la combustion d'un combustible. Il est exprimé en kilowattheures (kWh) ou en mégajoules (MJ) par unité de poids ou de volume du combustible. Ce paramètre est crucial pour plusieurs raisons, notamment pour calculer le coût de l'énergie produite par la combustion d'un combustible et pour comparer l'efficacité énergétique de différents combustibles.

III.2.1. Pouvoir Calorifique du Gaz

Le gaz pauvre est dilué 10 à 15 fois avec l'azote par rapport le gaz riche.

Tableau 6 : Pouvoir calorifique de gaz naturel et gaz riche.

Pouvoir calorifique	Inférieur	Supérieur
Le gaz naturel pauvre	9,16 kWh/m ³	10,17 kWh/m ³
Le gaz naturel riche	10,12 kWh/m ³	[11,3 ; 11,7] kWh/m ³ .

III.2.2. Pouvoir Calorifique d'Autres Combustibles

Tableau 7 : Pouvoir calorifique pour différent combustible.

Les combustibles	Le pouvoir calorifique	Le pouvoir calorifique inférieur
Butane	12,66 kWh/kg	13,7 kWh/kg
Propane	12,78 kWh/kg	13,89 kWh/kg
Gasoil	9,96 kWh/l	10,70 kWh/l
Charbon	8,72 kWh/kg	9,27 kWh/kg

III.2.3. Importance du Pouvoir Calorifique

- **Comparaison des énergies** : Le pouvoir calorifique permet de comparer l'efficacité énergétique de différents combustibles, ce qui est utile pour les consommateurs souhaitant changer de mode de chauffage ou pour évaluer l'efficacité de différents appareils utilisant la même énergie.

- **Facturation de l'Énergie** : Pour les consommateurs utilisant du gaz naturel, le pouvoir calorifique est essentiel pour comprendre sa facture d'énergie, car chaque mètre cube de gaz ne contient pas le même pouvoir calorifique.

En résumé, le pouvoir calorifique est une mesure clé pour évaluer l'efficacité énergétique des combustibles et pour calculer le coût de l'énergie produite par leur combustion. Il est important de connaître le pouvoir calorifique du combustible utilisé pour optimiser l'utilisation de l'énergie et comprendre la facture d'énergie.

III.2.4. Les types de pouvoir calorifique

On distingue deux types de pouvoir calorifique :

III.2.4.1. Pouvoir calorifique inférieur ou PCI

Il s'agit de la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion, n'incluant pas la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées.

$$H(\text{rp}) = \sum n \times \Delta H_{f(\text{produit})} - \sum m \times \Delta H_{f(\text{réactifs})} \quad \mathbf{H(\text{rp})} = -\text{PCI}$$

III.2.4.2. Pouvoir calorifique supérieur ou PCS

Il s'agit de la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée. Concrètement, le PCS est égal à la somme du PCI et de la chaleur latente dans la vapeur d'eau produite par la combustion. La somme du PCS est donc toujours supérieure à celle du PCI, car le calcul du PCI ne prend pas en compte l'utilisation de l'énergie issue des fumées.

III.2.5. Différence entre PCS et PCI

Le pouvoir calorifique est dit « inférieur » (abrégé : PCI) lorsque cette eau de combustion est supposée restée à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

Le pouvoir calorifique est dit « supérieur » (abrégé : PCS) lorsque l'eau produite lors de la combustion est supposée ramenée à l'état liquide dans les produits de combustion.

III.3. Calcul de Rendement de la chaudière (35-M-0511)

Le rendement d'une chaudière correspond à la relation entre l'énergie produite et l'énergie totale consommée. On le trouve dans la relation suivante :

$$\mu = (\text{Puissance utile} \div \text{Puissance introduite}) \times 100$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$Pu = \sum (D_s \times h_s) - \sum (D_e \times h_e)$$

Pu : puissance utile (kJ/h).

D_e : débit de l'eau entrante (kg/h).

H_e : enthalpie d'eau de l'entrée (kJ/kg).

D_s : débit de la vapeur sortante (kg/h).

Par la suite, les puissances injectées dans la chaudière sont calculées :

Les sources de puissance apportées sont diverses, la principale étant le combustible, elle est représentée par la relation suivante :

$$P_{in} = D_{gaz} \times PCI$$

Avec :

P_{in} : puissance introduite en (kJ/h).

PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible (gaz) en (kJ/Nm³).

D_{gaz} : débit de combustible (gaz) en (Nm³/h).

III.4. Présentation des données collectées

Tableau 8: les compositions de GPL avec ces enthalpies et PCI.

Les composants	Nom	État	Enthalpie de formation Hf_0 (kJ/kmol)	Mass M(g/mol)	PCI (kJ/Kg)
CO2	Dioxyde de Carbone	Gaz	-393.520	44	/
C1	Méthane	Gaz	-74.850	16	50144
C2	Éthane	Gaz	-84.680	30	47594
C3	Propane	Gaz	-103.850	44	64459
C4	Butane	Gaz	-126.150	58	101825
C5	Pentane	Gaz	-146.440	72	45445
H2O	Eau	Gaz	-241.820	18	/

III.4.1.1. Les paramètres de chaudière dans le cas Design

Tableau 9: Les paramètres de sortie de la chaudière [22].

Évaporation (Maximum continu)	19000 kg/h
Pression de marche maximale	12 bars G (1,2 MPa)
Pression de vapeur (à la sortie de tambour)	10 bars G (1,0 MPa)
Température de vapeur (à la sortie de tambour)	183 °C
Enthalpie	2777.7 kJ/kg

Tableau 10: Les paramètres d'entrée de l'eau pour la production 19th/h [22].

Débit d'eau d'entrée	19095 Kg/h
Pression	1.5 MPa
Température	0,5 °C
Enthalpie	3,6 kJ/Kg

Tableau 11: : Les paramètres d'entrée du combustible [22].

Débit du gaz	1538 Nm3/h
Pression	0,9 MPa
Température	37,8°C
PCI	38970 kJ/Nm3

III.4.1.2. Les paramètre de chaudière dans le cas Réel (durent la période 02-29 février 2024)

Tableau 12: Les paramètres entrée d'eau.

Débit d'eau d'entrée	4590 Kg/h
Pression	0,79 MPa
Température	24°C
Enthalpie	104,89 kJ/kg

Tableau 13: Les paramètres d'entrée du combustible.

Débit du gaz	614 Nm3/h
Pression	0.8MPa
Température	22°C
PCI	77699,03kJ/Nm3

Tableau 14: Les paramètres de sortie de la Chaudière.

Débit de vapeur	9014 kg/h
Pression de vapeur	0,755 MPa
Température de vapeur	173°C
Enthalpie	2773,69 kJ/kg

Interpolation d'enthalpie en cas réel :

$$(H_x - 2766,4) / (2769,1 - 2766,4) = (0,755 - 0,75) / (0,8 - 0,75)$$

Pression	Enthalpie
0.75 MPa	2766,4 kJ/Kg
0.755 MPa	2773,69 kJ/Kg
0.8 MPa	2769,1 kJ/Kg

III.5. Calcul de PCI

- Méthane :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O} \\
 H(rp) &= (Hf_0)CO_2 + 2(Hf_0)H_2O_g - (Hf_0)CH_4 \div M \\
 H(rp) &= (-393520 - (2 \times 241820) + 74850) \div 16 \\
 H(rp) &= -50144 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$PCI = 50144 \text{ kJ/kg}$$

- Éthane :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{C_2H_6 + 7 / 2 O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O} \\
 H(rp) &= (2(Hf_0)CO_2 + 3(Hf_0)H_2O_g - (Hf_0)C_2H_6) \div M(C_2H_6) \\
 H(rp) &= (-(2 \times (-393520)) + 3 \times (-241820) - (-84680)) \div 30 \\
 H(rp) &= -47594 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$PCI(C_2H_6) = 47594 \text{ kJ/kg}$$

- Propane :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O} \\
 H(rp) &= 3(Hf_0)CO_2 + 4(Hf_0)H_2O_g - (Hf_0)C_3H_8 \div M(C_3H_8) \\
 H(rp) &= (-(3 \times (-393520)) + 4 \times (-241820) - (-103850)) \div 44 \\
 H(rp) &= -64459 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$PCI(C_3H_8) = 64459 \text{ kJ/kg}$$

- Butane :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{C_4H_{10} + 13 / 2 O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O} \\
 H(rp) &= (4(Hf_0)CO_2 + 5(Hf_0)H_2O_g - (Hf_0)C_4H_{10}) \div M(C_4H_{10}) \\
 H(rp) &= (-(4 \times (-393520)) + 5 \times (-241820) - (-126150)) \div 58 \\
 H(rp) &= -101825 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$PCI(C_4H_{10}) = 101825 \text{ kJ/kg}$$

- Pentane :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O} \\
 H(rp) &= (5(Hf_0)CO_2 + 6(Hf_0)H_2O_g - (Hf_0)C_5H_{12}) \div M(C_5H_{12}) \\
 H(rp) &= (-(5 \times (-393520)) + 6 \times (-241820) - (-146440)) \div 72 \\
 H(rp) &= -45445 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$PCI(C_5H_{12}) = 45445 \text{ kJ/kg}$$

Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel est déterminé par les propriétés calorifiques individuelles de ses composants ainsi que par leur proportion volumique.

$$PCI(GN) = (\%CH_4 \times PCI(CH_4)) + (\%C_2H_6 \times PCI(C_2H_6)) + (\%C_3H_8 \times PCI(C_3H_8)) \\ + (\%C_4H_{10} \times PCI(C_4H_{10})) + (\%C_5H_{12} \times PCI(C_5H_{12}))$$

$$PCI(GN) = ((0,28 \times 50144) + 1,71 \times 47494) + (61,26 \times 64459) + (36,46 \times 101825) \\ + (0,29 \times 45445) \div \mathbf{100}$$

$$PCI(GN) = 77699,03 \text{ kJ/kg}$$

III.6. Calculs d'efficacité réalisés

III.6.1. Calculs d'efficacité dans le cas Design

$$\mu = Pu \div Pin$$

Pin : puissance introduite en (kJ/h).

Pu : puissance utile (kJ/h)

$$Pu = (D_s \times h_s) - (D_e \times h_e)$$

$$Pu = (19000 \times 2777.7) - (19095 \times 3.6)$$

$$Pu = 52707558 \text{ kJ/h}$$

$$Pu = 14640.99 \text{ Kw}$$

$$Pin = D_{gaz} \times PCI$$

$$Pin = 1538 \times 38970$$

$$Pin = 59935860 \text{ kJ/h}$$

$$Pin = 16648.85 \text{ Kw}$$

$$\mu = Pu \div Pin$$

$$\mu = 1464,99 \div 16648,85$$

$$\mu = 88 \%$$

III.6.2. Calculs d'efficacité dans le cas Réel (02-29 février 2024)

$$Pu = (D_s \times h_s) - (D_e \times h_e)$$

$$Pu = (9014 \times 2773,69) - (4590 \times 104,89)$$

$$Pu = 24520596,56 \text{ kJ/h}$$

$$Pu = 6811,27 \text{ Kw}$$

$$Pin = D_{gaz} \times PCI$$

$$Pin = 614 \times 77699,03$$

$$Pin = 4770703.81 \text{ kJ/h}$$

$$Pin = 13252.002 \text{ Kw}$$

$$\mu = Pu \div Pin$$

$$\mu = 6811,27 \div 13252,002$$

$$\mu = 51,39 \%$$

III.7. Récapitulatif des résultats trouver

Tableau 15: Récapitulatif des résultats trouver.

Données	Réel	Design (conception)
PCI du GN	77699,03	38970
Enthalpie d'eau (kJ/Kg)	104,89	3,6
Enthalpie de vapeur (kJ/Kg)	2773,69	2777,7
Puissance utile (kW)	13252,002	14640
Puissance introduite (kW)	6811,27	16848,85
Rendement %	51,39	88

III.8. Interprétation des résultats

Sur la base des données fournies, plusieurs écarts entre les valeurs réelles et les valeurs de conception pourraient indiquer des problèmes potentiels avec le système de chaudière :

Les débits et les pressions de l'eau et de la vapeur sont inférieurs aux valeurs de conception, suggérant des problèmes possibles avec la pompe d'alimentation, le système de contrôle de pression ou le processus de génération de vapeur.

La température de l'eau est supérieure à la valeur de conception, tandis que celle de la vapeur est inférieure, ce qui pourrait indiquer un problème de transfert de chaleur.

Les valeurs d'enthalpie de l'eau et de la vapeur sont inférieures aux valeurs de conception, pointant vers des problèmes de transfert de chaleur ou de génération de vapeur.

La valeur PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) du gaz est supérieure à la valeur de conception, suggérant un problème de débit de gaz ou de combustion.

En conclusion, le système de chaudière ne fonctionne pas à son efficacité optimale et une enquête approfondie est nécessaire pour identifier et résoudre ces écarts. Il est recommandé de consulter un spécialiste en chaudière.

III.9. Perspective

Problèmes potentiels avec le système de chaudière :

D'après les données fournies, plusieurs écarts entre les valeurs réelles et les valeurs de conception pourraient indiquer des problèmes potentiels avec le système de chaudière :

Débits et pressions de l'eau et de la vapeur inférieurs aux valeurs de conception

Cela pourrait être dû à un problème avec la pompe d'alimentation, le système de contrôle de pression ou le processus de génération de vapeur. La pompe d'alimentation peut ne pas fournir

suffisamment d'eau à la chaudière, le système de contrôle de pression peut ne pas maintenir la pression correcte dans la chaudière, ou le processus de génération de vapeur peut ne pas être efficace.

Température de l'eau supérieure à la valeur de conception et température de la vapeur inférieure à la valeur de conception

Cela pourrait indiquer un problème de transfert de chaleur. La chaudière peut ne pas transférer efficacement la chaleur de l'eau à la vapeur, ou la vapeur peut ne pas être correctement condensée en eau.

Valeurs d'enthalpie de l'eau et de la vapeur inférieures aux valeurs de conception

Cela pourrait également indiquer un problème de transfert de chaleur ou de génération de vapeur. L'enthalpie est une mesure de la teneur en énergie d'une substance. Si l'enthalpie de l'eau et de la vapeur est inférieure aux valeurs de conception, cela signifie que la chaudière ne produit pas suffisamment d'énergie.

Valeur PCI du gaz supérieure à la valeur de conception

Cela pourrait être dû à un problème de débit de gaz ou de combustion. Le débit de gaz peut être trop élevé ou la combustion du gaz peut ne pas être complète.

III.10. Solutions potentielles

Il est recommandé de consulter un spécialiste en chaudière pour identifier et résoudre ces problèmes. Cependant, voici quelques solutions potentielles qui pourraient être envisagées :

Vérifier la pompe d'alimentation, le système de contrôle de pression et le processus de génération de vapeur.

Cela peut impliquer le nettoyage ou le remplacement de la pompe d'alimentation, le réglage du système de contrôle de pression ou l'inspection du processus de génération de vapeur pour détecter d'éventuels problèmes.

Nettoyer ou remplacer l'échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur est l'endroit où la chaleur est transférée de l'eau à la vapeur. S'il est sale ou endommagé, il peut ne pas transférer efficacement la chaleur.

Régler le brûleur

Le brûleur est responsable de la combustion du gaz. S'il n'est pas correctement réglé, la combustion peut ne pas être complète.

Vérifier le débit de gaz

Le débit de gaz peut être vérifié à l'aide d'un débitmètre. Si le débit de gaz est trop élevé, il peut être réduit en ajustant la valve d'alimentation en gaz.

Sera en mesure de diagnostiquer le problème et de recommander la meilleure solution.

Il est important de noter que ce ne sont que des solutions potentielles. Un spécialiste en chaudière sera en mesure de diagnostiquer le problème et de recommander la meilleure solution.

Conclusion Générale

Au cours de notre stage, nous avons effectué une analyse approfondie des chaudières industrielles au sein du complexe GP1/Z de Sonatrach à Arzew. Cette expérience nous a donné un aperçu détaillé des divers types de chaudières en service. De plus, nous avons procédé à des évaluations de rendement pour l'une des chaudières étudiées.

Dans les conditions actuelles, le rendement de la chaudière reste inférieur au niveau recommandé par le fabricant, avec un taux de (51,39%) par rapport à (88%).

Cette baisse de performance est attribuée à un transfert de chaleur insuffisant à l'intérieur des tubes, causé par la présence d'une couche de résidus sur les parois internes de la chaudière, ce qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur.

Le système de chaudière ne fonctionne pas à son efficacité optimale. Une enquête approfondie est nécessaire pour identifier et résoudre les problèmes. Il est recommandé de consulter un spécialiste en chaudière.

Annexes

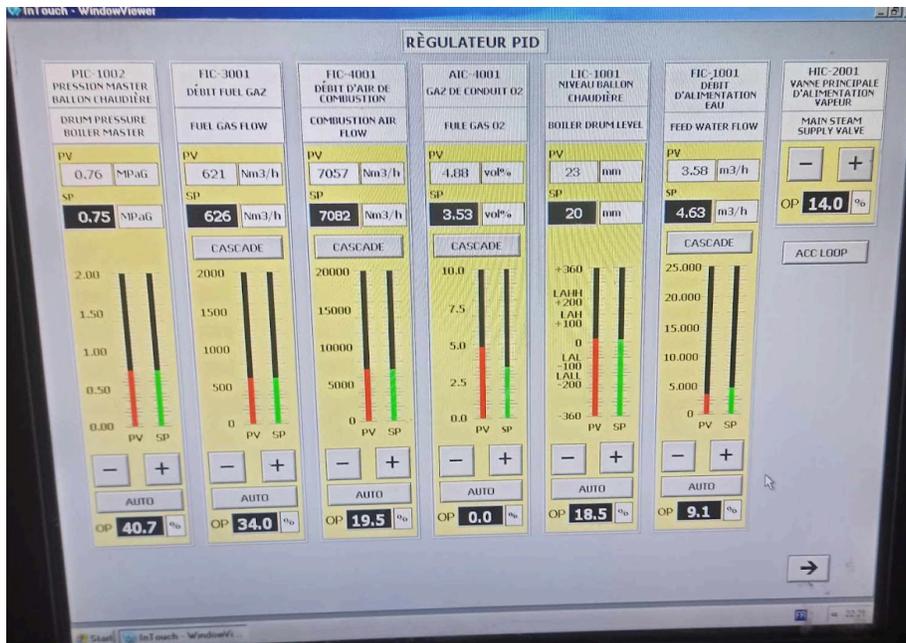


Figure 23 : Tableau de bord de régulateur.

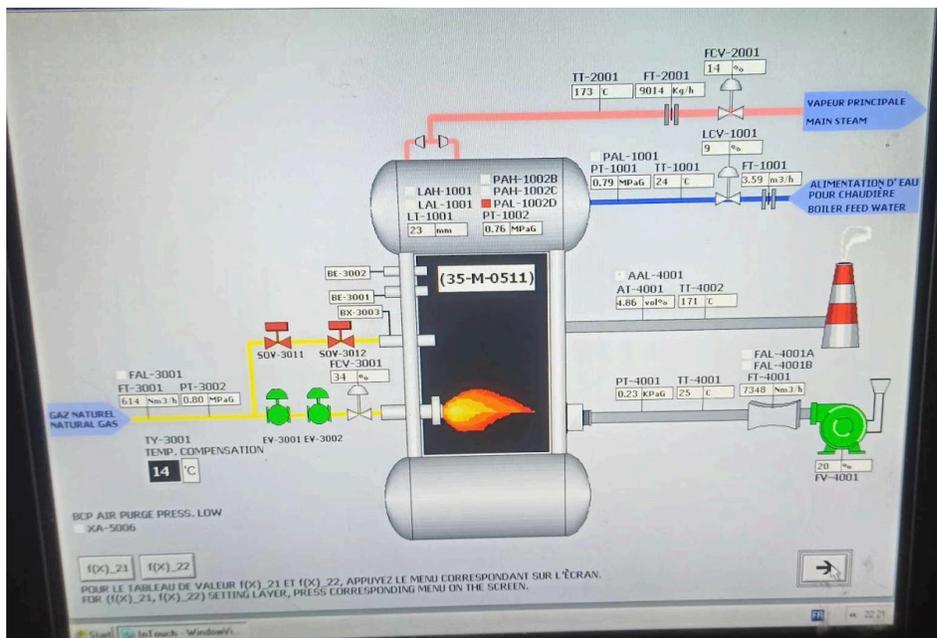


Figure 22 : Tableau de bord de Chaudière.

REGISTRE TECHNIQUE DE GAZ

DATE: 26.02.2024 QUART Start De 19 Heures à 07 Heures

Personnel/ Présent: (A) Personnel/ Absent :

Type d'analyse : ANALYSE GLOBALE DES GAZ
 Date Echantillonnage : 27-02-2024 Heure Prise Echantillon : 03.30

Repère échantillon	Comp / Analyses								O.B.S	OBSERVATIONS
	C1	C2	C3	IC4	NC4	IC5	NC5	C6+		
SC0001	0,28	1,71	61,26	12,32	24,14	0,26	0,03			
SC0003										
SC1104										
SC1201			0,22	31,72	67,05	0,93	0,08			
SC1203		0,74	99,18	0,08						
SC2104										
SC2201			0,56	32,15	66,23	0,96	0,10			
SC2203		0,82	98,96	0,21	0,01					
SC3104										
SC3201										
SC3203										
SC4104										
SC4201										
SC4203										
SC5104										
SC5201			0,39	32,80	65,74	0,97	0,10			
SC5203		0,77	98,28	0,91	0,04					
SC6104										
SC6201			0,23	32,39	66,29	0,98	0,11			
SC6203	0,34	2,68	96,45	0,50	0,03					
SC7104										
SC7201										
SC7203										
SC8104										
SC8201			0,18	31,88	66,89	0,96	0,09			
SC8203		0,59	99,30	0,11						
SC9104										
SC9201			0,30	31,91	66,71	0,97	0,11			
SC9203		0,54	99,32	0,14						

DU CHEF
QUART

Figure 24 : Registre technique de gaz.

Annexe

Annexe 1: Vapeur saturée : table de la température.

Vapeur saturée: table de la température

Temp. °C T	Pres. kPa P	Volume massique m³/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. u _f	Vapeur sat. u _g	Liquide sat. u _f	Évap. u _{fg}	Vapeur sat. u _g	Liquide sat. h _f	Évap. h _{fg}	Vapeur sat. h _g	Liquide sat. s _f	Évap. s _{fg}	Vapeur sat. s _g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	Mpa 0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Annexe 2 : Vapeur saturée : table de la pression

Vapeur saturée : table de la pression

Pres. kPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. <i>v_f</i>	Vapeur sat. <i>v_g</i>	Liquide sat. <i>u_f</i>	Évap. <i>u_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>u_g</i>	Liquide sat. <i>h_f</i>	Évap. <i>h_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>h_g</i>	Liquide sat. <i>s_f</i>	Évap. <i>s_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>s_g</i>
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6772
10	311.06	0.001 452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Références Bibliography

- [1] *Catalogue mécanique documente GP1/Z.*
- [2] *Manuel Opérateur GP1/Z, Généralités sur le complexe..*
- [3] M. P. K. COMPANY, «Manuel opératoire,» chez *Volume II (process)*, USA, 1994.
- [4] *Catalogue mécanique : manuel (document GP1/Z)..*
- [5] S. d. é. C. G. A. Département technique, *Manuel opératoire*, 2003.
- [6] (. GP1/Z), *Catalogue mécanique :manuel.*
- [7] B. Kaabouche, *Description de la section de stockage de l'unité GPL-1 HASSI MESSAOUD*,p. 38, Novembre 2017.
- [8] A. Daddiou, *Optimisation des paramètres de marche de l'unité de GPL de RHOURE NOUSS* ;p.58, 2010.
- [9] P. Wuithier, Raffinage et Genie Chimique, PARIS: TECHNIP, 1972.
- [10] [En ligne]. Available: jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques .
- [11] [En ligne]. Available: jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques .
- [12] *Étude techno-économique du remplacement des chaudières de procédé au complexe GL1/Z.ARZEW..*
- [13] H. Yousef, *Etude d'une chaudière industrielle à haute pression et du circuit de vapeur d'eau*, *Chimie industrielle*, Université USTO , 1992.
- [14] [En ligne]. Available: <https://www.quelleenergie.fr/>.
- [15] [En ligne]. Available: <https://www.thermogroup.com/>.
- [16] [En ligne]. Available: <https://www.quelleenergie.fr/>.
- [17] [En ligne]. Available: <https://www.choisir.com/energie/articles/163547/rendement-dune-chaudiere-comment-le-definir-et-le-calculer-pour-faire-des-economies-denergie>.
- [18] [En ligne]. Available: <https://www.quelleenergie.fr/>.
- [19] [En ligne]. Available: <https://www.thermogroup.com/>.
- [20] *Documentation du complexe GP1/Z (Section génératrice de vapeur)..*
- [21] D. d. c. GP1/Z, *objet : Suivi des chaudières combustion et rendement*, 18 Février 1992..
- [22] *catalogue manuel de la chaudiere M-0511 du complexe GP1/Z..*
- [23] *Catalogue mécanique documente GP1/Z.*