



Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم هندسة الطرائق
Process Engineering Department of

قسم هندسة الطرائق

التاريخ:

رقم : / ج. م. ك. ع. ت. / 2023

Department of Process Engineering

The Date

Ref : / U.M/F.S.T/2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie chimique

Thème

**Détermination de rendement actuel d'un équipement industriel :
Chaudière à tube d'eau (M-0511) du complexe GP1/Z**

- 1 Khedim Lina Ikram
- 2 Mohammed Seghir Chems

Soutenu le 21/06/2023 devant le jury composé de :

Présidente :	KHELLADI Malika	MCB	Université de Mostaganem
Examineur :	MOHAMED SEGHIR Zahira	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEZOUAGH Amina	MCB	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mon cher grand-père
« Dinar. Mohammed », que Dieu lui fasse
miséricorde.

Je dédie ce travail aussi aux lumières de mes jours,
les forces de mes efforts ma vie et mon bonheur
mes mères « Djamila, Fadila », je dis merci pour
toute assistantes et présence dans ma vie.

Je dédie ce travail à tout ma famille (mes oncles et
mes tantes).

A tout mes amis proches.

Khedim Lina Ikram

Dédicaces

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

A Mes chers parents. Ma mère pour m'avoir mis au monde et pour m'avoir accompagnée tout long de ma vie. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivée jusqu'ici.

A Mes chers frères : Abdelkader, Youcef, Hamza

A Mes cousines : Israa, Marwa, Asmaa, Fatima,
Hayet, Amel

A Mes amies :Khadidja, Houhou, Naima, Nouria,

Djamia, Sanaa

A Mon binôme Lina Ikram

Mohammed Seghir Chems

Remerciements

Avant tout nous remercions le Bon Dieu « **Allah** » de nous avoir la santé et le courage d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur, **M^{me} MEZOUAGH Amina** pour son aide et son suivi constant tout au long du stage et pour avoir fait confiance et encouragée à entreprendre ce travail qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions également les membres jury **M^{me} MOHAMED SEGHIR Zahira** et **M^{me} KHELLADI Malika** qui nous font l'honneur de juger notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel du complexe **GP1/Z** pour nous avoir ouvert ses portes et nous a permis de réaliser et de réussir ce travail.

A nos chers parents pour leur soutien constant et leurs encouragements aussi à nos chères familles et amis proches.

Merci à tout

Sommaire

Introduction générale	1
I.2. Présentation du complexe GP1/Z	4
I.3. Situation	5
I.4. Historique	5
I.5. Organisation du complexe	5
I.6. Principales installations du complexe	6
I.7. Description du système de production	7
I.7.1. Zone de stockage d'alimentation	7
I.7.2. Zone de fabrication	7
I.7.2.1. Section de déshydratation	7
I.7.2.2. Section de séparation	7
I.7.2.2.a. Fractionnateur	8
I.7.2.2.b. Dé-éthaniseur	8
I.7.2.3. Section de réfrigération	8
I.7.2.4. Section huile chaude	9
I.7.3. Zone des utilités	9
I.8. Les équipements principaux	9
I.8.1. Ballons	9
I.8.2. Les échangeurs de chaleur	9
II.1. Introduction	11
II.2. Définition d'une Chaudière	11
II.3. Le rôle d'une chaudière	11
II.4. Les types des chaudières	11
II.4.1. Chaudière à tube d'eau	11
II.4.1.a. Les avantages	12
II.4.2.b. Les inconvénients	12
II.4.2. Chaudière à tube fumée	12
II.4.2.a. Les avantages	13
II.4.2.b. Les inconvénients	13
II.5. Description de la chaudière à tube d'eau	14
II.6. Principaux éléments des chaudières	15
II.6.1. Chambre de combustion (Foyer)	16
II.6.2. Bruleurs	16
II.6.3. Pilot (allumeur)	16
II.6.4. Tube de vaporisation	17

Sommaire

II.6.5. Ventilateur d'air	17
II.6.6. Cheminée.....	17
II.6.7. Ballon de vapeur supérieur	17
II.6.8. Ballon inférieur.....	18
II.6.9. Evaporateur	19
II.6.10. Economiseur	19
II.7. Principe de fonctionnement de la chaudière.....	19
II.8. Les problèmes rencontrés dans la chaudière	20
II.8.1. Manque d'eau d'alimentation	21
II.8.2. Corrosion	21
II.8.3. Diminution de PH.....	21
II.8.4. Entrainement de gaz dans la chambre de combustion.....	21
II.8.5. L'entartrage.....	21
II.8.6. Détecteur de flamme	21
II.8.7. Niveau d'eau dans le ballon de vapeur inférieur à 20%.....	22
II.8.8. Pression	22
II.8.9. Incendie	22
II.8.10. Problème mécanique	22
II.8.11. Manque de Gaz Naturel.....	22
II.8.13. Manque d'Electricité.....	22
II.8.14. Primage	22
III.1. Introduction	24
III.2. Définition de la combustion	24
III.3. Type de combustion.....	24
III.3.1. Combustion complète	24
III.3.2. Combustion incomplète.....	26
III.3.3. Combustion rapide	25
III.3.4. Combustion lente	25
III.4. Combustibles	25
III.4.1. Classification du combustible	25
III.4.1.1. Combustibles solides.....	25
III.4.1.3. Combustibles gazeux	26
III.5. Le comburant	26
III.6. Caractéristique d'une réaction de combustion	26
III.6.1. Pouvoirs calorifiques	26
III.6.1.1. Pouvoir calorifique supérieur PCS	26

Sommaire

III.6.1.2. Pouvoir calorifique inférieur PCI	26
IV. 1. Introduction	28
IV.2. Calcul de Rendement de la chaudiere (M-0511)	28
IV.3. Calcul de rendement par rapport au Design	29
IV.3.1. la production de vapeur de 19th/hr (100%)	29
IV.4. Calcul de rendement actuel (réel).....	32
IV.5. Interprétation des résultats.....	38
IV.6. Recommandation	37
Conclusion générale	38
Références bibliographiques	43

Liste des figures

Figure I.1: Présentation du complexe.....	4
Figure I.2: Organigramme du complexe.	6
Figure I.3: Section déshydratation.	7
Figure I.4: Fractionnateur.....	8
Figure II.1: Chaudières à tubes d'eau.	12
Figure II.2: Schéma d'une chaudière à tube fumée.	13
Figure II.3: Chaudière à tube d'eau du complexe.....	14
Figure II.4: Vue de face d'une chaudière.....	15
Figure II.5: Schéma d'un bruleur.....	16
Figure II.6: Schéma d'une cheminée.	17
Figure II.7: Schéma du ballon de vapeur.	19
Figure II.8: Schéma descriptif de la chaudière du complexe.	20
Figure III.1: Triangle de feu.	25
Figure IV.1: La variation du rendement en fonction du combustible.	32
Figure IV.2: La variation de rendement en fonction du gaz naturel.	37

Liste des tableaux

Tableau III.1 1: La composition théorique d'air.	27
Tableau IV.1: Les paramètres d'entrée de l'eau pour la production 19 tn/h.	30
Tableau IV.2: Les paramètres d'entrée du combustible.	30
Tableau IV.3: Les paramètres de sortie de la chaudière.	31
Tableau IV.4: Les différents rendements par rapport les pourcentages.	32
Tableau IV.5: La composition du gaz naturel.	33
Tableau IV.6: Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 9h.	33
Tableau IV.7: Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 9h.	34
Tableau IV.8: Les caractéristiques de la vapeur qui sorte de la chaudière à 9h.	34
Tableau IV.9: Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 11h.	35
Tableau IV.10: Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 11h.	35
Tableau IV.11: Les caractéristiques de la vapeur qui sorte de la chaudière à 11h.	35
Tableau IV.12: Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 14h.	36
Tableau IV.13: Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 14h.	36
Tableau IV.14: Les caractéristiques de la vapeur qui sorte de la chaudière à 14h.	36
Tableau IV.15: Les résultats de calcul.	37

Nomenclature

Nomenclature

GP1/Z	Complexe de Gaz pétrole liquéfié à Arzew
GPL	Gaz pétrole liquéfié
GNL3/Z	Gaz naturel liquéfié à Arzew
GN	Gaz naturel
HP	Haut pression
MP	Moyenne pression
BP	Basse pression
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
m_{H_2O}	Masse d'eau formée lors de la combustion de l'unité du combustible
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ/m^3)
R	Rendement de la chaudière (%)
P_u	Puissance utile (kw)
P_{int}	Puissance introduit (kw)
D_e	Débit de l'eau entrante (kg/h)
D_s	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
FDF	Ventilateur à tirage forcé
LSLL	Level slow low
PSLL	Pressure slow low
BOG	Boiler Oil Gaz

Résumé :

La chaudière est un dispositif pour chauffer l'eau et de produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. Lors de sa production, la chaudière est exposée à des problèmes de corrosion, de primage et des dépôts de tartre au niveau ses composants tels que les tubes de fumées et les tubes d'eau, ce qui provoque la diminution de rendement de la chaudière.

Le but de ce travail est l'étude d'une chaudière à tubes d'eau de complexe GP1/Z, en suivre le calcul de son rendement dans les cas des conditions désigne et réel.

Mots-clés : Chaudière, Vapeur, l'eau, Puissance, Rendement.

Abstract:

The boiler is a device for heating water and producing the steam necessary for the operation of the processes. During its production, the boiler is exposed to problems of corrosion, priming and scale deposits on its components such as the smoke tubes and the water tubes, which causes the boiler's efficiency to decrease. The purpose of this work is the study of a boiler with water tubes of complex GP1/Z, to follow the calculation of its output in the cases of the conditions designates and real.

Keywords: Boiler, Steam, water, Power, Efficiency.

ملخص

الغلاية عبارة عن جهاز لتسخين المياه وإنتاج البخار اللازم لتشغيل العمليات. تتعرض الغلاية أثناء إنتاجها لمشاكل التآكل والتشكيل والترسبات الكلسية على مكوناتها مثل أنابيب الدخان وأنابيب المياه ، مما يؤدي إلى انخفاض مردودية الغلاية . الغرض من هذا العمل هو دراسة غلاية ذات انابيب مائة معقدة GP1/Z لمتابعة حساب مردوديتها في حالات الظروف المحددة والحقيقية.

الكلمات المفتاحية: غلاية ، بخار ، ماء ، طاقة ، كفاءة.

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est riche en gisement de pétrole plus particulièrement en sud (Sahara), elle produise et exporte le gaz et le pétrole vers de nombreux pays dans le monde.

On trouve des hydrocarbures en état gazeux et liquides. Le gaz pétrole liquéfié connu sous le terme de GPL, est considéré comme une grande source d'énergie, est un mélange d'hydrocarbures légers stocké à l'état liquide, et issus du raffinage du pétrole pour 40% et du traitement du gaz naturel pour 60%. Le GPL est un mélange de propane et de butane, ils sont composés d'environ 80% de butane et 20% de propane [1].

Avant d'être exportés, les produits finis doivent être soumis à un processus de transformation nécessitant un assemblage. Grands complexes de séparation GP1/Z est l'un des complexes de transformation.

Parmi les équipements fondamentaux dont dépend le travail de complexe est la chaudière

Le travail que nous avons présenté dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin d'étude consiste à faire une étude sur la chaudière du complexe GP1/Z, nous allons étudier et comparais les valeurs de rendement actuel et design.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

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

Le deuxième chapitre représente des généralités sur les chaudières particulièrement la chaudière de GP1/Z.

Le troisième chapitre donne des généralités sur la réaction de combustion.

Le dernier chapitre présente la partie de calcul, comporte un calcul de rendement de la Chaudière et une comparaison avec les valeurs design.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale suivi par quelques recommandations.

Problématique

Lors de la production de la vapeur, la chaudière est exposée à des problèmes de corrosion et à des dépôts de tartre au niveau de ses composants tels que les tubes ce qui provoque l'augmentation de taux de consommation de gaz naturel et donc la diminution de rendement de la chaudière.

Le but de ce travail est l'étude d'une chaudière à tubes d'eau de complexe GP1/Z, en suivre le calcul de son rendement dans les cas des conditions design et réel.

Chapitre I

I.1. Introduction

Le gaz de pétrole liquéfié connu sous le nom de GPL est obtenu à partir de pétrole brut après une distillation atmosphérique ou dans des champs de production du gaz naturel par utilisation de procédés de fractionnement.

De par son origine, le gaz de pétrole liquéfié est un mélange d'hydrocarbures à teneurs variables en légers. À température et pression atmosphériques, il est gazeux, mais peut être liquéfié à température ambiante sous une pression modérée.

Le GPL n'a pas de propriétés lubrifiantes, il est incolore en phase vapeur, cependant quand le liquide est évaporé, l'effet de refroidissement de l'air d'environnement peut causer une condensation et même une congélation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ce qui permet de rendre visible un espace de GPL.

Le GPL est pratiquement inodore et pour des raisons de détection et de sécurité, un odorant doit être ajouté dans des limites déterminées afin de le commercialiser

I.2. Présentation du complexe GP1/Z

Le complexe GP1/Z c'est un important complexe, construit dans la zone industrielle d'ARZEW dans le but de traiter le mélange brut GPL, venant de plusieurs gisements du sud algérien (Hassi Messaoud et Hassi R'Mel) pour la production des produits finis comme : propane commercial et du butane commercial [1].



Figure I.1 : Présentation du complexe.

I.3. Situation

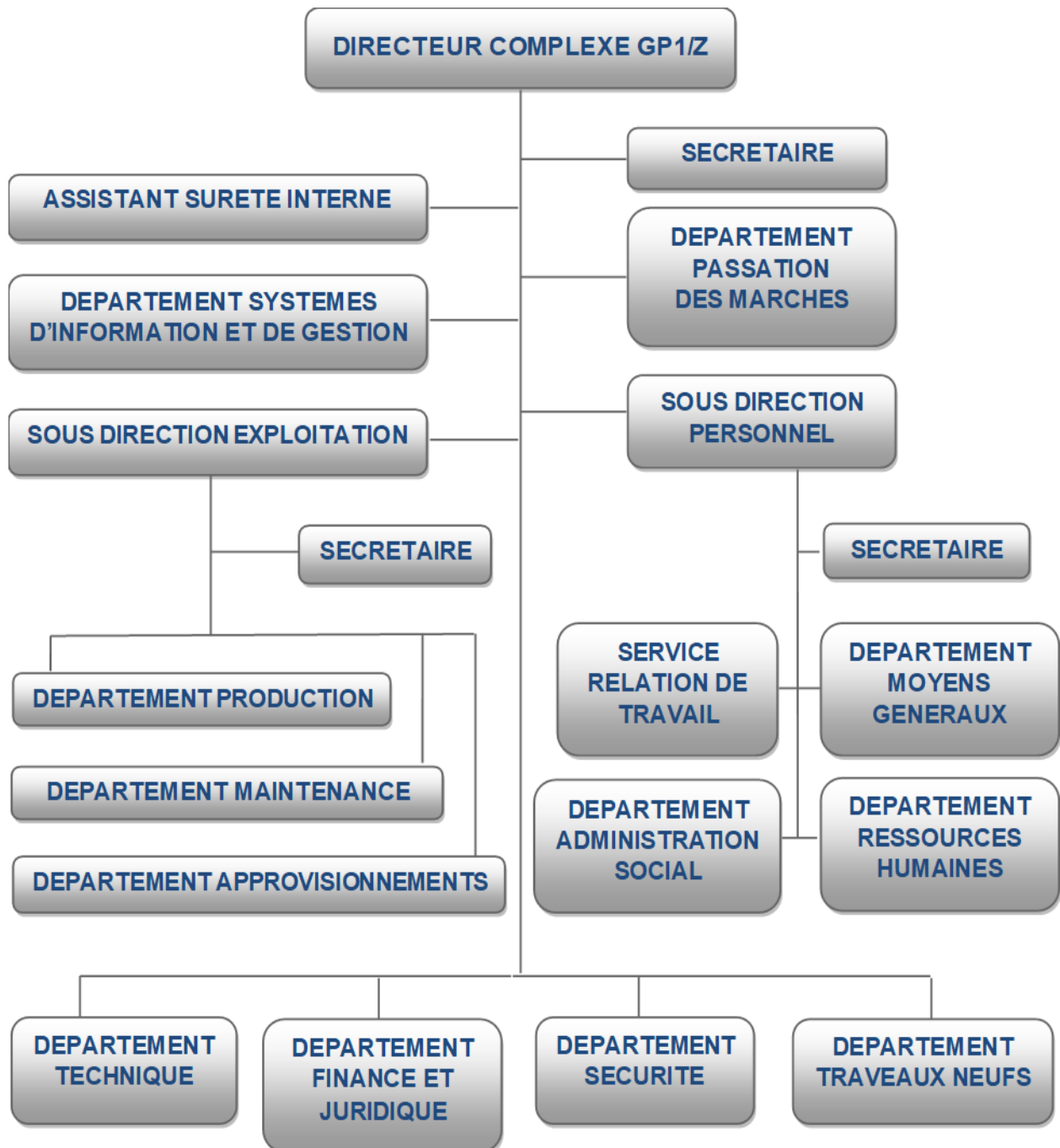
D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1/Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERS EL HADJAJ) à l'est et le complexe du gaz naturel liquéfié (GNL3/Z) à l'ouest, entre la mer méditerranée et la route national N°11.

I.4. Historique

- Le courant de construction passé avec « IHI-C-ITOH JAPON » le 11 Décembre 1978.
- L'ouverture du chantier le 10 Octobre 1980.
- L'inauguration officielle le 31 Décembre 1983 (quatre trains).
- Le chargement du premier navire de propane réfrigéré le 20 Février 1984.
- L'extension du complexe :
 - o Phase II le 24 février 1998 (deux trains).
 - o Phase III 24 février 2010 (trois trains) [1].

I.5. Organisation du complexe

Le complexe GP1/Z est géré suivant un organigramme bien déterminé de façon a bien maitrisé les taches, il est composé d'une direction générale, deux sous-directions, des départements de contrôle, comme le montre l'organigramme suivant [1].



FigureI.2 : Organigramme du complexe.

I.6. Principales installations du complexe

- 22 sphères de la charge de GPL.
- 09 trains de traitement du GPL.
- 01 sous station électrique alimentée par SONELGAZ.
- 04 bacs de stockage de propane à basse température.

- 04 bacs de stockage de butane à basse température.
- 04 sphères de stockage de produit à température ambiante (propane, butane).
- 01 station de pompier d'eau de mer pour le réseau d'incendie.
- 02 salles de contrôle.

I.7. Description du système de production

I.7.1. Zone de stockage d'alimentation

Cette zone comprend 22 sphères de stockage de GPL d'une capacité unitaire de 1000 m³.

I.7.2. Zone de fabrication

I.7.2.1. Section de déshydratation

Le but de cette section est de réduire la teneur en eau de 100 ppm à 5 ppm dans le déshydrateur de charge et de 5 ppm à environ 1 ppm dans le déshydrateur de garde (dans la section réfrigération). Afin d'éviter la formation du givre aux basses températures.



FigureI.3 : Section déshydratation.

I.7.2.2. Section de séparation

Le GPL provenant de section déshydratation est introduit dans le fractionnateur à un débit nécessaire.

Le GPL déshydraté entré dans le fractionnateur à température 71 °C, et passé par 3 préchauffeurs.

I.7.2.2.a. Fractionnateur

Est une colonne de fractionnement équipée de 55 plateaux à clapets. Cette colonne est effectuée la récupération de l'éthane et du propane en tête, le butane et le propane seront récupérés au fond. Le produit de tête du fractionnateur est envoyé vers le dé-éthaniseur au moyen d'une pompe de reflux qui assure en même temps la charge de dé-éthaniseur et le reflux du fractionnateur. Le butane sortant du fond est dirigé vers la section de réfrigération.



Figure I.4 :Fractionnateur.

I.7.2.2.b. Dé-éthaniseur

C'est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. Cette colonne est utilisée pour l'élimination de l'éthane contenu dans le propane, l'éthane sort en tête et le propane sort au fond de la colonne.

I.7.2.3. Section de réfrigération

Cette section est conçue dans le but de refroidir les produits finis à leurs températures de stockage. Soit (-38°C à -40°C) de propane et (-5°C à -10°C) de butane. Se fait en trois stades, HP (haute pression), MP (moyenne pression), BP (basse pression).

I.7.2.4. Section huile chaude

Cette section de fluide caloporteur utilisée comme source de chaleur pour les 3 préchauffeurs et les rebouilleurs de section déshydratation. L'huile circule à température 180°C.

I.7.3. Zone des utilités

- Gaz naturel.
- Azote.
- Eau industrielle, eau potable, eau distillée.
- Air instrument, air service.
- Gasoil.
- Méthanol.

I.8. Les équipements principaux**I.8.1. Ballons**

D'aspiration du compresseur

02-V-1006 : ballon haute pression.

02-V-1007 : ballon moyenne pression.

02-V-1008 : ballon basse pression.

I.8.2. Les échangeurs de chaleur

- Refroidisseurs de propane.
- Condensateur de propane : assure la condensation des vapeurs du propane réfrigérant provenant du compresseur.

Chapitre II

II.1. Introduction

La vapeur d'eau est couramment utilisée pour de nombreuses applications dans l'industrie, par exemple, pour la production de l'énergie électrique. La production de vapeur nécessite l'utilisation d'énergie calorifique par un générateur de vapeur (chaudière) [2].

II.2. Définition d'une Chaudière

On appelle chaudière, tout appareil qui produit de la vapeur ou un fluide chaud, et qui comporte un foyer dans lequel est brûlé un combustible. Une chaudière est un générateur de vapeur qui va permettre de transformer l'énergie calorifique du combustible en énergie thermodynamique au travers de la vapeur, et permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide, cette énergie peut être soit **la chaleur dégagée par la combustion** (de carbone, de fioul, de gaz, de bois), soit **la chaleur continue dans un autre fluide**.

II.3. Le rôle d'une chaudière

Le rôle d'une chaudière est essentiellement de produire de la vapeur d'eau à pression et température élevées dans les meilleures conditions de rendement et de sécurité.

Elle transmette de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique.

II.4. Les types des chaudières

Les chaudières industrielles sont des plusieurs catégorie :

II.4.1. Chaudière à tube d'eau

Les chaudières à tubes d'eau ont été développées entre 1958 et 1978, elles sont destinées à travailler à des puissances et pressions trop élevées (660 MW et 220 bars). Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur supérieur à 20 tonnes/h, en moyenne et haute pression. Il possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs.

Dans cet ensemble, circule l'eau qui se transforme en vapeur. Les gaz chauds produits par la combustion sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs où se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur [3].

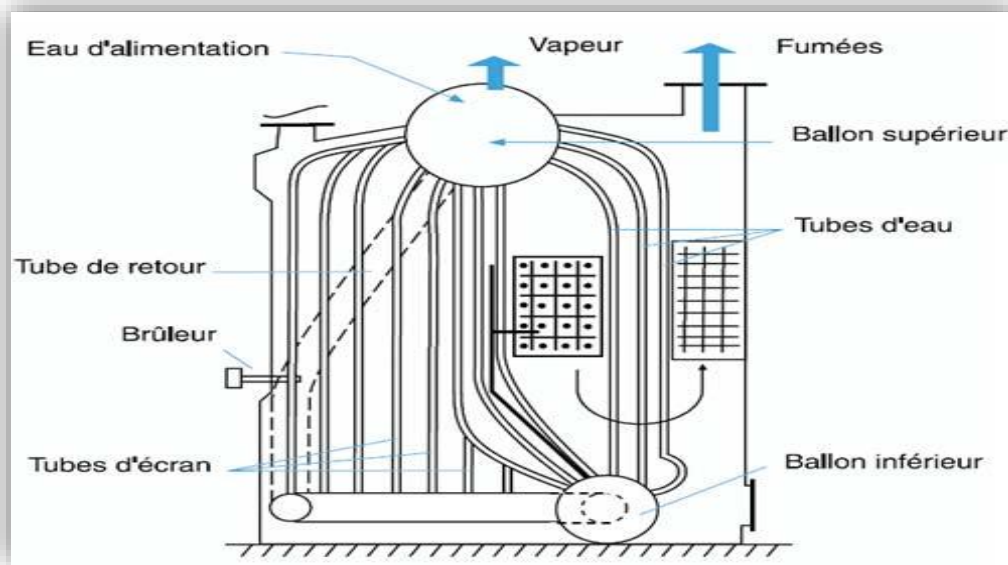


Figure II. 1 : Chaudières à tubes d'eau.

II.4.1.a. Les avantages

- Moins dangereuse, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier.
- Une fiabilité et une durée de vie plus importante.

II.4.2.b. Les inconvénients

- Son prix est très élevé, il peut aller jusqu'au double du prix de la chaudière à tube de fumée.
- Il faut faire plus attention à la qualité de l'eau d'alimentation.

II.4.2. Chaudière à tube fumée

Dans ce type de chaudière, les fumées issues de la combustion circulent à l'intérieur des tubes droits disposés dans une calandre d'eau formant le réservoir d'eau. Les tubes sont disposés de telle façon que l'échange de chaleur entre les fumées et l'eau liquide soit réalisée en plusieurs passes. Les générateurs servent à produire de la vapeur saturante à une pression ne dépassant pas généralement les 30 bars [4].

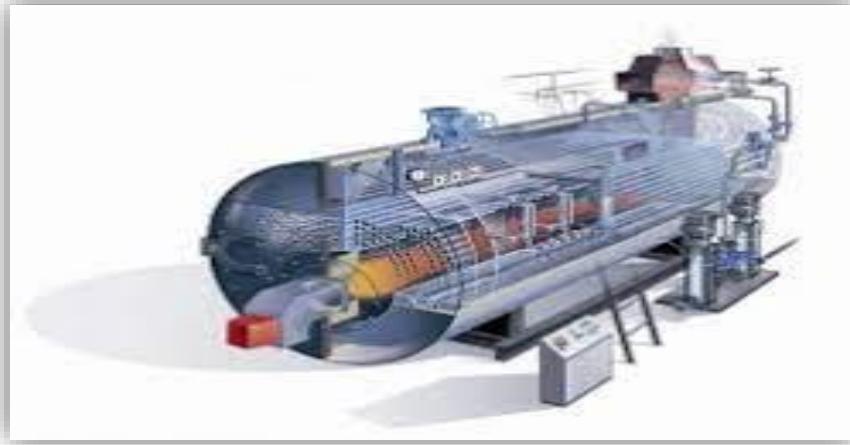


Figure II.2 : Schéma d'une chaudière à tube fumée.

II.4.2.a. Les avantages

Les chaudières à tubes de fumées sont choisies pour les raisons suivantes :

- Perte minimum par rayonnement.
- Facilité d'exploitation.
- La teneur en eau est excellente pour des applications de chauffage.
- N'exige pas un établissement spécial.
- Prix faible par rapport à l'autre type.
- Peut souvent être classée en seconde catégorie, ce qui ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante.

II.4.2.b. Les inconvénients

Tout comme il y a des avantages pour les chaudières à tubes de fumées, il y a aussi des inconvénients, représentés dans :

- Elle est soumise à des contraintes plus sévères que la chaudière à tube d'eau.
- Plus dangereuse qu'une chaudière à tube d'eau, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier.
- Une fiabilité et une durée de vie plus faible.

La chaudière utilisée dans le complexe GP1/Z c'est une chaudière à tube d'eau voir la (Figure II.3).



Figure II.3 : Chaudière à tube d'eau du complexe GP1/Z.

II.5. Description de la chaudière à tube d'eau

1. Un panneau de commande (Pour sélecteurs de démarrage, 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 ballon supérieur 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 (Equipée 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).
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 déaérateur et évent (Pour chasser l'air et/ou l'O₂ dissout dans l'eau (ballon supérieur).

II.6. Principaux éléments des chaudières

La figure II.4 montre une vue de face d'une chaudière.

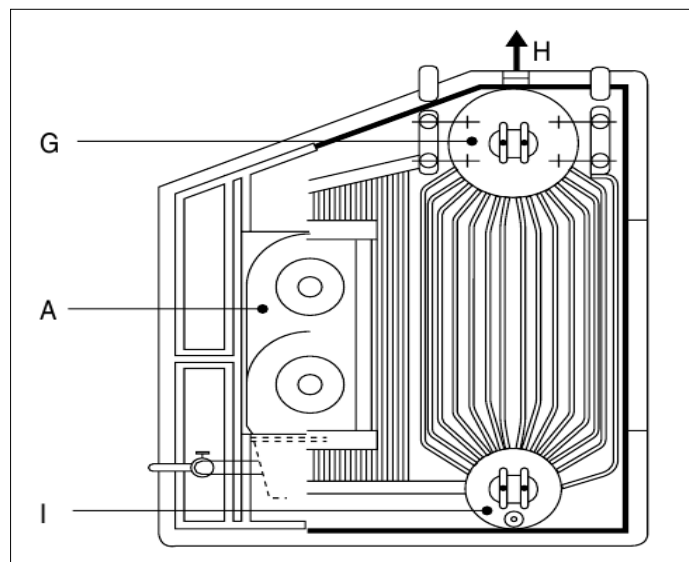


Figure II.4: Vue de face d'une chaudière.

A : Brûleurs

H : Sortie de vapeur saturée

I : Ballon inférieur

G : Ballon supérieur

II.6.1. Chambre de combustion (Foyer)

Elle est constituée par les tubes écrans, un garnissage réfractaire, un isolant et une tôle de casing. Le garnissage doit avoir une conductivité thermique faible, une résistance mécanique élevée, une bonne résistance aux variations de température et être de mise en œuvre facile [9].

II.6.2. Bruleurs

C'est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants ou d'imbrulés en plus ou moins grande quantité dans les fumées [6].

Le rôle du bruleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète).



Figure II.5: Schéma d'un bruleur.

II.6.3. Pilot (allumeur)

C'est une étincelle pour s'enflammer le bruleur tant que le bruleur allume, pour enflammer ce pilot il doit être un combustible (gaz), comburant (air) et étincelle.

II.6.4. Tube de vaporisation

C'est un ensemble de tubes entourant dans la chambre de combustion où l'émulsion eau vapeur qui circule est recueillie dans un réservoir où la séparation entre la vapeur et l'eau cette vapeur sera ensuite surchauffée [5].

II.6.5. Ventilateur d'air

Il assure la circulation des gaz dans le générateur de vapeur y compris les fumées, et l'air de combustion [5].

II.6.6. Cheminée

La chaudière est équipée d'une cheminée métallique c'est par là que les fumées sont évacuées après avoir été refroidies [5].



Figure II.6 : Schéma d'une cheminée.

II.6.7. Ballon de vapeur supérieur

Réalise la séparation des deux phases liquide et vapeur. La vapeur saturée sort en haut du ballon avant d'alimenter les surchauffeurs.

Il est constitué d'une enveloppe métallique cylindrique, il se caractérise par son volume important qui permettra de disposer d'un stockage de vapeur et de minimiser les fluctuations du niveau d'eau provoquées par les modifications soudaines de la demande en vapeur.

Il est aussi doté de trois rampes de répartition (introduction de l'eau d'alimentation, injection de réactifs et extraction de purges), d'aménagements internes pour la séparation de l'eau et de la vapeur (démistères et chicanes) et des équipements réglementaires de sécurité (soupapes, niveaux de lecture et manomètres). Le niveau d'eau dans le ballon supérieur est régulé à 50%.

II.6.8. Ballon inférieur

Alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

Le ballon inférieur est un cylindre constitué d'une enveloppe métallique, son rôle est de collecter l'eau arrivant des tubes descendants et de distribuer vers les tubes vaporisateurs l'eau et accessoirement de décanter les parties solides (sels et impuretés). Ce ballon est rempli 100 % d'eau.



FigureII.7 : Schéma du ballon de vapeur.

II.6.9. Evaporateur

L'évaporateur sert à réchauffer l'eau à l'intérieure du ballon, il est du type circulation naturelle est situé en aval de la surchauffeur primaire dans la zone de passe de retour. Les tuyaux de descente non chauffés, les tubes en boucles inclinées et les tuyaux montants sont prévus pour maintenir la circulation appropriée et stable d'eau à toutes les allures de production de vapeur [7].

II.6.10. Economiseur

Echangeur de chaleur eau d'alimentation / fumées (eau coté tubes). Il permet de préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière avant son admission dans le ballon supérieur en récupérant une partie de la chaleur des fumées [9].

II.7. Principe de fonctionnement de la chaudière

La chaudière phase 3 reçoit de l'eau déminéralisée produite par l'unité de dessalement à travers les pompes d'eau de chaudière qui aspirent à partir d'un réservoir de stockage d'eau distillée d'une capacité de 450 m³.

L'eau distillée est pompée et refoulé à une pression de 14bar afin d'alimenter la **chaudière**.

L'eau passe d'abord par un préchauffeur afin de récupérer l'énergie à partir de la ligne de drainage (Ballon supérieur), ensuite elle pénètre du sommet, de la **chaudière** 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 à 50 % sous contrôle de niveau.

L'eau à travers les tubes est chauffée par les gazes 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 de vapeur qui va sortir.

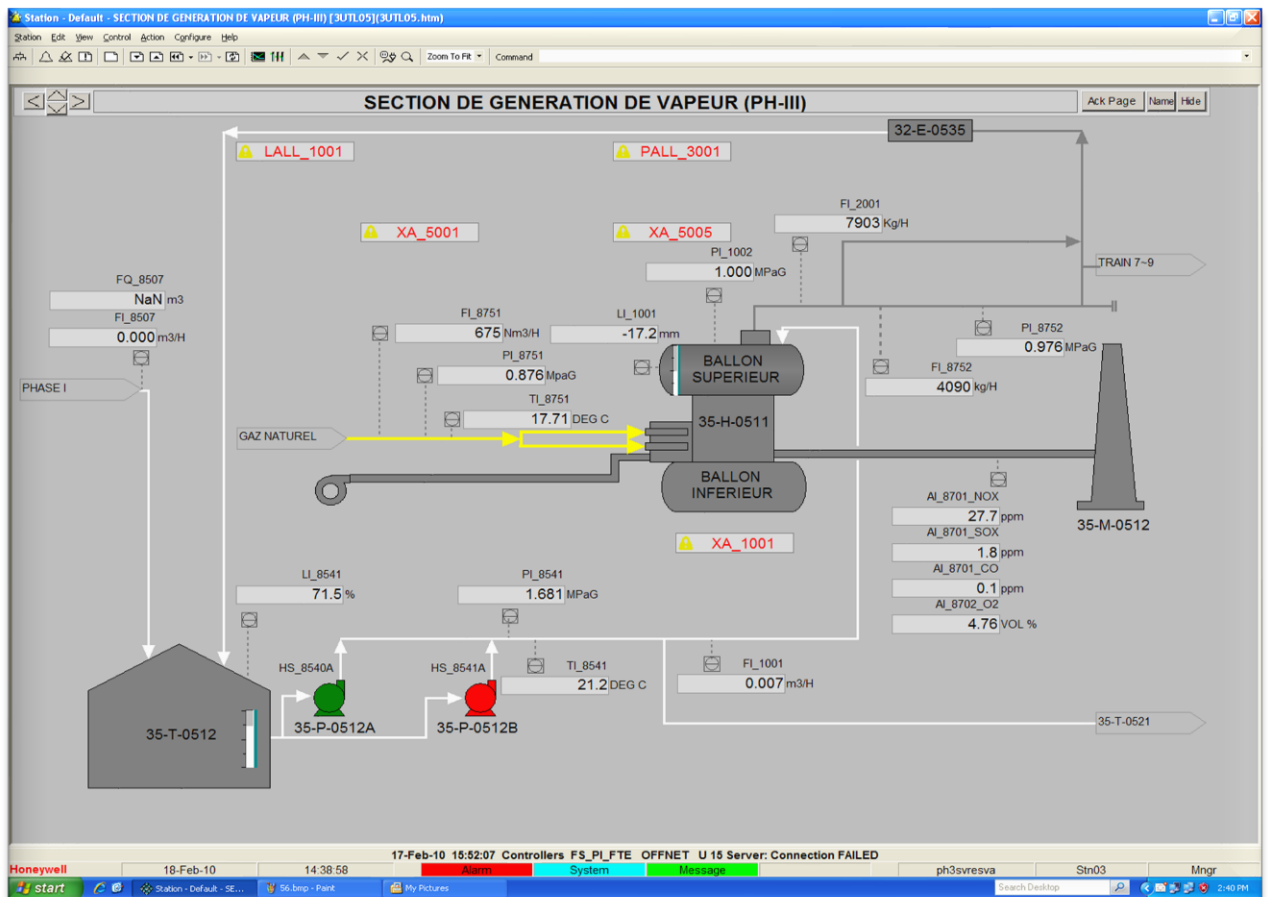


Figure II.8 : Schéma descriptif de la chaudière du complexe.

Parmi la consommation de vapeur qui va sortie de la chaudière on a :

- Vapeur de traçage (Lignes & Instrument de mesures).
- Réchauffeur de GN (pour augmenter la température de gaz à $>25^{\circ}\text{C}$).
- Surchauffeur du BOG-C4 (pour augmenter la température du butane à $>15^{\circ}\text{C}$).
- Four (pour démarrage).
- Torche (pour diluer le fumée et refroidir le bec de torche).
- Vaporisateur (pour évaporée les produits liquides qui envoyer vers la torche).
- Réchauffeur de C3/C4 (section de transfert pour chauffer le propane et butane).

II.8. Les problèmes rencontrés dans la chaudière

Les générateurs de vapeur sont soumis à des conditions sévères de haute température, haute pression, environnement corrosif et un fonctionnement continu. De plus il y a d'autre problème :

II.8.1. Manque d'eau d'alimentation

Le manque d'eau d'alimentation est considéré comme l'accident de référence pour les installations thermiques équipées avec la chaudière. Il peut être provoqué par l'arrêt des pompes alimentaires, le blocage de la vanne principale d'alimentation.

II.8.2. Corrosion

La corrosion est dégradation d'un matériau sous l'action d'agents atmosphériques ou chimiques. On définit comme étant la destruction des métaux qui se produisent sous l'effet des réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aqueux ou gazeux. La corrosion est un phénomène naturel. Les métaux élaborés industriellement à partir d'un minerai à la suite d'opérations souvent complexes. La corrosion généralement décelée par les effets qu'elle induit, par exemple la diminution du poids [8].

Pour éviter la corrosion on ajoute produit chimique qui s'appelle **Eliminox, (carbohydrazide)** pour réduire et éliminer la teneur restante d'oxygène dissous dans l'eau.

II.8.3. Diminution de PH

PH de l'eau distillé qui entre dans la chaudière égale à 7, pour obtenir l'eau qui va sortir de la chaudière basique on ajoute l'additif alimentaire phosphate trisodique (Na_3PO_4).

II.8.4. Entraînement de gaz dans la chambre de combustion

Avant le démarrage de chaudière on met le ventilateur de tirage forcé (FDF) pour le balayage pendant 30 minutes pour éviter le gaz naturel qui a entré dans la chaudière.

II.8.5. L'entartrage

C'est la précipitation des sels sous la forme cristalline directement sur les parois externes des tubes de la chaudière. Le tartre joue le rôle un isolant thermique au 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.8.6. Détecteur de flamme

Est un type de capteur capable de détecter et de réagir à la présence d'une flamme. Si le détecteur ne pas nettoyer, le démarrage de la section de flamme de brûleur elle n'est pas fonctionnée.

II.8.7. Niveau d'eau dans le ballon de vapeur inférieur à 20%

Si le niveau d'eau est diminué à 20%, le capteur de niveau (LSLL) à envoyer le signale aux vannes de sécurité pour couper le gaz naturel pour éviter le déclenchement de la chaudière.

II.8.8. Pression

La pression de vapeur est 10 bars. Si la pression augmente le capteur de la pression (PSLL) envoyé le signal à régulateur (master) pour diminuer la pression. Mais la pression reste augmentée il se passe un déclenchement de la chaudière.

II.8.9. Incendie

Pour couper le courant, isoler le GN et alerter la sécurité et avertir la hiérarchie.

II.8.10. Problème mécanique

Pour procéder à un arrêt rapide en avertissant la hiérarchie.

II.8.11. Manque de Gaz Naturel

Isoler par vannes le circuit GN jusqu'à retour de ce dernier.

II.8.12. Manque Air instrument

Isoler par vannes le circuit GN jusqu'à retour de ce dernier.

II.8.13. Manque d'Electricité

Dans ce cas le générateur de secours assure le démarrage et l'alimentation, procéder à un démarrage normal comme indiqué plus haut.

Toutes ces problèmes menacent l'intégrité du système et peuvent dans certains cas, provoquées l'explosion du générateur de vapeur. Généralement, les explosions des générateurs de vapeur sont de deux sortes :

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

II.8.14. Primage

Il est défini comme l'entraînement de gouttelettes d'eau dans la vapeur produite dans les conditions normales de fonctionnement.

Il peut être due à la mauvaise conception du séparateur eau/vapeur, à la salinité élevée de l'eau ou à une haute teneur en silice. Le primage aura pour conséquence l'érosion des ailettes de turbine.

Chapitre III

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous évoquerons le phénomène de combustion se déroulant dans le foyer et citerons tout mode de transfert de chaleur ayant intervenu dans les échanges thermiques dans la chaudière ainsi que le transfert de chaleur avec changement de phase en vase dont le rôle est pertinent.

III.2. Définition de la combustion

La combustion est une réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison d'une substance appelée **combustible** avec l'oxygène appelé **comburant**, pour former de nouvelles espèces chimiques appelées produits de combustion (gaz brûlés ou fumées).

Cette réaction produit essentiellement un grand dégagement de chaleur (réaction exothermique). Le but de combustion dans la chaudière est la récupération la plus parfaite possible de l'énergie chimique contenue en puissance dans le combustible. Celle-ci ne peut s'amorcer qu'en présence d'une énergie de démarrage, c'est la source de chaleur [9].

Les trois éléments, **combustible - comburant - énergie de démarrage**, forment le **triangle de feu** (Figure III.1).

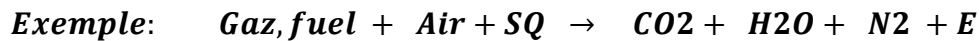


Figure III.1: Triangle de feu.

III.3. Type de combustion

III.3.1. Combustion complète

On appelle combustion complète une combustion où tout le combustible est oxydé. Les fumées ne contiennent aucun élément oxydable [9].



III.3.2. Combustion incomplète

Lorsque la combustion se fait avec une arrivée d'oxygène insuffisante, on parle de combustion incomplète. Celle-ci se traduit par la production d'imbrulés ou d'éléments partiellement oxydés comme le monoxyde de carbone (CO), très dangereux pour la santé [9].



III.3.3. Combustion rapide

Est une forme de combustion au cours de laquelle de grandes quantités de chaleur et d'énergie sous forme de lumière sont relâchés. Elle est utilisée dans certaines machines telles que les moteurs à combustion interne [9].

III.3.4. Combustion lente

Est une réaction se réalisant à des températures peu élevées. On peut citer le cas de la respiration cellulaire, cette lenteur due à des enzymes spécifiques permet de d'augmenter les Réactions d'oxydo-réduction et ainsi d'obtenir un très bon rendement par récupération d'une grande partie de l'énergie [9].

III.4. Combustibles

C'est la substance qui peut brûler en présence d'un comburant (l'oxygène) par une réaction d'oxydation générant de la chaleur [9].

III.4.1. Classification du combustible

On peut classer les combustibles en trois catégories :

III.4.1.1. Combustibles solides

Tous les combustibles solides contiennent de la matière organique exemples (charbon, bois, coke de gaz, déchets) [9].

III.4.1.2. Combustibles liquides

On retrouve dans les combustibles liquides une variété presque infinie d'hydrocarbures, à longue chaîne de carbone exemple (pétrole brut, kérosène, Fuel-oils, Mazout) [9].

III.4.1.3. Combustibles gazeux

Mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote exemples (gaz naturel, gaz de gazogène, gaz de four à coke) [9].

III.5. Le comburant

C'est la substance qui permet la combustion d'un combustible. Le comburant le plus utilisé est le dioxygène (O₂), contenu dans l'air ambiant que nous respirons au quotidien, (dans l'air, le comburant c'est le dioxygène, le diazote est considéré comme inerte).

En combustion, pour déterminer les quantités d'air théoriques, on utilise les pourcentages suivants :

Tableaux III.1 : la composition théorique d'air.

	% en Masse	% en Volume
O ₂	23	21
N ₂	77	79

III.6. Caractéristique d'une réaction de combustion

III.6.1. Pouvoirs calorifiques

Est la quantité de chaleur en joules ou en calories dégagée par la combustion complète à pression 1 atmosphère de l'unité de combustible. On a deux types de pouvoirs calorifiques :

III.6.1.1. Pouvoir calorifique supérieur PCS

C'est la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée, (dans ce cas l'eau qui résulte de la combustion est supposée ramenés à l'état liquide) [9].

III.6.1.2. Pouvoir calorifique inférieur PCI

C'est la chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée, (l'eau qui résulte de la combustion est supposée à l'état vapeur) [9].

La relation entre le PCS et PCI c'est la chaleur de condensation de l'eau formée.

$$\text{PCS} = \text{PCI} + m_{\text{H}_2\text{O}} \times L_v \quad (\text{III.3})$$

L_v : chaleur d'évaporation de l'eau kcal/kg.

$m_{\text{H}_2\text{O}}$: masse d'eau formée lors de la combustion de l'unité du combustible.

Chapitre IV

IV. 1. Introduction

Généralement la chaleur produite par la combustion n'est jamais totalement transférée ou récupérée par le fluide qu'on désire chauffer, car il existe toujours des pertes dues aux différents facteurs.

Plusieurs paramètres influencent la valeur de ce rendement, dont la température et la pression d'entrée de l'eau, du comburant et du combustible (gaz naturel), la nature de l'eau entrante, le niveau de l'eau dans la chaudière, voir même la variation de la demande en consommation de la vapeur.

IV.2. Calcul de Rendement de la chaudière (M-0511)

Le rendement d'une chaudière est le rapport entre l'énergie produite utile et l'énergie totale introduite. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = (\text{Puissance utile} / \text{Puissance introduite}) * 100 \quad (\text{IV.1})$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$P_u = \sum D_s * h_s - \sum D_e * h_e \quad (\text{IV.2})$$

Avec:

P_u: 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).

✚ Ensuite on calcul les puissances introduites dans la chaudière :

Les puissances introduites sont de différentes natures, la principale provenant du combustible, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_{in} = D_{gaz} * PCI \quad (IV.3)$$

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).

IV.3. Calcul de rendement par rapport au Design

IV.3.1. la production de vapeur de 19th/hr (100%)

TableauxIV.1 : Les paramètres d'entrée de l'eau pour la production 19 th/h.

Eau	Unité	Valeur
Débit d'eau d'entrée	Kg/h	19095
Pression	MPa	1.5
Température	°C	0.5
Enthalpie	Kj/Kg	3.6

Tableaux IV.2 : Les paramètres d'entrée du combustible.

Gaz (combustible)	Unité	Valeur
Débit du gaz	Nm ³ /h	1538
Pression	MPa	0.9
Température	°C	37.8
PCI	Kj/Nm ³	38970

Tableaux IV.3 : Les paramètres de sortie de la chaudière.

Vapeur sortée	Unité	Valeur
Débit de vapeur	Kg/h	19000
Pression	MPa	0.96
Température	°C	182.4
Enthalpie	Kj/Kg	2777.7

Applications numériques :

$$\eta = P_u / P_{in}$$

$$\longrightarrow P_u = (D_s * h_s) - (D_e * h_e) = (19000 * 2777.7) - (19095 * 3.6)$$

$$P_u = 52707558 \text{ Kj/h.}$$

Donc :

$$P_u = 14640.99 \text{ Kw.}$$

$$\longrightarrow P_{in} = D_{\text{gaz}} * PCI = (1538 * 38970)$$

$$P_{in} = 59935860 \text{ Kj/h.}$$

$$P_{in} = 16648.85 \text{ Kw.}$$

$$\eta = 14640.99 / 16648.85 = 0.88$$

$$\eta = 88 \%$$

On fait le même calcul pour les pourcentages de production de vapeur à 75% , 50% et 20% :

Tableaux IV.4 : Différentes valeurs de rendement par rapport les pourcentages.

Les paramètres	Pourcentages du la production du vapeur			
	100%	75%	50%	20%
Eau entrée (Kg/h)	19095	14321	9548	3819
Gaz naturel entré (Nm ³ /h)	1538	1139	751	317
Vapeur sortie (Kg/h)	19000	14250	9500	3800
Rendement (%)	88.14	89.14	89.59	90.10

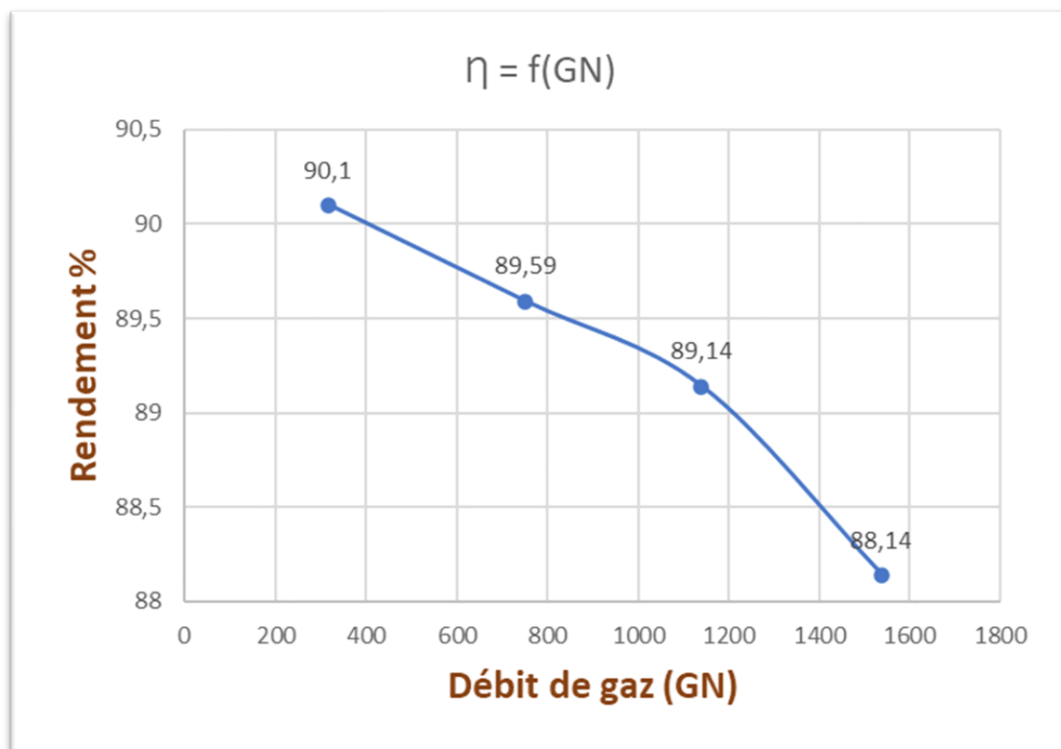


Figure IV.1 :La variartion du rendemet en fonction du débit de combustible.

IV.4. Calcul de rendement actuel (réel)

Tableaux IV.5 : La composition du gaz naturel.

PCI = 38970 Kj / Nm ³ .	Le composant	Composition Molaire %
	N ₂	5.80
	He	0.19
	CO ₂	0.21
	C1	83.00
	C2	7.10
	C3	2.25
	iC4	0.40
	nC4	0.60
	iC5	0.12
	nC5	0.15
	C6	0.15
	H ₂ O	50 ppm

Le rendement est calculé trois fois par jour à 9h00, 11h et 14h :

TableauxIV.6: Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 9h.

Eau	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	7000
Pression	Bar	10
Température	°C	30
Enthalpie	Kj/Kg	125.75

Tableaux IV.7 :Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 9h.

Gaz	Unité	Valeur
Débit	Nm ³ /h	588
Pression	Bar	8
Température	°C	25
PCI	Kj/Nm ³	38970

Tableaux IV.8 :Les caractéristiques de la vapeur sortante de la chaudière à 9h.

Vapeur	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	6900
Pression	Bar	9.5
Température	°C	177
Enthalpie	Kj/Kg	2774.22

$$P_u = (6900 * 2774.22) - (7000 * 125.75)$$

$$P_u = 18261868 \text{Kj/h.}$$

$$\longrightarrow \quad P_{in} = D_{gaz} * PCI$$

$$P_{in} = 588 * 38970$$

$$\text{Donc : } P_{in} = 22914360 \text{ Kj/h.}$$

$$\eta = P_u / P_{in}$$

$$\eta = 18261868 / 22914360 = 0.79$$

$$\eta = 79 \%$$

Tableaux IV.9 : Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 11h.

Eau	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	7040
Pression	Bar	10
Température	°C	30
Enthalpie	Kj/Kg	125.75

Tableaux IV.10 : Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 11h.

Gaz	Unité	Valeur
Débit	Nm ³ /h	622
Pression	Bar	8
Température	°C	25
PCI	Kj/Nm ³	38970

Tableaux IV.11 : Les caractéristiques de la vapeur sortante de la chaudière à 11h.

Vapeur	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	6990
Pression	Bar	9.5
Température	°C	177
Enthalpie	Kj/Kg	2774.22

$$\longrightarrow P_u = (6990 * 2774.22) - (7040 * 125.75)$$

$$P_u = 18506517.8 \text{Kj/h.}$$

$$\longrightarrow P_{in} = 622 * 38970$$

$$P_{in} = 24239340 \text{Kj/h.}$$

$$\eta = 18506517.8 / 24239340 = 0.76$$

$$\eta = 76 \%$$

Tableaux IV.12 : Les paramètres d'eau à l'entrée de la chaudière à 14h.

Eau	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	7010
Pression	Bar	10
Température	°C	30
Enthalpie	Kj/Kg	125.75

Tableaux IV.13 : Les paramètres du combustible à l'entrée de la chaudière à 14h.

Gaz	Unité	Valeur
Débit	Nm ³ /h	680
Pression	Bar	8
Température	°C	25
PCI	Kj/Nm ³	38970

Tableaux IV.14 : Les caractéristiques de la vapeur sortante de la chaudière à 14h.

Vapeur	Unité	Valeur
Débit	Kg/h	6990
Pression	Bar	9.5
Température	°C	177
Enthalpie	Kj/Kg	2774.22



$$P_u = (6990 * 2774.22) - (7010 * 125.75)$$

$$P_u = 18510290.3 \text{Kj/h.}$$

$$\longrightarrow \quad P_{in} = 680 * 38970$$

$$P_{in} = 26499600 \text{ Kj/h.}$$

$$\eta = 18510290.3 / 26499900 = 0.69$$

$$\eta = 69 \%$$

les résultats sont resumés dans le tableau IV.11 suivant :

Tableaux IV.15 : les résultats de calcul.

	9:00h	11 : 00 h	14 : 00h
Débit du gaz (Nm ³ /h)	588	622	680
Rendement (%)	79	76	69

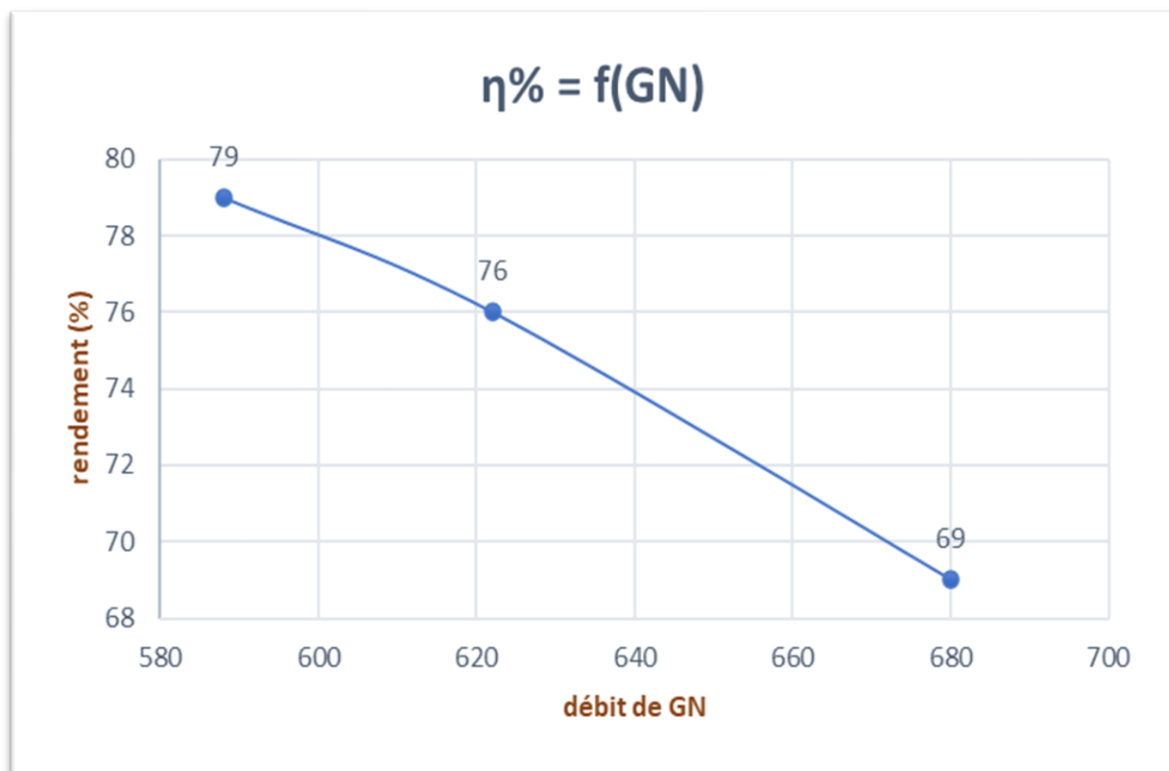


Figure IV.2 : La variation de rendement en fonction de débit du gaz naturel.

IV.5. Interprétations des résultats

On constate d'après les résultats obtenus que le rendement calculé (actuel) 79% est inférieur au rendement donné par le constructeur (désigné) 88%, avec une différence de 9%.

Cela signifie que lorsque la consommation du gaz naturel augmente, le rendement de la chaudière diminue, donc le rendement de la chaudière est inversement proportionnel avec le débit du combustible. On peut dire qu'il n'y a pas un bon transfert de chaleur dans la chaudière à cause de dépôt de coque ou de calcaire sur les parois des tubes de la chaudière à l'intérieur, qui forme un isolant thermique.

IV.6. Recommandation

On propose un dégazeur thermique pour éliminer les gaz dissous dans l'eau d'alimentation des chaudières, afin de prévenir la corrosion, et améliorer le rendement de la chaudière.

Conclusion générale

Durant notre stage, nous avons fait une étude sur les chaudières industrielles au niveau du complexe GP1/Z Sonatrach d'Arzew. Grâce à cette étude on a pu avoir une idée sur les différents types de chaudières.

Nous avons effectué des calculs de rendement d'une chaudière.

L'étude a conduit aux résultats suivants :

Le rendement du chaudière dans les conditions actuelles (69%) reste inférieur au rendement exigé par le constructeur (88%). Cette diminution du rendement est liée au transfert de chaleur faible par rapport au design à l'intérieur des tubes, ce qui est expliqué par la présence d'une couche de coke sur la paroi interne des tubes du chaudière ce qui affaiblit le transfert de chaleur.

Annexe.1 : caractéristiques physiques de vapeur d'eau du 0.1à 50 bars.

Vapeur saturée					Eau	
P abs. bars	Temp. vapo- risa- tion °C	ρ kg/m ³	enthalpie massique Vaporisa- tion kJ/kg	enthalpie massique Vapeur kJ/kg	Chal. Mas. kJ/kg/°C	enthalpie massique Eau liquide kJ/kg
0,1	45,83	0,0682	2392,9	2584,8	4,1857	191,83
0,2	60,09	0,1307	2358,4	2609,9	4,1846	251,45
0,3	69,12	0,1912	2336,1	2625,4	4,1855	289,3
0,4	75,88	0,2504	2319,2	2636,9	4,1862	317,65
0,5	81,34	0,3086	2305,4	2646	4,1869	340,56
0,6	85,95	0,366	2293,6	2653,6	4,1877	359,93
0,7	89,96	0,4228	2283,3	2660,1	4,1882	376,77
0,8	93,51	0,4792	2274	2665,8	4,1891	391,72
0,9	96,71	0,535	2265,6	2670,9	4,1899	405,21
1	99,63	0,5903	2257,9	2675,4	4,1906	417,51
1,0133	100	0,5977	2256,9	2676	4,1906	419,06
1,2	104,81	0,7003	2244,1	2683,4	4,192	439,36
1,3	107,13	0,7547	2237,8	2687	4,1929	449,19
1,6	113,32	0,9166	2220,9	2696,2	4,195	475,38
1,8	116,93	1,0233	2210,8	2701,5	4,1965	490,7
2	120,23	1,1294	2201,6	2706,3	4,1978	504,7
2,5	127,43	1,392	2181	2716,4	4,2011	535,34
3	133,54	1,6513	2163,2	2724,7	4,2042	561,43
3,6	139,86	1,9596	2144,4	2732,9	4,208	588,53
4	143,62	2,1636	2133	2737,6	4,2102	604,67
4,5	147,92	2,4201	2119,7	2742,9	4,2128	623,16
5	151,84	2,6688	2107,4	2747,5	4,2158	640,12
5,5	155,46	2,9197	2095,9	2751,7	4,2183	655,78
6	158,84	3,1696	2085	2755,5	4,2207	670,42

6,5	161,99	3,4188	2074,7	2758,8	4,2232	684,12
7	164,96	3,667	2064,9	2762	4,2256	697,06
7,5	167,75	3,9185	2055,5	2764,8	4,2283	709,29
8	170,41	4,1615	2046,5	2767,5	4,2306	720,94
8,5	172,94	4,4092	2037,9	2769,9	4,2328	732,02
9	175,36	4,6555	2029,5	2772,1	4,2349	742,64
9,5	177,66	4,902	2020,9	2775	4,2374	752,81
10	179,88	5,1467	2013,6	2776,2	4,2395	762,61
11	184,07	5,637	1998,5	2779,7	4,2437	781,13
12	187,96	6,1275	1984,3	2782,7	4,2479	798,43
13	191,61	6,6181	1970,7	2785,4	4,2519	814,7
14	195,04	7,1073	1957,7	2787,8	4,2559	830,08
15	198,29	7,593	1945,2	2789,9	4,2598	844,67
16	201,37	8,0841	1933,2	2791,7	4,2636	858,56
17	204,31	8,5763	1921,5	2793,4	4,2672	871,84
18	207,11	9,0662	1910,3	2794,8	4,2711	884,58
19	209,8	9,5511	1899,3	2796,1	4,2746	896,81
20	212,37	10,0503	1888,6	2797,2	4,2783	908,59
22	217,24	11,0314	1868,1	2799,1	4,2854	930,95
24	221,78	12,0192	1848,5	2800,4	4,2922	951,93
26	226,04	13,0107	1829,6	2801,4	4,2989	971,72
28	230,05	14,0076	1811,5	2802	4,3055	990,48
34	240,88	17,0271	1760,3	2802,1	4,325	1041,80
38	247,31	19,0694	1728,4	2801,1	4,3375	1072,70
42	253,24	21,1372	1697,8	2799,4	4,35	1101,60
46	258,75	23,2342	1668,3	2797	4,3625	1128,80
50	263,91	25,3614	1639,7	2794,20	4,3746	1154,50

Annexe.2 : caractéristiques physiques de vapeur d'eau du 0°C à 100°C.

Température	Pression référence	Pression de vapeur saturante	Masse volumique (Density)	Chaleur sensible (Enthalpie spécifique)		Chaleur spécifique (ou massique)		Chaleur volumique	Viscosité dynamique de l'eau
				°C	Pa	Pa	kg/m ³		
0.00	101325	611	999.82	0.06	0.01	4.217	1.007	4216.10	0.001792
1.00	101325	657	999.89	4.28	1.02	4.213	1.006	4213.03	0.001731
2.00	101325	705	999.94	8.49	2.03	4.210	1.006	4210.12	0.001674
3.00	101325	757	999.98	12.70	3.03	4.207	1.005	4207.36	0.001620
4.00	101325	813	1000.00	16.90	4.04	4.205	1.004	4204.74	0.001569
5.00	101325	872	1000.00	21.11	5.04	4.202	1.004	4202.26	0.001520
6.00	101325	935	999.99	25.31	6.04	4.200	1.003	4199.89	0.001473
7.00	101325	1001	999.96	29.51	7.05	4.198	1.003	4197.63	0.001429
8.00	101325	1072	999.91	33.70	8.05	4.196	1.002	4195.47	0.001386
9.00	101325	1147	999.85	37.90	9.05	4.194	1.002	4193.40	0.001346
10.00	101325	1227	999.77	42.09	10.05	4.192	1.001	4191.42	0.001308
11.00	101325	1312	999.68	46.28	11.05	4.191	1.001	4189.51	0.001271
12.00	101325	1402	999.58	50.47	12.06	4.189	1.001	4187.67	0.001236
13.00	101325	1497	999.46	54.66	13.06	4.188	1.000	4185.89	0.001202
14.00	101325	1597	999.33	58.85	14.06	4.187	1.000	4184.16	0.001170
15.00	101325	1704	999.19	63.04	15.06	4.186	1.000	4182.49	0.001139
16.00	101325	1817	999.03	67.22	16.06	4.185	1.000	4180.86	0.001109
17.00	101325	1936	998.86	71.41	17.06	4.184	0.999	4179.27	0.001081
18.00	101325	2063	998.68	75.59	18.05	4.183	0.999	4177.72	0.001054
19.00	101325	2196	998.49	79.77	19.05	4.182	0.999	4176.20	0.001028
20.00	101325	2337	998.29	83.95	20.05	4.182	0.999	4174.70	0.001003
21.00	101325	2486	998.08	88.14	21.05	4.181	0.999	4173.23	0.000979
22.00	101325	2642	997.86	92.32	22.05	4.181	0.999	4171.78	0.000955
23.00	101325	2808	997.62	96.50	23.05	4.180	0.998	4170.34	0.000933
24.00	101325	2982	997.38	100.68	24.05	4.180	0.998	4168.92	0.000911
25.00	101325	3166	997.13	104.86	25.04	4.180	0.998	4167.51	0.000891
26.00	101325	3360	996.86	109.04	26.04	4.179	0.998	4166.11	0.000871
27.00	101325	3564	996.59	113.22	27.04	4.179	0.998	4164.71	0.000852
28.00	101325	3779	996.31	117.39	28.04	4.179	0.998	4163.31	0.000833
29.00	101325	4004	996.02	121.57	29.04	4.179	0.998	4161.92	0.000815
30.00	101325	4242	995.71	125.75	30.04	4.178	0.998	4160.53	0.000798
31.00	101325	4491	995.41	129.93	31.03	4.178	0.998	4159.13	0.000781
32.00	101325	4754	995.09	134.11	32.03	4.178	0.998	4157.73	0.000765
33.00	101325	5029	994.76	138.29	33.03	4.178	0.998	4156.33	0.000749
34.00	101325	5318	994.43	142.47	34.03	4.178	0.998	4154.92	0.000734
35.00	101325	5622	994.08	146.64	35.03	4.178	0.998	4153.51	0.000720
36.00	101325	5940	993.73	150.82	36.02	4.178	0.998	4152.08	0.000705
37.00	101325	6274	993.37	155.00	37.02	4.178	0.998	4150.65	0.000692
38.00	101325	6624	993.00	159.18	38.02	4.178	0.998	4149.20	0.000678
39.00	101325	6991	992.63	163.36	39.02	4.179	0.998	4147.74	0.000666
40.00	101325	7375	992.25	167.54	40.02	4.179	0.998	4146.28	0.000653
41.00	101325	7777	991.86	171.71	41.01	4.179	0.998	4144.80	0.000641
42.00	101325	8198	991.46	175.89	42.01	4.179	0.998	4143.30	0.000629
43.00	101325	8639	991.05	180.07	43.01	4.179	0.998	4141.80	0.000618
44.00	101325	9100	990.64	184.25	44.01	4.179	0.998	4140.28	0.000607
45.00	101325	9582	990.22	188.43	45.01	4.180	0.998	4138.75	0.000596
46.00	101325	10085	989.80	192.61	46.00	4.180	0.998	4137.20	0.000586
47.00	101325	10612	989.36	196.79	47.00	4.180	0.998	4135.64	0.000576
48.00	101325	11161	988.92	200.97	48.00	4.180	0.998	4134.06	0.000566
49.00	101325	11735	988.47	205.15	49.00	4.181	0.999	4132.47	0.000556
50.00	101325	12335	988.02	209.33	50.00	4.181	0.999	4130.87	0.000547
51.00	101325	12960	987.56	213.51	51.00	4.181	0.999	4129.25	0.000538
52.00	101325	13612	987.09	217.69	52.00	4.182	0.999	4127.61	0.000529
53.00	101325	14292	986.62	221.88	52.99	4.182	0.999	4125.97	0.000521
54.00	101325	15001	986.14	226.06	53.99	4.182	0.999	4124.30	0.000512
55.00	101325	15740	985.65	230.24	54.99	4.183	0.999	4122.63	0.000504
56.00	101325	16510	985.16	234.42	55.99	4.183	0.999	4120.94	0.000496
57.00	101325	17312	984.66	238.61	56.99	4.183	0.999	4119.24	0.000489
58.00	101325	18146	984.16	242.79	57.99	4.184	0.999	4117.52	0.000481
59.00	101325	19015	983.64	246.97	58.99	4.184	0.999	4115.79	0.000474
60.00	101325	19919	983.13	251.16	59.99	4.185	0.999	4114.05	0.000467
61.00	101325	20859	982.60	255.34	60.99	4.185	1.000	4112.30	0.000460
62.00	101325	21837	982.07	259.53	61.99	4.186	1.000	4110.53	0.000453
63.00	101325	22854	981.54	263.72	62.99	4.186	1.000	4108.75	0.000447
64.00	101325	23910	981.00	267.90	63.99	4.187	1.000	4106.97	0.000440
65.00	101325	25008	980.45	272.09	64.99	4.187	1.000	4105.17	0.000434
66.00	101325	26148	979.90	276.28	65.99	4.188	1.000	4103.36	0.000428
67.00	101325	27332	979.34	280.46	66.99	4.188	1.000	4101.54	0.000422
68.00	101325	28561	978.78	284.65	67.99	4.189	1.000	4099.71	0.000416
69.00	101325	29837	978.21	288.84	68.99	4.189	1.001	4097.88	0.000410
70.00	101325	31161	977.63	293.03	69.99	4.190	1.001	4096.03	0.000404
71.00	101325	32533	977.05	297.22	70.99	4.190	1.001	4094.18	0.000399
72.00	101325	33957	976.47	301.41	71.99	4.191	1.001	4092.31	0.000394
73.00	101325	35433	975.88	305.60	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388

Les Annexes

73.00	101325	35433	975.88	305.60	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388
74.00	101325	36963	975.28	309.79	73.99	4.192	1.001	4088.57	0.000383
75.00	101325	38548	974.68	313.99	74.99	4.193	1.001	4086.69	0.000378
76.00	101325	40190	974.08	318.18	76.00	4.194	1.002	4084.80	0.000373
77.00	101325	41890	973.46	322.37	77.00	4.194	1.002	4082.91	0.000369
78.00	101325	43650	972.85	326.57	78.00	4.195	1.002	4081.01	0.000364
79.00	101325	45473	972.23	330.76	79.00	4.196	1.002	4079.11	0.000359
80.00	101325	47359	971.60	334.96	80.00	4.196	1.002	4077.20	0.000355
81.00	101325	49310	970.97	339.16	81.01	4.197	1.002	4075.29	0.000351
82.00	101325	51328	970.33	343.35	82.01	4.198	1.003	4073.38	0.000346
83.00	101325	53415	969.69	347.55	83.01	4.199	1.003	4071.46	0.000342
84.00	101325	55572	969.04	351.75	84.01	4.200	1.003	4069.54	0.000338
85.00	101325	57803	968.39	355.95	85.02	4.200	1.003	4067.62	0.000334
86.00	101325	60107	967.73	360.15	86.02	4.201	1.003	4065.70	0.000330
87.00	101325	62488	967.07	364.35	87.02	4.202	1.004	4063.78	0.000326
88.00	101325	64947	966.41	368.56	88.03	4.203	1.004	4061.85	0.000322
89.00	101325	67486	965.74	372.76	89.03	4.204	1.004	4059.93	0.000319
90.00	101325	70108	965.06	376.96	90.04	4.205	1.004	4058.00	0.000315
91.00	101325	72814	964.38	381.17	91.04	4.206	1.005	4056.08	0.000311
92.00	101325	75607	963.70	385.38	92.05	4.207	1.005	4054.15	0.000308
93.00	101325	78488	963.01	389.58	93.05	4.208	1.005	4052.23	0.000304
94.00	101325	81460	962.31	393.79	94.06	4.209	1.005	4050.31	0.000301
95.00	101325	84525	961.62	398.00	95.06	4.210	1.006	4048.39	0.000298
96.00	101325	87685	960.91	402.21	96.07	4.211	1.006	4046.47	0.000295
97.00	101325	90943	960.20	406.42	97.07	4.212	1.006	4044.55	0.000291
98.00	101325	94301	959.49	410.64	98.08	4.213	1.006	4042.64	0.000288
99.00	101325	97760	958.78	414.85	99.09	4.214	1.007	4040.73	0.000285
100.00	101325	101325	958.05	419.06	100.09	4.216	1.007	4038.82	0.000282

Références bibliographiques

- [1] :Documentation du complexe GP1/Z.
- [2] : Géovanie . TOSSOU, « valorisation de la pille par la conception d'une chaudière à tube d'eau pour l'entraînement d'une turbine à vapeur de 1 kw », université D'aBomey-Calavi (EPAC), page 8/138, 2012/2013.
- [3] : Belkadi. Achraf Taki Eddine, « Simulation du Comortement Transitoire d'une Chaudière à Tubes de Fumées- Démarrage à Froid ». Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi. 2016/2017.
- [4] : Etude d'une chaudière industrielle à haute pression et du circuit de vapeur d'eau. Houai Yousef PFE (Ingéniorat) chimie industrielle Université USTO 1992.
- [5] : Abderrahmane. CHABI, Lila. MEKZINE, « Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4 Tonnes/Heure de l'ECFERA » . université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU.page (33,34/111). 2013/2014.
- [6] : Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- [7] : Walid. BOUNAB , Mahmmoud khalil. HOUTIA, « Etude préventive sur la corrosion et difonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrarr», université Ahmed. Draia. 2019/2020.
- [8] : Document du complexe GP1/Z. objet : Suivi des chaudières combustion et rendement, 18 Février 1992.
- [9] : Polycopié de Cours module Fours et Chaudières, Niveau 1 ière Année Master en Génie Chimique, Département de Génie des Procédés, FST, réalisé par Dr MEZOUAGH Amina, 2021.

