



Faculty of Sciences and Technology  
Department of Process Engineering  
Ref:...../U.M/F.S.T/2025

كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم هندسة الطرائق  
رقم: ..... / ج. م. ك. ع. ت. / 2025

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : INDUSTRIES PETROCHIMIQUES**

**GENIE DES PROCEDES**

**Option: GENIE PETROCHIMIQUE**

**GENIE CHIMIQUE**

### Thème

**Calcul de vérification du rendement d'une chaudière industrielle à  
tube d'eau (ABB) de Complexe GL2/Z**

**Présenté par**

- HAOUACH Marwa
- HAMMADI Feryel

Soutenu le 24 /06/ 2025 devant le jury composé de :

<b>Présidente :</b>	BELARBI Ilhem	MCB	Université de Mostaganem
<b>Examinatrice :</b>	LARBI Nour Elhouda	MCB	Université de Mostaganem
<b>Rapporteuse :</b>	MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem

## **Remerciements**

*Avant tous nous tenons à remercier le bon DIEU notre créateur,  
pour nos avoir donné la force et le courage d'accomplir ce  
travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadrante Dr  
«MEZOUAGH Amina» Maître de conférences à l'université de  
Mostaganem pour ses compréhensions, ses patiences, ses remarques qui  
ont été précieuses et ses soutiens et ses conseils qui nous a apporté tout  
au long de ce travail dans des moments difficiles.*

*Nous sommes particulièrement honorées par la présence de,  
**BELARBI Ilhem** Maître de conférences à l'université Abdelhamid Ibn  
Badis de Mostaganem qui a bien accepté de présider ce jury de mémoire.*

*Mes chaleureuses remerciements vont à Mme **LARBI Nour Elhouda**  
Maître de conférences à l'université de Mostaganem.*

*Nos plus sincères remerciements vont également à tous les  
enseignants du département génie des procédés qui nous aidés,  
conseillés et guidés a fin de finaliser se présent  
mémoire fin d'étude dans des bonnes conditions.*

*Sans oublier de remercier l'ensemble des personnels du  
**COMPLEXE DE GNL2/Z**, pour les moyens qu'ils ont mis a notre  
disposition et leurs encouragements.*

*Toute notre amitié va vers nos collègues de la promo  
(Master 2 GC et Master 2 IP) et puis le personnel de l'université, pour la  
bonne ambiance qu'ils ont su créer.*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué  
au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce  
mémoire.*

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail

A mes chers parents, mon père et ma mère pour

Leur soutien, leur amour, leur patience et aussi leur Encouragement.

A ma sœur et mes frères

Mes nièces et mes neveux

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à ce travail.

**Marwa haouach**

## **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 mon père qui sans lui je ne serais pas arrivée jusqu'ici.

A ma sœur et mes frères

Mes nièces et mes neveux

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à ce travail.

**Feryel Hammadi**

## Résumé :

La chaudière est un dispositif pour chauffer l'eau et de produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. Lors de la 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 GL2/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 GL2/Z, to follow the calculation of its output in the cases of the conditions designates and real.

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

## ملخص

تتعرض الغلاية أثناء إنتاجها لمشاكل التآكل والتشكيل والترسبات الكلسية. الغلاية عبارة عن جهاز لتسخين المياه وإنتاج البخار اللازم لتشغيل العمليات GL2/Z الغرض من هذا العمل هو دراسة غلاية ذات أنابيب مائية معقدة. على مكوناتها مثل أنابيب الدخان وأنابيب المياه ، مما يؤدي إلى انخفاض مردودية الغلاية لمتابعة حساب مردوديتها في حالات الظروف المحددة والحقيقية

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

# SOMMAIRE

Liste des tableaux .....	9
Liste des figures .....	10
Introduction générale .....	12
I-PARTIE THEORIQUE .....	13
I-1 Présentation de complexe GNL2/Z.....	14
I-1-1 Introduction.....	14
I-1-2 Gaz naturel.....	14
I-1-2-1 Définition .....	14
I-1-2-2 Composition de gaz naturel.....	14
I-1-3 Historique du complexe GL2/Z .....	15
I-1-4 L'activité du complexe GL2/Z.....	16
I-1-4-1 Conception du complexe GL2/Z.....	16
I-1-4-1-1 Zone de procédé.....	17
I-1-4-1-2 Zone des utilités.....	20
I-1-4-1-3 Stockage et chargement du GNL/gazoline .....	21
I-2 Chaudière .....	22
I-2-1 Définition d'une chaudière.....	22
I-2-2 Le rôle d'une chaudière.....	23
I-2-3 Classification de chaudière .....	23
I-2-3-1 la conception .....	23
I-2-3-2 la circulation d'eau .....	24
I-2-3-3 le timbre .....	24
I-2-4 Les type des chaudières.....	24
I-2-4-1 Chaudière à tube d'eau.....	24
I-2-4-2 Chaudière à tube fumée.....	25
I-2-5 Les principaux éléments de la chaudière.....	26
I-2-5-1 Chambre de combustion.....	26
I-2-5-2 Brûleurs.....	27
I-2-5-3 Économiseur .....	27
I-2-5-4 Ballon supérieur (ballon vapeur).....	27
I-2-5-5 Ballon inférieur .....	28
I-2-5-6 Surchauffeurs .....	28
I-2-5-7 Faisceaux tubulaires .....	29
I-2-5-8 Désurchauffeur.....	29

I-2-5-9 Ventilateur d'air.....	29
I-2-5-10 Réchauffeur d'air .....	29
I-2-5-11 Cheminée .....	29
I-2-6 Fonctionnement de chaudière .....	31
I-2-6-1 Circuit Eau/Vapeur.....	31
I-2-6-2 Circuit Air/GAZ.....	32
I-2-7 Caractéristiques principales des eaux de chaudière .....	33
I-2-8 Distribution de la vapeur.....	34
I-2-8-1 La vapeur Haute pression (62 bar).....	34
I-2-8-2 La vapeur moyenne pression (17.2 bar).....	35
I-2-8-3 La vapeur basse pression (4.5 bars) .....	35
I-3 La combustion.....	35
I-3-1 Définition de la combustion .....	35
I-3-2 Type de combustion .....	36
I-3-2-1 Combustion complète .....	36
I-3-2-2 Combustion incomplète .....	36
I-3-2-3 Combustion rapide .....	36
I-3-2-4 Combustion lente .....	36
I-3-3 Combustibles.....	37
I-3-4 Classification du combustible .....	37
I-3-4-1 Combustibles solides.....	37
I-3-4-2 Combustibles liquides .....	37
I-3-4-3 Combustibles gazeux .....	37
I-3-5 Le comburant .....	37
I-3-6 Caractéristique d'une réaction de combustion .....	38
I-3-6-1 Pouvoirs calorifiques.....	38
II- PARTIE PRATIQUE .....	39
II-1 Introduction.....	40
II-2 Problématique .....	40
II-3 Méthode de calcul de rendement énergétique de la chaudière.....	41
II-3-1 Méthode de calcul directe .....	41
II-3-2 Méthode de calcul indirecte.....	41
II-3-2-1 Calcul de Pertes par cheminées .....	42
II-3-2-2 Pertes par purges.....	43
II-3-2-3 Pertes par parois.....	44

II-4 Calculs du rendement et les pertes énergétiques.....	45
II-4-1 Type et composition de combustible.....	46
II-4-2 Composition et température des fumées.....	46
II-4-3 Calcul de rendement énergétique.....	47
II-4-3-1 Détermination des enthalpies.....	47
II-4-4 Calcul des pertes.....	47
II-4-4-1 Pertes par cheminées.....	48
II-4-4-2 Pertes par purge.....	48
II-4-4-3 Pertes par parois.....	50
II-5 Etude d'économie d'énergie pour les chaudières.....	50
II-5-1 Pertes par fumées et Contrôle de l'excès d'air.....	51
II-5-2 Pertes par purges.....	51
II-5-3 Pertes par parois.....	52
II-6 Conclusion.....	53
Conclusion générale.....	55
Références bibliographiques.....	56

## *Liste des tableaux*

Tableau I- 1: Composition de gaz naturel destiné à la liquéfaction au niveau de l'unité GL2/Z .....	15
Tableau I- 2: Valeurs de service préconisées pour les eaux en chaudière .....	43
Tableau I-3: La composition théorique d'air .....	37
Tableau II- 1: Consommation de fuel gaz, d'eau et la production de vapeur aux chaudières A,B.....	46
Tableau II- 2: Composition de fuel gaz et son pouvoir calorifique.....	46
Tableau II- 3 : Résultats des analyses des fumées pour les deux chaudières (février 2025).....	46
Tableau II- 4: Résultat de calculs des rendements pour les deux chaudières.....	47
Tableau II- 5: Résultats de calculs des pertes par cheminées pour les deux chaudières .....	48
Tableau II- 6: Résultats de calcul de débit d'eau de purge et ces pertes.....	50
Tableau II- 7: Résultats de calcul des pertes par parois pour les deux chaudières.....	50
Tableau II- 8: Test de l'effet de l'excès d'air sur la température de la cheminée de deux chaudières (A, B).....	51
Tableau II- 9: Paramètres physico-chimiques de l'eau provenant des purges de design et de la situation actuelle .....	52
Tableau II- 10: Température de parois des deux chaudières .....	52

## *Liste des figures*

Figure I- 1: Présentation du complexe GL2/Z.....	16
Figure I- 2: Implantation du complexe GL2 /Z .....	17
Figure I- 3: Zone de procédé .....	17
Figure I- 4: Zone des utilités.....	21
Figure I- 5: Zone de stockage d'Expédition .....	22
Figure I- 6: Chaudière industrielle.....	23
Figure I- 7: Chaudières à tubes d'eau. ....	25
Figure I- 8: Chaudière à tube fumée .....	26
Figure I- 9: Bruleur.....	27
Figure I- 10: Ballon supérieur.....	28
Figure I- 11 : Ballon inférieur.....	28
Figure I- 12: Cheminée.....	30
Figure I- 13: Elément constitutifs d'une chaudière.....	30
Figure I- 14: Circuit Eau/Vapeur .....	32
Figure I- 15: Circuit Air/Gaz .....	33
Figure II- 1: Bilan thermique de la chaudière.....	42
Figure II- 2: Bilan thermique typique d'une chaudière ABB .....	48
Figure II- 3: Bilan de matière d'une chaudière.....	49

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Le Complexe de GL2/Z est responsable de la production de l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL). Les Complexes de GNL sont des grands consommateurs de vapeur, utilisée à la fois comme une source d'énergie de chauffage et comme force motrice pour les machines tournantes.

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

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 GL2/Z, nous allons étudier et comparais les valeurs de rendement actuel et design.

Ce mémoire est divisé en deux parties :

Dans la première partie nous présentons une brève description du complexe GL2/Z et des généralités sur les chaudières particulièrement la chaudière ABB de GL2/Z.

La deuxième partie présente la partie de calcul, comporte un calcul de rendement de la Chaudière et des pertes énergétiques et une comparaison avec les valeurs design

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **I-PARTIE**

# **THEORIQUE**

## **I-1 Présentation de complexe GNL2/Z**

### **I-1-1 Introduction**

Après la découverte d'énormes réserves de gaz naturel à Hassi R'mel, le pays a procédé aux installations des complexes de liquéfaction du gaz naturel, industrie induite par l'émergence du marché mondial du gaz. L'appareil de production de GNL est composé de trois complexes dénommés par codification : GL1/Z, GL2/Z et GL3/Z. Leur implantation fait partie du pôle industriel pétrochimique et gazier de la région, l'une des plus importantes concentrations industrielles du pays. Comme toute création industrielle d'envergure, le complexe GL2/Z a franchi des étapes qui sont autant d'événements marquants de son histoire[1].

### **I-1-2 Gaz naturel**

#### **I-1-2-1 Définition**

Le gaz naturel est un combustible fossile composé principalement de méthane, mais aussi d'autres hydrocarbures tels que l'éthane, le propane, le butane et le pentane. Il se forme naturellement dans les roches poreuses du sous-sol à partir de la décomposition de matière organique ancienne. Ce gaz est généralement extrait du sous-sol à l'aide de forages pétroliers et gaziers, puis transporté par gazoduc ou navires-méthaniers. Connu pour son efficacité énergétique, le gaz naturel est largement utilisé dans divers secteurs tels que la production de chaleur, d'électricité, le chauffage des habitations, le refroidissement, les transports et l'industrie. Il est moins polluant que d'autres énergies fossiles et émet environ un tiers de CO<sub>2</sub> par rapport au pétrole. Le gaz naturel peut être conventionnel ou non conventionnel en fonction de sa facilité d'extraction et des techniques utilisées [2].

#### **I-1-2-2 Composition de gaz naturel**

Le gaz naturel est un mélange du méthane, de l'éthane, du propane, des isomères du butane et des isomères du pentane. D'autres composés tels que le dioxyde de carbone, l'hélium, le sulfure d'hydrogène et l'azote peuvent également être trouvés. La composition du gaz naturel n'est jamais la même. Cependant, on peut dire que son composant principal est le méthane. Le gaz naturel, dans sa forme commercialisable, est considéré comme un combustible propre. Il contient peu de soufre et il ne produit pratiquement pas le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Ses émissions d'oxydes d'azote sont moindres que celles du pétrole ou du charbon, tandis que ses émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont inférieures à celles des autres combustibles fossiles [3].

**Tableau I- 1:** Composition de gaz naturel destiné à la liquéfaction au niveau de l'unité GL2/Z

Composant	% Molaire
Hélium	0.19
Azote	5.78
Méthane	82.49
Ethane	07.25
Propane	2.35
Isobutane	0.47
Normal-butane	0.68
Iso-pentane	0.15
Normal-pentane	0.19
Hexane	0.23
CO <sub>2</sub>	0.21
H <sub>2</sub> O	0.01

### **I-1-3 Historique du complexe GL2/Z**

Le complexe industriel de liquéfaction du gaz naturel (GL2/Z) constitue l'une des plus importantes réalisations industrielles de la chaîne de transformation des hydrocarbures, exploitée par la société SONATRACH en Algérie pour la production de gaz naturel liquéfié (GNL). Il est situé au nord de Bethioua à 6 Km de la ville d'Arzew au Nord-Ouest de l'Algérie, au bord de la méditerranée, son emplacement lui permet d'utiliser l'eau de mer comme source d'alimentation pour le refroidissement, la production d'eau distillé et la lutte antiincendie. Le complexe couvre une superficie de 72 hectares et il a été construit par la société américaine PULLMAN KELLOG. Le contrat a été signé avec cette dernière le 09/02/1976, sa réalisation a été commencée en début 1978 pour être opérationnel en début 1981. La première production de GNL a été effectuée le 29/01/1981 et la première expédition était le 20/07/1981[4].



**Figure I- 1:** Présentation du Complexe GL2/Z.

#### **I-1-4 L'activité du complexe GL2/Z**

Le Complexe comprend les installations de réception du gaz naturel produit par les champs gaziers d'Hassi Ramel situant à 550 Km au Sud d'Alger. Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température de  $-162^{\circ}\text{C}$  dans trois bacs cryogéniques de 100000 m<sup>3</sup> de capacité unitaire avant d'être exporté. La capacité théorique totale de production du complexe est de l'ordre de 18 millions de m<sup>3</sup> par an de GNL à pendant 335 jours par ans.

En parallèle du GNL, le propane et le butane destinés à la commercialisation expédiée par pipe vers le complexe GP1/Z.

La gazoline est destinée à l'exportation.

Le gaz de charge alimentant l'unité HELIOS pour y extraire de l'hélium et de l'azote[4].

##### **I-1-4-1 Conception du complexe GL2/Z**

L'usine est composée de trois zones à savoir :

- Zone de procédé ;
- Zone d'utilités ;
- Zone de stockage et expédition.



**Figure I- 2:** Implantation du complexe GL2 /Z.

#### **I-1-4-1-1 Zone de procédé**

Cette zone est composée essentiellement de six (06) trains de liquéfaction identiques. Chaque train comporte divers équipements répartis sur plusieurs sections notamment :



**Figure I- 3:** Zone de procédé.

##### **I-1-4-1-1-1 La démercurisation**

La démercurisation est réalisée par le phénomène d'adsorption moléculaire qui a pour objet d'éliminer le mercure qui provoque la corrosion des échangeurs en aluminium. Un lit de tamis moléculaire recouvert de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) est contenu dans le ballon démercuriseur 142 D. Le diamètre des billes est de 5mm. Ce lit est maintenu par une couche de billes d'alumine (diamètre 20 mm) posée sur une grille métallique. Le gaz traverse le lit de haut en bas. La capacité d'adsorption et la faible quantité de mercure contenue dans le gaz naturel (GN) (moins

de  $1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) exigent un temps de fonctionnement relativement long et permettent d'éviter une régénération des tamis du démercuriseur. Il est toutefois, prévu un séchage du tamis par gaz chaud, réalisé par une installation démontable. Celui-ci peut, en effet, se charger d'humidité lors du remplissage ou pendant un arrêt prolongé (maximum de mercure dans le GN  $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) [4].

#### **I-1-4-1-1-2 Décarbonatation :**

##### **I-1-4-1-1-2-a Elimination du CO<sub>2</sub>**

Le gaz brut d'alimentation passe tout d'abord dans le ballon séparateur GN alimentation où tous les hydrocarbures liquides en suspension dans le gaz naturel sont récupérés et éliminés vers le système de rejet liquide, afin de ne pas contaminer la MEA et ce qui provoquerait la formation d'une grande quantité de mousse.

Puis le GN est chauffé à  $38^\circ\text{C}$  dans le préchauffeur de GN d'alimentation avant de pénétrer dans la colonne d'absorption du CO<sub>2</sub> par le bas ou, à contre-courant de la solution de MEA pauvre, il sera débarrassé du CO<sub>2</sub> jusqu'à une teneur inférieure à 70ppm en tête de colonne. Puis le GN est dirigé ensuite vers la section de déshydratation. La solution de la MEA, pénétrant au niveau du 5<sup>e</sup> plateau de l'absorbeur s'enrichit en CO<sub>2</sub> au fur et à mesure qu'elle descend jusqu'à 29 plateaux de l'absorbeur et quitte le fond de la colonne sous forme de solution de MEA riche pour se diriger vers la colonne de régénération de MEA ou décarbonatation afin d'y être régénérée.

##### **I-1-4-1-1-2-b Régénération de la solution MEA**

La solution MEA riche, après être passée dans le ballon séparateur des hydrocarbures, est tout d'abord chauffée à  $102^\circ\text{C}$  par échange thermique avec la solution de MEA pauvre régénérée et est ensuite introduite en tête de la colonne de régénération fonctionnant normalement à  $110^\circ\text{C}$  et à 1 bars. En fond de la colonne la solution de MEA riche en CO<sub>2</sub> descend dans la colonne. Pour y être épurée par les gaz ascendants provenant de l'évaporation du produit de fond le liquide (solution MEA) en fond de colonne s'appauvrit en CO<sub>2</sub> et est renvoyée à l'absorbeur après avoir réchauffé la MEA riche et être refroidie à  $38^\circ\text{C}$ . La vapeur de tête condensée est récupérée au fond du ballon de reflux du régénérateur et est ensuite réinjectée en tête de la tour de régénération. Les gaz incondensables, essentiellement CO<sub>2</sub> sont évacués à l'atmosphère [5].

### **I-1-4-1-1-3 Déshydratation**

Le GN, à la sortie de la décarbonatation, est saturé en eau. La section sera chargée d'enlever complètement cette eau pour obtenir une concentration inférieure à 0.5 ppm. Cette déshydratation se fera en deux étapes :

- ✓ Refroidissement et condensation à 21 °C.
- ✓ Séchage par adsorption dans les sècheurs à tamis moléculaire, ce dernier se charge d'une certaine quantité d'eau et de CO<sub>2</sub>. Sa régénération se fera simplement par augmentation de la température du lit qui libérera les molécules emprisonnées

### **I-1-4-1-1-4 Compression et liquéfaction**

Cette section comprend deux boucles :

#### **I-1-4-1-1-4-a Boucle Propane**

Cette boucle permet le pré-refroidissement de gaz de charge et est composée des équipements suivants :

- Un (01) compresseur ;
- Un (01) accumulateur ;
- Deux (02) condensateurs ;
- Quatre (04) ballons d'aspiration du compresseur de propane ;
- Quatre (04) échangeurs pour le refroidissement du gaz ;
- Quatre (04) échangeurs pour le refroidissement du MCR (Réfrigérant à Composants Multiple).

#### **I-1-4-1-1-4-b Boucle du MCR**

Cette boucle permet le refroidissement final du gaz de charge et est composée des équipements suivants :

Deux (02) groupes turbocompresseurs MCR1 et MCR2 ;

Deux (02) ballons d'aspiration des compresseurs MCR1 et MCR2 [2].

#### **I-1-4-1-1-5 Section fractionnement**

Il s'agit d'une unité qui sépare les hydrocarbures lourds provenant de la tour de lavage en fonction de leur degré de volatilité. Il s'agit d'un mélange d'éthane, de propane, de butane et d'essence, et l'objectif de cette séparation est d'isoler chaque composant séparément.

Elle est réalisée en 3 étapes, et chaque étape possède sa propre colonne de distillation :

##### **I-1-4-1-1-5-a De-éthanisation**

Dans cette colonne, nous récupérons l'éthane, le composant le plus léger, qui sort en tête de colonne sous forme de vapeur à une température de 105°C et à une pression d'environ 29,7 bars pour être réinjecter dans le GNL. L'excès est utilisé comme combustible dans le système fuel gaz, et les produits de fond sont acheminés vers la colonne de de-propanisation.

##### **I-1-4-1-1-5-b De-propanisation**

Dans cette colonne, on retire le propane en haut de la colonne à une température de 123°C et une pression de 18 bars, dont une partie est vendue, une partie est utilisée dans la réfrigération ou comme support dans le MCR, tandis que le reste en bas va dans la troisième colonne.

##### **I-1-4-1-1-5-c De-butanisation**

Il s'agit de la troisième colonne avec du butane en haut de la colonne à (98.8 %) est envoyé vers GPI/Z pour être commercialisé ou réinjecté dans le GNL. Le produit de fond de la tour constitue la gazoline qui est envoyé vers stockage pour y être commercialisé [2].

#### **I-1-4-1-2 Zone des utilités**

Cette zone est essentiellement autonome, elle assure la production des utilités pour démarrage et le service des six trains de liquéfaction et stockage et expédition.

- **Source d'énergie :** la vapeur d'eau est la source d'énergie choisie pour le complexe.
- **Source de refroidissement :** l'eau de mer est la source de refroidissement transportée par un ensemble de six (6) pompes de grande puissance de 1750000m<sup>3</sup>/h.
- **Production d'électricité :** la production d'électricité est assurée par trois turbogénérateurs fournissent 36 MW par chacun.

- **Unité de dessalement** : il existe six unités de dessalement d'une capacité de 45 m<sup>3</sup>/h pour chacun, assurant la production de l'eau dessalée (eau distillée) pour alimenter les chaudières du complexe.
- **Production d'air comprimé** : une grande partie de l'instrumentation du complexe est pneumatique la production de l'air comprimé est assurée par un ensemble de quatre compresseurs de séchage liquéfaction des hydrocarbures.



**Figure I- 4:** Zone des utilités.

#### **I-1-4-1-3 Stockage et chargement du GNL/gazoline**

Le GNL est stocké à -162 °C dans trois bacs d'une capacité unitaire de 100.000 m<sup>3</sup> chacun (figure I.5). Le chargement du produit est assuré au niveau de deux quais de chargement pouvant recevoir des méthaniers d'une capacité de 40.000 à 145.000 m<sup>3</sup> GNL. Le stockage de la gazoline produite est assuré par deux bacs de 14.000 m<sup>3</sup> chacun.

Les données suivantes indiquent les capacités de production et de stockage au niveau du complexe :

- **Capacité de production annuelle :**

GNL : 17,8 Millions m<sup>3</sup> / an.

Propane : 410 000 Tonnes / an

Butane : 327 000 Tonnes /an.

Gazoline : 196 000 Tonnes /an.

• **Capacité totale de stockage :**

3 bacs aériens de stockage GNL : 100 000 m<sup>3</sup> chacun.

2 bacs aériens de stockage de gazoline : 14 000 m<sup>3</sup> chacun [4].



**Figure I- 5:** Zone de stockage d'Expédition.

## **I-2 Chaudière**

### **I-2-1 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 [2].



**Figure I- 6:** Chaudière industrielle.

### **I-2-2 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.

Est essentiellement de transmettre 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.

### **I-2-3 Classification de chaudière**

Les chaudières peuvent être classées suivant différents critères :

**I-2-3-1 la conception :** Les chaudières industrielles peuvent être classées suivant leurs conceptions en deux catégories principales :

**I-2-3-1-a Les chaudières conventionnelles :** dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustion de liquide ou gaz.

**I-2-3-1-b Les chaudières de récupération :** utilisant la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz.

### **I-2-3-2 la circulation d'eau**

**I-2-3-2-a Circulation d'eau naturelle :** l'eau descend par gravité du ballon supérieur au ballon inférieur par les tubes de chute, puis remonte sous forme liquide-vapeur au ballon supérieur à travers les tubes vaporisateurs.

**I-2-3-2-b Circulation d'eau forcée :** la circulation d'eau se fait grâce à des pompes intégrées dans le circuit.

### **I-2-3-3 le timbre**

- BP (Basse Pression) timbre jusqu'à 15 bars ;
- MP (Moyenne Pression) timbre entre 15 et 30 bars ;
- HP (Haute Pression) timbre supérieur à 30 bars.

### **I-2-4 Les type des chaudières**

On distingue plusieurs types de chaudières qui diffèrent l'une de l'autre selon leur classification qu'on a définie auparavant. Généralement les chaudières à vapeur industrielles sont des plusieurs catégorie :

#### **I-2-4-1 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 inférieur) 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 [6].

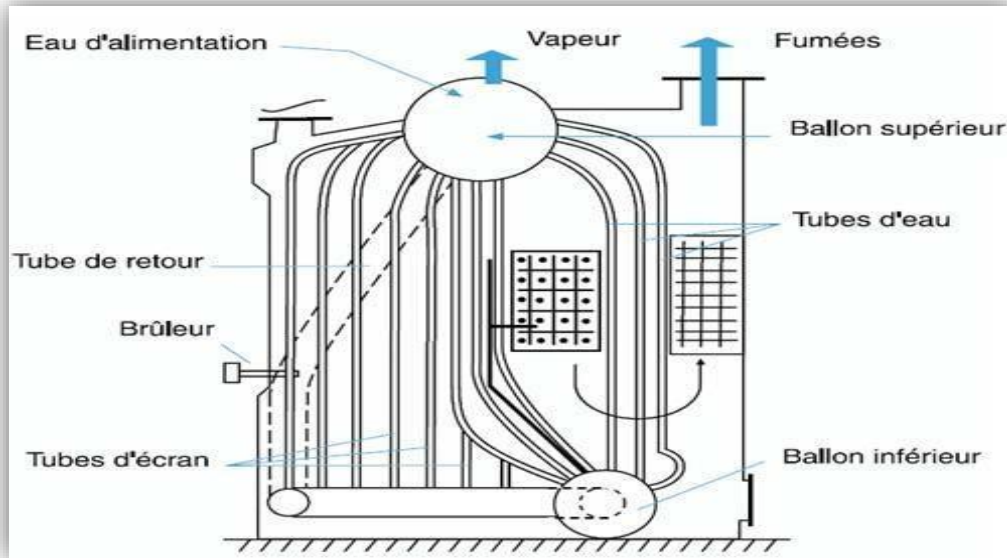
#### **I-2-4-1-a Les avantages**

- Moins dangereuse, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier.

### I-2-4-1-b Les inconvénients

Les inconvénients de ce type on a :

- Son prix est très élevé, il peut aller jusqu'au double du prix de la chaudière à tube de fumée.
- Traite un grand volume d'eau ; elle est classée en premier catégorie ; donc il doit avoir un local indépendant pour la chaufferie.



**Figure I- 7:** Chaudières à tubes d'eau.

### I-2-4-2 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 [7].

#### I-2-4-2-a Les avantages

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

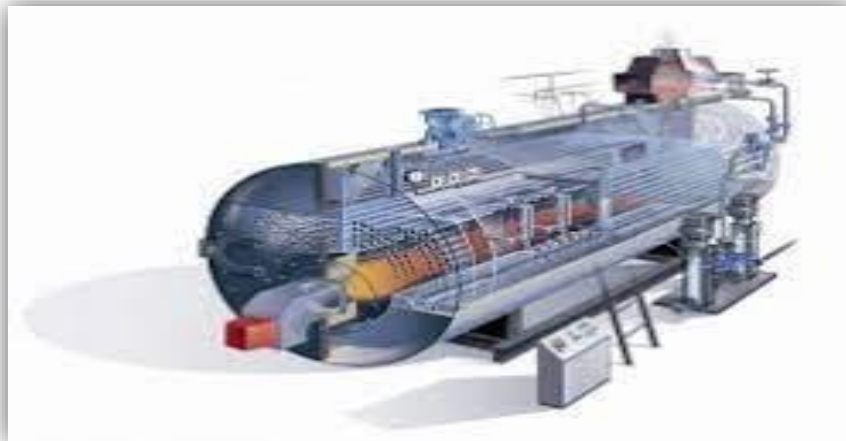
- Perte minimum par rayonnement.
- Facilité d'exploitation.
- La teneur en eau est excellente pour des applications de chauffage.

- 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.

#### **I-2-4-2-b Les inconvénients**

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

- 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.



**Figure I- 8:**Chaudière à tube fumée.

#### **I-2-5 Les principaux éléments de la chaudière**

Pour bien comprendre le fonctionnement de la chaudière, il faut d'abord connaître les différents éléments de la chaudière.

##### **I-2-5-1 Chambre de combustion**

C'est dans cette chambre que l'on brûle le mélange air combustible en libérant une certaine quantité de chaleur. Les murs latéraux et le plafond de cette chambre sont tapissés. L'échange thermique se fait par rayonnement, dans les tubes en acier appelés tubes écrans. La sortie de l'eau chaude (fumées) se fait généralement à travers une partie de la paroi latérale [2].

### **I-2-5-2 Brûleurs**

Un brûleur 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. Le mélange nécessite le meilleur réglage pour que le rendement de combustion soit maximum et que la combustion soit la plus complète possible [5].



**Figure I- 9:** Brûleur.

### **I-2-5-3 Économiseur**

L'économiseur joue le rôle d'un échangeur de chaleur dont l'objectif est d'augmenter la température de l'eau d'alimentation qui provient du dégazeur à l'aide de la récupération d'une partie des calories restantes dans les gaz de combustion [8].

### **I-2-5-4 Ballon supérieur (ballon vapeur)**

Il est aussi appelé ballon vapeur. Réalise la séparation des deux phases liquide et vapeur. Il se caractérise par son volume important qui permettra de disposer d'un stockage de 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) [2].



**Figure I- 10:** Ballon supérieur.

#### **I-2-5-5 Ballon inférieur**

Il est aussi appelé réservoir inférieur ou ballon de boue. Il est doté d'un système d'extraction des boues (sels précipités après l'injection du phosphate trisodique  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ). Le ballon inférieur est un cylindre constitué d'une enveloppe métallique, son rôle est de collecter l'eau arrivant des tubes descendants et de le distribuer vers les tubes vaporisateurs. Ce ballon est rempli à 100 % d'eau.



**Figure I- 11 :** Ballon inférieur.

#### **I-2-5-6 Surchauffeurs**

Les surchauffeurs reçoivent extérieurement les gaz venants directement de la chambre de combustion. Ce sont les faisceaux tubulaires du générateur de vapeur qui sont soumis aux températures les plus élevées. La vapeur saturée venant de la partie haute de réservoir, passe dans les tubes des surchauffeurs, où sa température est élevée à pression constante.

Bien que la vapeur surchauffée ne dépasse pas la température maximale autorisée par le matériel, un système de « désurchauffe » est parfois installé. Il s'agit d'un refroidissement de la vapeur.

#### **I-2-5-7 Faisceaux tubulaires**

Il englobe les tubes de chute ou tubes d'eau (alimentation du ballon inférieur en eau à partir du ballon supérieur), les tubes vaporisateurs (qui permettent la vaporisation de l'eau et relient le BI au BS), les tubes écrans (qui entourent complètement le foyer et forment la chambre de combustion) et le surchauffeur, formé de plusieurs faisceaux. Il permet de porter la température de la vapeur saturée à une température supérieure à la température d'utilisation.

#### **I-2-5-8 Désurchauffeur**

C'est un système d'injection d'eau par pulvérisation qui permet de régler la température finale de la vapeur surchauffée.

#### **I-2-5-9 Ventilateur d'air**

Il sert à alimenter la chaudière en air.

#### **I-2-5-10 Réchauffeur d'air**

Echangeur de chaleur air/fumées. Il est situé entre l'économiseur et la cheminée.

#### **I-2-5-11 Cheminée**

Elle permet l'évacuation des fumées dans les meilleures conditions de sécurité.

Ses dimensions (hauteur et diamètre) sont calculées pour permettre un tirage naturel des fumées [4].



**Figure I- 12:** Cheminée.

A- Bruleur

B-Foyer

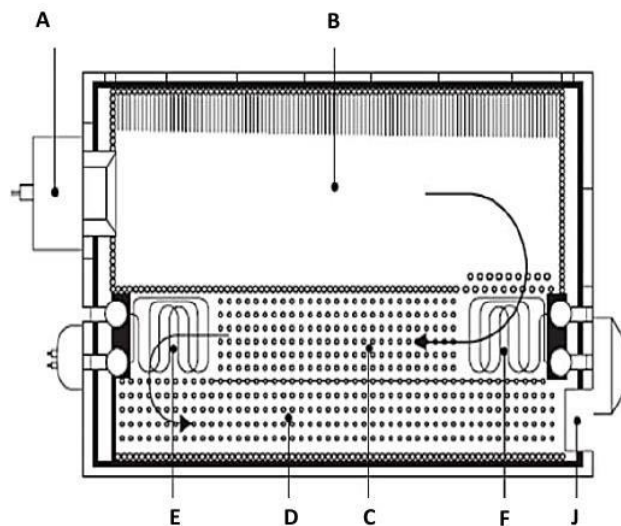
C- Tube convection descendant

D- Tube convection ascendant

E- Surchauffeur secondaire

F-Surchauffeur primaire

J-Sortie fumées vers cheminée



**Figure I- 13:** Elément constitutifs d'une chaudière.

## **I-2-6 Fonctionnement de chaudière**

Le fonctionnement d'une chaudière fait intervenir deux principaux circuits : un circuit Eau/vapeur dont le but est la transformation de l'eau en vapeur afin d'obtenir une vapeur à 400°C et 45bar ; et un circuit air/gaz qui sert à produire de la chaleur par la combustion.

### **I-2-6-1 Circuit Eau/Vapeur**

#### ➤ **L'arrivée de l'eau d'alimentation**

L'eau d'alimentation est stockée dans une bache, provient en partie des condensats de vapeur en retour après utilisation, et l'eau déminéralisée. Cette eau est aspirée par une pompe et refouler dans le dégazeur pour éliminer l'oxygène O<sub>2</sub> qui existe dans l'eau. Ce dégazage se fait par deux méthodes :

#### - **Dégazage physique**

Consiste à faire un dégazage par la vapeur très basse pression (VBB = 0.8), on injecte la vapeur dans le dégazage, et grâce à un barbotage le O<sub>2</sub> dégage vers l'atmosphère.

#### - **Dégazage chimique**

On utilise dans cette méthode un produit chimique, le plus utilisable est l'hydrate d'hydrazine (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), dont la réaction chimique, s'écrit comme suit :



Après ce phénomène de dégazage, les pompes aspirent l'eau du dégazeur et la refoule dans le ballon supérieur par le passage par l'économiseur.

#### ➤ **Passage par l'économiseur**

L'économiseur reçoit l'eau d'alimentation refoulée par la ou les pompes alimentaires. Il est généralement situé sur le parcours des fumées, ce sont les fumées produites lors de la combustion qui cèdent leur chaleur à l'eau d'alimentation avant de passer au ballon supérieur.

### ➤ Stockage dans le ballon supérieur

L'eau venant de l'économiseur est stockée au niveau du ballon supérieur. Après, l'eau passe à travers des tubes appelés tubes écrans qui sont exposés directement aux flammes.

### ➤ Passage par les surchauffeurs 1 et 2

Si la température désirée de la vapeur n'est pas encore atteinte une valeur de 400°C à 405 °C ou si la vapeur contient encore des goûtes d'eau, on a recouru au surchauffage. Il consiste à faire passer la vapeur par des serpentins dans la chambre de combustion, ces derniers seront exposés à la chaleur fournit par les fumées. Ainsi on aura de la vapeur.

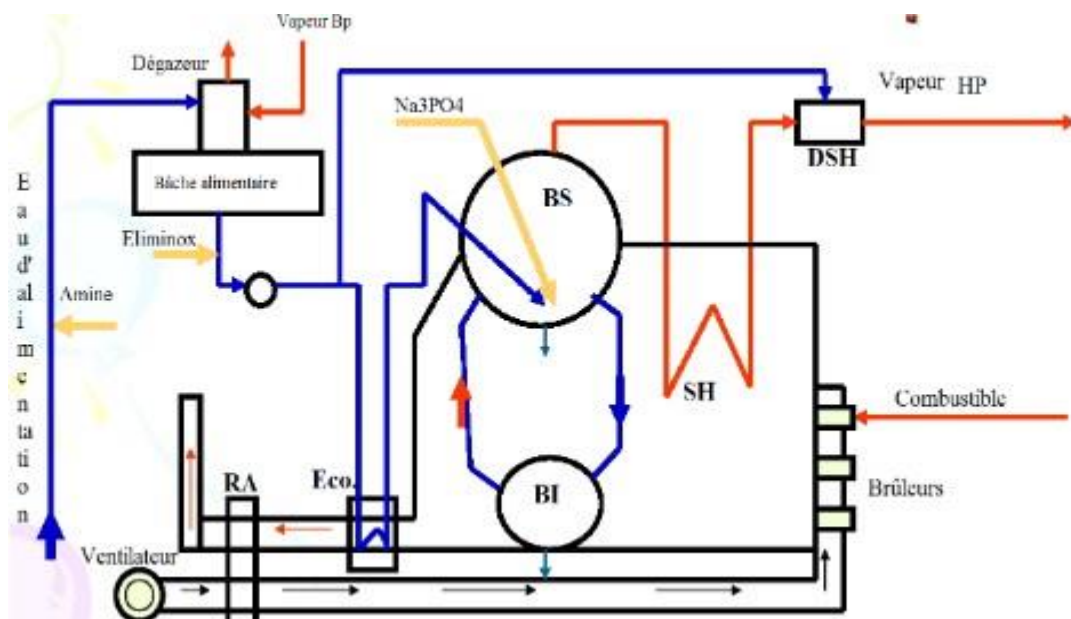
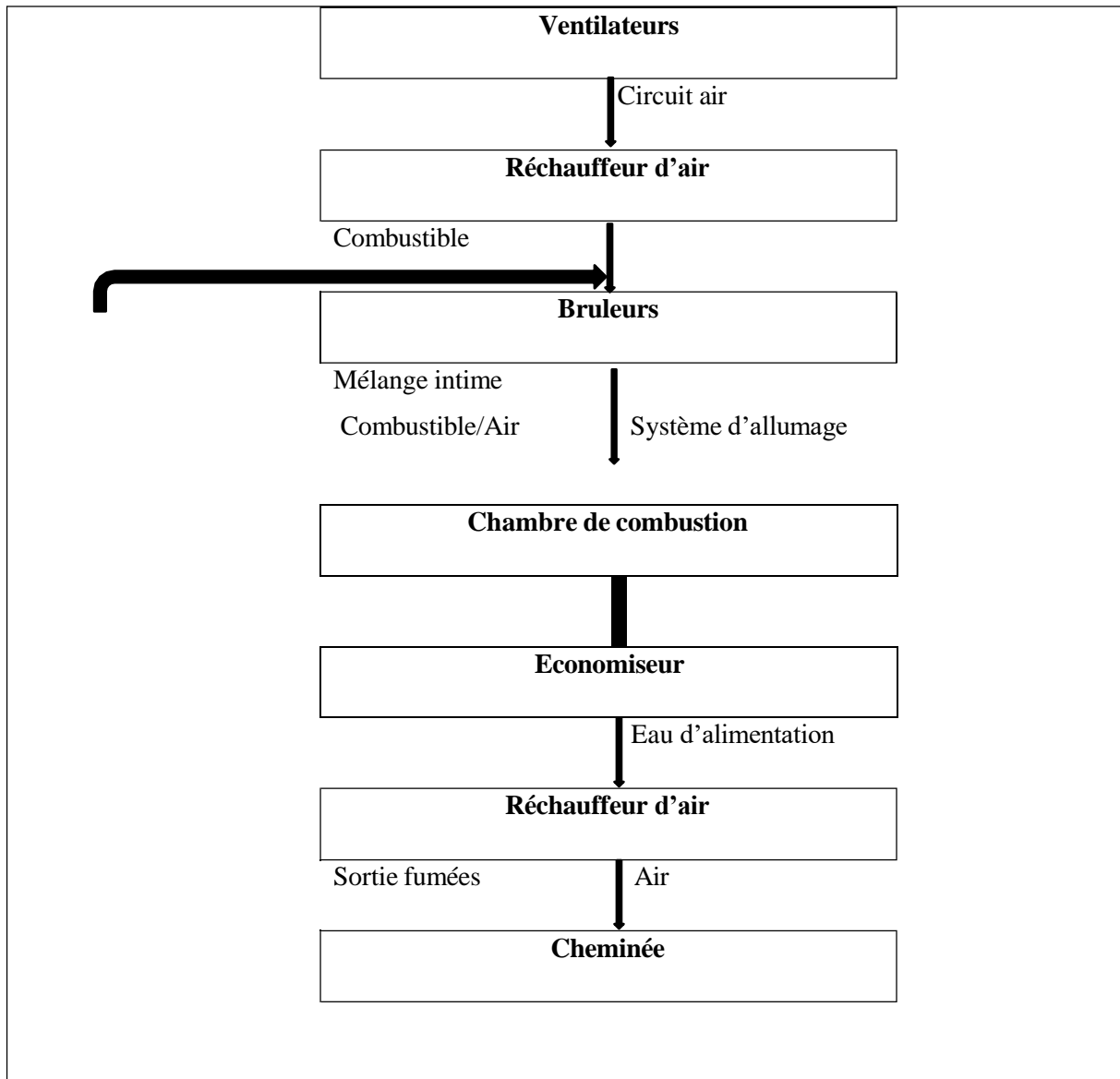


Figure I- 14: Circuit Eau/Vapeur.

### I-2-6-2 Circuit Air/GAZ

Dans le circuit air/gaz, comburant (air) aspiré par le ventilateur de soufflage à l'atmosphère est envoyé dans les brûleurs. Il est ensuite envoyé dans la chambre de combustion. L'oxygène de l'air se combine alors avec le combustible Fioul gaz (FG) en produisant de la chaleur et les fumées.

Ces fumées passent ensuite par les tubes de l'économiseur pour l'échauffement de l'eau d'alimentation avant d'être évacuées vers l'atmosphère [2].



**Figure I- 15:** Circuit Air/Gaz.

### I-2-7 Caractéristiques principales des eaux de chaudière

Le bon fonctionnement d'un générateur de vapeur nécessite une eau de qualité dont les principales caractéristiques sont :

- **Le PH**, limité en valeurs inférieure et supérieure pour éviter les risques de corrosion.

- **La conductivité**, elle est représentative de la teneur en sels dissous. Elle sert à ajuster le débit de la purge de déconcentration et peut permettre l'automatisation de cette dernière. Elle s'exprime en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- **Les Chlorures**, ils sont parmi les facteurs essentiels de la corrosion.
- **Les TA et TAC** (titres alcalimétriques), ils mesurent l'alcalinité de l'eau. Ils sont limités en valeurs supérieures pour éviter les incrustations.
- **Le TA** mesure les hydroxydes et la moitié des carbonates.
- **Le TAC** mesure l'ensemble des concentrations en sels ou en composés alcalins (bicarbonates, carbonates, hydroxydes et silicates) [2].

**Tableau I- 2:** Valeurs de service préconisées pour les eaux en chaudière [4].

	<b>Eau d'alimentation des chaudières</b>	<b>Eau de chaudière</b>
PH	8.8-9.2	9.7-10.2
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$ .	<6	<100
Cl (ppm)	<0,2	<8
Eliminox (ppm)	0.5-0.7	/
$\text{PO}_4^{3-}$ (ppm)	/	5-15
TA (ppm)	/	2.5-8
TAC (ppm)	/	5-15

### **I-2-8 Distribution de la vapeur**

Les chaudières produisent 36T/h de vapeur à la pression 62 bars. Il existe trois réseaux de vapeur :

#### **I-2-8-1 La vapeur Haute pression (62 bar)**

C'est la vapeur à la température de  $441^\circ\text{C}$  et la pression de 62 bar, qui alimente les équipements suivants :

- La turbine d'entraînement du compresseur propane ;
- La turbine d'entraînement du compresseur MCR ;
- La turbine d'entraînement du compresseur de gaz combustible ;
- Les réchauffeurs de gaz de régénération ;
- Les réseau vapeur 17.2 bar du train et ensuite 4.5 bar après passage par les stations des détentes.

### **I-2-8-2 La vapeur moyenne pression (17.2 bar)**

C'est la vapeur à la température de 324°C et la pression de 17.2 bars. Cette vapeur provient du réseau 62 bar après passage à travers le poste de détente.

La vapeur de 17.2 bars alimente les équipements suivants :

- Le vaporiseur de MEA ;
- La turbine qui entraîne la pompe d'huile de graissage principale ;
- Les turbines qui entraînent les ventilateurs à tirage forcé des chaudières procès.

### **I-2-8-3 La vapeur basse pression (4.5 bars)**

La vapeur 4.5 bars alimente les équipements suivants :

- Les éjecteurs des turbines à condensation X01/X02/X03 JT ;
- Le système de chauffage des bâtiments ;
- Le réchauffeur de gaz de dégivrage X 19 C ;
- Le réchauffeur de gaz d'alimentation X 31 C ;
- Le dégazeur X 72 U [4].

## **I-3 La combustion**

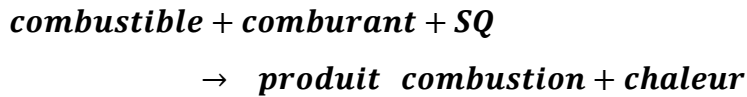
### **I-3-1 Définition de la combustion**

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 brulés 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.[2]

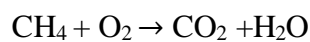
Les trois éléments, **combustible - comburant - énergie de démarrage**, forment le **triangle de feu**.



### **I-3-2 Type de combustion**

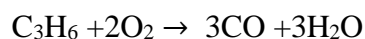
#### **I-3-2-1 Combustion complète**

On appelle combustion complète une combustion où tout le combustible est oxydé. Les fumées ne contiennent aucun élément oxydable [2].



#### **I-3-2-2 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 [2].



#### **I-3-2-3 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 [2].

#### **I-3-2-4 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 [2].

### **I-3-3 Combustibles**

C'est la substance qui peut brûler en présence d'un comburant (l'oxygène) par une réaction d'oxydation générant de la chaleur [2].

### **I-3-4 Classification du combustible**

On peut classer les combustibles en trois catégories :

#### **I-3-4-1 Combustibles solides**

Tous les combustibles solides contiennent de la matière organique exemples (charbon, bois, coke de gaz, déchets) [2].

#### **I-3-4-2 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) [2].

#### **I-3-4-3 Combustibles gazeux**

Mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote exemples (gaz naturel, gaz de gazogène, gaz de four à coke) [2].

### **I-3-5 Le comburant**

C'est la substance qui permet la combustion d'un combustible. Le comburant le plus utilisé est le dioxygène ( $O_2$ ), 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 :

**Tableau I-3:** La composition théorique d'air.

	<b>% en Masse</b>	<b>% en Volume</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	23	21
<b>N<sub>2</sub></b>	77	79

## **I-3-6 Caractéristique d'une réaction de combustion**

### **I-3-6-1 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 :

#### **I-3-6-1-1 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).[2]

#### **I-3-6-1-2 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).[2]

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

$$PCS = PCI + m_{H_2O} \times L_v$$

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

$m_{H_2O}$  : masse d'eau formée lors de la combustion de l'unité du combustible.

# **II-PARTIE**

# **PRATIQUE**

## **II-1 Introduction**

Généralement la chaleur produite par 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.

Au fil du temps, l'efficacité de la chaudière se dégrade en raison d'une combustion incomplète, d'un encrassement lors du transfert thermique et d'un entretien ou fonctionnement inadéquat. Une performance inférieure de la chaudière est également causée par la dégradation de la qualité du combustible et de l'eau. Les tests de performance nous permettent d'évaluer jusqu'à quel point l'efficacité de la chaudière s'écarte de l'optimal. Ainsi, toute anomalie constatée pourrait être examinée pour déterminer le problème et mettre en œuvre les actions correctives appropriées.

Dans cette section, nous avons analysé l'efficacité des chaudières ABB du Complexe GL2/Z, en calculant les diverses pertes d'énergie [4].

## **II-2 Problématique**

Dans le Complexe de GNL2/Z, on trouve six chaudières (quatre du modèle ABB et deux modèle IHI) à fort tonnage, de type tube à eau.

Les chaudières ABB sont élaborées pour générer 400 tonnes de vapeur par heure, utilisée comme source d'énergie pour différents appareils du processus de production de gaz naturel liquéfié [4].

Le but de notre étude est d'apprécier la consommation d'énergie actuelle en calculant le rendement de deux chaudières de type ABB (770UA, 770UB) qui sont actuellement opérationnelles.

Il est nécessaire d'identifier les différentes pertes énergétiques afin d'expliquer et de corriger d'éventuelles diminutions de l'efficacité des chaudières ainsi qu'une consommation excessive de combustible.

L'ensemble des calculs est orienté en fonction des données disponibles.

## II-3 Méthode de calcul de rendement énergétique de la chaudière

Il existe deux méthodes (directe et indirecte) pour évaluer les performances d'une chaudière.

### II-3-1 Méthode de calcul directe

Par la méthode directe, le rendement est calculé comme le rapport entre le flux de chaleur absorbé par le fluide ( $Q_{\text{absorbé}}$ ) et le flux de chaleur fourni à la chaudière par la combustion ( $Q_{\text{entrée}}$ ).

Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = Q_a/Q_e * 100 \dots\dots (II.1)$$

$$\text{Ou } \eta = D_v*(H_v - H_e) / (D_g*PCS) \dots\dots (II.2)$$

Avec :

$\eta$  : le rendement de la chaudière ;

$Q_a$  : débit de chaleur absorbée par le fluide (KJ/hr) ;

$Q_e$  : débit de chaleur entrée par le combustible ( $\text{Nm}^3$  /hr) ;

$D_v$  : Débit de vapeur surchauffée (KJ/Kg) ;

$D_g$  : débit de combustible ( $\text{Nm}^3$  /hr) ;

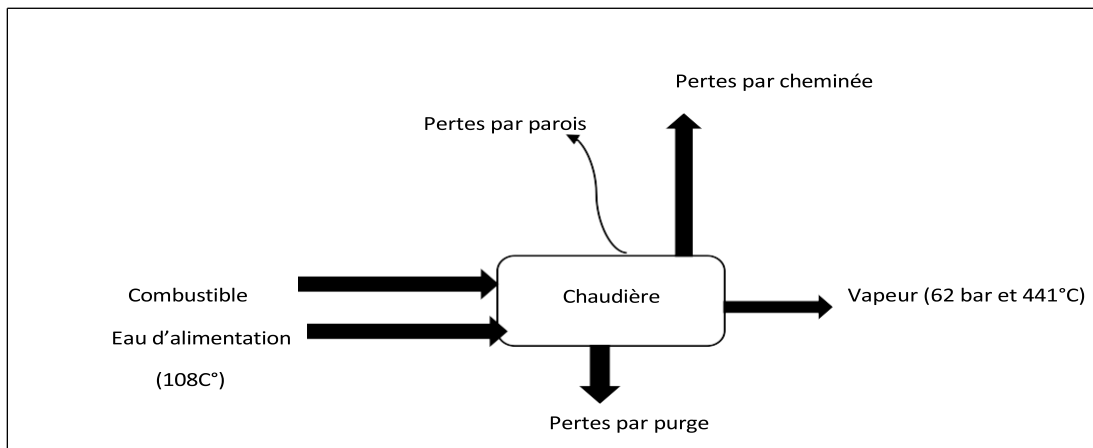
PCS : pouvoir calorifique supérieur (KJ/Kg) ;

$H_v$  : la chaleur contenue dans la vapeur surchauffée (KJ/Kg) ;

$H_e$  : La chaleur contenue dans l'eau d'alimentation saturée (KJ/Kg).

### II-3-2 Méthode de calcul indirecte

L'évaluation thermique de l'installation de production d'énergie, comme une chaudière, nous offre la possibilité de déterminer les diverses formes d'énergie entrantes, sortantes et stockées, tout en considérant les diverses pertes potentielles. Le schéma illustré ci-dessous (**Figure II-1**) permet de dépeindre le bilan thermique de la chaudière.



**Figure II- 1:** Bilan thermique de la chaudière.

La méthode de calcul est basée sur une estimation des pertes énergétiques existantes.

La formule de calcul du rendement indirect est la suivante :

$$\eta = 100 - \sum \text{Pertés} \dots\dots (\text{II.3})$$

Les pertes énergétiques dans une chaudière sont principalement :

Les pertes par cheminées (fumées) ( $P_c$ ).

Les pertes par purges ( $P_{pu}$ ).

Les pertes par parois ( $P_{pa}$ ).

### II-3-2-1 Calcul de Pertés par cheminées

Le calcul de rendement de combustion ( $\eta_{comb}$ ) par la formule de **seigert (EqII.4)** est nécessaire pour la détermination des pertés par cheminées.

$$\eta_{comb} = 100 - f * ((T_{fumées} - T_{amb}) / \%CO_2) \dots\dots (\text{II.4})$$

$\eta_{comb}$  : rendement de combustion (%) ;

$T_{fumées}$  : température des fumées (°C) ;

$T_{amb}$  : température ambiante (°C) ;

$\%CO_2$  : teneur en  $CO_2$  de fumées ;

f : facteur dépendant principalement du type de combustible (f=0,47 pour gaz naturel).

Une autre méthode de calcul du rendement du combustion est fournie par l'équation ci-dessous :

$$\eta_{comb} = (P_a - P_c) / P_a \dots\dots (\text{II.5})$$

$P_c$  : pertes par cheminées (KJ/hr) ;

$P_a$  : la puissance contenue dans le combustible et correspond à la multiplication entre le débit de gaz et le pouvoir calorifique inférieur ou supérieur (KJ/hr).

$$P_a = D_g * PCI \text{ ou PCS} \dots\dots (II.6)$$

PCS : pouvoir calorifique supérieur (KJ/Kg).

PCI : pouvoir calorifique inférieur (KJ/Kg) ;

L'évaluation du rendement de combustion ( $\eta_{comb}$ ) sert à déterminer les pertes à travers les cheminées :

$$P_c = P_a - [\eta_{comb} * P_a] \dots\dots (II.7)$$

### II-3-2-2 Pertes par purges

Après une certaine période d'utilisation de la chaudière, il existe un risque que l'eau de la chaudière soit saturée de sel.

Pour éviter la saturation en sel de la chaudière, le fabricant prévoit un système d'évacuation des eaux usées. Il existe deux types de purge d'eau de chaudière :

- Chaudières à purge manuelle discontinue

Pour les chaudières à purge manuelle discontinue, il faut prévoir une vidange régulière de la chaudière ; la fréquence de cette opération de purge doit être choisie de manière à ne pas atteindre la saturation en sel.

- chaudières à purges continue

Pour les chaudières à purge continue, la vanne de purge doit être réglée de manière à ce que la concentration de l'eau de purge soit proche de la saturation. (11)

Les pertes pendant le processus de purge sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$P_{pu} = D * h \dots\dots (II.8)$$

$P_{pu}$  : pertes par les purges (KJ/hr) ;

D : débit d'eau des purges (Kg/hr) ;

h : chaleur contenue dans l'eau des purges (KJ/Kg).

### II-3-2-3 Pertes par parois

Cette perte provient de l'échange de chaleur convectif et radiant entre la surface extérieure de la chaudière et l'environnement. Nous citerons deux méthodes de calcul de ces pertes, dont la première est la plus précise car elle est basée sur des corrélations de transfert de chaleur.

#### II-3-2-3-a Première méthode

Cette méthode détaille les deux types de transfert de chaleur, convectif et par rayonnement.

- Echange par convection :

$$Q_{\text{parois}} = A \cdot h (T_p - T_a) \dots \dots \dots \text{(II.9)}$$

Q parois : quantité de chaleur par parois (W)

A : surface totale d'échange (m<sup>2</sup>)

T<sub>p</sub> : la température moyenne de la parois (K)

T<sub>a</sub> : la température ambiante (K)

h : coefficient d'échange convectif de la chaleur (W/m<sup>2</sup>.K)

h s'exprime par cette relation :  $h = \text{Nu} \cdot \lambda / D$

Où :

λ : conductivité thermique en (W/m. K) ;

D : le diamètre de cylindre en (m) ;

Nu : le nombre de Nusselt sans unités défini par :  $\text{Nu} = C \cdot \text{Ra}^n$

Où :

Ra : nombre de Rayleigh  $\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$

Pr : nombre de Prandtl

Gr : nombre de Grashof qui calcul par :  $\text{Gr} = g \cdot \beta \cdot (T_p - T_{\text{amb}}) \cdot D^3 / \nu^2$

g : la pesanteur qui égale 10 m/s<sup>2</sup>

β : un coefficient qui égal à l'inverse de la température moyenne T<sub>m</sub> en K<sup>-1</sup>

- Echange par rayonnement :

Chaque objet dans la nature possède une énergie interne et rayonne de la chaleur par rayonnement selon la loi suivante :

$$Q_{\text{ray}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{\text{pa}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \dots \dots \dots \text{(II.10)}$$

$Q_{\text{ray}}$  : quantité de chaleur par rayonnement (W) ;

$\varepsilon$  : émissivité thermique dépendant de la température ;

$\sigma$  : constante de Stephan – Boltzmann égal à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  ;

$S$  : surface de rayonnement ( $\text{m}^2$ ) ;

$T_a$  : température ambiante (K) ;

$T_{\text{pa}}$  : température de paroi (K).

### II-3-2-3-b Deuxième méthode

Pour déterminer la perte d'énergie à l'aide de cette méthode, nous avons utilisé une autre méthode de calcul, basée sur la formule suivante :

$$P_{\text{pa}} = 100 - \eta = 100 - \sum (P_c + P_{\text{pu}} + \eta) \dots\dots \text{(II.11)}$$

$P_a$  : pertes par parois (%) ;

$P_{\text{pu}}$  : pertes par purges (%) ;

### II-4 Calculs du rendement et les pertes énergétiques

Il est nécessaire de calculer l'efficacité et les pertes d'énergie en utilisant différents paramètres de fonctionnement de la chaudière ABB, différentes compositions du combustible et de son PCS, et une analyse des gaz de combustion comme indiqué ci- dessous :

- La température de la vapeur surchauffée est de  $441^\circ\text{C}$  et la pression est de 62 bar ;
- La température de l'eau d'alimentation est de  $108^\circ\text{C}$  ;

Les valeurs mesurées des différents débits des chaudières (A, B) lors de notre séjour (du 1er février au 28 février 2025) sont regroupées dans le **tableau II-1**.

**Tableau II- 1:** Consommation de fuel gaz, d'eau et la production de vapeur aux chaudières A,B

	<b>Débit d'eau (m<sup>3</sup>/hr)</b>	<b>Débit de fuel gaz (Nm<sup>3</sup>/hr)</b>	<b>Débit de vapeur (Kg/hr)</b>
Chaudière A	6786	687000	6385000
Chaudière B	6401	607230	5829000

#### II-4-1 Type et composition de combustible

Le combustible alimente les chaudières ABB étudiées est fuel gaz. La composition et le pouvoir calorifique (PCS) sont regroupées dans le tableau II-2

**Tableau II- 2:** Composition de fuel gaz et son pouvoir calorifique.

<b>Composition</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>iC<sub>4</sub></b>	<b>He</b>	<b>PCS (KJ/h)</b>
Moyenne %	26.202	67.257	5.24	0.952	0.044	0.181	8550.6

#### II-4-2 Composition et température des fumées

Les pourcentages sont illustrés dans le tableau II- 3 suivant :

**Tableau II- 3 :** Résultats des analyses des fumées pour les deux chaudières (Février 2025).

<b>Chaudière</b>	<b>T° (C°)</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>NO (ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (ppm)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>
770 UA	205	1	50	0	44	12.8	7.9
770 UB	215	0	44	0	36	15.9	8.65

### II-4-3 Calcul de rendement énergétique :

#### II-4-3-1 Détermination des enthalpies

- ✓ L'enthalpie de l'eau d'alimentation de la chaudière à 108°C :

$$108^{\circ}\text{C} \rightarrow 452,67\text{KJ/Kg}$$

- ✓ L'enthalpie de vapeur à 441°C et 62 bar :

$$441^{\circ}\text{C et 62 bar} \rightarrow 3268,98\text{KJ/Kg}$$

Les résultats du calcul des performances énergétiques des deux chaudières via la méthode directe (Eq II.2) sont rassemblés dans le **tableau II-4**.

**Tableau II- 4:** Résultat de calculs des rendements pour les deux chaudières.

Chaudières	A	B
Rendement (%)	73.23	75.63

#### Interprétation

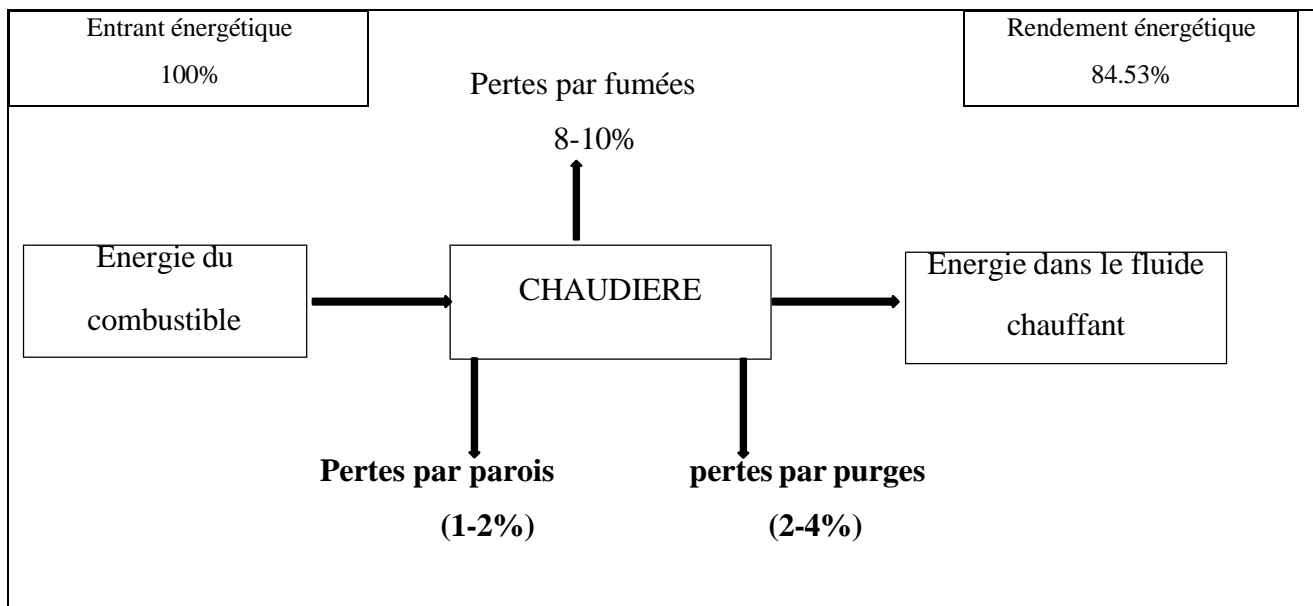
Les résultats du **tableau II-4** nous donnent un aperçu sur la dégradation de l'énergie de façon globale dans les deux chaudières

En effet, nous constatons que les rendements énergétiques calculés sont inférieurs au rendement énergétique préconisé par le constructeur qui est de 84.53%.

Le rendement a baissé d'environ 10% pour les deux chaudières A et B.

#### II-4-4 Calcul des pertes

Les pertes correspondent à l'écart entre la totalité de la chaleur émise par la combustion et la quantité de chaleur réellement transmise à l'eau en vapeur. Elles présentent des caractéristiques et des importances variées. Le schéma de la figure suivante présente les pourcentages des diverses pertes énergétiques potentielles dans les chaudières ABB, tels que fournis par le fabricant



**Figure II- 2:** Bilan thermique typique d'une chaudière ABB.

#### II-4-4-1 Pertes par cheminées

Afin de quantifier ces pertes, il était essentiel d'évaluer le rendement de la combustion en utilisant la formule de Seigert (**Eq II.4**), ainsi que les puissances intégrées dans le combustible (**Eq II.6**). Le **tableau II-5** résume les résultats obtenus.

**Tableau II- 5:** Résultats de calculs des pertes par cheminées pour les deux chaudières.

Chaudières	A	B
$\eta_{\text{comb}}$ (%)	89.29	89.68
$P_a * 10^{-10}$ (KJ/Kg)	2.45	2.17
$P_c * 10^{-9}$ (KJ/hr)	2.62	2.24
$P_c$ (%)	10.69	10.32

#### II-4-4-2 Pertes par purge

Dans le complexe GL2/Z les purges d'eau se font en continu.

Pour calculer ces pertes il est nécessaire de :

- Calculer la chaleur latente de l'eau de purge
- Faire un bilan de matière pour estimer le débit de purge

#### II-4-4-2-a Détermination de l'enthalpie de l'eau des purges

- En utilisant un thermomètre, nous avons déterminé la température de l'eau de purge sur le site. Nous avons observé que les températures des chaudières A et B étaient respectivement de 80°C et 60°C.
- On consulte le tableau thermodynamique de l'enthalpie pour établir les enthalpies de l'eau des purges.

➤ Pour la chaudière A :

$$80^{\circ}\text{C} \rightarrow 2643 \text{ KJ/Kg (Annex 1)}$$

$$h_{\text{puA}} = 2643 \text{ KJ/Kg}$$

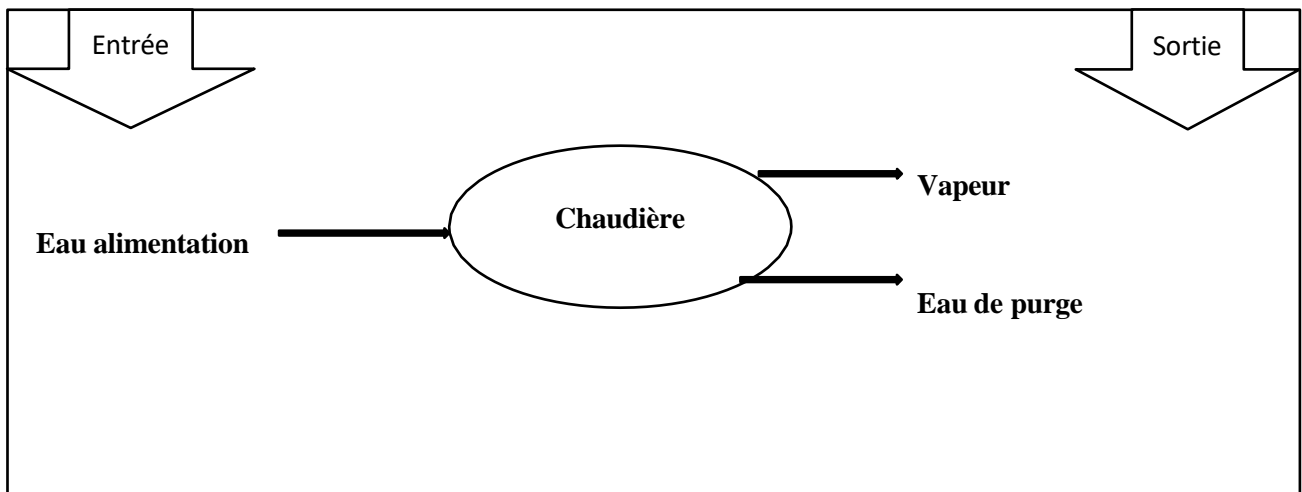
➤ Pour la chaudière B :

$$60^{\circ}\text{C} \rightarrow 2609 \text{ KJ/Kg (Annex 1)}$$

$$h_{\text{puB}} = 2609 \text{ KJ/Kg}$$

#### II-4-4-2-b Calcul de débit des purges

Le schéma ci-dessous illustre le bilan de matière de la chaudière, qui sert à déterminer les débits d'eau de purges :



**Figure II- 3:** Bilan de matière d'une chaudière.

$$D_{\text{alimentation}} = D_{\text{vapeur}} + D_{\text{purge}}$$

$$D_{\text{purge}} = D_{\text{alimentation}} - D_{\text{vapeur}}$$

La formule (Eq II.8) est utilisée pour estimer les pertes par purges des chaudières A et B.

Tous les calculs sont ensuite compilés dans le **tableau II-6**.

**Tableau II- 6:** Résultats de calcul de débit d'eau de purge et ces pertes.

<b>Chaudières</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Débit de l'eau des purges (KJ/hr)	401000	572000
Pertes par purges (KJ/hr)	1.50	1.06
Pertes par purges (%)	6.12	5.12

#### **II-4-4-3 Pertes par parois**

Ces pertes sont dues aux surfaces externes d'une chaudière en fonctionnement. Nous avons effectué les calculs en utilisant **Eq II.11**. Le **tableau II-7** présente les résultats de calcul.

**Tableau II- 7:** Résultats de calcul des pertes par parois pour les deux chaudières.

<b>Chaudières</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Pertes par parois (%)	9.96	8.93

#### **Interprétation**

Nous observons que les pertes par parois mesurées dans les chaudières A et B sont considérablement plus élevées comparativement aux valeurs fournies par le fabricant [1-2%].

#### **II-5 Etude d'économie d'énergie pour les chaudières**

Pour optimiser l'efficacité d'une chaudière, il est nécessaire de réduire les pertes. L'étude des causes du problème permettra d'améliorer les rendements, de réduire ainsi la consommation de combustible et de se conformer aux normes relatives aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

### II-5-1 Pertes par fumées et Contrôle de l'excès d'air

Dans la cheminée, la quantité d'air entrant dans le foyer a un effet sur la quantité de chaleur dissipée par le foyer. Nous avons pris des résultats de l'effet de l'excès d'air qui entre dans la chaudière, les résultats sont mentionnés dans le **tableau II-8**.

**Tableau II- 8:** Test de l'effet de l'excès d'air sur la température de la cheminée de deux chaudières (A, B).

	<b>Excès d'air (%)</b>	<b>Température de la cheminée (°C)</b>
Chaudière A	8.78	268.4
	8.43	267
Chaudière B	3.84	144
	3.35	143

#### Interprétation

Les conclusions de ces tests indiquent que la diminution de l'excès d'air entraîne une baisse significative des températures des fumées. Ceci peut être attribué à la réduction d'une portion de l'énergie présente dans le carburant utilisé pour élever la température de l'air ambiant jusqu'à celle des produits de combustion, et plus cette dernière se réduit, moins on dissipe d'énergie par la cheminée.

Ainsi, plus on diminue l'apport d'air, plus on économise de combustible, réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et allonge la durée de vie de la chaudière. Étant donné que la plupart de la chaleur est perdue en raison de la haute température des gaz de combustion, réduire ces températures en optimisant l'excès d'air de combustion peut entraîner des économies d'énergie considérables.

### II-5-2 Pertes par purges

Les purges sont principalement responsables des pertes, et cela provient surtout de l'eau d'alimentation des chaudières. L'eau qui alimente les chaudières ABB possède une conductivité supérieure à la valeur préconisée par le design (**Tableau II-9**). Le volume de sels dissous dans l'eau potable est attribué à un traitement inadéquat en amont, résultant de l'arrêt de la station de déminéralisation.

**Tableau II- 9:** Paramètres physico-chimiques actuelle et design de l'eau provenant des purges.

Paramètres	Design	Actuelle
PH	8.8-9.2	8.6
Conductivité ( $\Omega.S.cm^{-1}$ )	3.6	< 6

### II-5-3 Pertes par parois

Afin d'estimer les pertes substantielles par les parois des chaudières ABB, on a pris les valeurs de la température des surfaces des chaudières mesurée dans le complexe à l'aide d'un dispositif de mesure thermique à infrarouge, les résultats de mesure sont regroupés dans **le tableau II-10**.

**Tableau II- 10:** Température de parois des deux chaudières.

Chaudières	A	B
Coins 1	70 C°	86 C°
Coins 2	65 C°	79 C°
Coins 3	90 C°	65 C°
Coins 4	82 C°	79 C°

### Interprétation

D'après le guide d'utilisation des chaudières ABB, la température des surfaces de ces dernières ne doit pas excéder 60°C.

Selon les données de mesure, nous notons que la température des parois dans les deux chaudières est supérieure à 60°C. La quantité de chaleur dissipée est donc liée à la température de la surface chaude, qui est elle-même influencée par l'isolation (épaisseur, conductivité thermique...).

Afin de réduire cette perte thermique, il est nécessaire de revêtir les surfaces chaudes avec un matériau isolant offrant une résistance adéquate au passage de la chaleur.

## II-6 Conclusion

Ce travail nous a donné l'opportunité d'évaluer les chaudières ABB et de comprendre ainsi les divers types de pertes et leurs causes. Cette évaluation nous a permis d'analyser :

- Les rendements actuels des chaudières A et B (73.23% ;75,63%).
- Les différentes pertes d'énergie :
  - Les pertes par fumées s'élèvent à 10,69% pour la chaudière A et à 10,32% pour la chaudière B, dues à un taux d'excès d'air élevé.
  - Dans la chaudière A, les pertes dues aux purges s'élèvent à 6,12%, tandis que dans l'autre, elles sont de 5,12%. Ils ont été contraints d'utiliser des purges continues en raison de la mauvaise qualité de l'eau d'alimentation.
  - Les pertes par parois s'élèvent à 9,96% pour la chaudière A et à 8,93% pour la chaudière B, dues à une isolation insuffisante.

L'existence de ces pertes impacte l'efficacité des chaudières et a un effet sur l'environnement en consommant une importante quantité de combustible, ce qui génère une émission abondante de CO<sub>2</sub> responsable du réchauffement climatique.

# **CONCLUSION GENERALE**

## **Conclusion générale**

Durant notre stage, nous avons fait une étude sur les chaudières industrielles au niveau du complexe GL2/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 et calcul des différents pertes énergétique.

L'étude a conduit aux résultats suivants :

Le rendement de la chaudière dans les conditions actuelles (73.23% pour la chaudière A et 75.63% pour la chaudière B) reste inférieur au rendement exigé par le constructeur (84.53%). Cette diminution du rendement est liée au taux d'excès d'air élevé aussi la mauvaise qualité de l'eau d'alimentation, l'isolation insuffisante.

## Références bibliographiques

- [1] *Manuel de service formation GL2/Z « Soft tableau Process »*,(2010).
- [2] *Cours fours et chaudière, Master 1 Génie Chimique présenté par Dr. Mezouagh . A*,(2021).
- [3] *GNL101, Initiation au Gaz Naturel Liquéfié, SNCLavalin*,(2016).
- [4] *GL2/Z., MANUEL OPERTOIRE*
- [5] *Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda*, (2012).
- [6] *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).
- [7] *Etude d'une chaudière industrielle à haute pression et du circuit de vapeur d'eau. Houai Yousef PFE (Ingéniorat) chimie industrielle Université USTO*,(1992).
- [8] *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) .

## Annexe 1

Caractéristiques physiques de la vapeur d'eau saturée							
Température	Pression	Volume massique		Enthalpie massique		Entropie massique	
		liquide	vapeur	liquide	vapeur	liquide	vapeur
*C	bar	m3/kg	m3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K
0,01	0,006106	0,0010002	206,3	0	2501	0	9,1544
5	0,005719	0,0010001	147,2	21,05	2510	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,42	42,04	2519	0,161	8,8914
15	0,017041	0,001001	77,97	62,97	2528	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,9	2637	0,2964	8,6665
25	0,03168	0,001003	43,4	104,81	2547	0,3672	8,557
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,71	2556	0,4366	8,4523
35	0,05622	0,0010061	25,24	146,6	2565	0,5049	8,3519
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,5	2574	0,5723	8,2559
45	0,09584	0,0010099	15,28	188,4	2582	0,6384	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,04	209,3	2592	0,7038	8,0753
55	0,1574	0,0010145	9,578	230,2	2600	0,7679	7,9901
60	0,19917	0,0010171	7,678	251,1	2609	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617	0,8934	7,8297
70	0,3117	0,0010228	5,045	293	2626	0,9549	7,7544
75	0,3855	0,0010258	4,133	314	2635	1,0157	7,6815
80	0,4736	0,001029	3,408	334,9	2643	1,0753	7,6116
85	0,5781	0,0010324	2,828	355,9	2651	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	377	2659	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	398	2668	1,2502	7,4155
100	1,0131	0,0010435	1,673	419,1	2676	1,3071	7,3547
105	1,2079	0,0010474	1,419	440,2	2683	1,3132	7,2959
110	1,4326	0,0010515	1,21	461,3	2691	1,4184	7,2387
115	1,6905	0,0010559	1,036	482,5	2696	1,4733	7,1832
120	1,9654	0,0010803	0,8917	503,7	2706	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,7704	525	2713	1,5814	7,0777
130	2,7011	0,0010697	0,6683	546,3	2721	1,6354	7,0272
135	3,13	0,0010747	0,582	567,5	2727	1,6569	6,9781
140	3,614	0,0010798	0,5087	589	2734	1,7392	6,9304
145	4,155	0,0010651	0,4481	810,5	2740	1,7907	6,8839
150	4,78	0,0010906	0,3926	832,2	2746	1,8418	6,8383