



# Dédicace

*Nous avons le grand plaisir de dédier ce travail à :*

*A nos mères :*

*khayati Fatima & El moudden Awatif.*

*A nos pères :*

*Jebbouri Ahmed & Hadadi Hassan.*

*En témoignage de notre reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont consentis pour réussir notre parcours d'étude. Votre présence à notre côté nous a toujours apporté confiance et réconfort. Que Dieu vous procure longue vie, bonheur et santé.*

*A tout le personnel de LESSAFRE Maroc.*

*A toute nos familles.*

*A tous nos amis et collègues et particulièrement le plus intimes en témoignage des moments inoubliables, des sentiments purs, et des liens solides qui nous unissent.*

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Que tout le monde retrouve à travers ces quelques lignes, nos sincères sentiments et nos profondes reconnaissances.*

# Remerciements

*Élaborer ce rapport fut pour nous un honneur, le rédiger fut un plaisir.*

*Nous tenons d'abord le développement de ce rapport, à remercier nos encadrants, Monsieur SQALLI HOUSSAINI Driss, enseignant à la faculté des sciences et technique de Fès et Monsieur A. Tsouli, responsable de la chaufferie dans LESAFFRE Maroc, pour les efforts qu'ils ont déployés, les conseils fructueux qu'ils n'ont cessés de nous prodiguer avec bienveillance.*

*Nous ne pouvons pas oublier dans ces remerciements les membres du jury Mr. A. ENNADI ainsi que le professeur Mr. A. Chamat qui nous ont honorés par leur présence.*

*Nous adressons pareillement nos remerciements à tous les enseignants du Département de Génie Industriel qui ont contribué à notre formation pendant cette année.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à faciliter la tâche de notre travail, en prodiguant généralement leur aide accompagnée de sympathie et d'encouragements trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.*

*Enfin merci à tous.*

## Liste des tableaux

**Tableau 1:** Fiche de présentation de LESAFFRE Maroc.

**Tableau 2:** Composition élémentaire du fioul lourd N°2.

**Tableau 3 :** Paramètres de calcul du flux thermique du fioul.

**Tableau 4:** Paramètres de calcul du flux thermique de l'eau.

**Tableau 5:** Paramètres de calcul du flux thermique de pertes par fumée.

**Tableau 6:** Paramètres de calcul du débit de purges.

**Tableau 7:** Paramètres de calcul du flux des pertes par purges.

**Tableau 8:** Paramètres de calcul du flux des pertes par parois.

## Liste des figures

**Figure 1:** Organigramme de la société LESAFFRE-Maroc

**Figure 2:** Cellule de la levure

**Figure 3:** la mélasse

**Figure 4:** Fermenteur utilisé dans la fabrication de la levure

**Figure 5:** Les séparateurs de la levure.

**Figure 6:** filtre rotatif utilisé pour la filtration de la crème

**Figure 7:** sécheur de la levure

**Figure 8:** La chaudière à tubes de fumée

**Figure 9:** Schéma d'une chaudière à tubes d'eau

**Figure 10:** La chaudière à tubes de fumée

**Figure 11:** brûleur

**Figure 12:** principe de fonctionnement de brûleur à fioul

**Figure 13:** soupape de sécurité

**Figure 14:** cheminée de la chaudière

**Figure 15:** Pressostat de régulation

**Figure 16:** Pompe d'alimentation en eau

**Figure 17:** La vanne de purge

**Figure 18:** Principe de fonctionnement de la chaudière à tube fumée

## Sommaire

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>6</b>
<b>Chapitre 1: présentation de la société LESAFFRE Maroc .....</b>	<b>7</b>
I. Présentation de LESAFFRE :.....	8
II. Historique de LESAFFRE Maroc .....	8
III. La fiche technique .....	9
IV. Organigramme de l'entreprise.....	10
V. Description de la chaîne de production .....	10
<b>Chapitre 2 : généralité sur les chaudières à combustible et description de la chaudière de LESAFFRE Maroc.....</b>	<b>16</b>
I. Généralités et définition: .....	17
1. Définition:.....	17
2. Les chaudières à combustible :.....	17
2.1. Les chaudières à tubes de fumée.....	17
2.1.1. Présentation.....	17
2.1.2. Fonctionnement.....	17
2.2. Les chaudières à tube d'eau. ....	18
2.2.1. Présentation.....	18
2.2.2. Fonctionnement.....	18
II. Description de la chaudière à vapeur de LESAFFRE Maroc: .....	19
1. Description de l'installation de la chaudière à vapeur au sein de LESAFFRE Maroc: 19	
2. Description des composants de la chaudière à tube de fumée :.....	21
3. Fonctionnement : .....	24
<b>CHAPITRE 3: Notions fondamentales .....</b>	<b>26</b>
I. La chaleur:.....	27
1. Définition:.....	27
2. Comment calculer la chaleur? .....	27
II. Combustion: .....	28
1. Définition:.....	28
2. Combustion de fioul : .....	28
III. Pouvoir calorifique du fioul: .....	29
1. Définition:.....	29
IV. Flux thermique du fioul.....	30
V. Flux thermique de l'eau: .....	30

## Projet de fin d'étude

---

VI. Rendement : .....	30
V. Pertes par fumée: .....	30
VI. Pertes par purge: .....	31
VII. Pertes par parois : .....	32
VIII. Les pertes par les imbrulés: .....	32
<b>Chapitre 4: Bilan thermique de la chaudière à vapeur de LESAFFRE Maroc .....</b>	<b>34</b>
I. Introduction : .....	35
II. Identification des pertes .....	35
III. Calcul de bilan thermique: .....	35
1. Calcul du flux thermique du fioul: .....	35
2. Calcul du flux thermique de l'eau: .....	36
3. Calcul du rendement de la chaudière: .....	36
4. Calcul du flux de pertes au niveau de la chaudière: .....	37
IV. Interprétations des résultats et recommandations: .....	40
1. Interprétation : .....	40
2. Recommandations: .....	41
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>43</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>44</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>45</b>

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Dans son cursus universitaire, la Faculté des Sciences et Techniques de Fès assujettit ses étudiants à passer un stage Technique et pratique au sein d'une entreprise pour mettre en évidence les connaissances théoriques déjà acquises durant les années de formation. Ce stage vis essentiellement à façonner les connaissances des étudiants comme ils leurs permettent de se familiariser avec le milieu du travail.

Nous avons eu l'occasion d'effectuer notre stage à la société anonyme de l'industrie alimentaire et plus précisément la production de levure « LESAFFRE Maroc » au sein du service production, notre mission était de faire le bilan thermique de la chaudière à vapeur de la chaine de production de la société LESAFFRE Maroc.

Ce rapport est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la société LESAFFRE Maroc, ainsi qu'une description du processus de fabrication de la levure.
- Dans le deuxième chapitre nous parlerons des chaudières de façon générale; leurs description, leurs types ainsi que leurs composantes, et en particulier la chaudière étudiée « BABCOCK ».
- Dans le troisième chapitre nous parlerons des Notions fondamentaux est une mise en place des formules et moyens de calculs nécessaires pour effectuer le bilan thermique.
- Le quatrième chapitre : « Bilan thermique de la chaudière de LESAFFRE Maroc » est une étude des paramètres qui influencent le rendement de la chaudière au sein de LESAFFRE Maroc. Il sera consacré aussi aux interprétations des résultats du bilan thermique ainsi que quelques recommandations.

Puis nous terminerons par une conclusion.

---

# **CHAPITRE 1: PRÉSENTATION DE LA SOCIETE** **LESAFFRE MAROC**

---

## I. Présentation de LESAFFRE :

### 1. Présentation de LESAFFRE groupe :

La société LESAFFRE Maroc est l'une des principales filiales du groupe agroalimentaire

LESAFFRE, leader mondial en matière de production de la levure de panification. Groupe familial français indépendant, il est présent sur les cinq continents et compte plus de 7000 collaborateurs. Son siège est situé au quartier industriel SIDI BRAHIM à Fès.

L'entreprise compte, en plus du site de production à Fès, un « Baking Center » à Casablanca. Celui-ci constitue une vitrine des produits LESAFFRE, où les boulangers peuvent suivre des formations et voir des démonstrations afin de consolider leurs connaissances et améliorer leurs savoir-faire.

### 2. Gamme de produits

LESAFFRE MAROC produit :

- ✓ **LP:** Levure fraîche ou pressée appelée « Jaouda » 500g et « Rafiaa » 125g emballée avec du papier paraffiné, conservée entre 0 et 8°C, et consommée avant sa date limite d'utilisation (15 jours).
- ✓ **SPI:** Levure sèche instantanée de forme allongée, conditionnée sous azote dans un emballage complexe pour les sachets de 10g et sous vide pour les sachets de 125g et 500g sous le nom Rafiaa et Nevada, conservée à température ambiante (environ 20°C) jusqu'à 2ans avant ouverture.
- ✓ **SPH:** Levure sèche à hydrater de forme granulée arrondie, conditionnée sous vide dans un emballage complexe de 500g sous le nom Jaouda, conservée à température ambiante jusqu'à 2 ans.

LESAFFRE MAROC fabrique aussi des améliorants de panification et des correcteurs commercialisés sous les marques IBIS, MAGIMIX et BLEU afin de fabriquer un pain délicieux et de texture unique qui satisfait le consommateur.

## II. Historique de LESAFFRE Maroc

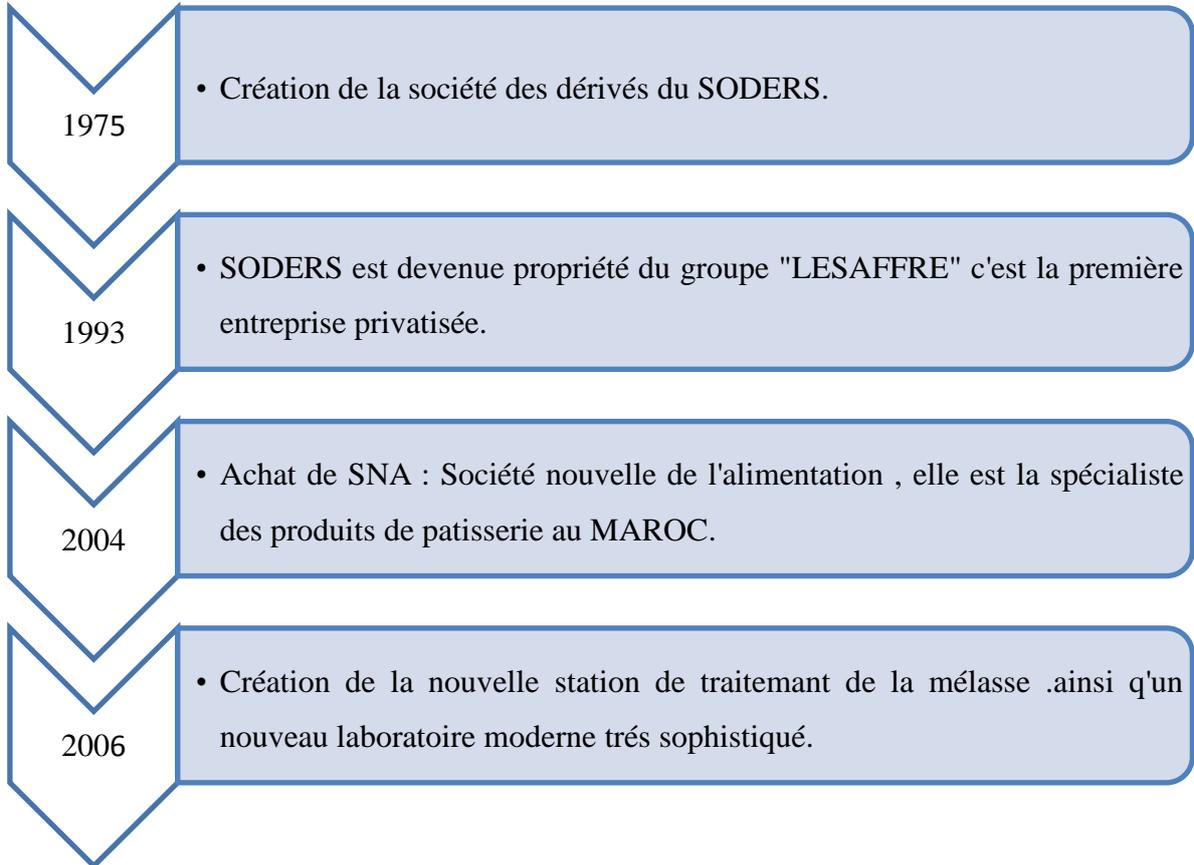
Depuis sa privatisation en 1993, la société SODERS (créée en 1975) a été majoritairement détenue par le groupe Français LESAFFRE, renommée « LESAFFRE-Maroc ». Elle représente la première entreprise privatisée du Maroc bénéficiant de l'expertise du leader mondial dans la fabrication de la levure de panification.

La société a investi 10 millions de DH par an pour augmenter sa capacité de production à 30.000 tonnes, avec un effectif de 200 personnes et un capital de 30.989.300,00 DHS, elle est subdivisée en un site de production à Fès et un BANKING CENTER à

## Projet de fin d'étude

Casablanca, ce dernier site constitue une vitrine des produits Lesaffre où les boulangers peuvent suivre des formations et des démonstrations applicables à leur métier.

### ❖ Schéma historique récapitulatif :



### III. La fiche technique :

La fiche technique qui contient les informations de la société est la suivante :

Raison sociale	LESAFFRE Maroc, Fès
Directeur général	Damien LESAFFRE.
Forme Juridique	société anonyme.
Date de création	1993.
Secteur d'activité	L'agroalimentaire.
Siège Sociale	Rue 806, BP 30 000, quartier industriel Sidi Brahim, Fès.
Tel	05 35 73 75 30.
Gamme de produits	Levures de panification, améliorants et correcteurs de farine.
Effectif	200 personnes (dont 20 cadres).
Capital social	30.989.300,00 DHS.

Tableau 2:Fiche de présentation de LESAFFRE Maroc

## IV. Organigramme de l'entreprise

La Société LESAFFRE MAROC divisée en plusieurs services dont chacun rempli des tâches bien précises et l'ensemble contribue à optimiser les conditions de production et la qualité du produit (figure 1).

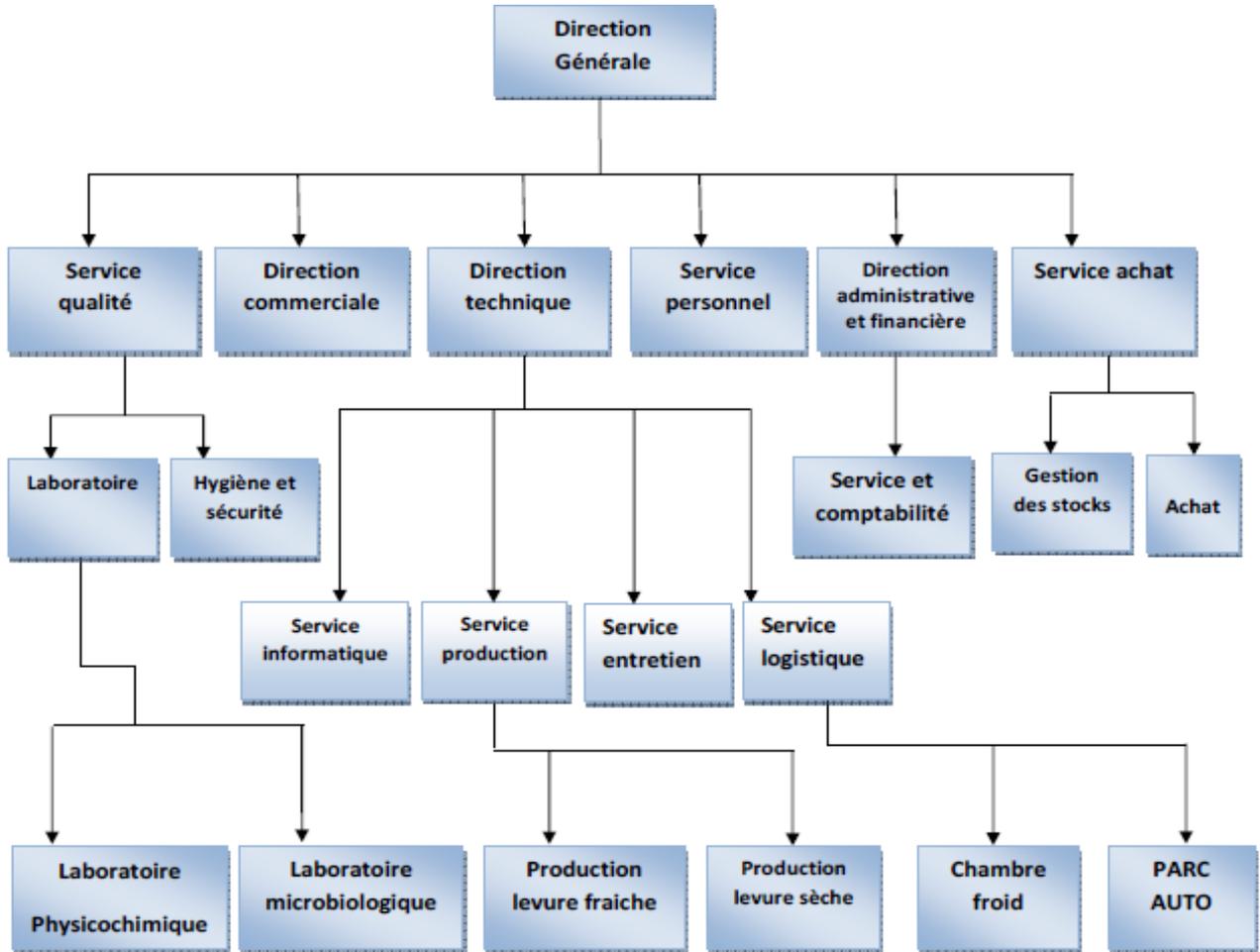


Figure 7:Organigramme de la société LESAFFRE-Maroc

## V. Description de la chaine de production

### 1. Définition de la levure

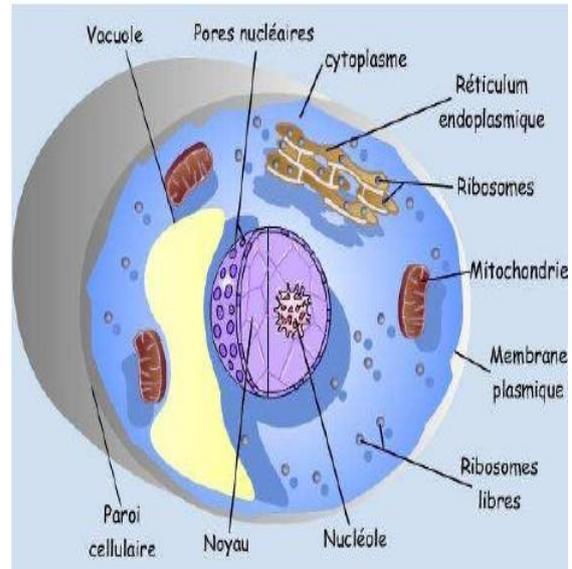
Une levure est un champignon unicellulaire « levure de Boulanger ou *Saccharomyces cerevisiae* » apte à provoquer la fermentation des Matières organiques animales ou végétales. Les levures sont employées pour la fabrication du vin, de la bière, des alcools industriels, des pates levées et d'antibiotiques.

Tout comme celles de l'homme, les cellules de levures sont vivantes et naturelles. Elles ont besoin d'air pour se multiplier, mais l'absence d'air n'est pas non plus sans conséquence sur son développement.

**La paroi cellulaire** : c'est la véritable peau de la cellule.

**La membrane cellulaire** : elle a pour rôle de réguler les échanges avec l'extérieur. Nourrir absorber, alcool et gaz carbonique rejetés. Elle veille à la bonne quantité d'eau contenue dans la cellule.

**Le cytoplasme** : partie vivante de la cellule qui contient un noyau qui est le « siège » des chromosomes de reproduction et un ou plusieurs vacuoles qui contiennent les cellules nutritives de la cellule.



**Figure 8: Cellule de la levure**

## 2. Préparation de la levure:

### 2.1. Laboratoire:

La souche pure (dans deux tubes un pour la levure fraîche et l'autre pour la levure sèche) reçue de la France. La levure est d'abordensemencée en tubes (à peu près 60 tubes) contenant les éléments nutritifs, on prend un tube par jour puis onensemence un ballon de 250 ml contenant le milieu de culture et onincube pendant 8h, la culture obtenue estensemencée dans un ballon de 7L pendant 18h puisensemencée en une cuve de 800L.

### 2.2. Pré-fermentation:

Le contenu de la cuve de 800L est versé dans un pré-fermenteur et on ajoute ces éléments avec des quantités précises :

- ✚ L'eau.
- ✚ La mélasse stérile.
- ✚ L'acide sulfurique pour l'hydrolyse du saccharose en glucose et fructose présent dans la mélasse.
- ✚ Les sels minéraux.
- ✚ Les éléments de traces (oligo-éléments et vitamines).
- ✚ L'air.

### 2.3. Traitement de la mélasse:

#### 2.3.1. Réception:

La mélasse provient de différentes sucreries de Maroc par des camions citernes, on s'assure de la bonne qualité en prenant des échantillons pour l'analyse du PH qui donne une idée sur la qualité de celle ci.

La mélasse est stockée dans des tanks qui sont équipés par des pompes qui assurent la poussé de la mélasse pour la dilution



**Figure 9: la mélasse**

#### 2.3.2. Dilution :

La mélasse brute de la canne et de la betterave se mélange dans une cuve de dilution avec de l'eau et de la vapeur pour avoir de mélasse dilué (MD), cette dernière contient environ 80% de betterave et 20% de canne.

La température dans la cuve de MD est de 70°C grâce à la vapeur d'eau injectée pour diminuer la viscosité de la mélasse et la diluer.

#### 2.3.3. Clarification :

Après la dilution, la clarification élimine les bouts et les matières solides indésirables par centrifugation. La mélasse diluée clarifiée (MDC), est stockée dans une cuve et transférée dans un échangeur mélasse/mélasse, qui augmente la température de la mélasse diluée clarifiée de 70°C à 90°C en échangeant avec une autre mélasse qui provient du stérilisateur et qui a une température de 120°C à 130°C.

#### 2.3.4. Stérilisation :

On injecte de la vapeur d'eau sous pression de 6 bars, la température de la mélasse augmente de 90°C à environ 120°C à 130°C. Après la stérilisation, la mélasse diluée clarifiée stérilisée (MDCS) est stockée dans deux cuves, ensuite elle passe dans l'échangeur mélasse/eau, qui refroidit la mélasse pour qu'elle soit utilisable pour la fermentation et pour produire de l'eau chaude à 60°C ou à 70°C.

### 2.4. Fermentation:

A la fin de la pré-fermentation on obtient un mout qui servira à ensemercer le fermenteur avec milieu nutritif (l'urée, sulfate d'ammonium et le mono ammonium phosphate : ces sels nutritifs offre pour la levure les sources d'azote et du phosphate et leurs préparations comprend seulement une dilution jusqu'à l'obtention du brix voulu) bien spécifique et après 18 à 20 heures de fermentation, on obtient la levure mère, qui va subir une séparation puis un stockage.

La levure mère obtenue va encore servir à la fermentation, par un ensemencement pour donner naissance à une levure commerciale.



**Figure 10: fermenteur utilisé dans la fabrication de la levure**

### 2.5. Séparation:

Le moût obtenu à la sortie des fermenteurs contient les cellules de levure et une solution liquide constituée à partir des restes du milieu nutritif. Des séparateurs fonctionnant par centrifugation, ils utilisent des assiettes tournantes à 5000tr/min, permettent d'obtenir un liquide dense : la crème et un liquide léger (le moût délivré qui va être évacué dans les égouts).



**Figure 11: Les séparateurs de la levure.**

### 2.6. Stockage de la crème:

La crème obtenue à l'issue de la séparation est acidifiée par l'acide sulfurique à pH=2 pour éviter la contamination, et stockée à 5°C pour ralentir le métabolisme cellulaire.

### 2.7. Filtration:

La filtration s'effectue à l'aide de trois des hydrateurs rotatoires sous vide P1, P2 et P3 contenant une couche filtrante d'amidon et munis de racleurs. La levure sous forme râpée tombe dans des trémies ou elle est mélangée avec une huile végétale rendant sa couleur plus claire.



**Figure 12: filtre rotatif utilisé pour la filtration de la crème**

### 2.8. Séchage :

Pour la levure sèche active ou SPH : A la sortie du filtre, la levure est à l'état pâteux, elle passe alors dans un mélangeur puis dans une grille percée de trous pour avoir une granulométrie bien déterminée. La levure granulée est alors récupérée dans des bols pour passer dans des séchoirs qui fonctionnent par l'envoi d'un courant d'air sec et chaud. La durée de séchage est de 4h et s'effectue à 45°C. Pour la levure sèche instantanée ou SPI : Elle est sous forme de bâtonnets, elle a une durée de séchage réduite (20 min environ pour une quantité de 1000Kg).



**Figure 7: sécheur de la levure**

### 2.9. Emballage:

Il existe 2 types d'emballages selon le type de la levure :

- ❖ **LEVURE FRAICHE:** La levure sous forme de pâte tombe dans des trémies ou elle est mélangée avec une huile végétale avant de passer dans la boudineuse. Le boudin de levure pressée est découpé en pain de 500g, qu'on enveloppe individuellement dans un papier paraffiné. Après mise en carton, la levure est conservée en chambre froide afin d'être réfrigérée avant son expédition.
- ❖ **LEVURE SECHE:** Pour la levure sèche, le gâteau provenant de la filtration sous vide est mélangé avec une quantité d'émulsifiant qui sert à conserver le produit plus longtemps et donner aussi la couleur blanche caractéristique de la levure.

### *Problématique :*

Toute entreprise opte pour minimiser les pertes afin de maximiser leurs profits puisque tout ralentissement de la production est une cause principale des pertes financière. Et même parfois elles coûtent des charges supplémentaires indésirables. LESAFFRE-Maroc dans cette situation voudrait réduire les pertes thermiques au niveau de la chaudière à vapeur ( qui a pour fonction de produire la vapeur utilisée dans le séchage de la levure, fermentation, stérilisation..) qui dépendent à la fois de la production de vapeur et de la consommation du fioul. Dans ce cadre s'intitule ce projet de fin d'études, dont nous allons analyser tous les causes responsables de l'abaissement du rendement de la chaudière. Pour ce faire nous allons calculer les pertes que subies la chaudière et proposer des solutions d'améliorations pour les réduire.

---

## **Chapitre 2 : généralité sur les chaudières à combustible et description de la chaudière de LESAFFRE Maroc**

---



## I. Généralités et définition:

### 1. Définition:

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique.

Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. La source de chaleur peut-être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon...) ou une résistance électrique [1].

Ce type de chaudière se compose de deux compartiments distincts :

- ❖ l'un dans lequel le combustible est brûlé: le foyer.
- ❖ un autre dans lequel l'eau est chauffée.

### 2. Les chaudières à combustible :

On distingue deux types de chaudière à combustible en fonction de la circulation de l'eau à chauffer par rapport à la chaleur de combustion :

- Les chaudières à tube de fumée.
- Les chaudières à tube d'eau.

#### 2.1. Les chaudières à tubes de fumée

##### 2.1.1. Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul [1].

##### 2.1.2. Fonctionnement

Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur. Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories [1].

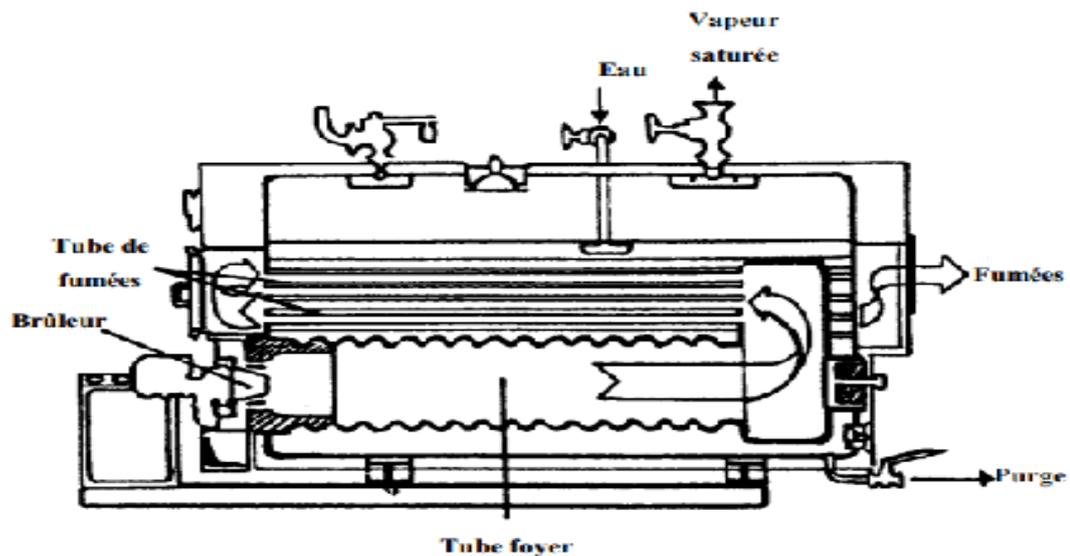


Figure 8:La chaudière à tubes de fumée

## 2.2. Les chaudières à tube d'eau.

### 2.2.1. Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets [1].

### 2.2.2. Fonctionnement

Ce type de chaudière 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 le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci 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. Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas. Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds [1].

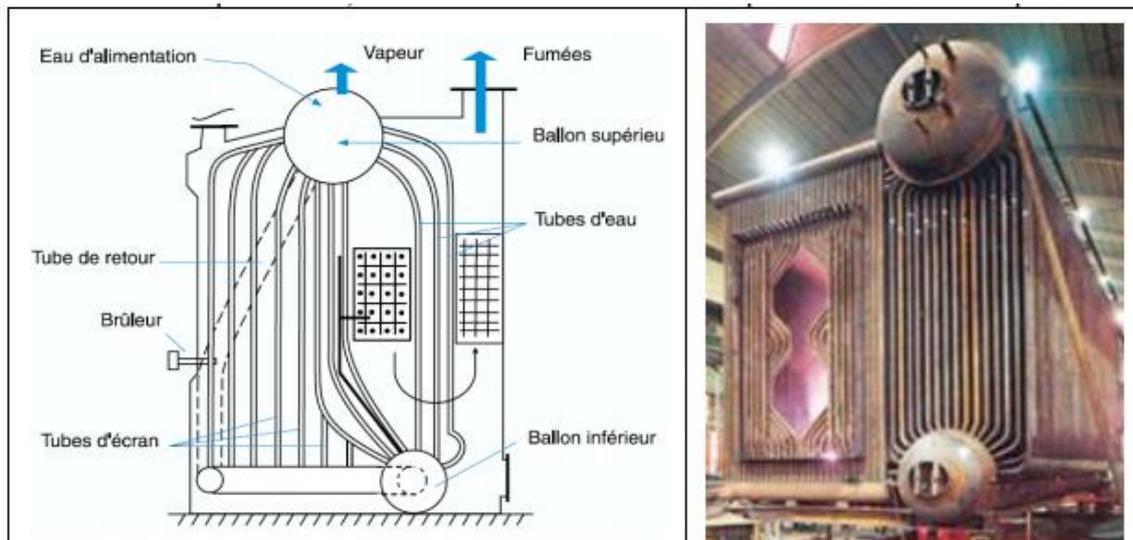


Figure 9:Schéma d'une chaudière à tubes d'eau

## II. Description de la chaudière à vapeur de LESAFFRE Maroc:

### 1. Description de l'installation de la chaudière à vapeur au sein de LESAFFRE Maroc:

L'usine est constituée de trois chaudières :

- Chaudière 1 : production maximale est 2626,83 kg/h de vapeur.
- Chaudière 2 : production maximale est 5253,66 kg/h de vapeur.
- Chaudière 3 : production maximale est 1313,41 kg/h de vapeur.
- Un bac de stockage d'eau.
- Un adoucisseur

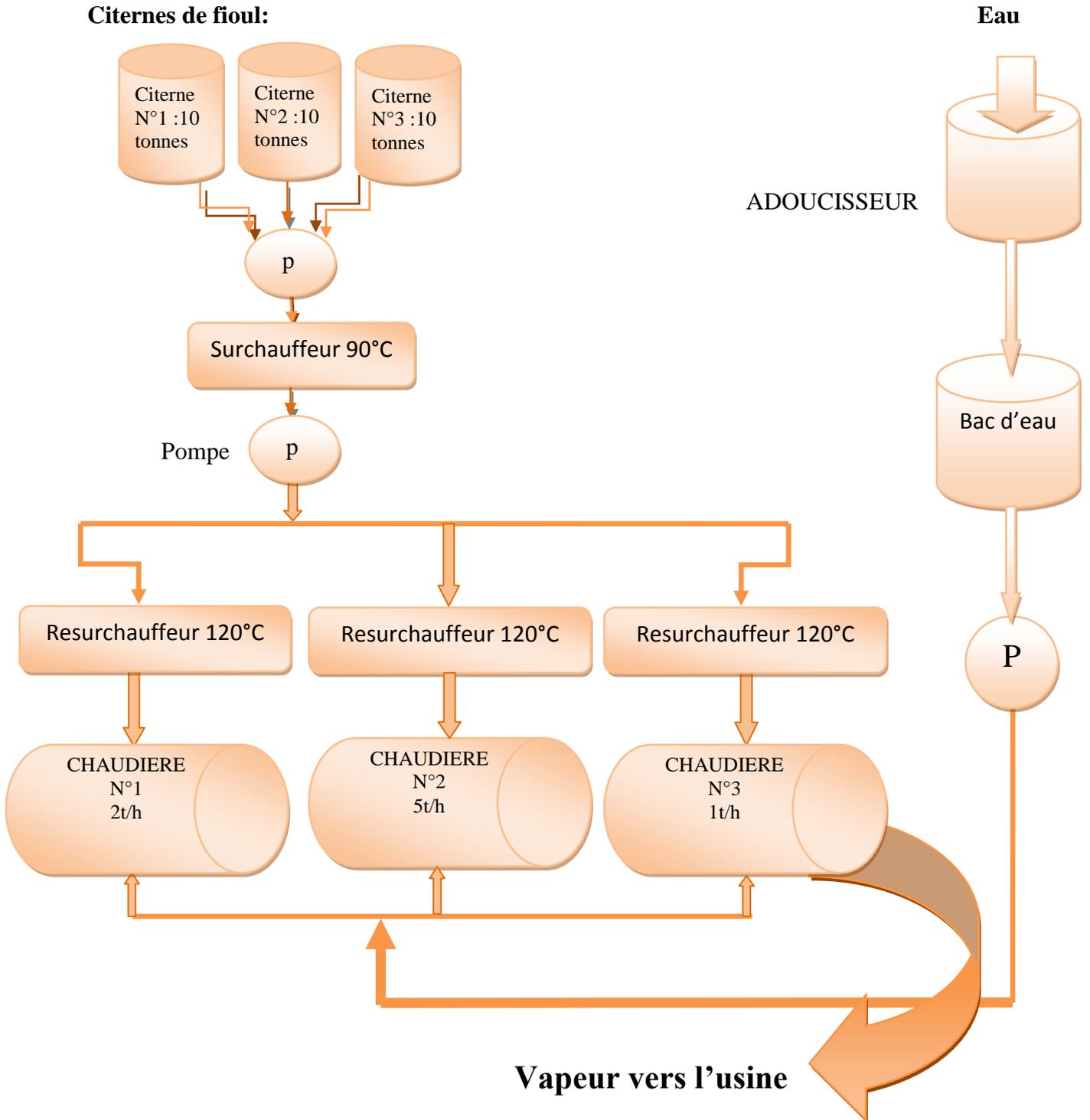
L'eau passe par un système de traitement que l'on appelle adoucisseur afin d'obtenir de l'eau déminéralisée, diluée pour éviter l'entartrage autour des tubes dans la chaudière au cours du chauffage de l'eau.

L'eau adoucie entre à la chaudière avec une température égale à 100°C due au retour condensat (retour de la vapeur non consommable vers la bac d'eau ce qui permet d'augmenter la température de l'eau d'alimentation)

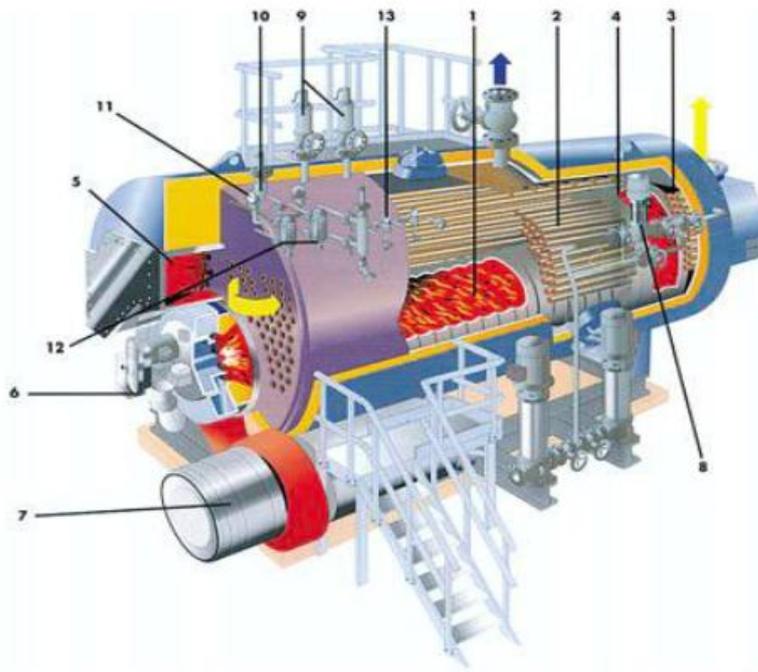
Le fioul se stocke dans des citernes indépendantes des chaudières, puis grâce au pompe à engrenage, ce fioul est aspiré des citernes de stockage et refoulé vers le brûleur, en passant par le filtre à fioul, dirigeant ensuite vers le surchauffeur et le resurchauffeur où celui-ci subit un chauffage par des résistances électriques.

**Récapitulatif:**

**Citernes de fioul:**



## 2. Description des composants de la chaudière à tube de fumée :



1. Foyer
2. Tube de fumée 2<sup>ème</sup> passe
3. Tube de fumée 3<sup>ème</sup> passe
4. Boîte arrière à refroidissement par eau
5. Chambre de combustion
6. Brûleur
7. Ventilateur de combustion
8. Vanne de régulation
9. Soupape de sécurité
10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau
11. Manomètre
12. Indicateur de niveau à glace
13. Bloc d'isolement + manomètre

**Figure 10: La chaudière à tubes de fumée [1]**

### 2.1. Le brûleur:

#### a. Définition:

Le brûleur est un élément mécanique constitué de plusieurs pièces permettant la combustion du fuel domestique au sein d'une chaudière fuel. Le brûleur chauffe le fioul provenant de la cuve avant sa diffusion dans les radiateurs.

Il a pour fonction de mélanger le combustible avec l'air et de fournir de l'énergie grâce à la combustion du mélange ainsi obtenu.



**Figure 11: brûleur**

#### b. Fonctionnement de brûleur à fioul:

Le brûleur à fioul a pour fonction de mélanger, dans des proportions correctes, l'air comburant et le fioul pour permettre la combustion. L'alimentation en air assurée par un ventilateur qui puise l'air ambiant de la chaufferie. L'alimentation en fioul est assurée par une

pompe qui puise dans le réservoir. La pompe a également pour mission de maintenir, via un régulateur, une pression suffisante au fioul pour permettre sa pulvérisation. L'électrovanne libère le combustible au moment déterminé par la programmation. Le gicleur assure la pulvérisation du fioul des milliards de gouttelettes et le réglage du débit nominal de fioul. La pulvérisation du fioul a pour objectif d'augmenter la surface de contact entre le fioul et l'air comburant. Cela permet une évaporation plus importante du fioul à sa surface et favorise son mélange avec l'air.

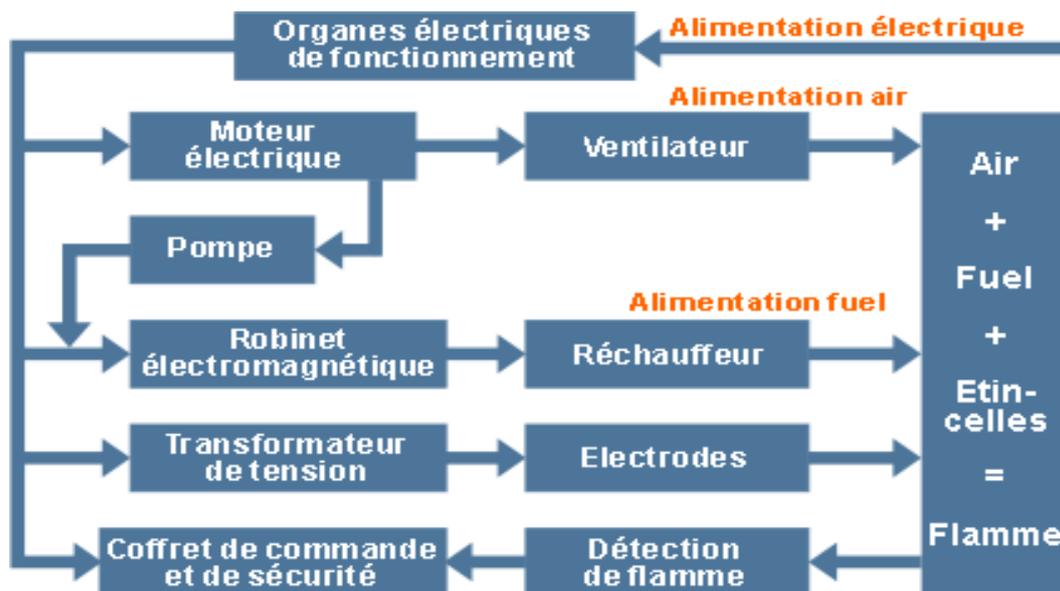


Figure 12: principe de fonctionnement de brûleur à fioul

### 2.2. Soupape de sécurité:

La soupape de sécurité est un système qui régule la pression de la chaudière afin d'empêcher une quelconque explosion. A cet effet, quand la température de la chaudière augmente de manière anormale, la soupape s'ouvre et laisse couler l'excédent d'eau (par un tuyau d'évacuation) se trouvant dans le circuit. Son rôle important, ce qui en fait un élément indispensable à tous les systèmes de chauffage



Figure 13: soupape de sécurité

### 2.3. Cheminée

La cheminée d'une chaudière permet l'évacuation de fumée vers l'extérieur de la locale chaudière. L'évacuation de fumée peut être faite par une convection naturelle provoquée par la différence de densité entre l'air et la fumée chaude.



**Figure 14:cheminée de la chaudière**

### 2.4. Pressostat de régulation:

Un pressostat à plusieurs seuils commande la marche arrêt ou allures du brûleur, Le seuil bas de pression permet de mettre en marche le brûleur de la chaudière, le seuil haut arrête le brûleur.



**Figure 13: Pressostat de régulation**

### 2.5. Indicateur de niveau de sécurité d'eau :

Il indique le niveau d'eau dans la chaudière.

### 2.6. Pompe d'alimentation en eau:

La pompe d'alimentation en eau d'une chaudière est une pompe à haute pression, sa pression doit être supérieure à la pression de travail de la chaudière.



**Figure 16:Pompe d'alimentation en eau**

### 2.7. Vanne de sortie de vapeur :

Elle est située au-dessus de la chaudière, elle permet l'évacuation de la vapeur vers les autres services.

### 2.8. La vanne de purge

La purge se fait généralement par l'ouverture complète d'une vanne connectée sur le fond de la chaudière. Cette ouverture dure souvent quelques dizaines de secondes et s'effectue plusieurs fois par jour. Le but est de créer un débit important sur un laps de temps court, afin de dégraisser le fond de la chaudière



**Figure 14: La vanne de purge**

### 2.9. Foyer de chaudière:

C'est l'espace où la combustion peut avoir lieu, le foyer de chaudière est une chambre cylindrique dans laquelle se passe la combustion du carburant. La partie frontale du foyer de chaudière qui est en face du brûleur est revêtue en brique réfractaire qui supporte l'éventuel contact du front de la flamme.

### 2.10. Tubes de fumée :

Dans les chaudières à tube de fumée la fumée circule à l'intérieur des tubes disposés dans le récipient où l'eau ou la vapeur se trouve.

## 3. Fonctionnement :

Le fioul entre dans le brûleur sous forme liquide et sort à l'état gazeux par la combustion, il pénètre ensuite dans le foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur.

Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière.

Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouché sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur. Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant par conduction la vaporisation de l'eau.

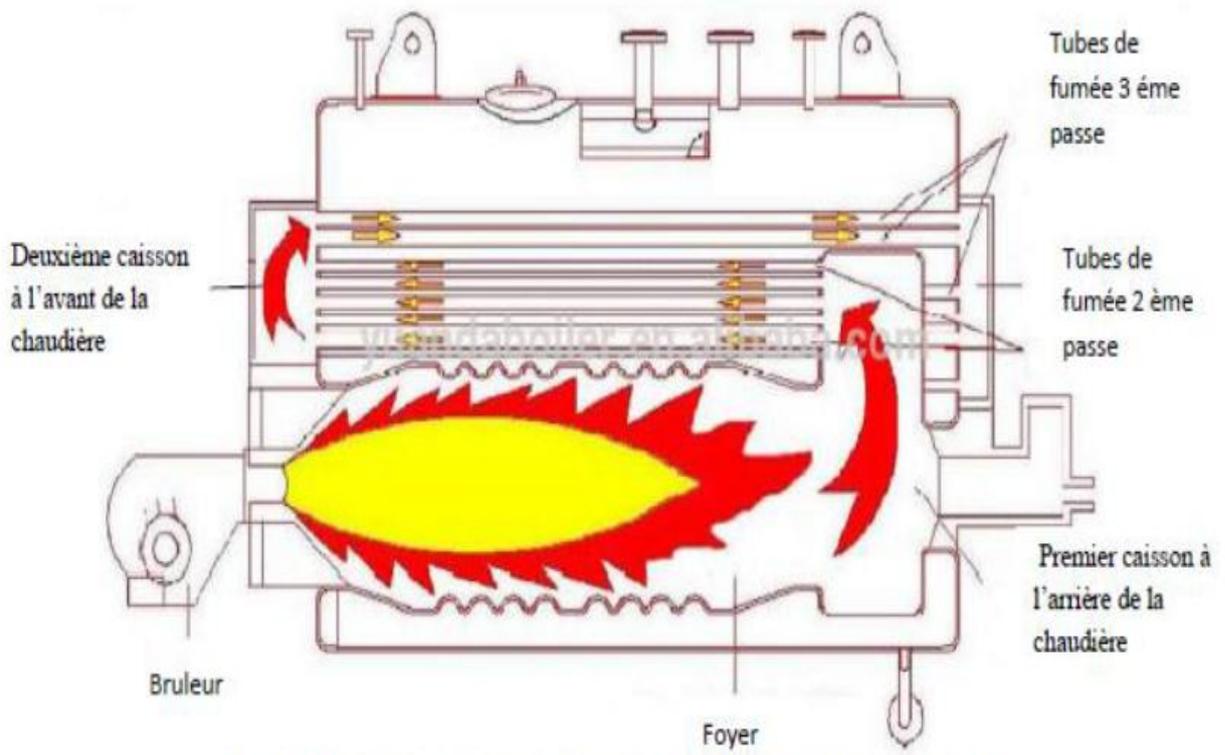


Figure 18: Principe de fonctionnement de la chaudière à tube fumée

## **CHAPITRE 3: Notions fondamentales**

---

## I. La chaleur:

### 1. Définition:

Les échanges d'énergie non réductibles à un travail s'appellent chaleur. Ce transfert d'énergie se fait sous la forme cinétique moléculaire correspondant à une agitation désordonnée.

- Lorsqu'on fournit de l'énergie thermique à un corps, on lui fournit de la chaleur. Ce qui provoque l'augmentation de sa température.
- Le transfert de l'énergie sous forme de chaleur se fait sous forme de :
  - Conduction.
  - Convection.
  - Rayonnement.

### 2. Comment calculer la chaleur?

Le transfert de chaleur peut avoir deux types d'effets sur un système, c'est deux types peuvent se succéder pour un corps pur homogène ou coexister pour un corps hétérogène. C'est deux effets sont :

- **La chaleur sensible** : la quantité de chaleur échangée, accompagnée d'un changement de température du corps, sans transition de phase physique, entre plusieurs corps formant un système isolé.

La relation utilisée est [2]:

$$Q = m.c.(T_2 - T_1)$$

Avec

**Q** : est la chaleur sensible (en w)

**m** : la Débit massique du corps en kilogrammes par seconde kg/s

**c** : chaleur massique du corps en J/ (kg. °C).

**T<sub>1</sub>** et **T<sub>2</sub>** sont les températures initiales et finales du corps (en K ou en °C.).

- **La chaleur latente** : ou l'enthalpie de changement d'état (anciennement chaleur latente de changement d'état) d'un corps pur est par définition la variation d'enthalpie qui accompagne un changement d'état du corps rapportée à la quantité de matière mise en jeu lors de cette transformation. Par exemple pour le passage de l'état liquide à l'état de vapeur on parlera d'enthalpie de vaporisation.

La relation utilisée est [2]:

$$Q' = m \cdot L$$

Avec :

$Q'$ : quantité d'énergie thermique nécessaire pour fondre une masse  $m$  (en w)

$m$  : Débit massique du corps en kilogrammes par seconde kg/s

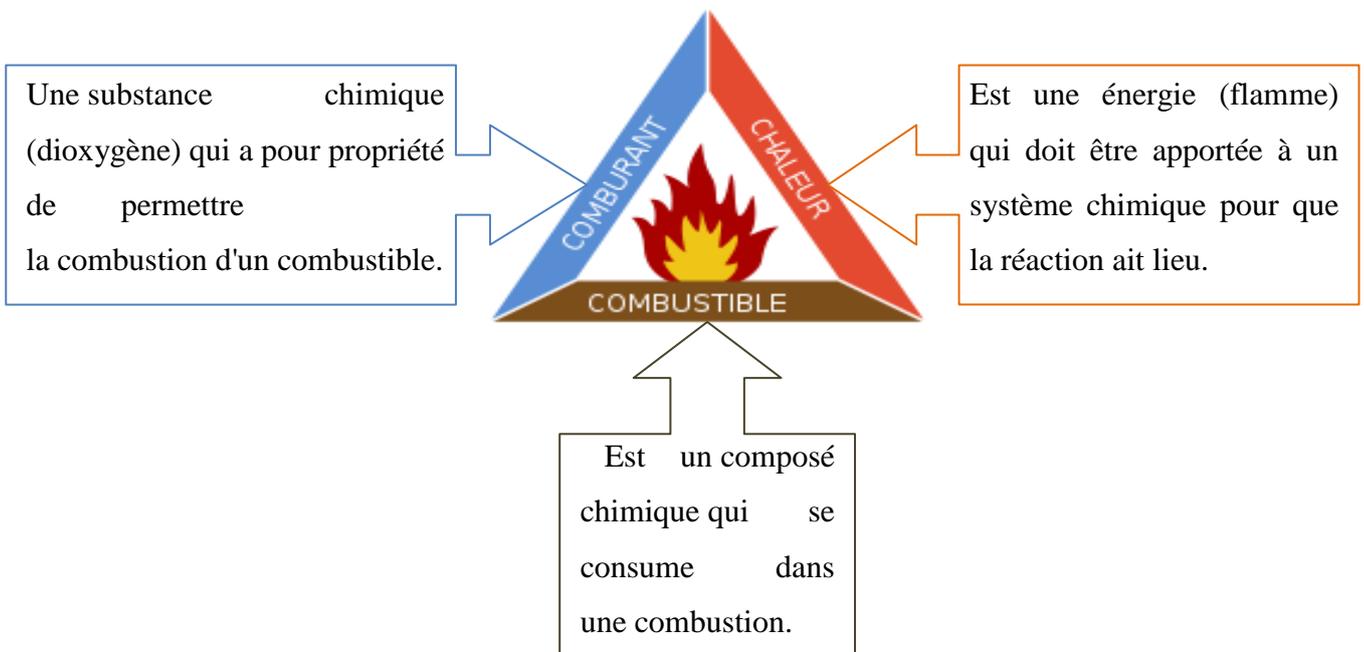
$L$  : chaleur latente de changement de phase en J/kg.

## II. Combustion:

### 1. Définition:

La **combustion** est une réaction exothermique d'oxydoréduction. Lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme ou par une explosion (déflagration, voir détonation si le front de flamme dépasse la vitesse du son). La combustion complète d'un alcane dans le dioxygène donne la réaction chimique suivante :  
 $C_nH_{(2n+2)} + (3n+1)/2O_2 \rightarrow nCO_2 + (n+1)H_2O + \text{chaleur}$ .

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi on parle du « triangle du feu ».



### 2. Combustion de fioul :

#### 2.1. Définition de fioul :

## Projet de fin d'étude

Le fioul, mazout ou fuel est un combustible dérivé du pétrole, utilisé notamment dans les chaudières. Il est classé dans les ressources énergétiques fossiles et contribue à la pollution de l'air.

### 2.2. Combustion de fioul :

Le fioul lourd est de  $C_{26}$  à  $C_{36}$  donc :



Ou,



### 2.3. Composition chimique du fuel N°2

Le fioul N°2 (Basse Teneur en Soufre : inférieure ou égale à 2 %) provient de la distillation du pétrole brut. Les proportions de carbone et d'hydrogène dans les fiouls varient très peu, la valeur moyenne des composantes du fioul utilisé au Maroc est donnée dans le tableau suivant [5] :

Composants	Pourcentage (%)
Carbone	86.3
Hydrogène	10.7
Soufre	2.6
Oxygène	0.3
Azote	0.1

Tableau 2: Composition élémentaire du fioul lourd N°2

## III. Pouvoir calorifique du fioul:

### 1. Définition:

Le pouvoir calorifique du fioul est la chaleur que peut dégager la combustion complète d'une unité de combustible. Dans le milieu scientifique, on l'exprime souvent en kJ/kg. Néanmoins, suivant le domaine d'application, on peut l'exprimer dans d'autres unités plus pratiques, par exemple, en kWh/m<sup>3</sup> pour le gaz ou kWh/litre pour le fuel.

Pour le fioul N° 2

$$\text{PCI} = 11.16 \text{ kWh/kg [6]}$$

$$\text{PCI} = 9600 \text{ kcal/kg [7]}$$

### IV. Flux thermique du fioul

C'est le flux généré par la combustion du combustible.

Pour la calculer on utilise la relation suivante [2]:

$$\Phi_{\text{fioul}} = D_c \cdot \text{PCI}$$

Avec

$\Phi_{\text{fioul}}$  : le flux thermique du fioul.

$D_c$  : le débit du fioul en kg/h.

$\text{PCI}$  : le pouvoir calorifique inférieur du fioul en kcal/kg.

### V. Flux thermique de l'eau:

C'est le flux thermique absorbé par l'eau à la sortie de la chaudière.

Pour la calculer on utilise la relation suivante :

$$\Phi_{\text{eau}} = Q + Q'$$

Avec,

$\Phi_{\text{eau}}$  : flux thermique de l'eau.

$Q$  : la chaleur sensible en (kcal).

$Q'$  : quantité d'énergie thermique nécessaire pour fondre une masse  $m$  en (kcal).

### VI. Rendement :

Le rendement désigne le rapport entre l'efficacité énergétique réelle d'une machine thermique et son efficacité théorique maximale.

Pour le calculer on utilise la relation suivante [2]:

$$R = \frac{\text{flux thermique de l'eau}}{\text{flux thermique du fioul}}$$

### V. Pertes par fumée:

Les pertes par fumée représentent la chaleur dans les gaz de combustion qui est perdue dans l'atmosphère à l'entrée de la cheminée. Les pertes par fumée dépendent de la composition du combustible, des conditions d'alimentation et de la température des gaz de carneau. Il existe deux types de pertes : les pertes de gaz de carneau - l'énergie thermique (sensible) dans les gaz de carneau en raison de la température des gaz de carneau; et les pertes

de gaz de carneau attribuables à l'humidité - l'énergie (latente) dans la vapeur dans le flux de gaz de carneau attribuable à l'eau produite par la réaction de combustion qui est pulvérisée en raison de la température élevée des gaz de carneau.

Pour calculer ces pertes on utilise la relation suivante qui se base sur les températures et la teneur de CO<sub>2</sub> [3]:

$$\phi_{\text{fumée}}(\%) = \frac{k * (T_{\text{fumée}} - T_a)}{\alpha(\text{CO}_2)}$$

Avec :

$\Phi_{\text{fumée}}$  : le flux de pertes par fumée en %.

**K** : le coefficient de Sierget, varie avec la nature du combustible, est un nombre adimensionnel.

$T_{\text{fumée}}$  : la température de la fumée en °C.

$T_a$  : la température de l'air ambiant en °C.

$\alpha(\text{CO}_2)$  : la teneur de CO<sub>2</sub> dans la fumée en %.

### VI. Pertes par purge:

La purge continue est une opération contribuant à maintenir la qualité de l'eau (concentration de sels inférieurs au seuil de saturation) dans la chaudière, c'est un paramètre essentiel pour le bon fonctionnement de l'installation. Elle consiste à laisser sortir le calcaire accumulé à l'intérieur de la chaudière après une certaine fréquence (dépend de la qualité de traitement de l'eau).

Pour calculer ces pertes on utilise la relation suivante [4]:

$$\phi_{\text{purge}}(\%) = \frac{D_{\text{purge}} * \Delta H_{\text{purge}}}{D_{\text{fioul}} * PCI} * 100$$

Avec:

$\Phi_{\text{purge}}$  : le flux de pertes par purge en %.

$D_{\text{purge}}$  : le débit massique de purge de la chaudière en kg/h.

$\Delta H_{\text{purge}}$  : la variation de l'enthalpie spécifique de l'eau à la température des purges en kcal/kg.

$D_{\text{fioul}}$  : le débit du fioul en kg/h.

**PCI** : le pouvoir calorifique inférieur du fioul en kcal/kg.

Et [4] :

$$D_{\text{purge}} = \frac{D_{\text{vapeur}} * K_a}{K_a + K_p}$$

Avec :

**D<sub>purge</sub>** : le débit massique de purge de la chaudière en kg/h.

**D<sub>vapeur</sub>** : le débit massique de vapeur produite par la chaudière kg/h.

**K<sub>a</sub>** : la conductivité d'eau d'alimentation de la chaudière en  $\mu\text{s/cm}$ .

**K<sub>p</sub>** : la conductivité d'eau de purge en  $\mu\text{s/cm}$ .

### VII. Pertes par parois :

Elles représentent la chaleur perdue en chaleur ambiante provenant des surfaces chaudes d'une chaudière ou d'un générateur d'eau surchauffée. Ce type de pertes dépend surtout de la dimension de l'équipement (par exemple le pourcentage des pertes des petites chaudières est proportionnellement plus élevé que celui des grandes chaudières), aussi de type de l'isolation utilisée , et de la puissance réelle relative à la puissance maximale de conception.

Pour les calculer on utilise la relation suivante [8]:

$$\phi_{\text{parois}}(\%) = \frac{P_{\text{nominale}}}{P_{\text{actuelle}}} * e$$

Avec :

**Φ<sub>parois</sub>** : le flux de pertes par parois en %.

**P<sub>nominale</sub>** : Charge maximale moyenne de la chaudière en kg/h.

**P<sub>actuelle</sub>** : charge moyenne avec laquelle fonctionne la chaudière en kg/h.

**e** : coefficient d'écran, est un nombre adimensionnel.

### VIII. Les pertes par les imbrulés:

Un imbrulé est un résidu émis par un dispositif de combustion (four, chaudière, moteur thermique, etc.). Les imbrulés participent à la pollution de l'air.

Dans le cas des chaudières, les imbrulés typiques sont des particules solides ou des suies, résidus par exemple de charbon ou autres combustibles comme le bois, d'hydrocarbures "imbrulés" liquides ou gazeux pour des combustibles liquides (fioul, essence, etc.).

Le mauvais mélange combustible-comburant, L'insuffisance d'air de combustion, l'excès d'air de combustion abaissent la température de la flamme, le dimensionnement

## Projet de fin d'étude

---

inadapté du foyer à la charge calorifique, sont les principales causes de la production d'imbrûlés.

Pour la calculer on utilise la relation suivante:

$$\phi_{imbrulés}(\%) = 100 - R - \phi_{fumée}(\%) - \phi_{purge}(\%) - \phi_{parois}(\%)$$

---

## **Chapitre 4: Bilan thermique de la chaudière à vapeur de LESAFFRE Maroc**

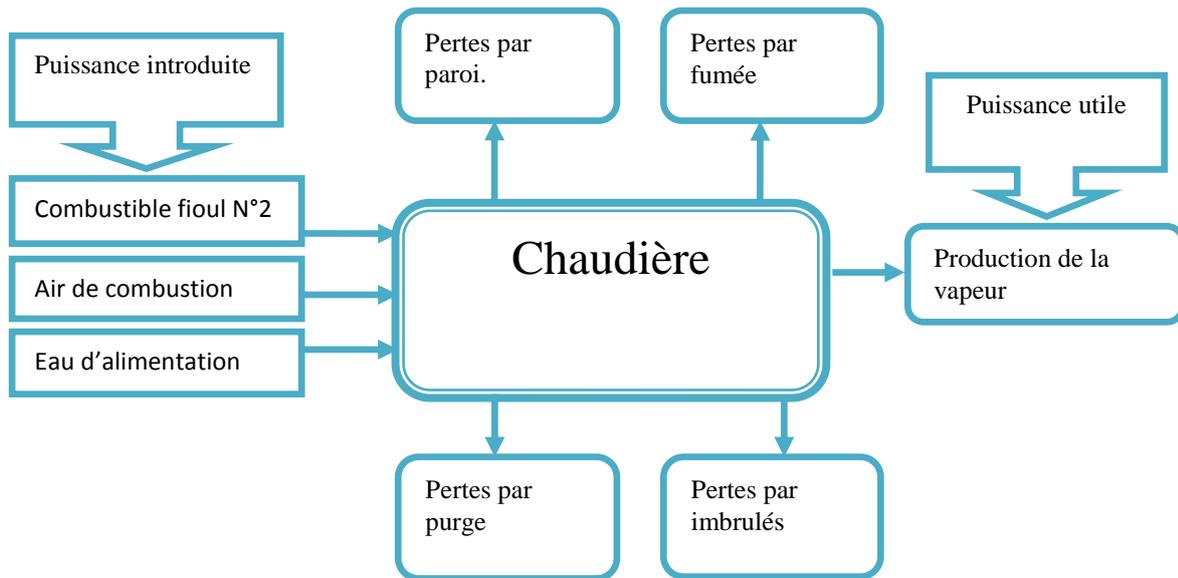
---

## I. Introduction :

La chaudière à vapeur subit des différentes pertes, puisque ce qu'on dépense de fioul n'est pas nécessairement équivalent à ce qu'on reçoit de vapeur.

## II. Identification des pertes

Le bilan énergétique d'une chaudière peut être schématisé comme suit :



Bilan d'énergie du système chaudière

## III. Calcul de bilan thermique:

### 1. Calcul du flux thermique du fioul:

On a la relation suivante:

$$\Phi_{\text{fioul}} = D_c \cdot \text{PCI}$$

$\Phi_{\text{fioul}}$ : le flux thermique du fioul.	
$D_c$ : Le débit de combustible	180,16Kg/h.(Annexe 2)
PCI : Pouvoir Calorifique du combustible.	9600 Kcal/Kg. [7]

**Tableau 3:Paramètres de calcul du flux thermique du fioul**

**A.N :**  $\Phi_{\text{fioul}}=180,16 * 9600$

$$\Phi_{\text{fioul}} = 1729536\text{Kcal/h.}$$

## 2. Calcul du flux thermique de l'eau:

La chaleur produite par le fioul se traduit en énergie absorbé par l'eau (entrant à la chaudière à 100 °C) qui se transforme de l'état liquide à l'état gazeux à la température 168 °C.

$$\Phi_{\text{eau}} = Q + Q'$$

$$\Phi_{\text{eau}} = m \cdot c \cdot (T_f - T_i) + m \cdot L$$

Avec

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_f - T_i)$  : le flux thermique de la chaleur sensible.

$Q' = m \cdot L$ : le flux thermique de la chaleur latente.

$\Phi_{\text{eau}}$ : le flux thermique de l'eau en J	
L : la chaleur latente à 6, 5bars.	495 ,54 kcal/kg ( <b>Annexe 1</b> )
m : Débit massique de l'eau.	2626,83 Kg /h.( <b>Annexe 2</b> )
c : chaleur massique de l'eau.	1 kcal/°C.kg.[2]
$T_f$ : la température finale de la vapeur .	174°C
$T_i$ : la température initiale de l'eau.	100°C.

**Tableau 4: Paramètres de calcul du flux thermique de l'eau**

A.N.

$$\Phi_{\text{eau}} = 1496084,75 \text{ kcal/h.}$$

## 3. Calcul du rendement de la chaudière:

On utilise la relation suivante :

$$R = \frac{\Phi_{\text{eau}}}{\Phi_{\text{fioul}}}$$

A.N.

$$R = \frac{1496084,75}{1729536}$$

$$R=86,5\%$$

#### 4. Calcul du flux de pertes au niveau de la chaudière:

Les différentes pertes évaluées :

- ✚ Pertes par les fumées.
- ✚ Pertes par les imbrulés.
- ✚ Pertes par les purges.
- ✚ Pertes par les parois.

##### 4.1. Calcul du flux de pertes par fumées:

On utilise la relation suivante :

$$\phi_{fumée}(\%) = \frac{k * (T_{fumée} - T_a)}{\alpha(CO_2)}$$

$\phi_{fumée}(\%)$ : Le flux de pertes par fumée en %.	
K : Le coefficient de sierget.	0,56 [3]
T <sub>fumée</sub> : température de fumée.	182°C
T <sub>a</sub> : La température ambiante.	20 °C
$\alpha(CO_2)$ : La teneur de CO2 dans la fumée.	11 ,2 % [8]

**Tableau 5:Paramètres de calcul du flux thermique de pertes par fumée**

A.N.  $\phi_{fumée}(\%) = 8,1\%$

Par conséquent le flux de chaleur perdu par la fumée est le suivant:

$$\phi_{fumée} = 1729536 * 0,081$$

$$\phi_{fumée} = 140092,416 \text{Kcal/h.}$$

##### 4.2. Calcul du flux des pertes par purge:

Pour calculer les pertes par purge on a besoin de débit de purge, on le calcule en utilisant la relation suivante :

$$D_{purge} = \frac{D_{vapeur} * K_a}{K_a + K_p}$$

## Projet de fin d'étude

$D_{\text{purge}}$ : le débit massique de purge.	
$D_{\text{vapeur}}$ : Le débit massique de vapeur.	2626,83kg/h. (Annexe 2)
$K_a$ : la conductivité d'eau d'alimentation de la chaudière.	50,9 $\mu\text{s/cm}$ .
$K_p$ : La conductivité d'eau de purge.	1506 $\mu\text{s/cm}$

**Tableau 6: Paramètres de calcul du débit de purges**

**Remarque :** Les conductivités ont été retrouvées après des analyses dans le laboratoire de la société Lesaffre Maroc.

**A.N.**

$$D_{\text{purge}} = \frac{2626,83 * 50,9}{50,9 + 1506}$$

$$D_{\text{purge}} = 85,87 \text{Kg/h.}$$

Pour calculer le flux des pertes par purge on utilise la relation suivante :

$$\phi_{\text{purge}}(\%) = \frac{D_{\text{purge}} * \Delta H_{\text{purge}}}{D_{\text{fioul}} * \text{PCI}} * 100$$

Avec,

$\Phi_{\text{purge}}$ : Le flux de pertes par purge en %.	
$D_{\text{purge}}$ : le débit massique de purge de la chaudière.	85,87 kg/h .
$\Delta H_{\text{purge}}$ : la variation de l'enthalpie spécifique de l'eau à la température des purges à 6 bars.	160,13 kcal /kg .[8]

## Projet de fin d'étude

D <sub>fioul</sub> : le débit du fioul.	180 ,16 kg/h ( <b>Annexe 2</b> )
PCI : le pouvoir calorifique inférieur du fioul.	9600 Kcal/kg [7]

**Tableau 7:Paramètres de calcul du flux des pertes par purges**

$$\text{A.N.} \quad \phi_{\text{purge}}(\%) = \frac{85,87 * 160,13}{180,16 * 9600} * 100$$

$$\phi_{\text{purge}}(\%) = \mathbf{0,82\%}$$

Par conséquent le flux de chaleur perdu par purges est le suivant :

$$\Phi_{\text{purge}} = 1729536 * 0,0082$$

$$\Phi_{\text{purge}} = 14230,7531 \text{ kcal/h}$$

### 4.3. Calcul du flux de pertes par parois:

On utilise la relation suivante :

$$\phi_{\text{parois}}(\%) = \frac{P_{\text{ nominale}}}{P_{\text{actuelle}}} * e$$

<b><math>\phi_{\text{parois}}</math></b> :Le flux de pertes par parois en %.	
P <sub>nominale</sub> : Charge maximale moyenne de la chaudière.	5000 kg/h.
P <sub>actuelle</sub> : Charge moyenne avec laquelle fonctionne la chaudière	2626,83 kg /h.
e : Coefficient d'écran	0,5 [8]

**Tableau 8:Paramètres de calcul du flux des pertes par parois.**

A.N.

$$\phi_{\text{parois}}(\%) = \frac{5000}{2626,83} * 0,5$$

$$\phi_{\text{parois}}(\%) = \mathbf{0,95\%}$$

Par conséquent le flux de chaleur perdu par parois est le suivant :

$$\Phi_{\text{parois}} = 1729536 * 0,0095$$

$$\Phi_{\text{parois}} = 16460,29 \text{ Kcal/h.}$$

## Projet de fin d'étude

### 4.4. Calcul du flux de pertes par imbrulés:

On utilise la relation suivante :

$$\phi_{\text{imbrulés}} = 100 - R - \phi_{\text{fumée}}(\%) - \phi_{\text{purge}}(\%) - \phi_{\text{parois}}(\%)$$

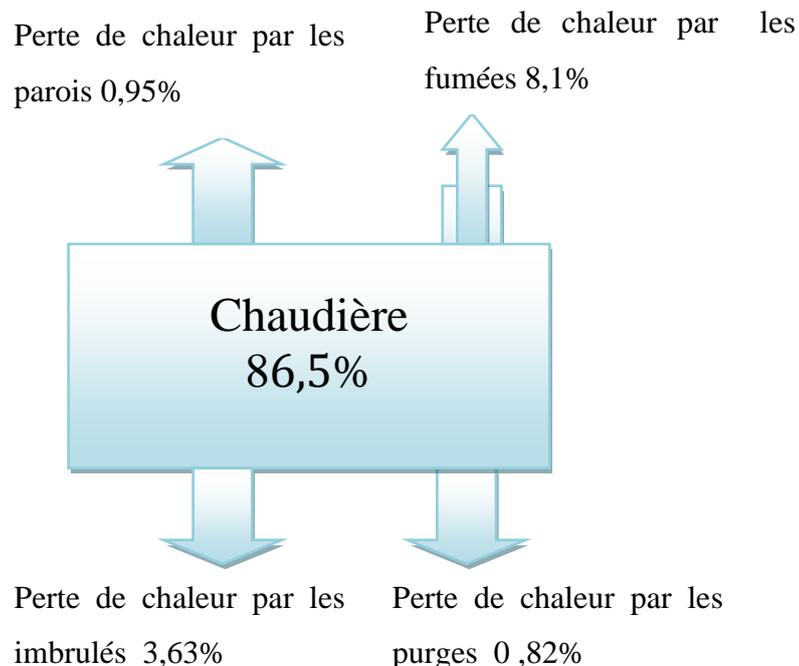
A.N.  $\phi_{\text{imbrulés}} = 100 - 86,5\% - 0,95\% - 0,82\% - 8,1\%$   
 $\phi_{\text{imbrulés}} = 3,63\%$

Par conséquent le flux de chaleur perdu par imbrulés est le suivant :

$$\Phi_{\text{imbrulés}} = 1729536 * 0,0363$$

$$\Phi_{\text{imbrulés}} = 62782,1568 \text{ Kcal/h.}$$

### Récapitulatif:



## IV. Interprétations des résultats et recommandations:

### 1. Interprétation :

On constate d'après les résultats obtenus que le rendement calculé (86,5%) est inférieure au rendement donné par le constructeur (92%) ; avec une différence de (5,5%) , cela est du aux différents pertes.

## Projet de fin d'étude

---

D'après les calculs on a trouvé que les pertes par les fumées sont plus importantes que les autres pertes, ils ont un grand impact sur le rendement de la chaudière et l'environnement, et qu'elles peuvent provenir d'un excès d'air excessif qui peut être du aux :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.
- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fioul.

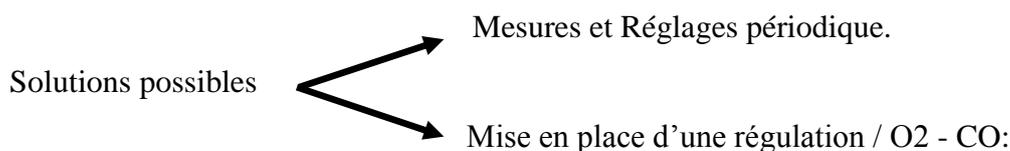
En deuxième lieu on trouve les pertes par les imbrulées, puis les parois et finalement les pertes par les purges.

### 2. Recommandations:

#### Pour les pertes par les fumées :

Maîtriser l'excès d'air :

- Pas assez d'air : Risque de combustion incomplète avec présence de CO (Danger, mauvais rendement)
- Trop d'air : Gaspillage d'énergie.



La mise en place d'un régulateur O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> pour contrôler la quantité d'air nécessaire à la combustion afin d'avoir une bonne fumée dans la cheminée.

#### Pour les pertes par les purges :

Améliorer l'adoucissement de l'eau afin d'éliminer les ions Mg<sup>2+</sup> et Ca<sup>2+</sup>. responsables de la dureté de l'eau et donc des dépôts de tartre dans les installations.

Faire un nettoyage annuel de la chaudière pour enlever le calcaire qui se précipite dans les tubes.

#### Pour les pertes par les parois :

Les pertes par parois représentent environ 0,95%, les solutions qu'on propose sont :

- ❖ Changer l'épaisseur de l'isolant (la laine de verre).
- ❖ Utiliser un autre isolant comme le polystyrène afin de diminuer le flux de chaleur sortant de la chaudière.

**Remarque :**

Les pertes n'ont pas été calculées d'une manière précise parce que nous ne disposons pas des données relatives au taux de salinité de l'eau de la purge, l'analyse des teneurs en gaz carbonique dans la fumée, en oxygène, en azote, des appareils de mesure bien étalonnés...

Donc il faut impérativement commander les appareils de mesures capables de mesurer ces teneurs au niveau de la chaudière, ce qui permettrait un calcul plus précis du rendement.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Le stage que nous avons effectué au sein de la société LESAFFRE MAROC, nous a permis de mettre en évidence nos connaissances acquises pendant notre formation en Génie industriel à la FST.

Le sujet que nous avons traité « le bilan thermique de la chaudière à vapeur » était très bénéfique car il nous a permis de comprendre le mécanisme de la combustion, la production de la vapeur et de suivre les paramètres qui influencent sur le rendement de la chaudière et de sa durée de vie.

Nous avons proposé à la société différentes recommandations que nous pouvons résumer comme suit :

- Améliorer le système de traitement de l'eau d'alimentation pour éviter le cas de la chaudière encrassé.
- Utiliser un isolant thermique comme le polystyrène.
- Commander des appareils de mesure.
- Faire des analyses régulières.

Finalement il faut savoir que s'engager pour un développement durable nécessite un investissement, pour cela il faut être conscient que l'amélioration du rendement d'une chaudière permet de diminuer la consommation du combustible, réduire les rejets de CO<sub>2</sub> et CO dans l'atmosphère, protéger indirectement les appareils de production contre l'entartrage et la corrosion ...

Pour résumer, il faut produire tout en respectant l'environnement, en protégeant les appareils et en économisant de l'énergie.

## **Bibliographie**

### Bibliographie

[8] Documentation de la société LESAFFRE-Maroc.

[2] Cours de thermodynamique de Mr. Saïd Haouache « enseignant à la Fst de Fès ».

### Webographie

[1] [http://ww2.ac-poitiers.fr/sc\\_phys/IMG/pdf/Chaudieres\\_a\\_vapeur\\_a\\_combustible.pdf](http://ww2.ac-poitiers.fr/sc_phys/IMG/pdf/Chaudieres_a_vapeur_a_combustible.pdf)

[3] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10987#c4820>

[4] <http://www.grtgaz.com/fileadmin/clients/agenda/documents/fr/5-GRTgaz-pistes-economies-chaufferie-industrielle.pdf>

[5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fioul>

[6] <https://www.picbleu.fr/page/tableau-comparatif-pouvoir-calorique-inferieur-pci-des-energies>

[7] <http://c.21-bal.com/pravo/2517/index.html?page=4>

## Annexe

1. Tableau : Enthalpies des différentes chaleurs:

Pression absolue	Températ. évaporation	Volume massique vapeur	Masse volumique vapeur	Enthalpie spécifique de l'eau (Chaleur sensible)		Enthalpie spécifique de la vapeur (chaleur totale)		Chaleur latente de vaporisation		Chaleur spécifique vapeur	Viscosité dynamique vapeur
				kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg		
bar	°C	m3/kg	kg/m3	kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg.K	kg/m.s
1	99.63	1.694	0.590	417.51	99.72	2675.43	639.02	2257.92	539.30	2.0267	0.000012
1.1	102.32	1.549	0.645	428.84	102.43	2679.61	640.01	2250.76	537.59	2.0373	0.000012
1.2	104.81	1.428	0.700	439.36	104.94	2683.44	640.93	2244.08	535.99	2.0476	0.000012
1.3	107.13	1.325	0.755	449.19	107.29	2686.98	641.77	2237.79	534.49	2.0576	0.000013
1.4	109.32	1.236	0.809	458.42	109.49	2690.28	642.56	2231.86	533.07	2.0673	0.000013
1.5	111.37	1.159	0.863	467.13	111.57	2693.36	643.30	2226.23	531.73	2.0768	0.000013
1.5	111.37	1.159	0.863	467.13	111.57	2693.36	643.30	2226.23	531.73	2.0768	0.000013
1.6	113.32	1.091	0.916	475.38	113.54	2696.25	643.99	2220.87	530.45	2.0860	0.000013
1.7	115.17	1.031	0.970	483.22	115.42	2698.97	644.64	2215.75	529.22	2.0950	0.000013
1.8	116.93	0.977	1.023	490.70	117.20	2701.54	645.25	2210.84	528.05	2.1037	0.000013
1.9	118.62	0.929	1.076	497.85	118.91	2703.98	645.83	2206.13	526.92	2.1124	0.000013
2	120.23	0.885	1.129	504.71	120.55	2706.29	646.39	2201.59	525.84	2.1208	0.000013
2.2	123.27	0.810	1.235	517.63	123.63	2710.60	647.42	2192.98	523.78	2.1372	0.000013
2.4	126.09	0.746	1.340	529.64	126.50	2714.55	648.36	2184.91	521.86	2.1531	0.000013
2.6	128.73	0.693	1.444	540.88	129.19	2718.17	649.22	2177.30	520.04	2.1685	0.000013
2.8	131.20	0.646	1.548	551.45	131.71	2721.54	650.03	2170.08	518.32	2.1835	0.000013
3	133.54	0.606	1.651	561.44	134.10	2724.66	650.77	2163.22	516.68	2.1981	0.000013
3.5	138.87	0.524	1.908	584.28	139.55	2731.63	652.44	2147.35	512.89	2.2331	0.000014
4	143.63	0.462	2.163	604.68	144.43	2737.63	653.87	2132.95	509.45	2.2664	0.000014
4.5	147.92	0.414	2.417	623.17	148.84	2742.88	655.13	2119.71	506.29	2.2983	0.000014
5	151.85	0.375	2.669	640.12	152.89	2747.54	656.24	2107.42	503.35	2.3289	0.000014
5.5	155.47	0.342	2.920	655.81	156.64	2751.70	657.23	2095.90	500.60	2.3585	0.000014
6	158.84	0.315	3.170	670.43	160.13	2755.46	658.13	2085.03	498.00	2.3873	0.000014
6.5	161.99	0.292	3.419	684.14	163.40	2758.87	658.94	2074.73	495.54	2.4152	0.000014
7	164.96	0.273	3.667	697.07	166.49	2761.98	659.69	2064.92	493.20	2.4424	0.000015
7.5	167.76	0.255	3.915	709.30	169.41	2764.84	660.37	2055.53	490.96	2.4690	0.000015
8	170.42	0.240	4.162	720.94	172.19	2767.46	661.00	2046.53	488.80	2.4951	0.000015
8.5	172.94	0.227	4.409	732.03	174.84	2769.89	661.58	2037.86	486.73	2.5206	0.000015
9	175.36	0.215	4.655	742.64	177.38	2772.13	662.11	2029.49	484.74	2.5456	0.000015
9.5	177.67	0.204	4.901	752.82	179.81	2774.22	662.61	2021.40	482.80	2.5702	0.000015
10	179.88	0.194	5.147	762.60	182.14	2776.16	663.07	2013.56	480.93	2.5944	0.000015
11	184.06	0.177	5.638	781.11	186.57	2779.66	663.91	1998.55	477.35	2.6418	0.000015
12	187.96	0.163	6.127	798.42	190.70	2782.73	664.64	1984.31	473.94	2.6878	0.000015

## Projet de fin d'étude

2. Relevés journaliers du compteur de consommation du fioul et des débitmètres de vapeur, pour une durée d'un mois (De 11-04-2018 à 10-05-2018) :

Jour	consommation de fioul en kg /jour	production vapeur en kg /jour
11-avr-18	4696	68467,68
12-avr-18	4241	61833,78
13-avr-18	6264	91329,12
14-avr-18	4132	60244,56
15-avr-18	4132	60244,56
16-avr-18	3411	49732,38
17-avr-18	3362	49017,96
18-avr-18	3301	48128,58
19-avr-18	3497	50986,26
20-avr-18	2856	41640,48
21-avr-18	5413,5	78928,83
22-avr-18	5413,5	78928,83
23-avr-18	3459	50432,22
24-avr-18	2782	40561,56
25-avr-18	3670	53508,6
26-avr-18	3535	51540,3
27-avr-18	4800	69984
28-avr-18	5493,5	80095,23
29-avr-18	5493,5	80095,23
30-avr-18	4754	69313,32
01-mai-18	4754	69313,32
02-mai-18	4754	69313,32
03-mai-18	4754	69313,32
04-mai-18	4754	69313,32
05-mai-18	4754	69313,32
06-mai-18	4754	69313,32
07-mai-18	4093	59675,94
08-mai-18	3615	52706,7
09-mai-18	4650	67797
10-mai-18	4132	60244,56

- ❖ La consommation moyenne de fioul pendant 30 jours est : 4324Kg /24h.
- ❖ Donc le débit moyen de fioul par heure est : 180 ,16Kg/h.
- ❖ La consommation moyenne de vapeur pendant 30 jours est : 63043,92Kg /24h
- ❖ Le débit moyen de vapeur par heure est : 2626,83 Kg /h.