

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique**  
**Université du 20 Août 1955 Skikda**



**Faculté des Sciences et Technologies**  
**Département de Pétrochimie**

## **Mémoire**

En vue d'obtention d'un diplôme du Master

**Filière: Industries Pétrochimiques**

**Spécialité: Génie Pétrochimique**

**Thème :**

---

# **Etude gravimétrique de l'encrassement au niveau des chaudières à tubes d'eau**

---

*Présenté par :*

**SADALLAH Fateh**

**BOUFLIGHA Soheib**

Soutenu le : 04 Juillet 2023

**Devant le jury composé de :**

Mme. MECHATI Fadia

Mme. BOULAHNECHE Samia

M. BOUSSAHA El Hadi

Présidente

Examinatrice

Encadrant

**Année Universitaire : 2022/2023**

# *Remerciement*

Nous tenons à remercier en premier lieu Dieu tout-puissant pour le courage et la patience qui nous ont permis d'aboutir à ce modeste mémoire.

Nous exprimons notre gratitude à notre encadrant, **Mr. El Hadi BOUSSAHA**, d'avoir accepté de nous encadrer et pour son aide et ses conseils. Nous n'oublions pas de remercier **Mme. Samia AOUICI** pour son assistance tout au long de ce travail.

Nous remercions chaleureusement tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté et pour avoir accepté de participer et d'assister à la valorisation de notre travail.

Nous sommes reconnaissants envers **SONATRACH** d'avoir accepté de nous accueillir pour notre stage et nous exprimons notre gratitude à tout le personnel de l'entreprise pour nous avoir réservé un accueil chaleureux. Nos remerciements vont tout particulièrement à **Mr. Hichem BARIOUT** et à **Mr. Mohamed LANTRI** pour leur présence et leur aide tout au long de notre stage.

Nous n'oublions pas de remercier **Mr. Abdelkarim DJILANI**, l'ingénieur du laboratoire analytique N°16.

Nous adressons également nos remerciements à **Mr. Youcef KISMOUNE** et à **M. Hichem ALMA**.

Nos remerciements s'adressent également aux enseignants qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui nous ont soutenus tout au long de la réalisation de ce mémoire.

# *Dédicace*

*Ce modeste travail est dédié à  
Mes chers parents,  
Tous mes proches de la famille **BOUFLIGHA**, et plus précisément, mes  
sœurs et mes frères tout à son nom,  
A tous ceux ou celles qui sont chers à moi,  
Tous mes chers **amis** et mes **collègues** d'étude à l'université du 20  
Août 1955 Skikda,  
À **moi-même**, pour toutes les années que j'ai souffert, pour toute  
l'énergie que j'ai perdue afin de voir ce fruit.  
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail  
soit réalisé.*

*Soheib*

# *Dédicace*

*Je remercie **Dieu** tout puissant de m'avoir donné le courage et la force  
pour accomplir ce modeste travail que je dédie*

*A mes très chers **Parents** pour leur esprit de sacrifice, leur  
encouragement, leur générosité et leur soutien moral... Que **Dieu** me les  
garde*

*A mes **Frères** qui m'ont accompagné tout au long de cette aventure  
académique*

*À mon très cher cousin **Youcef**, pour son inestimable soutien dans mon  
parcours professionnel*

*A toute ma **Famille** et mes **Amis***

*A **moi-même**, pour cette réalisation remarquable, et que cela ne soit que  
le début d'une brillante trajectoire*

*Et à tous ceux qui ont apporté leur contribution, de près ou de loin, à la  
réalisation de ce travail.*

*Fateh*

## Résumé

Les chaudières à tubes d'eau sont considérées comme l'un des principaux équipements utilisés dans l'industrie pétrolière. L'encrassement et l'entartrage font partie des plus grands problèmes rencontrés lors de leur fonctionnement.

L'objectif principal de cette étude est de trouver la solution idéale pour nettoyer une chaudière à tubes d'eau. Nous avons réalisé des protocoles de nettoyage sur des échantillons d'acier C-1020 et choisi une méthode classique et efficace, à savoir la méthode gravimétrique. La variation des principaux paramètres tels que la concentration des solutions et la température, combinée avec le temps, nous a permis d'obtenir des résultats. Pour les optimiser, nous avons analysé les données obtenues afin de déterminer l'efficacité de nettoyage de chaque produit.

**Mots clés :** Chaudière, chaudière à tubes d'eau, entartrage, encrassement, nettoyage, méthode gravimétrique.

## Abstract

Water tube boilers are considered to be one of the major pieces of equipment used in the petroleum industry. Clogging and scaling are among the biggest problems encountered during their operation.

The main objective of this study is to find the ideal solution for cleaning a water tube boiler. We carried out cleaning protocols on C-1020 steel samples and chose a classic and effective method, namely the gravimetric method. The variation of the main parameters such as the concentration of the solutions and the temperature, combined with time, allowed us to obtain results. To optimize them, we analyzed the data obtained to determine the cleaning effectiveness of each product.

**Keywords:** Boiler, water tube boiler, scaling, fouling, cleaning, gravimetric method.

## المخلص

تعتبر الغلايات ذات انابيب المياه واحدة من القطع الرئيسية المستخدمة في الصناعات البترولية، كما يعد الانسداد وتراكم الجير من أكبر المشكلات التي تواجهها هذه الأخيرة اثناء عملها. ان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إيجاد الحل الأمثل لتنظيف الغلاية ذات انابيب المياه، حيث قمنا بإجراء بروتوكولات مختلفة على عينات الفولاذ 1020 واخترنا طريقة كلاسيكية وفعالة والمتمثلة في طريقة قياس الكتلة.

سمح لنا تباين المعطيات الرئيسية مثل اختلاف تركيز المحاليل ودرجة الحرارة والوقت المستغرق في التنظيف بالحصول على نتائج محددة، حيث قمنا بتحليلها وتحديد البروتوكولات الفعالة لكل عينة. **الكلمات المفتاحية:** الغلاية، الغلايات ذات انابيب المياه، انسداد، تراكم الجير، تنظيف، طريقة قياس الكتلة.

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>page</b>
<b>Figure. I.1:</b> Chaudière industrielle (à tube de fumée).....	<b>04</b>
<b>Figure. I.2:</b> exemple d'une chaudière de récupération sur les fumées d'un four de reformage primaire d'une usine d'ammoniac.....	<b>05</b>
<b>Figure. I.3:</b> Chaudière électrique.....	<b>05</b>
<b>Figure. I.4:</b> Le foyer.....	<b>06</b>
<b>Figure. I.5:</b> Les tubes d'eau dans une Chaudière à tubes d'eau.....	<b>07</b>
<b>Figure. I.6:</b> Les tubes de fumées.....	<b>07</b>
<b>Figure. I.7 :</b> Surchauffeur d'une chaudière.....	<b>08</b>
<b>Figure. I.8:</b> Le brûleur.....	<b>09</b>
<b>Figure. I.9:</b> Soupape de sécurité.....	<b>10</b>
<b>Figure.I.10 :</b> Chaudière à tubes de fumées.....	<b>11</b>
<b>Figure. I.11 :</b> Schéma représentatif de la composition d'une chaudière à tube de fumées.....	<b>12</b>
<b>Figure. I.12 :</b> Schéma représentatif d'une chaudière à tube d'eau.....	<b>13</b>
<b>Figure. I.13 :</b> Chaudière en fonte.....	<b>16</b>
<b>Figure. I.14 :</b> Chaudière en acier.....	<b>16</b>
<b>Figure I.15 :</b> Chaudière à circulation naturelle.....	<b>17</b>
<b>Figure I.16:</b> Chaudière à circulation assistée.....	<b>18</b>
<b>Figure I.17 :</b> Chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage.....	<b>19</b>
<b>Figure. I.18 :</b> Chaudière à double parcours (foyer borgne).....	<b>20</b>
<b>Figure. I.19 :</b> Chaudière à triple parcours.....	<b>21</b>
<b>Figure. II.1 :</b> Ballon supérieur.....	<b>24</b>
<b>Figure.II.2 :</b> Surchauffeur suspendu.....	<b>25</b>
<b>Figure.II.3 :</b> Désurchauffeur à pulvérisation.....	<b>25</b>
<b>Figure II.4 :</b> l'encrassement tubulaire.....	<b>35</b>
<b>Figure III.1 :</b> Echantillons de L'acier C-1020.....	<b>43</b>
<b>Figure III.2 :</b> Les échantillons après le polissage.....	<b>44</b>

<b>Figure III.3</b> : La polisseuse.....	<b>45</b>
<b>Figure III.4</b> : Balance électronique.....	<b>45</b>
<b>Figure III.5</b> : Chlorure de calcium dihydrate.....	<b>46</b>
<b>Figure III.6</b> : Bicarbonate de sodium.....	<b>47</b>
<b>Figure III.7</b> : des échantillons entartrés.....	<b>48</b>
<b>Figure III.8</b> : Peinture organique alimentaire.....	<b>49</b>
<b>Figure III.9</b> : Peinture organique non alimentaire.....	<b>49</b>
<b>Figure III.10</b> : L'hydroxyde de sodium.....	<b>50</b>
<b>Figure III.11</b> : Acide chlorhydrique.....	<b>51</b>
<b>Figure III.12</b> : Acide acétique.....	<b>51</b>
<b>Figure III.13</b> : pesage 2 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et 2 g de $\text{NaHCO}_3$ .....	<b>52</b>
<b>Figure III.14</b> : Le mélange pendant la formation du tartre.....	<b>52</b>
<b>Figure III.15</b> : Les échantillons après le séchage du tartre.....	<b>53</b>
<b>Figure III.16</b> : Pesage d'échantillons.....	<b>53</b>
<b>Figure III.17</b> : Avant (A) et après (B) l'échauffement des huiles.....	<b>54</b>
<b>Figure III.18</b> : Les échantillons après la formation d'encrasse.....	<b>54</b>
<b>Figure III.19</b> : Echantillons teintés.....	<b>55</b>
<b>Figure III.20</b> : Echantillons teintés et entartrés.....	<b>55</b>
<b>Figure III.21</b> : Solution aqueuse de $\text{NaOH}$ (5%).....	<b>57</b>
<b>Figure III.21</b> : Solution aqueuse de $\text{HCl}$ (5%).....	<b>58</b>
<b>Figure III.22</b> : Solution aqueuse de $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ (3%).....	<b>59</b>
<b>Figure III.23</b> : protocole de nettoyage d'encrassement.....	<b>60</b>
<b>Figure III.24</b> : protocole de nettoyage d'encrassement.....	<b>61</b>
<b>Figure III.25</b> : protocole de nettoyage d'entartrage.....	<b>62</b>
<b>Figure III.26</b> : Nettoyage d'échantillons entartrés.....	<b>63</b>
<b>Figure III.27</b> : Nettoyage d'échantillons entartrés.....	<b>65</b>
<b>Figure IV.1</b> : : Taux d'encrassement des échantillons 1EM, 2EM, 3EM en fonction de temps.....	<b>66</b>
<b>Figure IV.2</b> : Taux d'encrassement des échantillons 4EM, 5EM, 6EM en fonction de temps.....	<b>69</b>
<b>Figure IV.3</b> : Taux d'entartrage des échantillons 1TR,2TR,3TR en fonction de temps.....	<b>71</b>

<b>Figure IV.4 :</b> Taux d'entartrage d'échantillons 9TR en fonction du temps.....	<b>73</b>
<b>Figure IV.5 :</b> Taux d'entartrage d'échantillon 7TR en fonction de temps.....	<b>74</b>
<b>Figure IV.6 :</b> Taux d'entartrage des échantillons 8TR en fonction du temps.....	<b>76</b>
<b>Figure IV.7 :</b> Taux d'entartrage des échantillons 4TR,10TR en fonction du temps...	<b>77</b>
<b>Figure IV.8 :</b> Taux d'entartrage des échantillons 5TR,6TR en fonction du temps....	<b>79</b>
<b>Figure IV.9 :</b> Taux d'entartrage des échantillons 11TR,12TR en fonction du temps....	<b>81</b>
<b>Figure IV.10 :</b> Taux d'encrassement des échantillons 1EM, 2EM, 3EM en fonction du temps.....	<b>82</b>
<b>Figure IV.11 :</b> Taux d'encrassement des échantillons 4EM, 5EM, 6EM en fonction du temps.....	<b>82</b>
<b>Figure IV.12 :</b> Taux d'entartrage des échantillons 1TR,2TR, 3TR en fonction du temps.....	<b>83</b>
<b>Figure IV.13:</b> Taux d'entartrage des échantillons 9TR en fonction du temps.....	<b>83</b>
<b>Figure IV.14:</b> Taux d'entartrage des échantillons 4TR, 10TR en fonction du temps....	<b>84</b>
<b>Figure IV.15:</b> Taux d'entartrage des échantillons 5TR, 6TR en fonction du temps....	<b>84</b>
<b>Figure IV.16:</b> Taux d'entartrage des échantillons 7TR, 8TR en fonction du temps....	<b>84</b>
<b>Figure IV.17:</b> Taux d'entartrage des échantillons 11TR, 12TR en fonction du temps...	<b>85</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b> : Les normes de l'eau de la chaudière.....	<b>31</b>
<b>Tableau II.2</b> : les types d'encrassement.....	<b>34</b>
<b>Tableau III.1</b> : Propriété mécanique d'acier C-1020.....	<b>43</b>
<b>Tableau III.2</b> Composition chimique de l'acier C-1020.....	<b>44</b>
<b>Tableau III.3</b> : Caractéristiques principales de chlorure de calcium dihydrate.....	<b>46</b>
<b>Tableau III.4</b> : Caractéristiques principales de bicarbonate de sodium.....	<b>47</b>
<b>Tableau III.5</b> : Différents concentration des expériences (Echantillon 1EM,2EM,3EM).....	<b>60</b>
<b>Tableau III.6</b> : Différents concentration des expériences.....	<b>61</b>
<b>Tableau III .7</b> : Différents concentration des expériences. (Echantillon 4EM, 5EM, 6EM).....	<b>62</b>
<b>Tableau III .8</b> : Différents concentration des expériences. (Echantillon 4TR).....	<b>63</b>
<b>Tableau III .9</b> :Différents concentration des expériences.(echantillon 5TR,6TR).....	<b>63</b>
<b>Tableau III .10</b> : Différents concentration des expériences. (Echantillon 7TR,8TR)..	<b>64</b>
<b>Tableau III .11</b> : Différents concentration des expériences. (Echantillon 9TR,10TR)..	<b>64</b>
<b>Tableau III .12</b> : Différents concentration des expériences. (Echantillon 11,12TR)....	<b>65</b>
<b>Tableau IV.1</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 1EM (huile de NAFTAL).....	<b>66</b>
<b>Tableau IV.2</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 2EM (huile de CASTROL).....	<b>66</b>
<b>Tableau IV.3</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 3EM (huile de LIQUI MOLY)....	<b>67</b>
<b>Tableau IV.4</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 4EM (l'huile de NAFTAL).....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.5</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 5EM (l'huile de CASTROL).....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.6</b> : Taux d'encrassement d'échantillon 6EM (l'huile de Liqui-Moly).....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.7</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 1TR.....	<b>71</b>
<b>Tableau IV.8</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 2TR.....	<b>71</b>
<b>Tableau IV.9</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 3TR.....	<b>72</b>
<b>Tableau IV.10</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 9TR (NaOH).....	<b>73</b>
<b>Tableau IV.11</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 9TR (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ).....	<b>73</b>
<b>Tableau IV.12</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 7TR.....	<b>75</b>

<b>Tableau IV.13</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 8TR.....	<b>76</b>
<b>Tableau IV.14</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 4TR.....	<b>77</b>
<b>Tableau IV.14</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 4TR.....	<b>78</b>
<b>Tableau IV.16</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 5TR.....	<b>79</b>
<b>Tableau IV.17</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 6TR.....	<b>79</b>
<b>Tableau IV.18</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 11TR.....	<b>81</b>
<b>Tableau IV.19</b> : Taux d'entartrage d'échantillon 12.....	<b>81</b>

## Liste des symboles et abréviations

Symbole	Signification	Unité
GN	Gaz Naturel	-
T	Température	°C
P	Pression	bar
$\rho$	puissance	KW
pH	Potentiel d'hydrogène	-
DT	Eau distillé	-
DM	Eau déminéralisée	-
FW	Eau d'alimentation	-
BW	Vapeur d'eau	-
$\sigma$	Conductivité	$\mu\text{S.cm}^{-1}$
T.Fe	Taux de fer	ppm
T.Cu	Taux de cuivre	ppm
C	Concentration	Mol/L
m	masse	g
d	densité	$\text{g/cm}^3$
V	Volume	ml

# Table des matières

**Remerciements**

**Dédicace**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

## Sommaire

**Introduction générale..... 01**

## **Chapitre I : Les chaudières industrielles**

I.1 Introduction.....	03
I.2 Définition.....	03
I.3 Classification des chaudières.....	03
I.3.1 Chaudières conventionnelles (combustion) .....	04
I.3.2 Chaudières récupération.....	04
I.3.3 Chaudières électriques.....	05
I.4. Constitution globale des chaudières.....	06
I.4.1. Le foyer d'une Chaudière.....	06
I.4.2. Les grilles.....	06
I.4.3. Les tubes d'eau.....	07
I.4.4. Les tubes de fumées.....	07
I.4.5. Les bouilleurs.....	08
I.4.6. Les Surchauffeurs/Resurchauffeurs.....	08
I.4.7. L'économiseur (réchauffeur d'eau) .....	08
I.4.8. Réchauffeur d'air.....	09
I.4.9. Réservoir (Ballon supérieur) .....	09
I.4.10. Brûleur.....	09
I.4.12. Soupapes de sécurité.....	10
I.5. Les différents types des chaudières.....	10
I.5.1. Chaudière à tube de fumé.....	10
I.5.2. Chaudière à tubes d'eau.....	12
I.5.3. Chaudière à eau chaude .....	13
I.5.4. Chaudière à combustion sous pression.....	13
I.5.5. Chaudière à fluide caloporteur .....	14
I.6. Principe de fonctionnement d'une chaudière.....	14
I.7. Technologie des chaudières.....	15
I.7.1. Chaudières en fonte.....	15
I.7.2. Chaudières en acier.....	16

I.8 Circulation dans une chaudière .....	17
I.8.1. Circulation naturelle .....	17
I.8.2. Circulation assistée .....	17
I.8.3. Circulation forcée .....	18
I.9. Classification des puissances applicables aux réglementations.....	19
I.10. Architecture de la chaudière.....	19
I.10.1. Chaudières à double parcours des fumées (foyer « borgne ») .....	20
I.10.2. Chaudières à triple parcours des fumées.....	20
I.11. Conclusion.....	21

## **Chapitre II : Les chaudières à tubes d'eau**

II. Introduction.....	23
II.1. Définition.....	23
II.2. Conception de la chaudière à tube d'eau.....	23
II.2.1. Elément du circuit eau vapeur.....	23
II.2.2. Elément du circuit air/gaz.....	26
II.3. Fonctionnement des tubes d'eau.....	26
II.3.2-But du conditionnement.....	27
II.4 Problèmes de fonctionnement.....	27
II.4.1 La Chaudière fuit .....	27
II.4.2 La chaudière est bruyante.....	28
II.4.3 La chaudière siffle .....	28
II.4.4 La chaudière ne démarre pas.....	28
II.4.5 La chaudière s'éteint toute seule.....	29
II.5. L'eau d'alimentation de la chaudière.....	29
II.5.1 Généralité sur le dessalement.....	29
II.5.1.1 Définition .....	29
II.5.1.2 La qualité de l'eau d'alimentation.....	29
II.5.1.3 L'eau de la chaudière.....	30
II.6. Encrassement.....	31
II.6.1 Définition d'encrassement.....	31
II.6.2 Les différents types d'encrassement.....	31
II.7 Les problèmes d'encrassement .....	34
II.7.1 Notion sur l'encrassement de la chaudière.....	35
II.7.1.1 Encrassement physique.....	35
II.8 Causes principales de l'encrassement .....	35
II.8.1 Caractéristiques des combustibles .....	35
II.9 Moyennes de lutte contre l'encrassement .....	36
II.10 Paramètres influençant à l'encrassement .....	38

## **Chapitre III : Partie expérimentale**

III.1 Introduction.....	41
III.2 Méthodologie de l'étude.....	41
III.3. Méthodes et matériaux .....	41
III.3.1. Les méthodes de nettoyage.....	41
III.3.1.1. Méthode gravimétrique .....	42
III.3.1.2. Méthode de nettoyage en place (NEP) .....	42
III.3.2. Matériaux utilisés .....	42
III.3.2.1. Préparation des échantillons .....	43
III.3.2.2. Produits d'entartrage.....	45
III.3.2.3. Produits d'encrassement .....	48
III.4. Procédés de nettoyage .....	50
III.5. Procédure expérimentale .....	52
III.5.1. L'entartrage .....	53
III.5.2. L'encrassement .....	53
III.5.3. La peinture .....	54
III.6. Préparation des solutions .....	55
III.7. Protocole de nettoyage chimique .....	60

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

Introduction .....	65
IV.1 Résultats et discussions de la méthode gravimétrique.....	65
IV.1.1 Résultats et discussions de nettoyage d'encrasse.....	65
IV.1.2 Résultats et discussions de nettoyage du tartre .....	70
IV.2 Analyse de données sous MATLAB .....	82
IV.2.1 Analyse de données d'encrassement .....	82
IV.2.2 Analyse de données de tartre .....	83

## **Conclusion générale**

## **Références bibliographiques**

## Introduction générale

L'industrie pétrolière est un secteur économique mondial qui englobe toutes les activités liées à la production, au raffinage, à la distribution et à la commercialisation du pétrole et des produits pétroliers. Ces activités requièrent une variété d'équipements spécifiques, dont les chaudières industrielles. Les chaudières industrielles sont utilisées dans de nombreux secteurs industriels pour générer de la chaleur ou de la vapeur d'eau, notamment dans les processus de séparation des produits, le chauffage et la purification.

Cependant, les chaudières industrielles peuvent présenter des problèmes critiques tels que l'encrassement et l'entartrage. Ces problèmes surviennent lorsque des dépôts indésirables, tels que des sédiments minéraux, des impuretés présentes dans l'eau ou des résidus de combustion, s'accumulent à l'intérieur des chaudières. L'encrassement réduit l'efficacité de transfert de chaleur des chaudières, entraînant une diminution de leur performance et une augmentation de la consommation d'énergie. L'entartrage, quant à lui, peut obstruer les tuyaux et les conduites d'eau, entraînant des problèmes de circulation et de pression.

L'analyse de ces problèmes fait appel à plusieurs domaines tels que l'électrochimie, la physique des solides, la métallurgie, la chimie, les phénomènes de surface et l'adsorption, ce qui souligne leur importance scientifique et leur enjeu industriel.

D'un point de vue économique, l'encrassement et l'entartrage ont un impact significatif tant au niveau local qu'industriel. Les dommages causés par ces phénomènes entraînent des pertes financières considérables chaque année. Afin de lutter contre ces problèmes, différentes méthodes expérimentales peuvent être utilisées, telles que la méthode de nettoyage en place qui utilise des acides et de la soude, ainsi que des méthodes appliquées en laboratoire comme la méthode gravimétrique.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur une comparaison des résultats obtenus en utilisant des solutions de différents types et concentrations sur des échantillons d'acier C-1020 présentant de l'entartrage ou de l'encrassement. L'importance de ce sujet nous a conduit à diviser notre travail en quatre chapitres distincts. Le premier chapitre présente une étude générale sur les chaudières industrielles. Le deuxième chapitre se concentre sur le type de chaudières étudiées, à savoir les chaudières à tube d'eau. Le

troisième chapitre aborde les caractéristiques des matériaux et les techniques expérimentales utilisées, notamment la technique de la masse perdue (méthode gravimétrique). Enfin, le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus et leur interprétation. En conclusion, nous proposons une synthèse générale et référençons les sources bibliographiques utilisées.

# ***Chapitre I***

## ***Les chaudières industrielles***

## **I.1 Introduction**

Les chaudières industrielles sont des équipements clés utilisés dans les processus industriels pour produire de la vapeur ou de l'eau chaude. Elles sont utilisées dans de nombreuses industries, telles que la production d'électricité, l'industrie chimique, la fabrication de papier, l'industrie pétrolière et gazière, la transformation des aliments et la production de textiles.

## **I.2 Définition**

Une chaudière est un « générateurs de chaleur ». Il s'agit en effet d'un appareil ou d'une installation qui permet de transférer - en continu - de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (porteur de chaleur). Ainsi, tout dispositif produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, ou de l'eau surchauffée est considéré comme une chaudière.

Les chaudières sont des équipements statistiques destinées à produire de la vapeur à partir de l'énergie calorifique du combustible (GN, Fuel gaz, etc...).

Une chaudière industrielle fournit de la vapeur surchauffée à diverses pression et température.[1]

## **I.3 Classification des chaudières**

La classification des chaudières se fait sur la base de 8 critères :

- La gamme de puissance : supérieure ou inférieure à 70KW ;
- Le système d'installation : sol ou mural ;
- L'utilisation : domestique, collective, industrielle, centrale ;
- Le type de fluide caloporteur : eau, vapeur, fluide, sels ;
- La construction : à tubes de fumées ou à tubes d'eau ;
- Le type de circulation : naturelle, assistée, force ;
- L'architecture : chaudière à deux passes, chaudière tour ;
- La source de chaleur : combustion, récupération, électrique.

La source de chaleur est la classification la plus souvent utilisée quand il est question d'orienter le choix de ses clients (particuliers, collectivités ou encore industriels). Cette classification nous permet de distinguer 3 types de chaudières.[1]

### I.3.1 Chaudières conventionnelles (combustion)

Il est possible de distinguer deux types de chaudières à combustion : les chaudières à combustion liquides ou gazeux : gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, fioul domestique, fioul lourd. Les chaudières à combustion solides : à grilles, à lit fluidisés, à charbon pulvérisé.

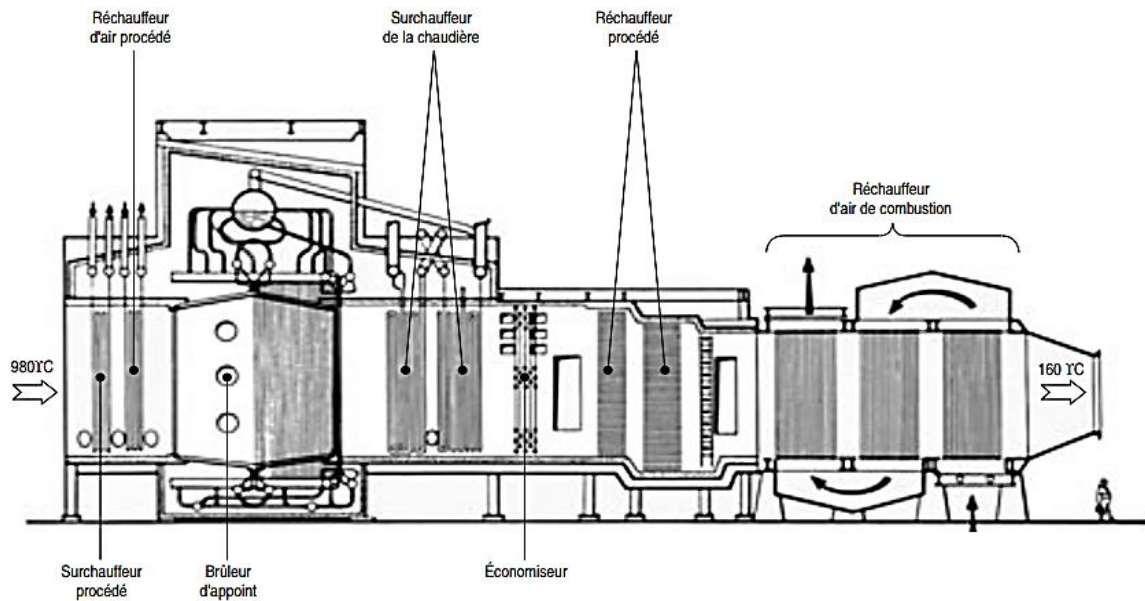
Selon que l'eau ou les fumées circulent à l'intérieur d'un faisceau tubulaire dans les chaudières conventionnelles, on distingue les chaudières à tubes d'eau et les chaudières à tubes de fumées. [2]



**Fig. I.1:** Chaudière industrielle (à tube de fumée). [2]

### I.3.2 Chaudières récupération

Ce sont généralement des chaudières industrielles sophistiquées. Elles fonctionnent en récupérant la chaleur d'un circuit primaire générateur d'une forte source de chaleur. La source doit être assez forte pour être conduite vers un circuit secondaire. On prend un exemple sur les chaudières de récupération sur les fumées d'un four de reformage primaire d'une usine d'ammoniac la chaleur sensible des fumées à 980 C ne suffisant pas à produire le débit de vapeur nécessaire à l'usine, la chaudière est équipée de brûleurs additionnels.



**Fig. I.2:** exemple d'une chaudière de récupération sur les fumées d'un four de reformage primaire d'une usine d'ammoniac. [2]

### I.3.3 Chaudières électriques

Les chaudières électriques sont des systèmes adaptés tant aux besoins industriels qu'aux besoins domestiques. Il est possible de distinguer 3 principes de chauffe électriques :

- Chaudière électrique à résistances.
- Chaudière électrique à effet joule,
- Chaudières électriques ioniques.



**Fig. I.3:** Chaudière électrique.[3]

## I.4. Constitution globale des chaudières

### I.4.1. Le foyer d'une Chaudière

Le foyer est dit intérieur quand il est placé à l'intérieur d'un des corps cylindriques de la chaudière, l'eau se trouvant autour du foyer. Le foyer est dit extérieur quand les flammes et les fumées se développent à l'extérieur du ou des corps cylindriques constituant la chaudière. L'ensemble est enfermé dans une enceinte en maçonnerie réfractaire munie de chicanes obligeant les gaz de la combustion à balayer la surface extérieure des corps avant de se rendre à la cheminée. [4]



**Fig. I.4:** Le foyer. [4]

### I.4.2. Les grilles

Les grilles dans les chaudières conventionnelles sont des éléments essentiels pour la combustion du combustible. Elles sont généralement situées dans le foyer de la chaudière et leur rôle est de maintenir le combustible en place pendant la combustion et de permettre la circulation de l'air nécessaire pour maintenir la combustion.

Les grilles sont généralement en fonte ou en acier, et peuvent être de différents types, tels que les grilles fixes ou mobiles. Les grilles mobiles permettent une plus grande flexibilité en matière de réglage de la combustion, mais nécessitent également un entretien plus fréquent.

### I.4.3. Les tubes d'eau

Les tubes d'eau dans les chaudières sont des conduites cylindriques qui transportent de l'eau à l'intérieur de la chaudière pour être chauffée et convertie en vapeur. Ces tubes sont souvent en acier et peuvent être droits ou courbes, en fonction de la conception de la chaudière.

La vapeur produite dans les tubes d'eau est ensuite utilisée pour alimenter des turbines ou des moteurs, ou pour fournir de la chaleur à d'autres processus industriels.



**Fig. I.5:** Les tubes d'eau dans une Chaudière à tubes d'eau.[5]

### I.4.4. Les tubes de fumées

Ces tubes, dudgeonnés sur le fond des corps, sont en contact avec l'eau par leur surface extérieure, et parcourus intérieurement par les gaz chauds.



**Fig. I.6:** Les tubes de fumées.[6]

#### I.4.5. Les bouilleurs

Le bouilleur est un équipement de chauffage, dans une chaudière à combustion le bouilleur est la partie où l'eau est chauffée jusqu'à l'ébullition pour produire de la vapeur (chambre de combustion). Le bouilleur peut être constitué de différentes parties, telles que des tubes, des plaques, des serpentins, ou encore des réacteurs chimiques, en fonction du type de chaudière et de son application.

#### I.4.6. Les Surchauffeurs/Resurchauffeurs

Les surchauffeurs et resurchauffeurs sont constitués d'une série de serpentins tubulaires généralement identiques dont l'une des extrémités est raccordée sur un tube de gros diamètre ou collecteur d'entrée de vapeur et l'autre sur un élément semblable ou collecteur de sortie.



Fig. I.7 : Surchauffeur d'une chaudière.[7]

#### I.4.7. L'économiseur (réchauffeur d'eau)

Le générateur de vapeur sera complété par un préchauffeur d'eau d'alimentation (économiseur - ECO) intégré ou monté en aval et destiné à augmenter le rendement de chaudière. L'eau d'alimentation est chauffée par les fumées à l'intérieur de l'économiseur, ce qui refroidit les fumées. Les économiseurs peuvent être en fonte ou en acier. Ils sont constitués de tubes dont le nombre et la longueur varient selon :

- ✓ Le volume des fumées ;
- ✓ Les températures d'entrée et de sortie des fumées ;
- ✓ Les températures d'entrée et de sortie de l'eau d'alimentation ;
- ✓ L'espace dont on dispose à l'intérieur de la chaudière ou à l'extérieur. [4]

#### I.4.8. Réchauffeur d'air

Un réchauffeur d'air permet de chauffer l'air introduit dans la chambre de combustion d'une chaudière. Cela permet d'augmenter l'efficacité de la chaudière en réduisant la quantité de combustible nécessaire pour produire la même quantité de chaleur.

#### I.4.9. Réservoir (Ballon supérieur)

Élément principal dans la chaudière, le réservoir est le lieu où elle reçoit le mélange d'eau et de vapeur qui provient des tubes d'écran et de faisceaux vaporisateurs. Le ballon est un gros cylindre horizontal à parois épaisses qui se trouve à la partie supérieure de la chaudière et dont le rôle est multiple, à savoir :

- ✓ La séparation de l'eau et de la vapeur contenues dans l'émulsion
- ✓ L'équilibrage des pressions eau et de vapeur grâce au maintien d'un plan d'eau
- ✓ L'introduction de l'eau d'alimentation dans le système évaporateur
- ✓ La répartition correcte de l'eau d'alimentation dans les tubes de descente, avec le minimum d'entraînement de vapeur
- ✓ L'introduction et la dilution des produits de traitement de l'eau de la chaudière
- ✓ L'extraction de déconcentration.

#### I.4.10. Brûleur

Le brûleur est le premier élément après l'arrivée de gaz ou de fioul. Il est fixé sur la chaudière et peut dans certains cas être intégré à la chaudière. Il permet de mélanger le carburant (gaz, fioul...) avec le comburant (air) et d'enflammer le mélange pour créer de la chaleur.

Il existe deux types de brûleurs selon le combustible utilisé : à fuel ou à gaz.[9]

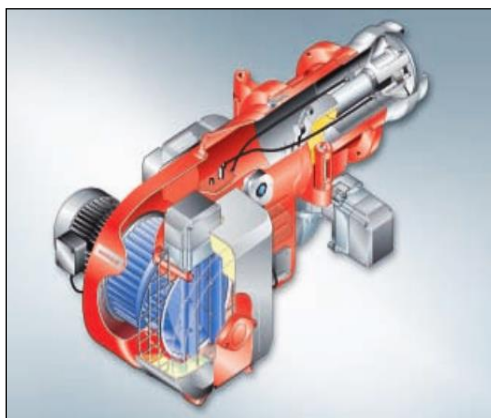


Fig. I.8: Le brûleur.[8]

### I.4.11. Soupapes de sécurité

Accessoire de sécurité indispensable à toute chaudière alimentant un circuit de chauffage hydraulique, la soupape de sécurité permet d'éviter une pression trop forte dans le réseau. En évacuant le fluide surcomprimé, elle garantit l'intégrité de la chaudière ou du chauffe-eau.



**Fig. I.9:** Soupape de sécurité.[10]

## I.5. Les différents types des chaudières

Il existe plusieurs types de chaudières, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Les principaux types de chaudières sont :

### I.5.1. Chaudière à tube de fumé

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.

Les chaudières à tubes de fumées sont des chaudières à circulation naturelle. Le volume de l'eau chauffée est assez important. Si ces chaudières sont chauffées au fuel, ou au gaz, elles peuvent alors être conduites de façon automatisée. Elles sont très compactes et peuvent donc être entièrement montées et essayées en atelier avant d'être expédiées sur le site pour la mise en marche. Mais à partir de 20 bars, cette construction devient délicate à cause des épaisseurs à prévoir pour le corps.

La puissance de ces chaudières est relativement faible. De nos jours, la production maximale de vapeur est de 30 tonnes/heure pour une pression maximale de 25 bars.

Le principe même de ces chaudières ne se prête guère à l'obtention de vapeur surchauffée. Cependant, la production de vapeur surchauffée est possible. La surchauffeur est alors placée, soit dans la boîte de retour, soit dans la chambre de réversion. Dans ces types de chaudière c'est le tube foyer, où se déroule la combustion qui risque le plus de détérioration par la surchauffe du métal (rayonnement des flammes).

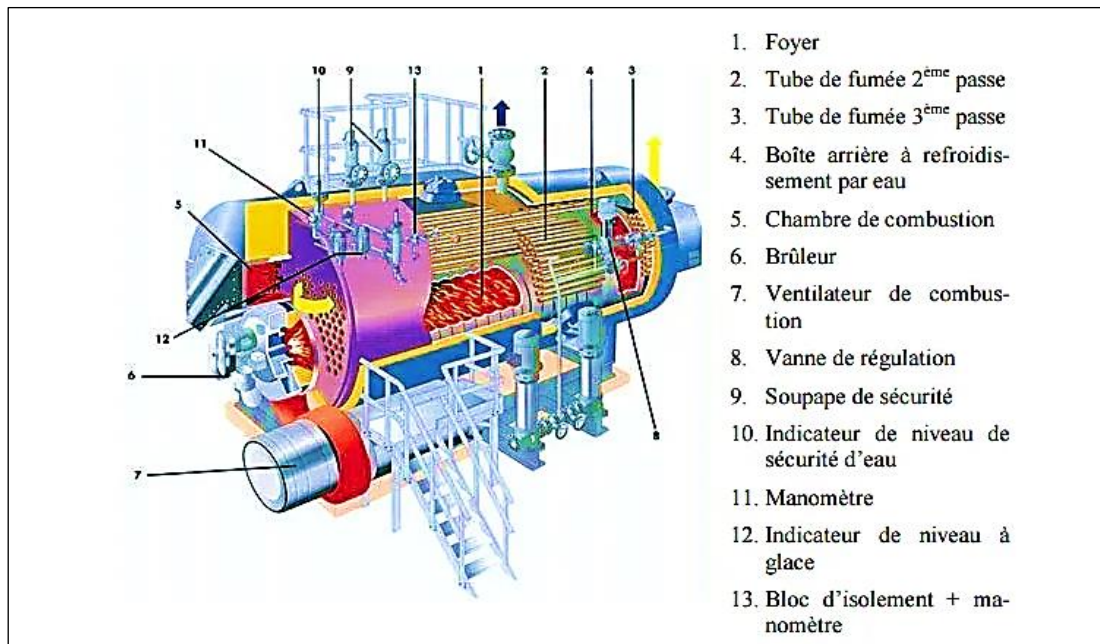


**Fig.I.10** : Chaudière à tubes de fumées.[8]

Pour limiter sa température, il est nécessaire de maintenir parfaitement propre la surface extérieure du tube foyer afin d'obtenir un échange thermique optimal. 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. [8]

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.



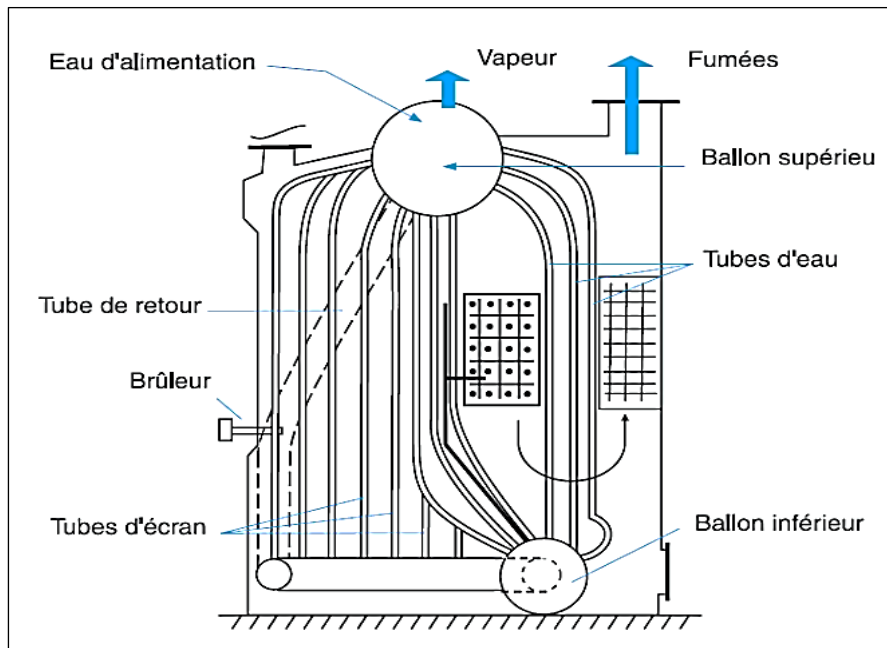
**Fig. I.11** : Schéma représentatif de la composition d'une chaudière à tube de fumées.[8]

### I.5.2. Chaudière à tubes d'eau

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. Elles permettent de couvrir toute la gamme de vaporisation des chaudières industrielles de 0,1 à 400 t/h.

Les chaudières à tube d'eau représentent la grande majorité des chaudières mises en service. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.

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.[11]



**Fig. I.12** : Schéma représentatif d'une chaudière à tube d'eau.[11]

### I.5.3. Chaudière à eau chaude :

Une chaudière à eau chaude est un appareil qui permet d'utiliser directement la chaleur de combustion d'un combustible quelconque pour réchauffer de l'eau de la température  $T_0$  d'entrée à la température  $T_1$  requise à la sortie pour son utilisation en phase liquide, à la pression  $p$  du réseau défini seulement à la hauteur géométrique et aux pertes de charges près.

L'exemple le plus simple des chaudières à eau chaude est les chaudières de chauffage central débitant sur un réseau à la pression atmosphérique dans ce cas la température est inférieure à  $100^\circ\text{C}$ . Il existe deux types d'installation de chaudières domestiques :

- Chaudières au sol : Les chaudières au sol sont en général utilisées pour des habitations disposant d'un sous-sol ou d'un garage. Elles occupent néanmoins une place importante.

- Chaudières murales : Les chaudières murales conviennent aux habitations de petite taille (appartements). Elles offrent une puissance moindre que les chaudières au sol

### I.5.4. Chaudière à combustion sous pression :

Dans les chaudières à combustion sous pression, la température très élevée des fumées quittant la chambre impose, plus que dans celles à combustion à la pression

atmosphérique, d'intercaler, avant la surchauffeur, un faisceau vaporisateur qui ramène la température des fumées à une valeur plus modérée.

Les chaudières à combustion sous pression de plusieurs bars sont destinées à faire partie d'un ensemble à cycle combiné. La combustion sous pression génère une forte quantité d'oxydes d'azote, ce qui va à l'encontre des limitations actuelles concernant les rejets gazeux à l'atmosphère. Elles sont utilisées dans les chambres à combustion des turbines à gaz ou des turbomachines d'aviation

Comme exemples de réalisations de chaudières sous pression on a les chaudières marines sous pression.

### **I.5.5. Chaudière à fluide caloporteur**

L'apparition des chaudières à fluide caloporteur, encore appelées chaudières à fluide thermique, est liée au développement des industries chimiques et pétrochimiques après la première guerre mondiale. Ces industries exigeaient en effet, pour leur fabrication, des niveaux de température de plus en plus élevés, difficiles à atteindre avec des générateurs thermiques classiques, sauf au prix de pressions de travail très élevées. La propriété marquante des fluides caloporteurs est, en effet, de permettre un réchauffage dans la plage de température 300 à 400°C à des pressions inférieures à 10 bars.

### **I.6. Principe de fonctionnement d'une chaudière**

Qu'elle soit alimentée par du gaz ou du fioul, la chaudière à vapeur industrielle fonctionne à peu près de la même façon. En effet, ces chaudières utilisent le principe de condensation, et ce, dans le but d'optimiser les échanges thermiques, d'améliorer l'efficacité énergétique et de diminuer les déperditions de chaleur. Ainsi, elles fonctionnent comme suit :

- La chaudière vapeur utilise son brûleur pour réchauffer le circuit d'eau présent dans la chaudière,
- Les fumées se régénèrent dans la chaudière grâce à cette combustion,
- Les fumées générées contiennent de la vapeur à très haute température,
- La combustion produit de l'eau chaude qui par la suite va être distribuée dans le circuit de chauffage,

- Sur la paroi de l'échangeur, la vapeur d'eau va se condenser naturellement et crée de l'énergie. [13]

## I.7. Technologie des chaudières

La construction des chaudières dépend des facteurs suivants :

- La nature du fluide caloporteur (eau chaude, vapeur d'eau saturée, vapeur surchauffée).
- Les conditions de service (état physique : pression et température).
- La nature du combustible (solide, liquide, gazeux).
- La mise en œuvre du combustible (manuelle, mécanique, brûleurs, ...).

Les constructeurs ont développé de très nombreux types de chaudières. Celles-ci subissent d'ailleurs constamment des modifications à la suite des progrès scientifiques et technologiques

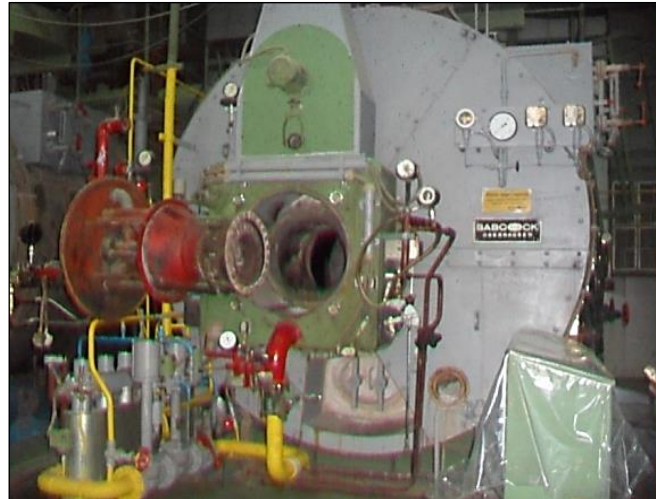
Les chaudières, au point de vue construction peuvent être en fonte ou en acier.[8]

### I.7.1. Chaudières en fonte

Les différents éléments d'une chaudière en fonte sont obtenus par moulage à partir d'un modèle.

Les chaudières en fonte ont une meilleure inertie. La fonte est capable d'emmagasiner plus de chaleur que l'acier. Lorsque le brûleur s'arrête, la chaudière en fonte continue à restituer de la chaleur à l'eau plus longtemps. Ces chaudières sont également plus résistantes à la corrosion.

La fonte est plus lourde que l'acier, donc moins facile à manipuler lors de l'installation.



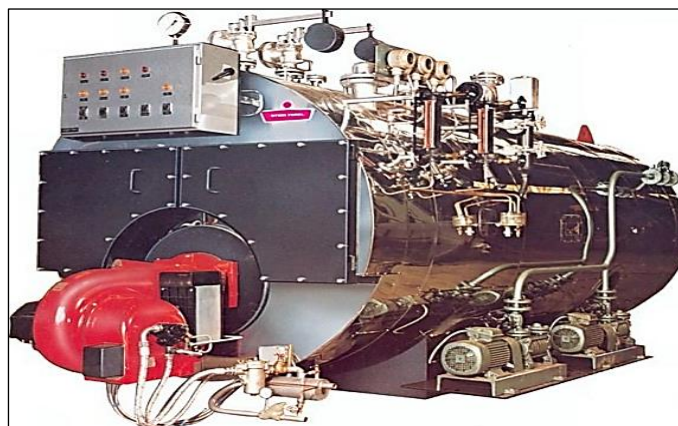
**Fig. I.13 :** Chaudière en fonte.

### I.7.2. Chaudières en acier

Le corps de chauffe des chaudières utilisées en génie climatique est généralement en fonte ou en acier. Lorsqu'elles sont en acier, elles sont réalisées par soudage de plaques et de tubes d'acier. Ces soudures assurent une étanchéité parfaite du circuit de combustion. Selon ce qui devra traverser les tubes, on répartit les chaudières en acier en deux catégories : les chaudières à tubes de fumées et les chaudières à tubes d'eau.

L'acier est utilisé pour la fabrication de chaudières de petites à très grosses puissances.

La chaudière en acier montera en température plus rapidement qu'une chaudière en fonte, mais restituera de la chaleur moins longtemps après l'extinction du brûleur (moins d'inertie). Elle est également plus sensible à la corrosion, notamment au niveau des soudures.[12]



**Fig. I.14 :** Chaudière en acier. [12]

## I.8 Circulation dans une chaudière

On distingue :

### I.8.1. Circulation naturelle :

La circulation naturelle résulte de la différence de densité entre l'eau dans les tubes vaporisateurs sortants du ballon et le mélange eau-vapeur dans les tuyaux de retour vers le ballon. La circulation naturelle est d'autant meilleure que la différence de hauteur entre le ballon et les tubes vaporisateurs est grande. Ce genre de circulation présente un bon rendement.

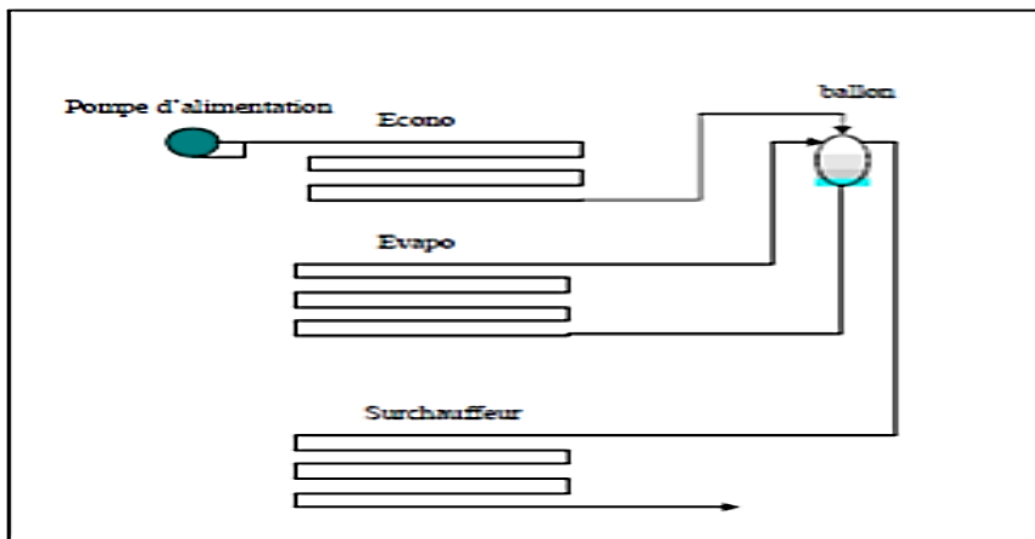


Figure I.15 : Chaudière à circulation naturelle. [13]

### I.8.2. Circulation assistée :

Lorsque la pression de la vapeur augmente, le tirage naturel dans les tubes de l'évaporateur devient insuffisant. Une pompe de circulation est alors introduite dans la boucle de vaporisation pour vaincre les pertes de charge du mélange eau-vapeur à déplacer.

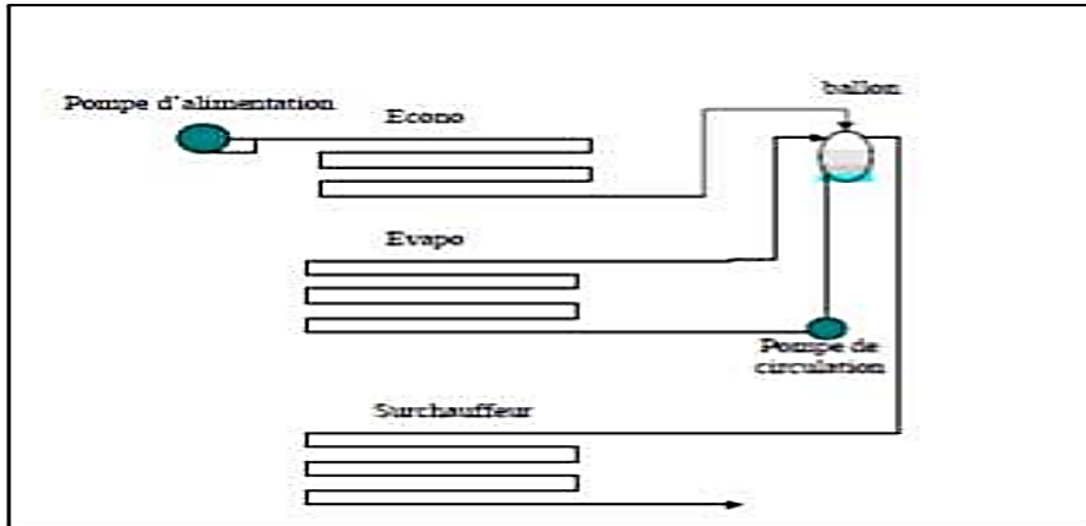


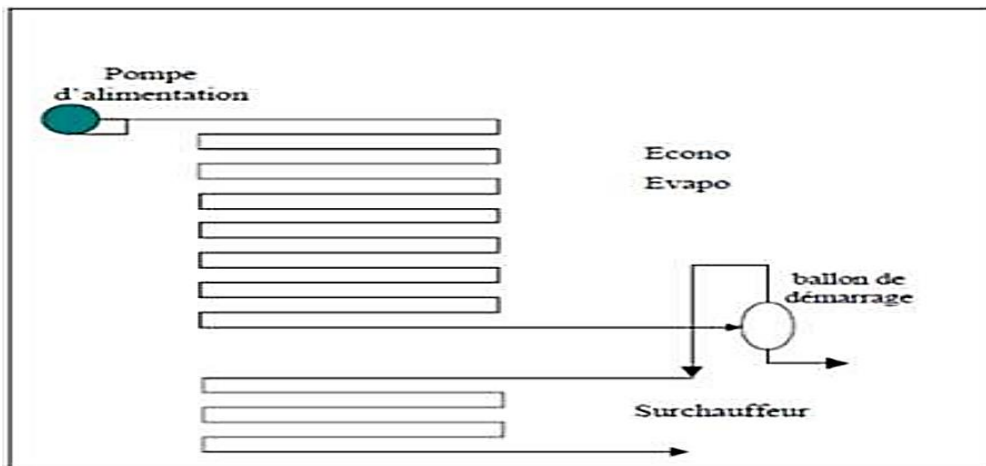
Figure I.16: Chaudière à circulation assistée. [13]

C'est un schéma couramment rencontré pour des pressions comprises entre 100 et 180 bars. Pour des pressions supérieures, on rencontrera des chaudières à circulation forcée.

### I.8.3. Circulation forcée :

Les chaudières les plus modernes peuvent être à vaporisation totale (once-through boiler) : elles ne comportent théoriquement plus de réservoir matérialisant la séparation eau vapeur et sont constituées d'un grand nombre de tubes parallèles à l'intérieur desquels l'eau se réchauffe, se vaporise, et se surchauffe en un seul passage.

Une chaudière à circulation forcée diffère d'une chaudière classique, à circulation naturelle ou assistée, de par le nombre d'éléments qui la composent. En effet, une chaudière classique comprend un économiseur, un vaporiseur avec ballon de séparation et un surchauffeur. Dans une chaudière à circulation forcée, on ne peut plus faire la différence entre l'économiseur et le vaporiseur, et s'il subsiste un ballon de séparation, non seulement sa taille est fortement réduite, mais en plus, son utilité est principalement limitée à la phase de démarrage de la chaudière, pendant laquelle l'eau soutirée à la base du ballon est renvoyée vers le dégazeur, la surchauffeur n'étant opérationnel que lorsque le débit de vapeur sortant du ballon est suffisant. Par contre elle présente l'inconvénient de consommation d'énergie par la pompe. [13]



**Figure I.17 :** Chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage. [13]

### I.9. Classification des puissances applicables aux réglementations

Afin d'appliquer les différents textes réglementaires, il est important de classer les chaudières en différentes catégories de puissance. On distingue :

- Les chaudières de petites puissances inférieures à 70 kW : chaudières individuelles (domestique)
- Les chaudières de petites puissances comprises entre 70 et 400 KW : chaudières collectives (Réglementation chaufferie applicable)
- Les chaudières de moyennes puissances comprises entre 400 KW et 1 MW (1 000 kW) utilisées dans les grosses collectivités et dans l'industrie
- Les chaudières de grosses puissances supérieures à 1 MW (1 000 kW) utilisées dans la grosse industrie.

### I.10. Architecture de la chaudière

Sur les chaudières de petites, moyennes et grandes puissances, on distingue deux architectures principales dans la conception de la chaudière :

- La chaudière à inversion de flamme (à "foyer borgne" ou à double parcours).
- La chaudière à triple parcours des fumées.

### I.10.1. Chaudières à double parcours des fumées (foyer « borgne »)

Les chaudières à double parcours (à foyer borgne), les fumées font demi-tour au fond du foyer et reviennent vers l'avant en entourant la flamme, ce qui maintient des températures de flamme plus élevées. En effet, Les fumées chaudes qui font demi-tour dans le foyer réduisent l'échange de chaleur direct entre la flamme et les parois du foyer refroidies par l'eau. Les fumées restent également plus longtemps dans le foyer, zone la plus chaude de la chaudière.

Ces deux points favorisent malheureusement la formation d'oxydes d'azote, responsables des pluies acides. Plus la température de la flamme est élevée, plus il y a un risque de produire des oxydes d'azote. Les fumées entrent ensuite dans les tubes de fumées (second parcours), avant de s'échapper de la chaudière par la buse.

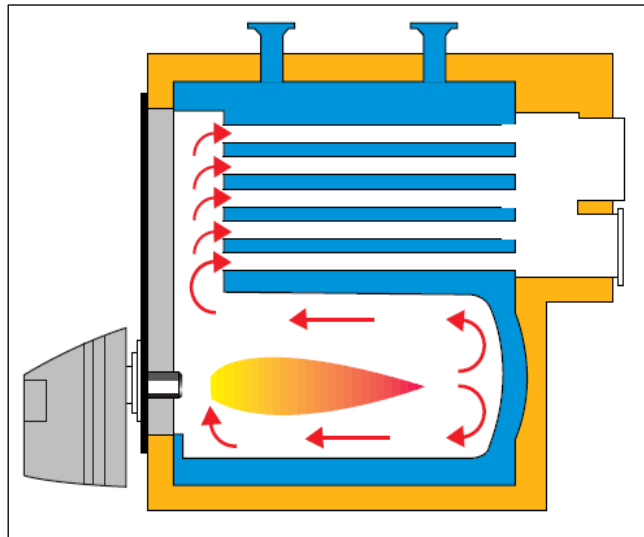
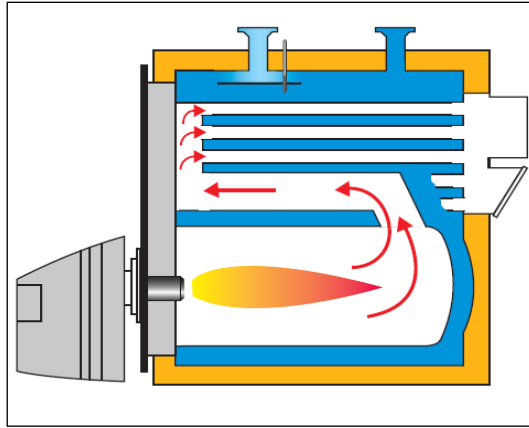


Fig. I.18 : Chaudière à double parcours (foyer borgne).[12]

### I.10.2. Chaudières à triple parcours des fumées

Chaudières à triple parcours des fumées Dans les chaudières à triple parcours, les fumées ne font pas demi-tour dans le foyer, mais entrent directement dans les tubes de fumées (second parcours) par une chambre de reflux située dans le fond du foyer. Elles sortent ensuite de la 1ère rangée de tubes (ou carneaux) pour entrer dans une seconde chambre de reflux côté porte foyer, derrière la trappe de nettoyage. Elles entrent alors dans le troisième parcours, également réalisé sous forme de tube de fumées, avant de sortir finalement dans la boîte à fumée et de s'échapper de la chaudière par la buse.

Comme les fumées restent très peu de temps dans le foyer et ne lèchent plus la flamme, la flamme peut céder davantage de chaleur à l'eau à travers les parois du foyer, et devient ainsi plus froide que sur une chaudière double parcours. Cela réduit la formation de polluants sous forme d'oxydes d'azote (NOx). [12]



**Fig. I.19** : Chaudière à triple parcours.[12]

## I.11.Conclusion

Dans ce chapitre on a pu voir les différents types des chaudières industrielles, ainsi leurs classifications, constitution globale et le principe de fonctionnement de chacune...

## ***Chapitre II***

### ***La chaudière à tubes d'eau***

## II. Introduction

Les chaudières à tube d'eau sont des types de chaudières qui utilisent des tubes remplis d'eau pour transférer la chaleur produite par la combustion des combustibles vers l'eau. Cette eau chauffée est ensuite utilisée pour générer de la vapeur, qui peut être utilisée pour alimenter des turbines, des générateurs de vapeur ou pour le chauffage.

### II.1. Définition

C'est un type de générateur de vapeur dans lequel l'eau circule dans les tubes qui sont chauffés extérieurement par les gaz de combustion. Ils représentent la grande majorité des générateurs de vapeur en service.

Ces générateurs de vapeur sont utilisés dans les grandes installations industrielles et les centrales électriques pour produire de la vapeur à haute pression. Ils utilisent comme combustible du gaz, de l'huile ou du combustible solide. [14]

### II.2. Conception de la chaudière à tube d'eau

Toute chaudière doit comporter essentiellement deux classes d'éléments :

#### II.2.1. Élément du circuit eau vapeur

- **Bâche alimentaire**

La bâche alimentaire reçoit l'eau provenant des deux bacs de stockage de l'eau déminéralisée. Les caractéristiques de l'eau d'alimentation sont préconisées par le constructeur de la chaudière, un traitement physique, toujours nécessaire, s'effectue au niveau du dégazeur thermique situé à la partie supérieure de la bâche, où l'eau est chauffée jusqu'à environ 140°C.

- **Economiseur**

L'économiseur est au niveau de la chaudière l'échangeur qui reçoit l'eau d'alimentation et dans lequel cette eau sera chauffée par les fumées avant d'être évacuées par la cheminée.

- **Ballon supérieur**

L'eau réchauffée dans l'économiseur arrive au ballon supérieur par une ou plusieurs tuyauteries reliant le collecteur de sortie de l'économiseur au ballon.

Le ballon supérieur est équipé à l'intérieur de cyclones dont le but est de séparer l'eau de la vapeur de façon à réduire les entraînements de gouttelettes dans la surchauffeur et à aider la circulation de l'eau dans la chaudière. Les cyclones utilisent la vitesse de rotation pour centrifuger et projeter l'eau sur les parois, le long desquelles elle se rassemble, tandis que la vapeur se dégage au centre, avec une faible proportion d'eau entraînée. Cette vapeur passe ensuite par des sécheurs qui se trouvent au-dessus des cyclones, en partie haute du ballon pour obtenir que de la vapeur sèche.

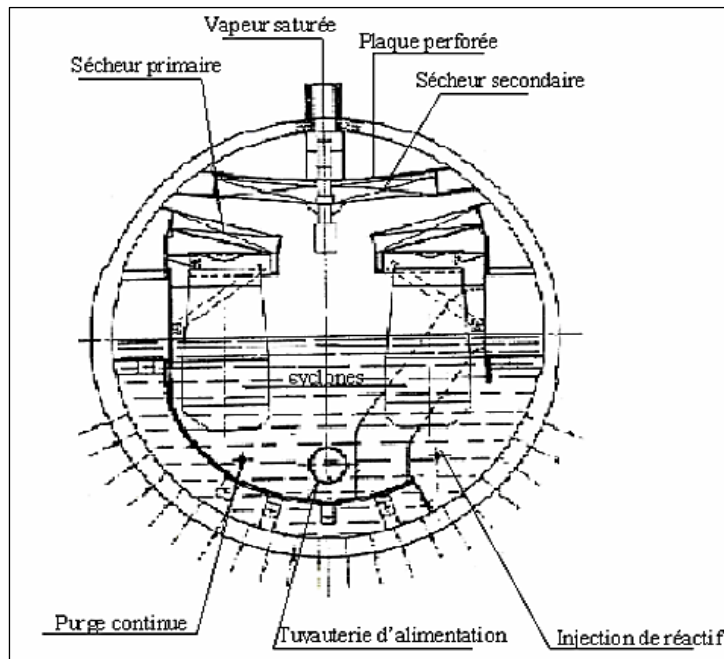


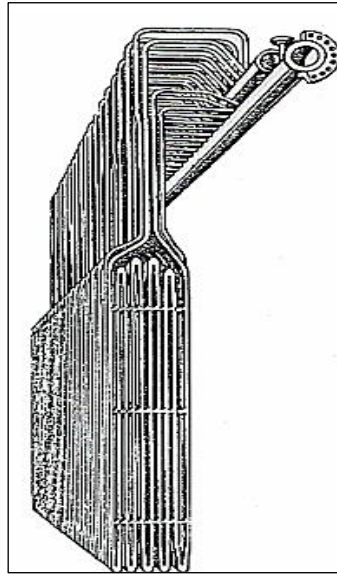
Fig. II.1 : Ballon supérieur [15]

- **Ballon inférieur**

C'est un réservoir d'eau moins volumineux que le ballon supérieur placé dans la partie inférieure de la chaudière, ce réservoir est relié avec le réservoir supérieur par un faisceau de tubes descendants, son rôle consiste à distribuer l'eau aux écrans vaporiseurs dans lesquels l'eau s'élève.

- **Surchauffeur**

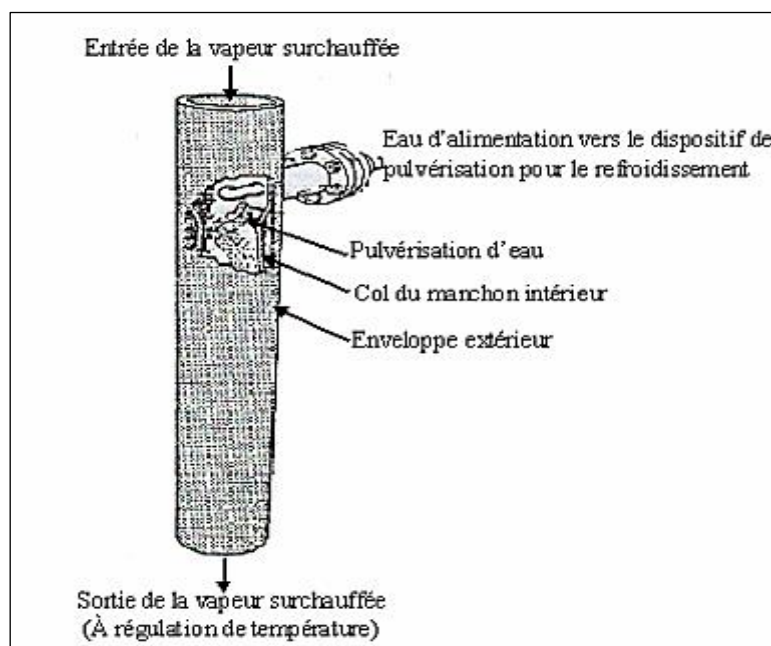
C'est un échangeur thermique situé sur le parcours des fumées entre la sortie de la chambre de combustion et l'économiseur. Son rôle est d'augmenter la température de la vapeur sans changer la pression.



**Fig.II.2** : Surchauffeur suspendu [15]

- **Désurchauffeur**

Ce dispositif est situé à la sortie de la surchauffeur, il permet de régler la température finale de la vapeur surchauffée délivrée par la chaudière, ceci en la mettant en contact avec un courant de vapeur saturée. Dans ce type de désurchauffeur, un certain prélèvement d'eau d'alimentation est directement pulvérisé dans la vapeur pour obtenir le refroidissement requis. La quantité d'eau est réglée en fonction de la température demandée



**Fig.II.3** : Désurchauffeur à pulvérisation. [15]

### II.2.2. Élément du circuit air/gaz

- **Ventilateurs de soufflage**

L'air nécessaire à la combustion est amené dans la chaudière à l'aide d'un ventilateur de soufflage. En générale, on prévoit par mesure de sécurité un deuxième ventilateur placé en parallèle pour remplacer le ventilateur principal en cas de panne accidentelle ou d'arrêt volontaire pour maintenance.

- **Brûleurs**

Un brûleur est constitué principalement d'un distributeur d'air de combustion et d'un injecteur de combustible. Il comprend également d'autres appareils auxiliaires tels que les allumeurs, la pompe à combustible ...etc.

- **Allumeurs (pilot)**

La mise à feu est réalisée par un allumeur, l'étincelage est produit par un transformateur haute tension, et parfois par un allumeur à combustible qui est un brûleur de faible débit (utilisant un combustible de bonne qualité)

- **Réchauffeur d'air**

Le réchauffage de l'air présente l'avantage de favoriser les phénomènes de combustion.

Les gaz d'échappement de la chaudière peuvent tout d'abord servir à réchauffer l'eau d'alimentation dans l'économiseur puis le reste de la chaleur disponible pouvant servir encore à réchauffer l'air de combustion.[10]

### II-3-Fonctionnement des tubes d'eau

Le fonctionnement des tubes d'eau dans une chaudière à tubes d'eau est relativement pratique. L'eau est introduite dans la chaudière par le biais d'un orifice d'alimentation en eau, et est ensuite pompée à travers les tubes d'eau par une pompe de circulation. Les gaz chauds provenant de la combustion des carburants dans la chambre de combustion passent autour des tubes d'eau, transférant leur chaleur aux tubes et à l'eau à l'intérieur. L'eau chauffée est ensuite recueillie dans un réservoir de vapeur.

### II-3-1-Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement d'une chaudière à tube d'eau dépendent de plusieurs facteurs, notamment :

- **La pression de la vapeur :** La pression de la vapeur produite par une chaudière à tubes d'eau dépend de la température et de la quantité d'eau dans la chaudière. La pression de la vapeur est régulée par une soupape de sécurité qui protège la chaudière contre les surpressions.
- **Le débit de l'eau :** Le débit de l'eau doit être suffisant pour assurer une circulation adéquate de l'eau dans les tubes de la chaudière, ce qui permet de dissiper la chaleur produite par les gaz de combustion et de prévenir les surchauffes.
- **La qualité de l'eau :** La qualité de l'eau utilisée dans une chaudière à tubes d'eau est importante car une eau de mauvaise qualité peut entraîner la formation de dépôts ou de corrosion dans les tubes, ce qui peut réduire l'efficacité de la chaudière et augmenter les coûts de maintenance.
- **La température de l'eau :** La température de l'eau dans une chaudière à tubes d'eau doit être suffisamment élevée pour permettre la production de vapeur, mais pas trop élevée pour éviter l'ébullition de l'eau dans les tubes, ce qui peut endommager les tubes et provoquer une explosion. Les chaudières à tubes d'eau sont souvent conçues pour fonctionner à des températures et des pressions spécifiques en fonction de leur capacité et de leur application.

### II-3-2-But du conditionnement

Il est nécessaire de suivre la qualité de l'eau de la chaudière par des produits chimiques de manière à protéger les équipements et les installations des risques critiques (entartrage, corrosion ...)

## II.4 Problèmes de fonctionnement

### II.4.1 La Chaudière fuit

Une fuite d'eau au niveau de votre chaudière peut avoir plusieurs causes :

- Une pression inadéquate : quand elle est supérieure à la moyenne (2,5 à 3 Bar), la soupape de pression la fait diminuer, mais en créant souvent des fuites.
- Une pièce défectueuse : un élément entartré ou endommagé peut perturber le fonctionnement normal de votre appareil. Cela est souvent dû à l'absence d'entretien périodique.

#### **II.4.2 La chaudière est bruyante**

Ces bruits peuvent avoir différentes origines :

- L'eau circule trop rapidement à l'intérieur.
- Quand le bruit survient au moment d'utiliser l'eau chaude, il peut s'agir d'un problème de pression : les canalisations contiennent de l'air qui gêne l'écoulement de l'eau
- Une combustion mal réglée
- Un dysfonctionnement du groupe de sécurité (vanne de sécurité, soupape...)
- Un entartrage de l'échangeur de chaleur

#### **II.4.3 La chaudière siffle**

Les principales causes d'un sifflement sont :

- Débit d'eau insuffisant
- Soupape de sécurité défectueuse
- Obstruction de la vanne de régulation
- Problème de combustion
- Fuite de vapeur

#### **II.4.4 La chaudière ne démarre pas**

L'échec de la mise en route peut avoir plusieurs origines :

- Des problèmes de pression
- Un brûleur défectueux
- Des fuites dans la tuyauterie
- Un encrassement du conduit d'évacuation
- Une obstruction des tuyaux

- Un dysfonctionnement de l'apport en air
- Une mauvaise combustion

#### **II.4.5 La chaudière s'éteint toute seule**

Cet arrêt automatique indique généralement que le dispositif a détecté un problème de sécurité qui l'amène à stopper son fonctionnement. Parmi les causes possibles, on peut citer :

- Un encrassement ou un refoulement au niveau du conduit d'évacuation
- Un mauvais fonctionnement du brûleur (élément assurant le mélange entre le combustible liquide ou gazeux et l'air) ou du gicleur (dans une chaudière au fioul, cette pièce permet de pulvériser le combustible sous la forme de fines gouttelettes)
- Problèmes avec le système de sécurité. [16]

### **II.5. L'eau d'alimentation de la chaudière**

La source de l'eau d'alimentation dans les chaudières à tube d'eau est généralement l'eau de la mer. Cette dernière nécessite quelque procédé pour rendre l'eau prêt d'être exploitable par la chaudière.

#### **II.5.1 Généralité sur le dessalement**

##### **II.5.1.1 Définition**

Le dessalement est un processus qui consiste à éliminer les sels et les minéraux dissous dans l'eau de mer, l'eau saumâtre ou toute autre source d'eau salée pour produire de l'eau douce potable. Il existe plusieurs techniques de dessalement, notamment l'osmose inverse, l'évaporation à plusieurs effets, la distillation et l'électrodialyse.

##### **II.5.1.2 La qualité de l'eau d'alimentation**

La qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière à tube d'eau est un facteur important à considérer pour le bon fonctionnement de la chaudière. L'eau d'alimentation doit être traitée pour éviter les dépôts de sels minéraux et de matières en suspension qui pourraient endommager les tubes d'eau de la chaudière, notamment :

- **Dureté de l'eau :** La dureté de l'eau, due à la présence de sels de calcium et de magnésium, peut causer la formation de dépôts de tartre dans les tubes de la chaudière. La dureté de l'eau doit être contrôlée et régulée à l'aide de produits chimiques appropriés pour éviter les dépôts.
- **Teneur en oxygène :** La présence d'oxygène dans l'eau peut provoquer la corrosion des tubes de la chaudière. Il est donc important d'éliminer l'oxygène de l'eau d'alimentation en utilisant des équipements tels que des dégazeurs ou des traitements chimiques.
- **Potentiel d'hydrogène :** Le pH de l'eau doit être maintenu à un niveau approprié pour éviter la corrosion des tubes de la chaudière. Le pH doit être régulé à l'aide de produits chimiques appropriés.
- **Teneur en matières en suspension :** Les matières en suspension peuvent obstruer les tubes de la chaudière. Il est donc important de filtrer l'eau pour éliminer les matières en suspension avant son utilisation.
- **Conductivité :** La conductivité de l'eau doit être maintenue à un niveau approprié pour éviter la formation de dépôts de sel dans les tubes de la chaudière. Il est donc important de surveiller la conductivité de l'eau et de réguler son traitement en conséquence.

### II.5.1.3 L'eau de la chaudière

L'unité de dessalement produit l'eau distillé (DT) à partir de l'eau de mer par des divers procédés (l'osmose inverse, évaporation...). Le dessalement permet d'éliminer les sels et les matières en suspension dans l'eau et peut abaisser le pH aussi.

Le DT prend le chemin vers une chaîne de traitement qui a des polishers, ces dernières contiennent des résines anionique et cationique, l'eau passe à travers ces résines pour éliminer les minéraux et certains sels en effet pour abaisser la conductivité.

L'eau obtenue est stockée dans des bacs de stockage et prête à utiliser dans les chaudières.

Pour résumer, le tableau ci-dessous montre les normes de l'eau de la chaudière :

Tableau II.1 : Les normes de l'eau de la chaudière.

	DT	DM	FW	BW
pH	6.5 – 7.5	6.5 – 7.5	7 – 9.5	9.5 – 11.5
Conductivité ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	< 10	< 0.3	0.5 – 5	30 - 150
SiO <sub>2</sub> (ppm)	0 – 0.1	/	0.0 – 0.05	0.01 – 20
T. Fe (ppm)	0 – 0.04	0.002	0.01 – 0.05	0 – 0.15
T. Cu (ppm)	0.01 – 0.03	0 – 0.007	Traces	< 0.05
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	/	/	0.01 – 0.1	/
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (ppm)	/	/	/	5 - 30

## II.6. Encrassement

### II.6.1 Définition d'encrassement

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles. Ces dépôts s'accumulent sur les parois internes des tubes, et peut réduire l'efficacité de la chaudière en réduisant le flux thermique, en augmentant la température des gaz de combustion et en augmentant la pression dans la chaudière. [17]

### II.6.2 Les différents types d'encrassement

#### a. Encrassement particulière

C'est la forme la plus courante de l'encrassement. La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange :

- L'eau de chaudière contenant des produits de corrosion.

- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion.

#### **b. Corrosion :**

La corrosion est un résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre le fluide en écoulement et le métal de la surface d'échange de chaleur permet la production des particules de carbone déposées pour former un dépôt. La corrosion peut se produire en raison des impuretés situés dans le flux des fluides, telles que (l'hydrogène, le soufre et l'ammoniac...). Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent le dépôt, il s'agit là, d'un mécanisme de corrosion, in situ, lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulière.

#### **c. Entartrage**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin (tartre) à partir d'une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies :

- La limite de solubilité doit être dépassée, c'est à dire qu'il y ait saturation : c'est l'aspect thermodynamique
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique.

#### **d. Encrassement biologique**

Il est dû au développement de micro-organismes en contact avec la surface d'échange et qui provoque la formation d'un film, ces organismes sont : les bactéries, champignons et les algues. Il existe des conditions chimiques et physiques dans les échangeurs de chaleur sont favorables à leur développement.

Les hydrocarbures et l'ammoniac renforcent la présence des bactéries, tandis que les algues et les champignons se développent dans la présence des autres facteurs catalyseurs, notamment le soleil, l'humidité, etc.... Le chlore est souvent utilisé comme une mesure préventive car il est considéré comme un biocide toxique à effet rapide pour la plupart des micro-organismes.

**e. Encrassement par réaction chimique**



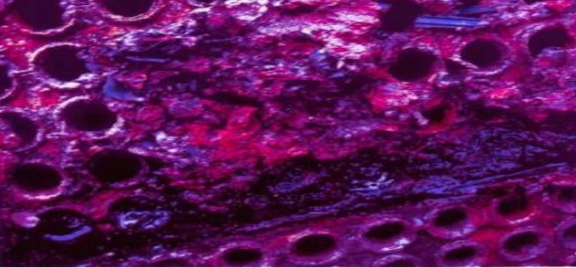

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds).

**f. Encrassement par solidification**

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace ou de givre à l'intérieur des conduites) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d'hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre).[18]

Le tableau (tableau II.2) suivant montre des exemples de forme d'encrassement :

Tableau II.2 : les types d'encrassement. [18]

Encrassement particulaire : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur	
Entartrage	
Dégradation (encrassement sous corrosion)	
Encrassement biologique : Dépôt bactérien	

## II.7 Les problèmes d'encrassement

L'encrassement est un problème courant qui peut affecter de nombreux systèmes et équipements, tels que les moteurs, les filtres, les canalisations, les échangeurs de chaleur et les chaudières. Il est généralement causé par l'accumulation de particules solides, de dépôts de calcaire, de graisse, de rouille ou d'autres matières étrangères à l'intérieur du système ou de l'équipement.

## II.7.1 Notion sur l'encrassement de la chaudière

### II.7.1.1 Encrassement physique

L'encrassement est l'accumulation de matériaux non désirés sur des surfaces solides au détriment de la fonction. Les matériaux d'encrassement peuvent être constitués d'organismes vivants ou d'une substance non vivante (minéraux ou composés organiques). La couche de dépôts représente une résistance supplémentaire au transfert de chaleur et provoque une diminution du taux de transfert de chaleur dans un équipement industriel.[19]



Figure II.4 : l'encrassement tubulaire.[20]

## II.8 Causes principales de l'encrassement

Les causes principales de l'encrassement peuvent varier en fonction du type de chaudière et de son utilisation spécifique. Cependant, voici quelques causes courantes de l'encrassement :

### II.8.1 Caractéristiques des combustibles

Plusieurs caractéristiques des combustibles peuvent contribuer à l'encrassement de la chaudière à tube d'eau, notamment :

- Teneur en cendres : les combustibles contenant une quantité élevée de cendres, telles que le charbon, peuvent produire des résidus solides qui s'accumulent sur les surfaces de la chaudière et entraînent l'encrassement.

- Teneur en soufre : les combustibles contenant une quantité élevée de soufre, tels que le charbon, le fioul et le gaz naturel acide, peuvent produire des gaz de combustion qui réagissent avec l'eau pour former des acides. Ces acides peuvent corroder les surfaces de la chaudière et contribuer à l'encrassement.
- Teneur en humidité : les combustibles contenant une quantité élevée d'humidité, tels que les biomasses et les combustibles de récupération, peuvent produire des dépôts liquides sur les surfaces de la chaudière lorsqu'ils sont brûlés. Ces dépôts peuvent se transformer en dépôts solides qui contribuent à l'encrassement.
- Taille des particules : les combustibles contenant des particules de petite taille, telles que les poussières et les cendres volantes, peuvent se déposer sur les surfaces de la chaudière et contribuer à l'encrassement.

Il est important de noter que la composition chimique du combustible peut varier en fonction de sa provenance et de son traitement, ce qui peut affecter ses caractéristiques d'encrassement. Par conséquent, il est important de choisir des combustibles appropriés et de suivre les recommandations du fabricant de la chaudière en matière de spécifications de combustibles et de procédures d'entretien pour minimiser l'encrassement.

## II.9 Moyennes de lutte contre l'encrassement

### a. Protection contre l'entartrage

Les solutions les couramment appliqués sont :

- Décarbonatations à la chaux
- Décarbonatations sur les résines carboxyliques
- Injection des acides (lessivage)
- Séquestration par polyphosphate
- Adoucissement sur résines échangeuses d'ions.

### b. Le moussage et le primage

#### b.1 Le moussage

Le moussage sont les bulles ou la mousse qui sont créés à la surface de l'eau des chaudières et sortent avec la vapeur, et sont causées par la forte concentration en solide

dans l'eau des chaudières. Cependant, on ne croit généralement que les surfaces spécifiques telles que les semences alcalines, les huiles ; les corps gras, les graisses, certains types de matière organique et les solides suspendus sont particulièrement favorables à la formation de moussage.

En théorie, les solides en suspension se rassemblent sur un film à la surface entourant la bulle de vapeur et la rendent plus dure. Ainsi, la bulle de vapeur résiste à la cassure et s'accumule en mousse. Plus les particules sont fines, meilleur est leur accumulation en bulle.[21]

## **b.2 Le primage**

Le primage est le transfert de grandes quantités en gouttelettes d'eau dans la vapeur, qui baisse le rendement énergétique de la vapeur et entraîne des dépôts des cristaux de sels sur les surchauffeurs et dans les turbines. Le primage peut être causé par une mauvaise construction de la chaudière, des régimes excessifs, ou des fluctuations soudaines en demande de vapeur. Le primage est parfois aggravé par les impuretés dans l'eau des chaudières.[22]

## **b.3 Protection contre le moussage et le primage**

Il existe plusieurs mesures que vous pouvez prendre pour prévenir le moussage et le primage dans une chaudière à tubes d'eau. En voici quelques-unes :

- Assurez-vous que le niveau d'eau de la chaudière est correctement contrôlé. Un niveau d'eau trop bas peut entraîner le moussage, tandis qu'un niveau d'eau trop élevé peut causer le primage.
- Utilisez un produit anti-moussant pour aider à prévenir le moussage. Ces produits peuvent être ajoutés directement à l'eau de la chaudière.
- Assurez-vous que les tubes de la chaudière sont propres et exempts de dépôts de calcium ou d'autres substances qui pourraient favoriser le moussage ou le primage.
- Vérifiez régulièrement la qualité de l'eau utilisée dans la chaudière. L'eau doit être traitée pour éliminer les contaminants qui pourraient causer des problèmes.
- Assurez-vous que la chaudière est correctement entretenue et que tous les composants sont en bon état de fonctionnement.

En prenant ces mesures, vous pouvez aider à prévenir le moussage et le primage dans une chaudière à tubes d'eau. Cependant, il est important de consulter un professionnel si vous rencontrez des problèmes avec votre chaudière.

### c. Protection contre la corrosion

Les méthodes de lutte contre la corrosion, les plus utilisées sont :

- La protection active : protection cathodique et anodique
- L'emploi d'inhibiteur de corrosion
- La protection passive par revêtement
- La protection par modification du milieu

## II.10 Paramètres influençant à l'encrassement

L'encrassement dans une chaudière à tube d'eau est un problème courant qui peut réduire l'efficacité de la chaudière et augmenter les coûts de maintenance. Plusieurs facteurs peuvent influencer l'encrassement dans une chaudière à tube d'eau, notamment [23] :

### ➤ La vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation

La vitesse d'écoulement a une influence très importante sur la formation du dépôt sur une paroi. L'augmentation de cette dernière, due au débit élevé du fluide, fait décroître la résistance d'encrassement. D'autre part, pour une faible température de surface, l'augmentation de la vitesse d'écoulement est une méthode efficace pour réduire le phénomène d'encrassement des équipements thermique.

### ➤ Température de la surface d'échange de chaleur

La température de la surface d'échange est aussi un paramètre très important, car la déposition des particules solides sur une surface d'échange est favorisée lorsque la température est élevée, d'où la formation d'un encrassement plus rapide et plus sévère. Les travaux d'Oufer relatifs à l'encrassement par réaction chimique, la variation de la vitesse d'écoulement par rapport à la température obéit à la loi d'Arrhenius. La vitesse d'encrassement est liée à la constante de vitesse de la réaction chimique qui, elle-même, est fonction de la température.

### ➤ Concentration du précurseur

Plus la concentration du précurseur est élevée, plus la formation du dépôt est grande pour l'encrassement particulaire. Dans une autre étude, il a été trouvé qu'à température

élevée et à faible vitesse, les concentrations élevées du styrène augmentent les vitesses d'encrassement par le polystyrène formé.

➤ **Présence de l'oxygène et du soufre**

Selon les études réalisées par Oufier sur polymérisation du styrène sur les jets fuel, la formation du dépôt par réaction chimique est favorisée par la présence de l'oxygène et du soufre dans la charge d'alimentation.

➤ **Nature et matériaux de construction de la surface**

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser l'initiation de l'encrassement. Le dépôt formé par la suite modifie cette rugosité. D'où un bon choix des matériaux de construction devra éviter l'encrassement par corrosion.

## ***Chapitre III***

### ***Partie expérimentale***

### III.1 Introduction

L'encrassement est parmi les problèmes majeurs critiques dans l'industrie pétrochimique, pour cela dans ce chapitre nous allons effectuer un protocole de nettoyage des différents types de produits préparés au niveau de laboratoire, pour éliminer les dépôts d'encrassement et de tartre présentant au niveau des échantillons. Cette étude est une simulation d'un procédé industriel qui mène aux problèmes d'encrassement dans les chaudières.

### III.2 Méthodologie de l'étude

Le travail sera réalisé par :

➤ **Contrôle du paramètres suivants**

Paramètres donnés :

- La température de nettoyage (T) :30°C
- La concentration des solutions chimique (C).

Paramètres mesurés :

- La perte de masse des dépôts (m).

➤ **La proposition d'un procédé de nettoyage**

- Réalisation d'un protocole de nettoyage chimique au niveau de laboratoire
- Résultats concernant chaque échantillon choisi
- Discussion les résultats obtenus.

### III.3. Méthodes et matériaux

#### III.3.1. Les méthodes de nettoyage

La méthode de nettoyage chimique implique l'utilisation d'une solution alcaline forte (hydroxyde de sodium, NaOH) et d'un acide fort (acide chlorhydrique, HCl), ainsi que d'acide acétique (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>). Des concentrations et des températures spécifiques sont respectées selon l'approche gravimétrique (méthode de perte de masse), qui consiste à déterminer la masse d'un produit formé ou éliminé par pesée. Cette méthode suit également les principes de la technique de nettoyage en place (NEP).

### III.3.1.1. Méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique est une technique d'analyse chimique quantitative utilisée pour déterminer la quantité d'une substance présente dans un échantillon. Elle repose sur la mesure de la masse d'un produit formé ou éliminé lors d'une réaction chimique. Dans cette méthode, des réactifs spécifiques sont utilisés pour réagir avec la substance cible et former un produit solide. Ce produit est ensuite isolé, purifié et pesé avec précision. La différence de masse avant et après la réaction permet de calculer la quantité de la substance présente dans l'échantillon d'origine.[24]

### III.3.1.2. Méthode de nettoyage en place (NEP)

Le NEP est un procédé de nettoyage automatique d'installations de traitement et de production. Cette méthode de nettoyage industriel aussi appelée CIP, Clean in Place en anglais, est intégrée dans les équipements lors de leur conception. Sans démontage, l'ensemble de l'unité de process est lavé en continu ou par cycles. Cette solution de nettoyage industriel permet d'éviter l'arrêt de la production du site en respectant les protocoles d'hygiène et de qualité.

Selon l'objet traité, son degré de contamination et le secteur d'activité, le NEP ou CIP peut différer légèrement. Un processus de nettoyage complet possède 8 étapes :

1. Rinçage initial pour l'évacuation des résidus solides.
2. Nettoyage avec un produit alcalin.
3. Rinçage à l'eau claire pour l'évacuation de la solution nettoyante.
4. Rinçage avec un acide afin d'éliminer le calcaire.
5. Rinçage à l'eau claire.
6. Séchage.
7. Remplissage des équipements avec un produit de désinfection antimicrobien.
8. Rinçage à l'eau claire pour l'élimination du produit.[25]

### III.3.2. Matériaux utilisés

Les matériaux nécessaires pour les essais de nettoyage chimique dans le cadre de cette étude ont été préparés avec soin en termes de qualité et de quantité.

### III.3.2.1. Préparation des échantillons

#### ➤ Choix des plaques

**L'acier C-1020 :** Acier AISI 1020 est un acier au carbone à faible trempabilité et à faible résistance à la traction qui a une valeur nominale de 0,22%C et 0,55%Mn. Il a une excellente soudabilité, une bonne usinabilité et une ductilité élevée avec une dureté Brinell de 119 à 235 et une résistance à la traction de 410 à 790 MPa. Il est normalement utilisé à l'état tourné et poli ou étiré à froid. En raison de sa faible teneur en carbone, il résiste au durcissement par induction ou au durcissement à la flamme.[26]



Figure III.1 : Echantillons de L'acier C-1020.

#### ➤ Propriété mécanique d'acier 1020 :

Tableau III.1 : Propriété mécanique d'acier C-1020.[26]

Résistance à la traction (ultime)	Dureté Rockwell B	Allongement	Réduction de surface	Module de cisaillement
394,72 MPa	64	36.5% dans environ 50 mm	66.00%	80,0 GPa

#### ➤ Composition chimique (%) de l'acier C-1020 :

Tableau III.2 Composition chimique de l'acier C-1020.[26]

Élément ou substance	Contenu (%)
Carbone (C)	0,17 à 0,230
Fer (Fe)	99,08 à 99,53
Manganèse (Mn)	0,30 à 0,60
Phosphore (P)	0.040
Soufre (S)	0.050

➤ **Polissage des échantillons :**

Nous avons effectué cette étape de polissage afin d'éliminer la couche de rouille ainsi que les impuretés, et de rendre la surface des échantillons homogène. Ensuite, nous avons fait un rinçage avec l'eau distillée pour éliminer complètement les traces d'impuretés, suivi d'un séchage à l'aide d'un chiffon sans frottement.



Figure III.2 : Les échantillons après le polissage.

Dans cette étape nous avons utilisé la polisseuse et leur principal élément est le papier verre, généralement le papier verre de numéro : 80-120-200-400-1200.

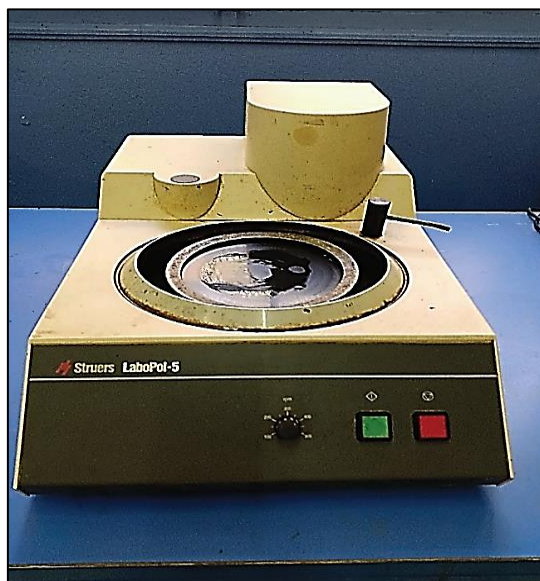


Figure III.3 : La polisseuse.

#### ➤ Pesage des échantillons

Nous avons utilisé une balance électronique pour déterminer la masse exacte de chaque échantillon.



Figure III.4 : Balance électronique.

#### III.3.2.2. Produits d'entartrage

##### ➤ Préparation du tartre

Nous avons utilisé le bicarbonate de soude ( $\text{NaHCO}_3$ ) ainsi que le sel de chlorure de calcium dihydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) pour préparer la pâte du tartre (carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) avec l'eau afin de former une couche dure sur nos échantillons.

- $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : Chlorure de calcium dihydrate.

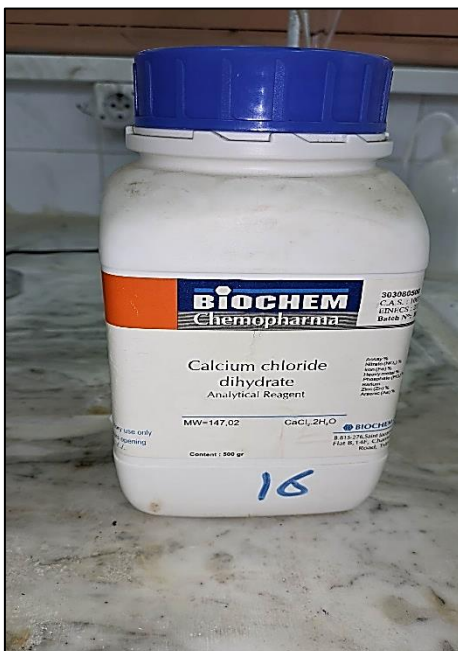


Figure III.5 : Chlorure de calcium dihydrate.

À température ambiante, il se présente sous forme de cristaux solides, anhydre, très déliquescent et soluble dans l'eau.

Caractéristiques principales :

Tableau III.3 : Caractéristiques principales de chlorure de calcium dihydrate.

Caractéristiques	Produit (Anhydre)
Masse molaire	147.015 g/mol
Point de fusion	176°C
Densité	1.850 g/cm <sup>3</sup>

- $\text{NaHCO}_3$  : Bicarbonate de sodium.

Formule chimique :  $\text{NaHCO}_3$ .

(Na = 27,37 %, C = 14,3 %, H = 1,2 %).

Masse molaire =  $84,0066 \pm 0,0018 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

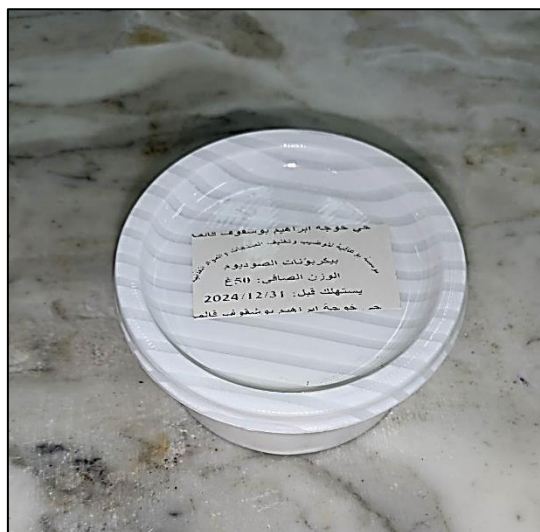


Figure III.6 : Bicarbonate de sodium.

Le bicarbonate de soude est une poudre minérale composée de petits cristaux blancs.

Caractéristiques principales :

Tableau III.4 : Caractéristiques principales de bicarbonate de sodium.

Caractéristiques	Produit anhydre (20°C)
% NaHCO <sub>3</sub>	97 à 99%
Masse volumique	2220 kg/m <sup>3</sup>
Fusion	50°C (décomposition)
Solubilité maximum	96 g/l

#### ➤ Description de la préparation du tartre

Pour la préparation du tartre, nous avons mélangé du chlorure de calcium dihydrate (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) avec le bicarbonate de soude (NaHCO<sub>3</sub>) dans un bécher, puis nous avons ajouté l'eau du robinet avec l'échantillon, après nous avons mis le mélange sur une plaque chauffante à une température spécifique pendant quelques minutes.

Enfin, nous avons obtenu un échantillon avec des dépôts de calcaire sous forme de pâte. Finalement nous avons couvert l'échantillon avec le reste de la pâte obtenu et laissons-la pour le séchage.

### ➤ La formation du tartre

Le tartre se forme selon l'équation suivante :



Figure III.7 : des échantillons entartrés.

### III.3.2.3. Produits d'encrassement

#### a) Les huiles d'encrassement

Nous avons utilisé les huiles lubrifiantes qui sont utilisés dans les industries, les automobiles et la lubrification de différentes pièces mécaniques composant un moteur, parce qu'ils sont servis à limiter l'échauffement en diminuant le coefficient de frottement et lutter contre la corrosion avec un indice de viscosité (120-170) (120-140 pour 10w40 et 155-175 pour 5w40) et un point d'écoulement 40°C et un point d'éclair (200-240°C)

Nous avons utilisé 3 types des huiles pour faire l'encrasse (CASTROL 10W40, NAFTAL 10W40, LIQUI MOLY 5W40) qu'ils ont presque les mêmes caractéristiques et différences qualités.

#### b) Les peintures

Une peinture est un revêtement liquide composé de pigments colorés mélangés à un liant et éventuellement à d'autres additifs. Elle est appliquée sur différentes surfaces pour des raisons esthétiques, de protection ou fonctionnelles.

Pour essayer l'efficacité des peintures nous avons créé 2 types différents de revêtements sur la surface extérieure de nos échantillons qui sont :

- 1) **Revêtement organique alimentaire transparent** : ce type de peinture est généralement utilisé à l'intérieur des boîtes de conserve pour prévenir tout contact direct entre les aliments et le métal, évitant ainsi la corrosion et la contamination des aliments



**Figure III.8** : Peinture organique alimentaire.

- 2) **Revêtement organique non alimentaire (peinture à base d'eau)**

Les peintures à base d'eau sont respectueuses de l'environnement et peuvent être utilisées pour décorer les boîtes de conserve. Elles sont souvent préférées en raison de leur faible teneur en composés organiques volatils (COV) et une bonne adhérence et durabilité.



**Figure III.9** : Peinture organique non alimentaire.

### III.4. Procédés de nettoyage

#### ➤ Choix des solutions

- La soude caustique (NaOH)

La soude caustique, également connue sous le nom d'hydroxyde de sodium (NaOH), est une base puissante qui se trouve sous forme solide à température ambiante. Elle est composée de cations sodium ( $\text{Na}^+$ ) et d'anions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) et est hautement soluble dans l'eau. Sa forme la plus courante est en solution aqueuse, appelée soude, qui est transparente, visqueuse et encore plus corrosive que l'hydroxyde de sodium pur en raison de sa nature mouillante.

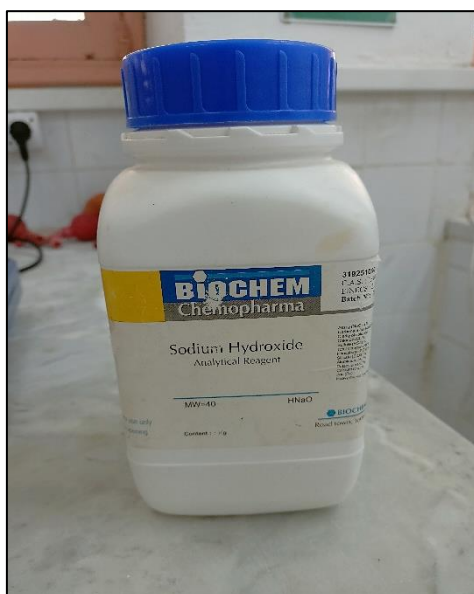


Figure III.10 : L'hydroxyde de sodium.

- L'acide chlorhydrique (HCl)

L'acide chlorhydrique, ou la solution d'acide chlorhydrique (chlorure d'hydrogène dissous dans l'eau), est un acide minéral fort. Il se présente sous une forme incolore. Il est largement utilisé comme réactif dans l'industrie chimique.

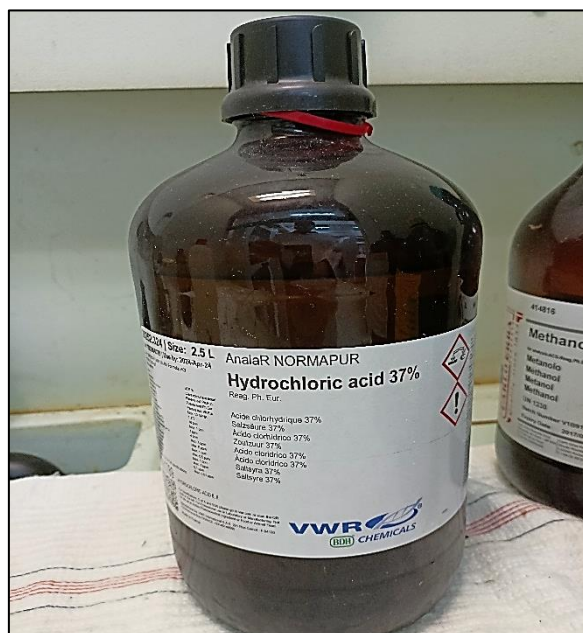


Figure III.11 : Acide chlorhydrique.

- L'acide acétique  $C_2H_4O_2$

L'acide acétique, également connu sous le nom d'acide éthanoïque, est un acide organique présent dans le vinaigre et de nombreux autres produits. Il a une odeur piquante et il est soluble dans l'eau. L'acide acétique est largement utilisé dans l'industrie des aliments, pharmaceutique...

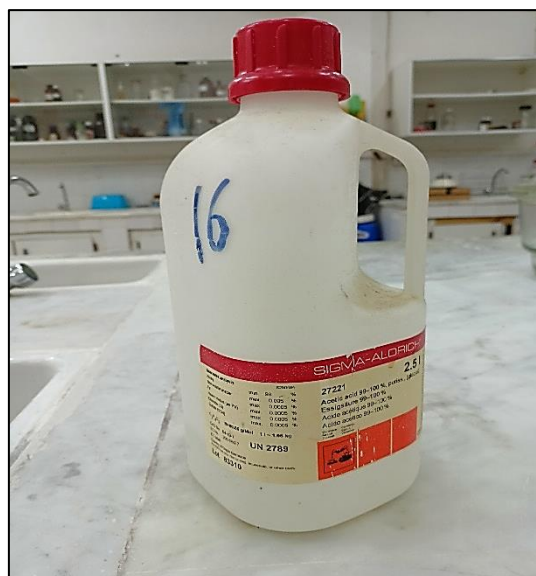


Figure III.12 : Acide acétique.

### III.5. Procédure expérimentale

#### III.5.1. L'entartrage

- Nous avons pesé 4g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 4g de  $\text{NaHCO}_3$ .
- Dans un bécher nous avons mélangé tous les substances ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec  $\text{NaHCO}_3$ ) avec 30 ml d'eau de robinet



Figure III.13 : pesage 2 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 2 g de  $\text{NaHCO}_3$ .

- Nous avons immergé l'échantillon dans le mélange puis mis le bécher sur une plaque chauffante à température environ de 200-300 C jusqu'à la formation d'une pâte de tartre



Figure III.14 : Le mélange pendant la formation du tartre.

- Après la formation du dépôt sur l'échantillon nous avons laissé-la pour le séchage pendant 5-7 jours.



**Figure III.15 :** Les échantillons après le séchage du tartre.

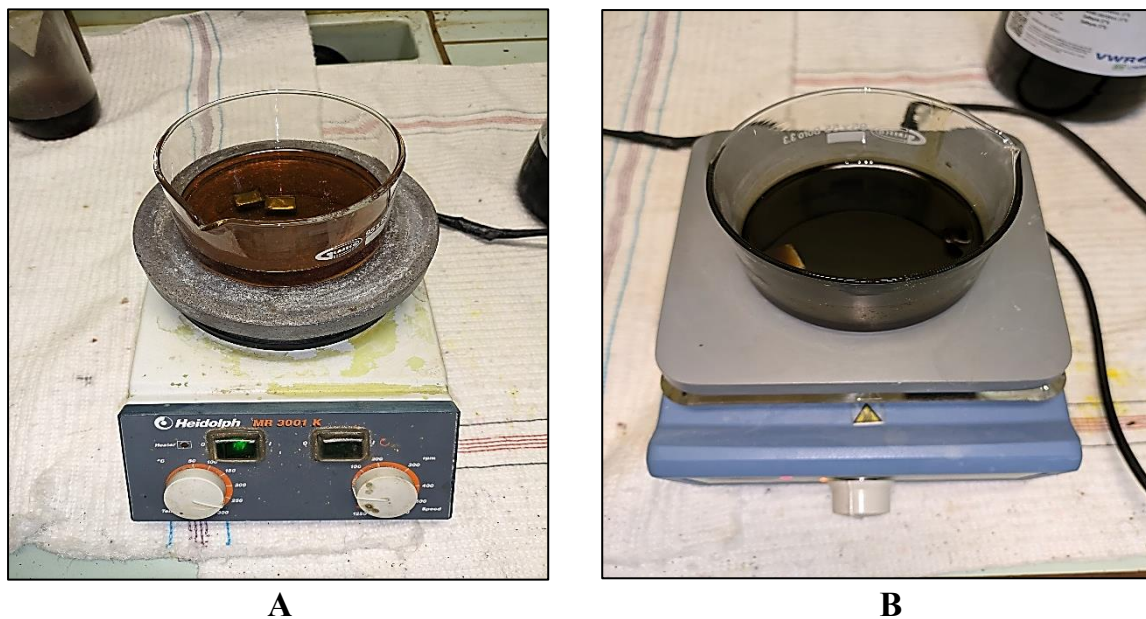
- Après le séchage nous avons pesé l'échantillon entartré.



**Figure III.16 :** Pesage d'échantillons.

### III.5.2. L'encrassement

- Nous avons pris 3 cristallisoirs puis ajouté à chacun un échantillon ainsi qu'une quantité d'huile différente (CASTROL 10W40, NAFTAL 10W40, LIQUIMOLY 5W40).
- Nous avons mis les cristallisoirs sur des plaques chauffantes à haute température (environ de 250-300°C) jusqu'à le changement de la couleur de chaque huile.



**Figure III.17 :** Avant (A) et après (B) l'échauffement des huiles.

- Après un certain temps nous avons observé une couche d'encrasse formé sur chaque échantillon.
- Nous avons laissé les échantillons pour le séchage pendant 5-7 jours



**Figure III.18 :** Les échantillons après la formation d'encrasse.

### III.5.3. La peinture

- Nous avons pris les deux échantillons et mis la première dans la peinture organique alimentaire transparente et l'autre dans la peinture organique non alimentaire (peinture à base d'eau jusqu'à l'obtention des échantillons complètement recouverts de peinture.

- Nous laissons les échantillons 2 jours pour le séchage.



**Figure III.19 :** Echantillons teintés.

- Après le séchage nous avons fait le tartre pour notre échantillons (la même procédure que nous avons fait déjà) puis laissé les échantillons pour le séchage pendant 5-7 jours



**Figure III.20 :** Echantillons teintés et entartrés.

- A la fin de cette étape nous avons pesé nos échantillons.

### III.6. Préparation des solutions

- **La soude NaOH**

Nous avons préparé 4 solutions de la soude de différente concentration à partir de la loi :

$$V_1 \longrightarrow m_2 \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow C_1$$

**1. solution de concentration 1% de NaOH**

$$\begin{array}{l} 250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\% \\ \qquad \qquad \qquad m_1 \longrightarrow 1\% \end{array}$$

$$m_1 = 2,5\text{g}$$

**2. solution de concentration 2% de NaOH**

$$\begin{array}{l} 250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\% \\ \qquad \qquad \qquad m_1 \longrightarrow 2\% \end{array}$$

$$m_1 = 5\text{g}$$

**3. solution de concentration 3% de NaOH**

$$\begin{array}{l} 250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\% \\ \qquad \qquad \qquad m_1 \longrightarrow 3\% \end{array}$$

$$m_1 = 7,5\text{g}$$

**4. solution de concentration 5% de NaOH**

$$\begin{array}{l} 250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\% \\ \qquad \qquad \qquad m_1 \longrightarrow 5\% \end{array}$$

$$m_1 = 12,5\text{g}$$

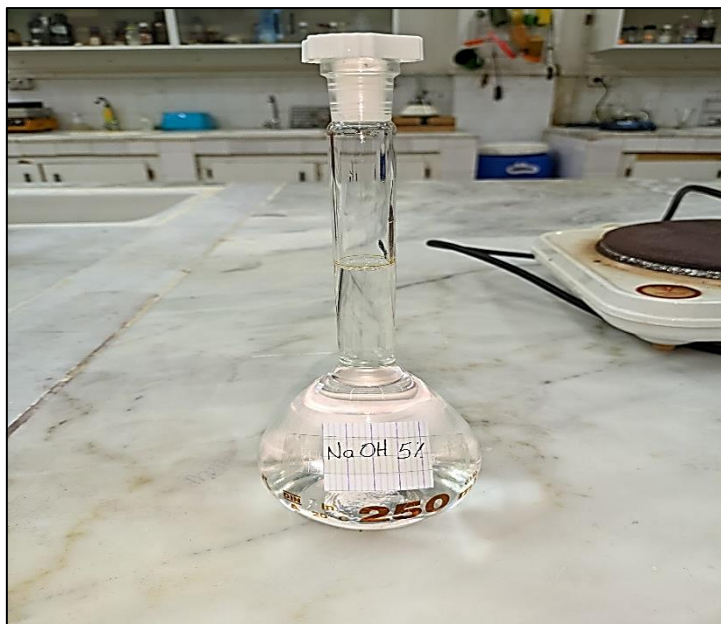


Figure III.21 : Solution aqueuse de NaOH (5%).

- **L'acide chlorhydrique HCl**

Nous avons préparé six solutions d'acide chlorhydrique (HCl) de concentrations différentes. Afin de déterminer la concentration en HCl, nous avons calculé le volume de chaque solution en utilisant les lois suivantes :

$$C_1V_1 = C_2V_2 \longrightarrow V_1 = C_2V_2 / C_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$C = 10 \text{ Pd} / \text{M} \dots\dots\dots (2)$$

D'après (1) et (2) on peut déduire la loi finale du volume :

$$V_1 = \frac{P_1}{P_2} * V_2$$

**1. solution de concentration 0,25 % d'HCl :**

$$V_1 = \frac{0.25}{37} * 250$$

$$V_1 = 1.69 \text{ ml}$$

**2. solution de concentration 0,5 % d'HCl :**

$$V_1 = \frac{0.5}{37} * 250$$

$$V_1 = 3.38 \text{ ml}$$

**3. solution de concentration 0,75 % d'HCl :**

$$V_1 = \frac{0.75}{37} * 250$$

$$V_1 = 5.07 \text{ ml}$$

**4. solution de concentration 1 % d'HCl :**

$$V_1 = \frac{1}{37} * 250$$

$$V_1 = 6.75 \text{ ml}$$

**5. solution de concentration 3 % d'HCl :**

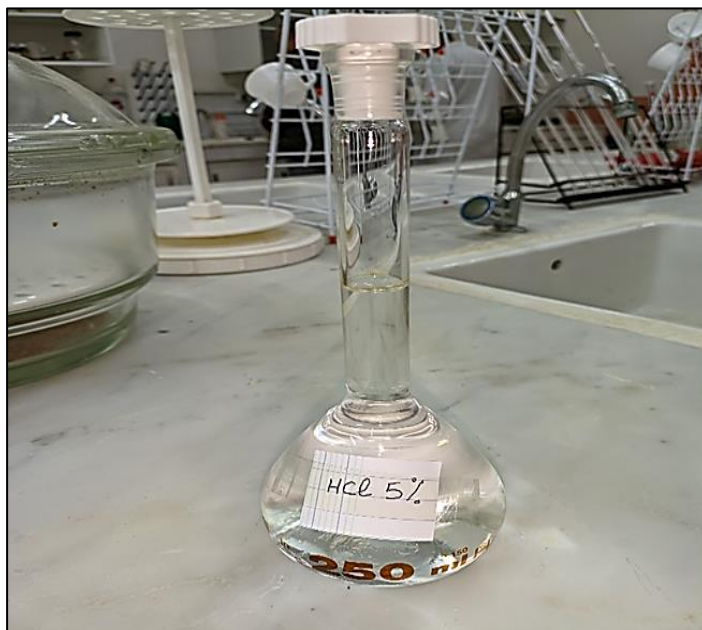
$$V_1 = \frac{3}{37} * 250$$

$$V_1 = 10.13 \text{ ml}$$

**6. solution de concentration 5 % d'HCl :**

$$V_1 = \frac{5}{37} * 250$$

$$V_1 = 33.78 \text{ ml}$$



**Figure III.21 :** Solution aqueuse de HCl (5%).

- **L'acide acétique C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>**

Trois solutions d'acide acétique (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) de concentrations différentes ont été préparées. Afin d'obtenir une concentration spécifique de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, le volume de chaque solution a été calculé en utilisant les lois suivantes :

$$V_1 = \frac{P_1}{P_2} * V_2$$

**1. solution de concentration 0,5 % de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>**

$$V1 = \frac{0.5}{99.9} * 250$$

$$V1 = 1,3 \text{ ml}$$

**2. solution de concentration 1 % de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>**

$$V1 = \frac{1}{99.9} * 250$$

$$V1 = 2,50 \text{ ml}$$

**3. solution de concentration 3 % de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>**

$$V1 = \frac{3}{99.9} * 250$$

$$V1 = 6 \text{ ml}$$



**Figure III.22 :** Solution aqueuse de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> (3%).

### III.7. Protocole de nettoyage chimique :

Nous avons suivi les protocoles suivants au niveau de laboratoire :

➤ **Protocoles de nettoyage d'encrasse :**

• **Protocole 01 :**

- Nous avons pris les échantillons encrassés avec des huiles et effectué le nettoyage en utilisant des solutions acides HCl d'un volume de 30 ml et à une température de 30°C.
- Chaque 3 minutes, nous avons prélevé les échantillons et les avons placés dans des solutions de NaOH pour les neutraliser, puis nous avons mesuré leur masse.
- Les solutions de nettoyage étaient de différentes concentrations.
- Nous avons répété cette procédure jusqu'à ce que le nettoyage soit terminé.

**Tableau III .5 :** Différents concentration des expériences.

Echantillon	HCl (%)	NaOH (%)
1EM, 2EM, 3EM	De 0.25% jusqu'à 5%	De 1% jusqu'à 5%



**Figure III.23 :** protocole de nettoyage d'encrassement

- **Protocole 02**

Nous avons appliqué le même protocole 1, mais nous avons remplacé l'acide chlorhydrique par l'acide acétique.

**Tableau III .6 :** Différents concentration des expériences.

Echantillon	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (%)	NaOH (%)
4EM, 5EM, 6EM	De 0.5% jusqu'à 3%	De 1% jusqu'à 3%



**Figure III.24 :** protocole de nettoyage d'encrassement

➤ **Protocoles de nettoyage du tartre :**

- **Protocole 01**

- Nous avons pris les échantillons entartrés et mis chacune dans un bécher contenant 30 ml de la solution aqueuse d'HCl de différentes concentrations et une température constante 30°C
- Puis, nous avons prélevé les échantillons chaque 3 min pour mesurer leurs masses.
-

**Tableau III .7** : Différents concentration des expériences. (Echantillon 1TR, 2TR, 3TR)

Echantillon	HCl (%)
1TR	0.5
2TR	0.75
3TR	1



**Figure III.25** : protocole de nettoyage d'entartrage.

- **Protocole 02**

- Nous avons placé l'échantillon dans un bécher contenant 30 ml de solution basique de NaOH à une concentration de 0,5 % et une température de 30°C. Nous avons ensuite mesuré sa masse toutes les 3 minutes pendant une durée de 12 minutes.
- Ensuite, nous avons transféré l'échantillon dans une autre solution aqueuse de  $C_2H_4O_2$  à une concentration de 0,5 %, une température de 30°C et un volume de 30 ml.
- Puis nous avons suivi la diminution de sa masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

**Tableau III .8 :** Différents concentration des expériences. (Echantillon 9TR)

Echantillon	NaOH (%)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (%)
9TR	0.5	0.5

- **Protocole 03**

- Nous avons placé les échantillons entartrés dans un bécher contenant 30 ml de solution basique de NaOH.
- Nous avons effectué le nettoyage en utilisant des solutions de NaOH de différentes concentrations, à une température de 30°C, pendant 12 minutes. Toutes les 3 minutes, nous avons prélevé des échantillons pour mesurer leur masse.
- Ensuite, nous avons transféré les échantillons dans une autre solution aqueuse d'HCl, avec une concentration de 0,25 %, une température de 30°C et un volume de 30 ml. Nous avons suivi la diminution de leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

**Tableau III .9 :** Différents concentration des expériences. (Echantillon 7,8)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
7TR	1	0.25
8TR	2	0.25

**Figure III.26 :** Nettoyage d'échantillons entartrés.

- **Protocole 04**

Nous avons préparé deux solutions aqueuses :

- La première solution contenait un mélange de NaOH (0,5%) d'un volume de 15 ml avec une solution de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> (0,5%) d'un volume de 15 ml.
- La deuxième solution contenait un mélange de NaOH (0,5%) d'un volume de 15 ml avec une solution de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> (1%) d'un volume de 15 ml.
- Nous avons placé les échantillons dans les deux solutions à une température de 30°C, et toutes les 3 minutes, nous les avons prélevés pour mesurer leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

**Tableau III .10** : Différents concentration des expériences. (Echantillon 4TR,10TR)

Echantillon	NaOH (%)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (%)
4TR	0.5	1
10TR	0.5	0.5

- **Protocole 05**

Nous avons préparé deux solutions aqueuses :

- La première solution contenait un mélange de HCl (0,5%) d'un volume de 15 ml avec une solution de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> (0,5%) d'un volume de 15 ml.
- La deuxième solution contenait un mélange de HCl (0,5%) d'un volume de 15 ml avec une solution de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> (1%) d'un volume de 15 ml.
- Nous avons placé les échantillons dans les deux solutions à une température de 30°C, et toutes les 3 minutes, nous les avons prélevés pour mesurer leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

**Tableau III .11** : Différents concentration des expériences. (Echantillon 5TR,6TR)

Echantillon	HCl (%)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (%)
6TR	0.5	1
5TR	0.5	0.5

- **Protocole 06 :**

Nous avons mélangé deux solutions aqueuses :

$C_2H_4O_2$  (1%) d'un volume de 15 ml avec HCl (1%) d'un volume de 15 ml. Ensuite, nous avons placé les échantillons peinturés et entartés dans deux béchers contenant ce mélange, à une température de 30°C. Toutes les 3 minutes, nous les avons prélevés pour mesurer leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

**Tableau III .12 :** Différents concentration des expériences. (Echantillon 11TR,12TR)

Echantillon	$C_2H_4O_2$ (%)	HCl (%)
11TR, 12TR	1	1



**Figure III.27 :** Nettoyage d'échantillons entartés.

## ***Chapitre IV***

### ***Résultats et discussions***

## Introduction

Le nettoyage des différents dépôts et formations de tartre présents à la surface extérieure des échantillons d'acier C-1020 a été réalisé en utilisant la méthode gravimétrique, comme décrit dans le chapitre précédent. Cette méthode permet de mesurer la variation de masse résultant d'une réaction chimique due à l'influence de la concentration des différents produits utilisés. Les résultats obtenus ont été présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

### IV.1 Résultats et discussions de la méthode gravimétrique :

#### IV.1.1 Résultats et discussions de nettoyage d'encrasse :

- **Protocole 01**

Les taux d'encrassements obtenus sont donnés dans le tableau 1,2 et 3.

**Tableau IV.1** : Taux d'encrassement d'échantillon 1EM (huile de NAFTAL)

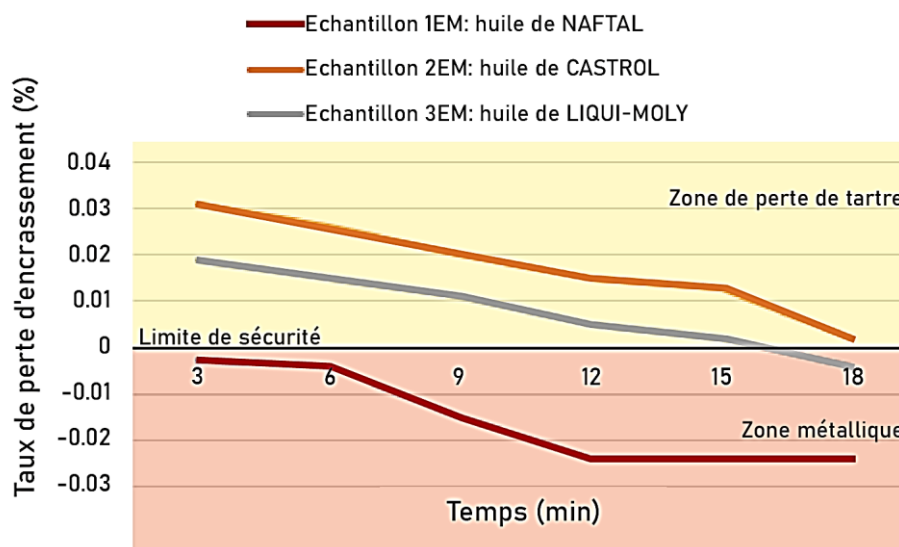
Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	Solution de nettoyage (HCL) %	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
1EM	6.4935	6.4941	0	0	6.4941	0.009
			0.25	3	6.4933	-0.003
			0.5	6	6.4932	-0.004
			0.75	9	6.4925	-0.015
			1	12	6.4919	-0.024
			3	15	6.4919	-0.024
			5	18	6.4919	-0.024

**Tableau IV.2** : Taux d'encrassement d'échantillon 2EM (huile de CASTROL)

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	Solution de Nettoyage (HCL)%	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
2EM	18.5351	18.5421	0	0	18.5421	0.037
			0.25	3	18.5409	0.031
			0.5	6	18.5401	0.026
			0.75	9	18.5389	0.020
			1	12	18.5380	0.015
			3	15	18.5376	0.013
			5	18	18.5355	0.002

**Tableau IV.3 :** Taux d'encrassement d'échantillon 3EM (huile de LIQUI MOLY)

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	Solution de nettoyage (HCL) %	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
3EM	16.7450	16.7495	0	0	16.7495	0.026
			0.25	3	16.7482	0.019
			0.5	6	16.7476	0.015
			0.75	9	16.7469	0.011
			1	12	16.7459	0.005
			3	15	16.7455	0.002
			5	18	16.7443	-0.004

**Figure IV.1 :** Taux d'encrassement des échantillons 1EM, 2EM, 3EM en fonction de temps.

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'encrassement d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'encrassement est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal.

En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'encrassement du système au fil du temps. Avant le nettoyage, le taux de perte d'encrassement est relativement élevé, ce qui

indique une accumulation significative de dépôts d'huiles et de saletés dans nos échantillons (1EM, 2EM, 3EM). Cependant, pendant le nettoyage, nous constatons une diminution progressive du taux de perte d'encrassement. Cette diminution est attribuée aux mesures prises pour nettoyer et éliminer les dépôts d'huiles. Ces mesures comprennent l'utilisation de différentes concentrations d'acide HCl (de 0.25 à 5 % en fonction du temps).

En examinant de plus près les graphiques, nous constatons que le taux de perte d'encrassement de l'échantillon 1EM affiche des valeurs négatives et que son graphique se situe dans la zone métallique, ce qui signifie que l'encrassement d'huile NAFTAL a disparu au début du nettoyage (0,25 % d'HCl) et que le métal a perdu de la masse. En revanche, l'échantillon 2EM présente des valeurs positives de taux de perte d'encrassement, et son graphique se situe dans la zone de perte d'encrassement, ce qui indique que l'encrassement disparaît progressivement avec l'augmentation de la concentration d'HCl. Finalement, le taux de perte d'encrassement de l'échantillon 3EM affiche des valeurs positives pendant le nettoyage, de 3 minutes à 15 minutes, ce qui indique que les concentrations utilisées sont efficaces. Cependant, après l'utilisation de l'HCl à 5 % (de 15 à 18 minutes), nous constatons une diminution du taux de perte d'encrassement en dessous du seuil de sécurité, c'est-à-dire que le métal a perdu de la masse.

En conclusion, ce graphique met en évidence la diminution progressive du taux de perte d'encrassement d'un système au fil du temps. Il souligne l'efficacité des mesures de nettoyage pour réduire l'accumulation de dépôts d'huiles et de saletés et maintenir les performances optimales du système.

- **Protocole 02**

Les taux d'encrassements d'échantillons nettoyées par l'acide acétique (tableau 4,5,6).

Tableau IV.4 : Taux d'encrassement d'échantillon 4EM (l'huile de NAFTAL)

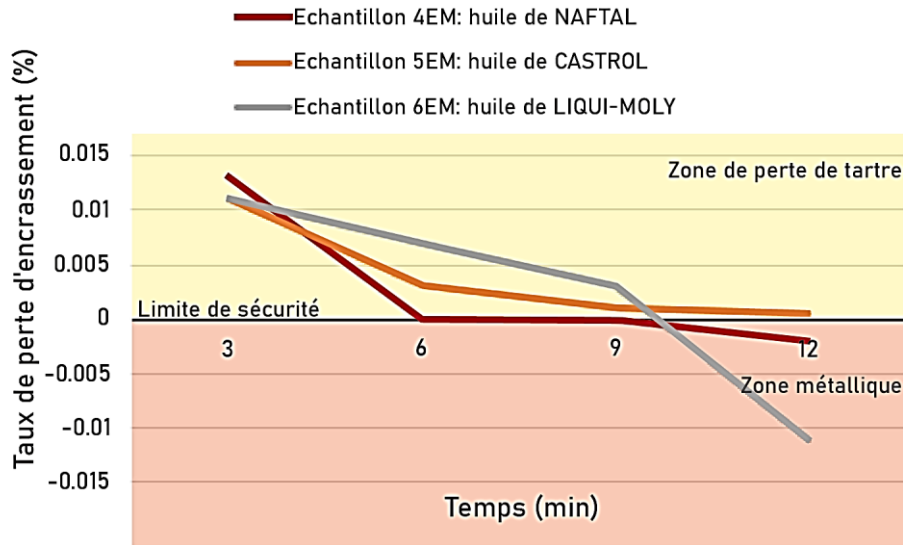
Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	Solution de nettoyage (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) %	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
4EM	6.7725	6.7734	0	0	6.7734	0.013
			0.5	3	6.7725	0
			1	6	6.7725	0
			3	9	6.7723	-0.002

Tableau IV.5 : Taux d'encrassement d'échantillon 5EM (l'huile de CASTROL)

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	Solution de nettoyage (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) %	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
5EM	14.5178	14.5194	0	0	14.5194	0.011
			0.5	3	14.5183	0.003
			1	6	14.5180	0.001
			3	9	14.5179	0.0006

Tableau IV.6 : Taux d'encrassement d'échantillon 6EM (l'huile de Liqui-Moly)

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'encrassement (g)	% Solution de nettoyage (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )	Temps (min)	Masse après traitement	Taux de perte d'encrassement (%)
6EM	16.9816	16.9836	0	0	16.9836	0.011
			0.5	3	16.9829	0.007
			1	6	16.9822	0.003
			3	9	16.9817	-0.011



**Figure IV.2** : Taux d'encrassement des échantillons 4EM, 5EM, 6EM en fonction de temps.

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'encrassement d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'encrassement est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal.

En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'encrassement du système au fil du temps. En examinant de plus près les graphiques, nous constatons que le taux de perte d'encrassement des échantillons 4EM et 6EM affiche des valeurs positives pendant le nettoyage, de 3 minutes à 6 minutes, ce qui indique que les concentrations utilisées d'acide acétique ( $C_2H_4O_2$ ) sont efficaces. Cependant, après l'utilisation de l'acide acétique à 3 % (de 6 à 9 minutes), nous constatons une diminution du taux de perte d'encrassement en dessous du seuil de sécurité, c'est-à-dire que le métal a perdu de la masse. En revanche, l'échantillon 5EM présente des valeurs positives de taux de perte d'encrassement, et son graphique se situe dans la zone de perte d'encrassement, ce qui indique que l'encrassement disparaît progressivement avec l'augmentation de la concentration d'acide acétique ( $C_2H_4O_2$ ).

En conclusion, le taux de perte d'encrassement souligne l'efficacité des mesures de nettoyage par l'utilisation de différentes concentrations d'acide acétique pour réduire l'accumulation de dépôts d'huiles et de saletés, et maintenir les performances optimales du système.

## IV.1.2 Résultats et discussions de nettoyage du tartre :

- Protocole 01

Les taux d'encrassements d'échantillons nettoyés par l'acide acétique (tableau 4,5,6).

**Tableau IV.7 : Taux d'entartrage d'échantillon 1TR.**

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
1TR	6.4817	8.3115	HCl (0.5%)	0	8.3115	28.23
				3	6.4827	0.015
				6	6.4818	0.001
				9	6.4814	-0.004
				12	6.4813	-0.006

**Tableau IV.8 : Taux d'entartrage d'échantillon 2TR.**

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
2TR	6.7667	8.3598	HCl (0.75%)	0	8.3598	23.54
				3	6.7670	0.004
				6	6.7664	-0.004
				9	6.7661	-0.008
				12	6.7659	-0.01

Tableau IV.9 : Taux d'entartrage d'échantillon 3TR.

Echantillon	Masse après polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
3TR	14.5323	18.0980	HCl (1%)	0	18.0980	24.53
				3	14.5117	-0.141
				6	14.5093	-0.158
				9	14.5091	-0.159
				12	14.5088	-0.161

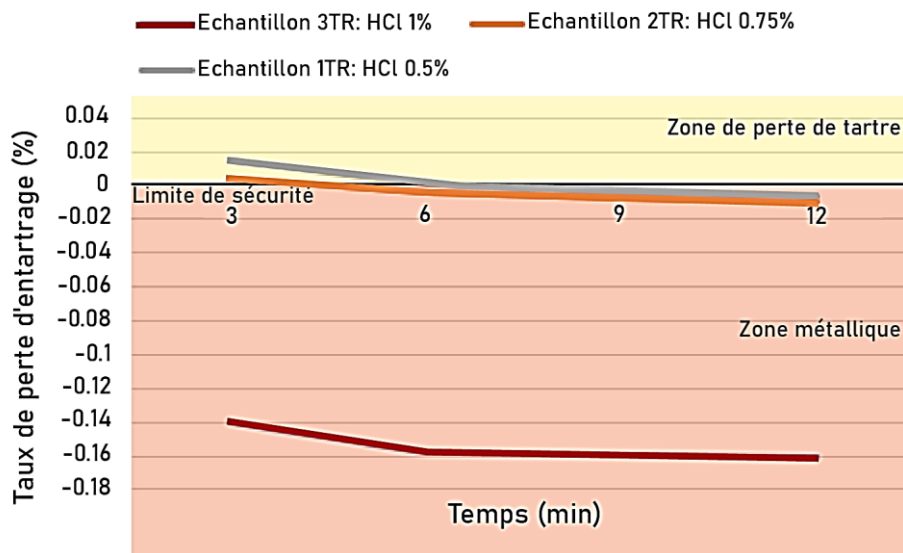


Figure IV.3 : Taux d'entartrage des échantillons 1TR,2TR,3TR en fonction de temps.

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal. En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. En examinant de plus près les graphiques, nous constatons que le taux de perte d'entartrage des échantillons 1TR et 2TR affiche des valeurs positives pendant le nettoyage, de 3 minutes à 6 minutes, ce qui indique que les concentrations d'acide chlorhydrique (HCl) utilisées

sont efficaces (0,5 % pour l'échantillon 1TR et 0,75 % pour 2TR). Cependant, après quelques minutes, nous constatons une diminution du taux de perte d'entartrage en dessous du seuil de sécurité, c'est-à-dire que le métal a perdu de la masse. En revanche, nous constatons que le taux de perte d'entartrage de l'échantillon 3TR affiche des valeurs négatives et que son graphique se situe dans la zone métallique, ce qui signifie que l'entartrage a disparu au début du nettoyage (1 % d'HCl) et que le métal a perdu de la masse. En conclusion, l'utilisation de solutions à forte concentration élimine le tartre, mais peut endommager le métal aussi (corrosion).

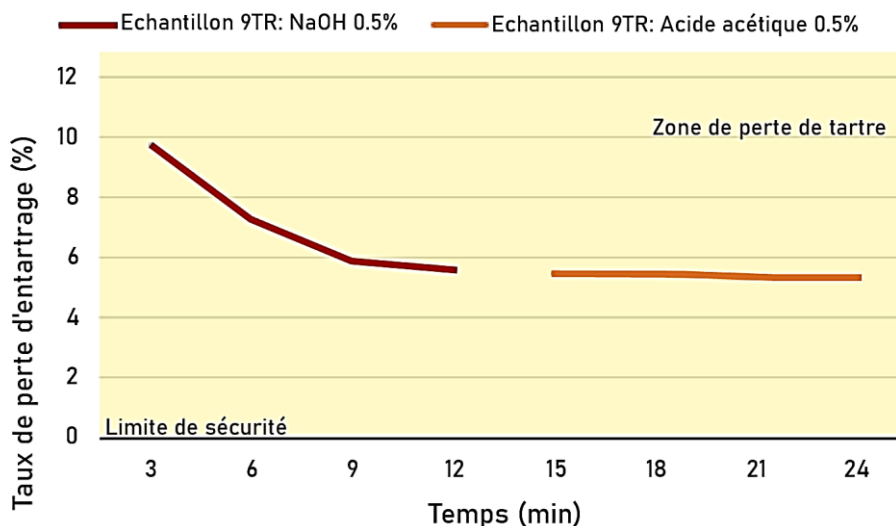
- **Protocole 02**

**Tableau IV.9 :** Taux d'entartrage d'échantillon 9TR (NaOH).

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
9TR	7.4021	9.7554	NaOH (0.5%)	0	9.7554	31.79
				3	8.1229	9.73
				6	7.9423	7.29
				9	7.8392	5.90
				12	7.8170	5.60

**Tableau IV.11 :** Taux d'entartrage d'échantillon 9TR (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>).

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux d'entartrage (%)
9TR	7.4021	9.7554	Acide Acétique (0.5%)	0	7.8170	5.60
				3	7.8075	5.47
				6	7.8050	5.46
				9	7.7995	5.36
				12	7.7993	5.36



**Figure IV.4 :** Taux d'entartrage d'échantillons 9TR en fonction du temps.

Le graphique présente l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal. En examinant attentivement le graphique, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. Cependant, une analyse plus approfondie révèle que le taux de perte d'entartrage des échantillons 9TR présente des valeurs positives pendant le nettoyage. Malgré cela, ces valeurs ne s'approchent pas de 0%, ce qui signifie que le tartre ne disparaît pas complètement après le nettoyage avec le NaOH et l'acide acétique. Il reste donc une quantité importante de tartre. En conclusion, la concentration d'acide acétique utilisée dans ce protocole n'est pas suffisante pour éliminer complètement le tartre.

• Protocole 03

Tableau IV.12 : Taux d'entartrage d'échantillon 7TR.

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
7TR	7.1442	9.0224	NaOH (1%)	0	9.0224	26.28
				3	7.4694	4.55
				6	7.2206	1.06
				9	7.1766	0.45
				12	7.1452	0.01
7TR	7.1442	9.0224	HCl (0.25%)	0	7.1452	0.01
				3	7.1360	-0.11
				6	7.1301	-0.19
				9	7.1280	-0.22
				12	7.1274	-0.23

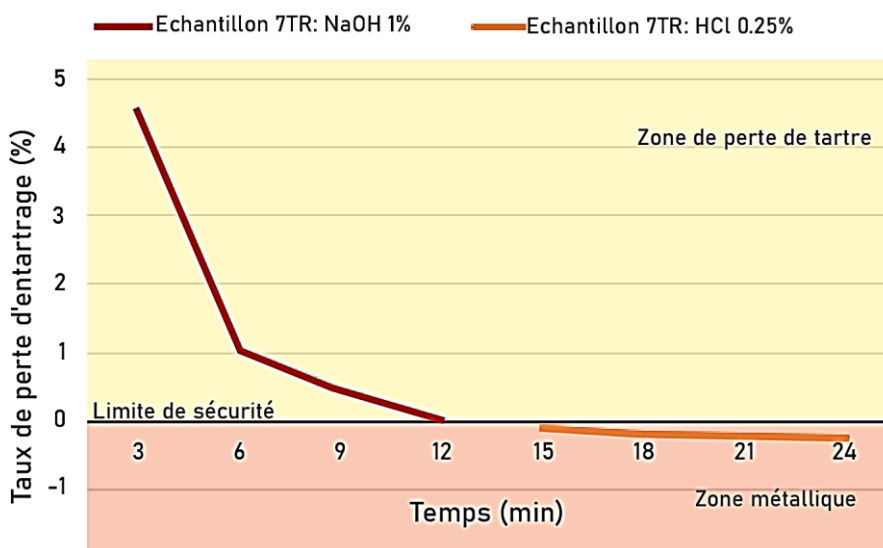


Figure IV.5 : Taux d'entartrage d'échantillon 7TR en fonction de temps

Le graphique présente l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal. En

examinant attentivement le graphique, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. En examinant de plus près les graphiques, nous constatons que le taux de perte d'entartrage des échantillons 7TR affiche des valeurs positives pendant le nettoyage avec le NaOH (1%) et s'approche de 0%. Cependant, après l'utilisation de l'acide chloridrique (0,25%), nous remarquons que le taux de perte d'encrassement affiche des valeurs inférieures au seuil de sécurité, ce qui signifie que le métal a perdu de la masse.

**Tableau IV.13 : Taux d'entartrage d'échantillon 8TR.**

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
8TR	7.4021	10.7157	NaOH (2%)	0	10.7157	44.76
				3	8.7603	18.34
				6	8.5436	15.42
				9	8.4620	14.31
				12	8.4462	14.10
8TR	7.4021	10.7157	HCl (0.25%)	0	8.4462	14.10
				3	8.4284	13.86
				6	8.4195	13.74
				9	8.4177	13.72
				12	8.4112	13.63

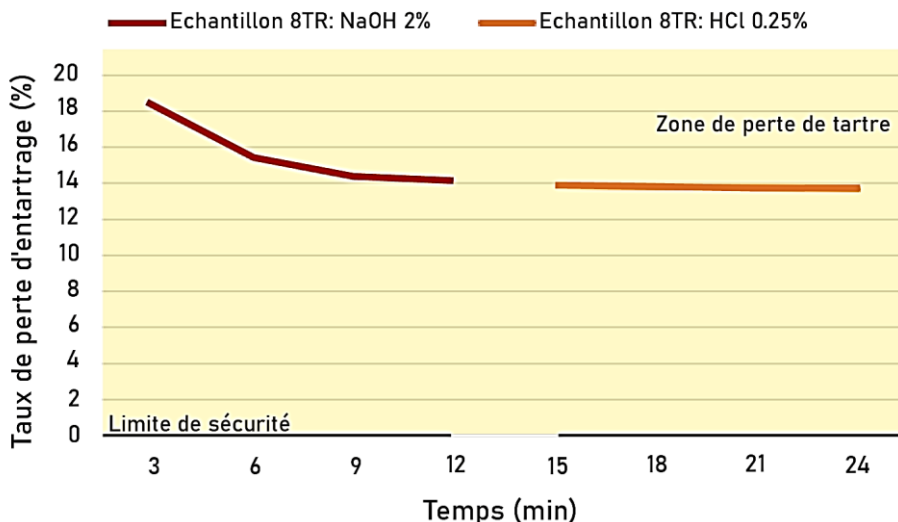


Figure IV.6 : Taux d’entartrage des échantillons 8TR en fonction du temps.

En revanche, le taux de perte d'entartrage de l'échantillon 8TR présente des valeurs positives au cours de l'expérience (utilisation de NaOH à 2% et HCl à 0,25%), mais ces valeurs ne s'approchent pas de 0%, ce qui signifie qu'il reste une quantité importante de tartre. En conclusion, le NaOH joue un rôle important dans le nettoyage et il est efficace avec de faibles concentrations.

- **Protocole 04**

Tableau IV.14 : Taux d’entartrage d’échantillon 4TR.

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l’entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d’entartrage (%)
4TR	18.5139	22.2089	Acide Acétique (1%) + NaOH (0.5%)	0	22.2089	19.95
				3	19.9164	7.57
				6	18.5162	0.23
				9	18.5153	0.007
				12	18.5118	-0.01

Tableau IV.15 : Taux d'entartrage d'échantillon 10TR.

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
10TR	7.4021	9.7554	Acide Acétique (0.5%) + NaOH (0.5%)	0	9.7554	31.79
				3	7.8468	6.00
				6	7.4996	1.31
				9	7.3898	-0.16
				12	7.3816	-0.27

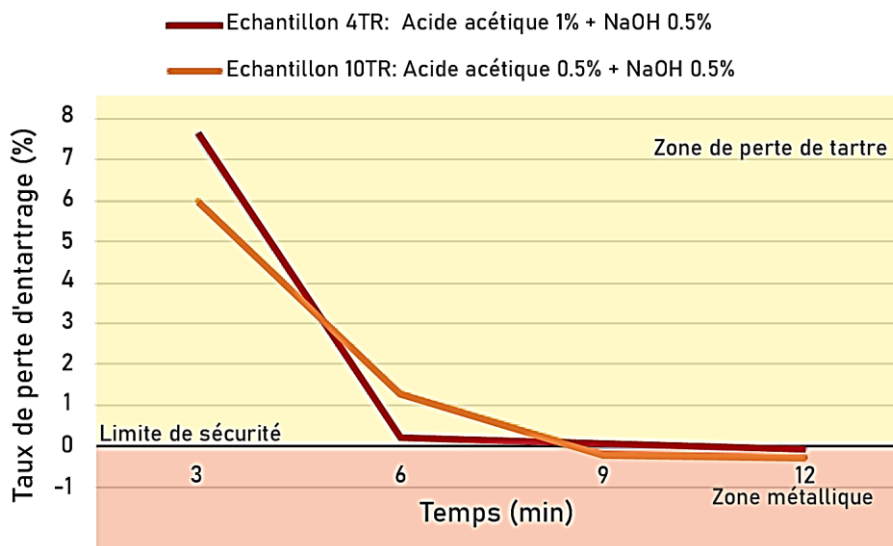


Figure IV.7 : : Taux d'entartrage des échantillons 4TR,10TR en fonction du temps

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal. En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. Cependant, une analyse plus détaillée révèle que le taux de perte d'entartrage des échantillons 4TR et 10TR affiche des valeurs positives de 3 à 6 minutes de nettoyage. À partir de 9 minutes, cependant, le taux de perte d'entartrage présente des valeurs négatives, ce qui

indique que le graphique se situe dans la zone métallique et que le métal a perdu de la masse. En conclusion, l'efficacité de l'acide acétique utilisé en combinaison avec le NaOH est plus élevée lorsque sa concentration est plus élevée.

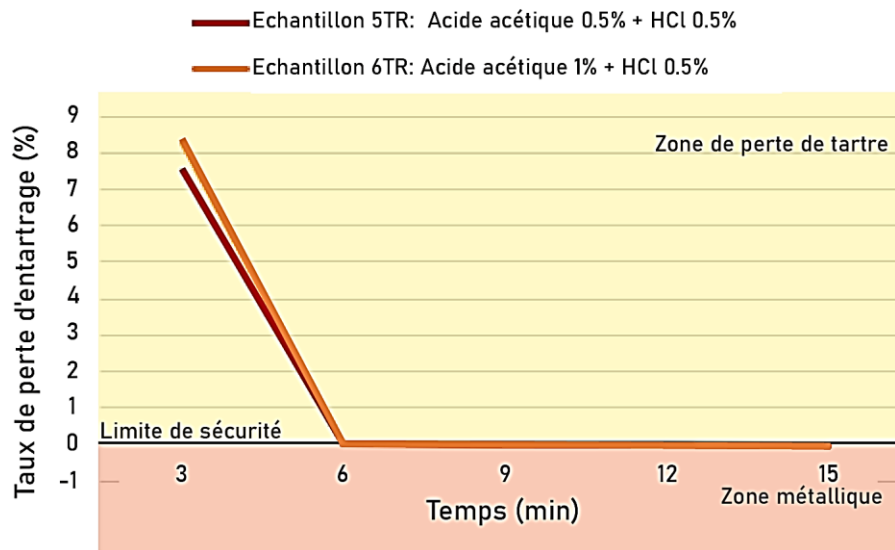
- **Protocole 05**

**Tableau IV.16 : Taux d'entartrage d'échantillon 5TR.**

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
5TR	16.7244	20.9443	Acide Acétique (0.5%) + HCl (0.5%)	0	20.9443	25.23
				3	17.9805	7.51
				6	16.7287	0.02
				9	16.7274	0.01
				12	16.7243	-0.0005
				15	16.7235	-0.005

**Tableau IV.17 : Taux d'entartrage d'échantillon 6TR.**

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux d'entartrage (%)
6TR	16.9666	21.5193	Acide Acétique (1%) + HCl (0.5%)	0	20.9443	23.44
				3	18.3700	8.27
				6	16.9730	0.03
				9	16.9650	-0.009
				12	16.9635	-0.01
				15	16.9633	-0.01



**Figure IV.8 :** : Taux d'entartrage des échantillons 5TR,6TR en fonction du temps

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal. En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. Cependant, une analyse plus détaillée révèle que le taux de perte d'entartrage des échantillons 5TR et 6TR affiche des valeurs positives de 3 à 6 minutes de nettoyage. À partir de 9 minutes, cependant, le taux de perte d'entartrage présente des valeurs négatives, ce qui indique que les graphiques se situent dans la zone métallique et que le métal a perdu de la masse. De plus, l'échantillon 6TR présente des valeurs de perte de métal plus négatives que l'échantillon 5TR en raison de la différence de concentration d'acide acétique. En conclusion, l'efficacité de l'acide acétique utilisé en combinaison avec le HCl est plus élevée lorsque sa concentration est plus élevée.

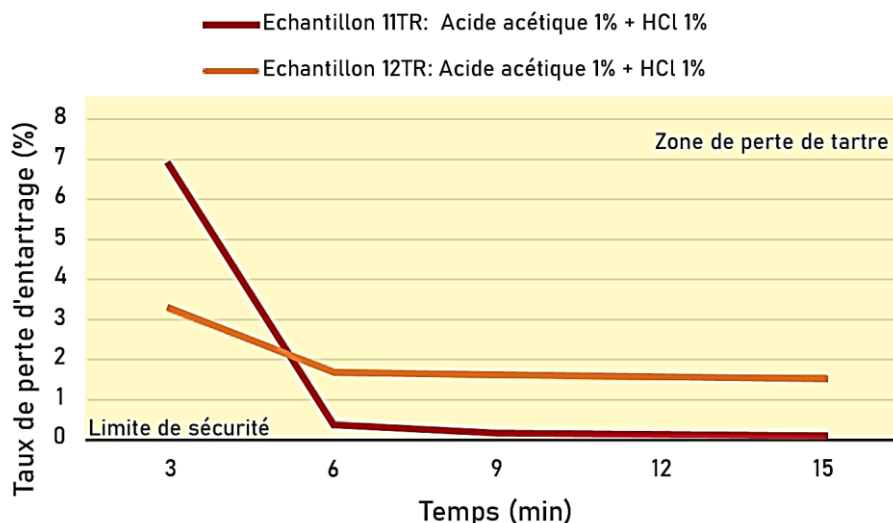
- Protocole 06

Tableau IV.18 : Taux d'entartrage d'échantillon 11TR.

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
11TR	16.5310	20.7118	Acide Acétique (1%) + HCl (1%)	0	20.7118	25.29
				3	17.6603	6.83
				6	16.5922	0.37
				9	16.5548	0.14
				12	16.5380	0.04
				15	16.5320	0.006

Tableau IV.19 : Taux d'entartrage d'échantillon 12TR.

Echantillon	Masse après le polissage (g)	Masse après l'entartrage (g)	Solution de nettoyage	Temps (min)	Masse après traitement (g)	Taux de perte d'entartrage (%)
12TR	19.5732	24.5680	Acide Acétique (1%) + HCl (1%)	0	24.5680	25.51
				3	20.2051	3.22
				6	19.9000	1.66
				9	19.8820	1.57
				12	19.8733	1.53
				15	19.8730	1.53



**Figure IV.9 :** Taux d'entartrage des échantillons 11TR,12TR en fonction du temps

Les graphiques présentent l'évolution du taux de perte d'entartrage d'un système au fil du temps. Le taux de perte d'entartrage est exprimé en pourcentage massique sur l'axe vertical, tandis que les minutes écoulées sont indiquées sur l'axe horizontal.

En examinant attentivement les graphiques, nous pouvons observer une tendance générale à la diminution du taux de perte d'entartrage du système au fil du temps. Cependant, une analyse plus détaillée révèle que le taux de perte d'entartrage de l'échantillon 11TR (teinté avec une peinture transparente alimentaire et entartré) affiche des valeurs positives et s'approche de 0% à partir de 6 minutes, ce qui indique que l'échantillon perd à la fois le tartre et la peinture pendant le nettoyage, ce qui montre que la peinture utilisée n'est pas résistante.

En revanche, le taux de perte d'entartrage de l'échantillon 12TR (teinté avec une peinture blanche à base d'eau et entartré) affiche des valeurs positives mais ne s'approche pas de 0% pendant le nettoyage. Cela peut s'expliquer par le fait que la solution utilisée a éliminé le tartre, mais la peinture blanche a résisté au processus de nettoyage.

En conclusion, la solution utilisée a bien nettoyé l'échantillon 11TR, donc la peinture utilisée n'est pas résistante. En revanche, pour l'échantillon 12TR, la solution a seulement enlevée le tartre, tandis que la peinture a resté intacte.

IV.2 Analyse des données sous MATLAB

IV.2.1 Analyse des données d'encrassement

Protocole 01

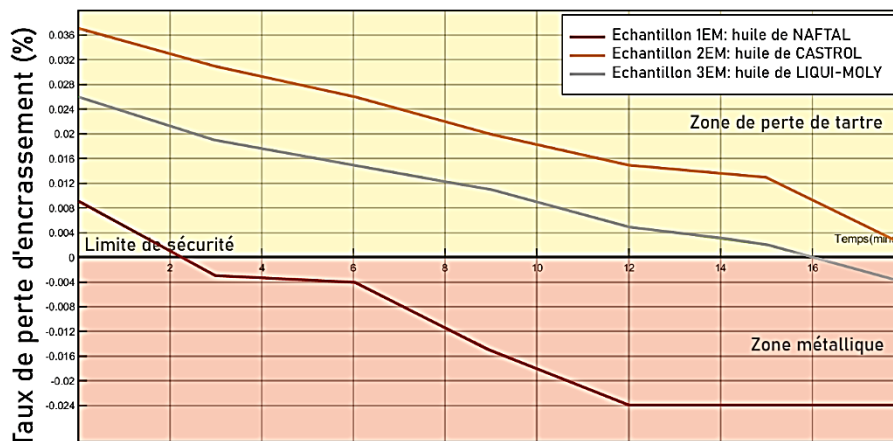


Figure IV.10 : Taux d'encrassement des échantillons 1EM, 2EM, 3EM en fonction du temps.

Protocole 2

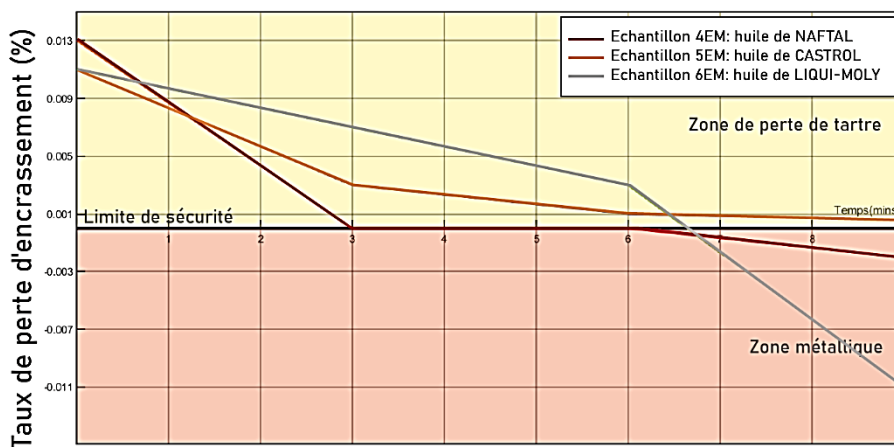


Figure IV.11 : Taux d'encrassement des échantillons 4EM, 5EM, 6EM en fonction du temps.

### IV.2.2 Analyses des données de tartre

#### Protocole 1

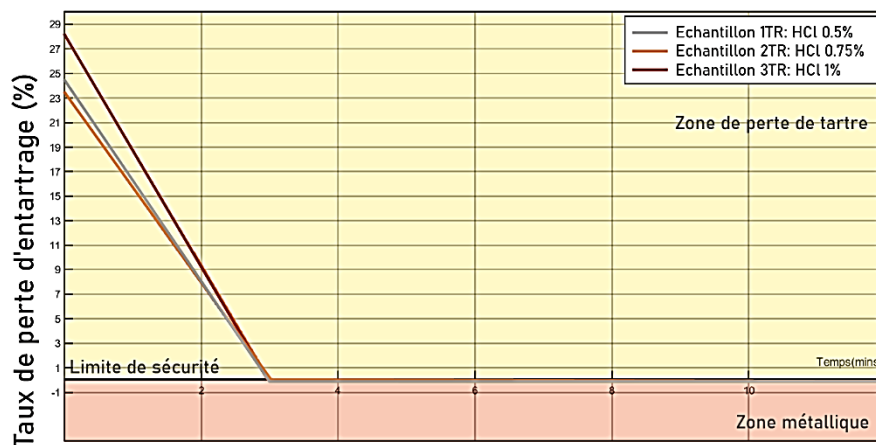


Figure IV.11 : Taux d’entartrage des échantillons 1TR,2TR, 3TR en fonction du temps.

#### Protocole 2

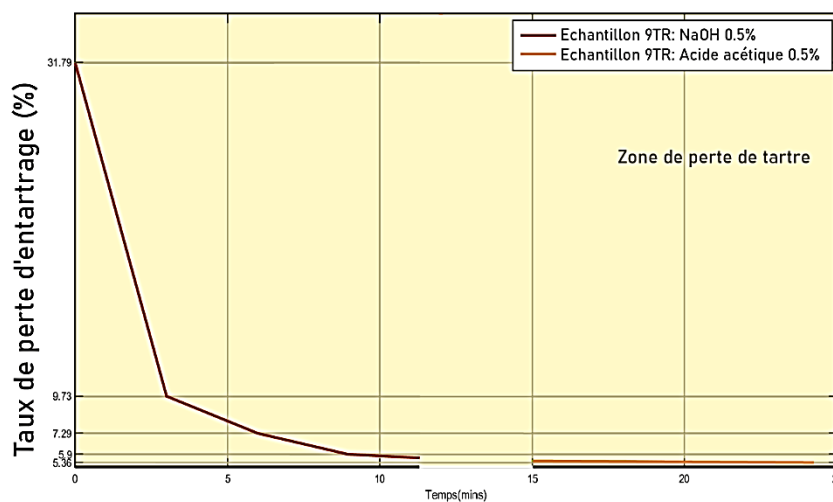


Figure IV.13: Taux d’entartrage des échantillons 9TR en fonction du temps.

Protocole 3

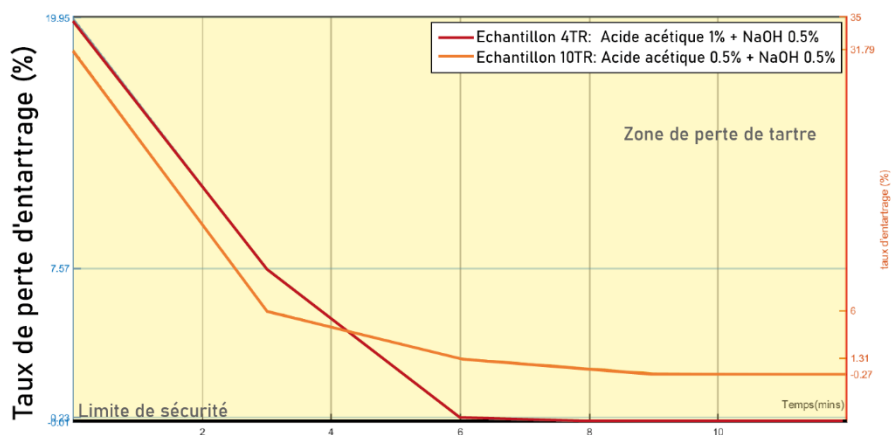


Figure IV.14: Taux d'entartrage des échantillons 4TR, 10TR en fonction du temps.

Protocole 4

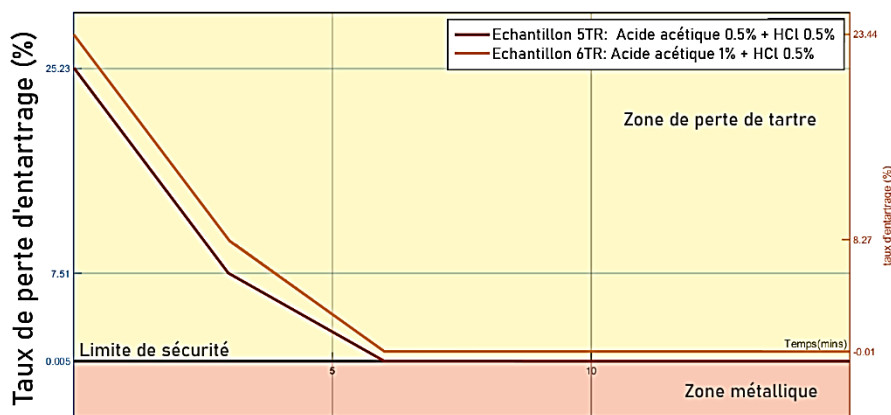


Figure IV.15: Taux d'entartrage des échantillons 5TR, 6TR en fonction du temps.

Protocole

Protocole 5

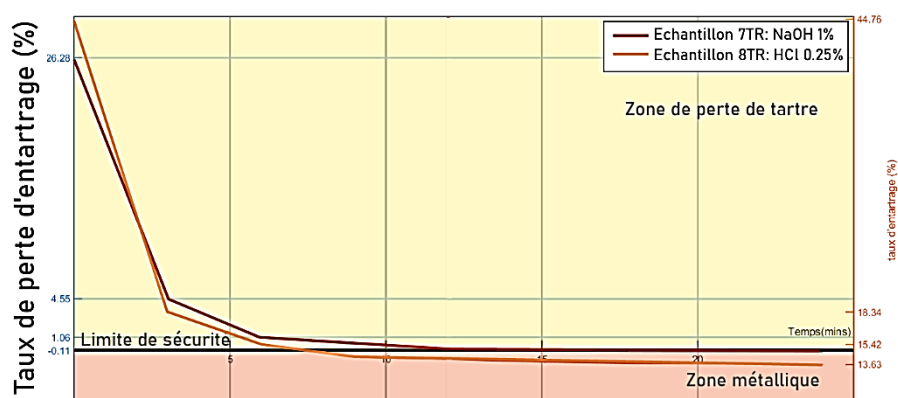


Figure IV.16: Taux d'entartrage des échantillons 7TR, 8TR en fonction du temps.

Protocole 6

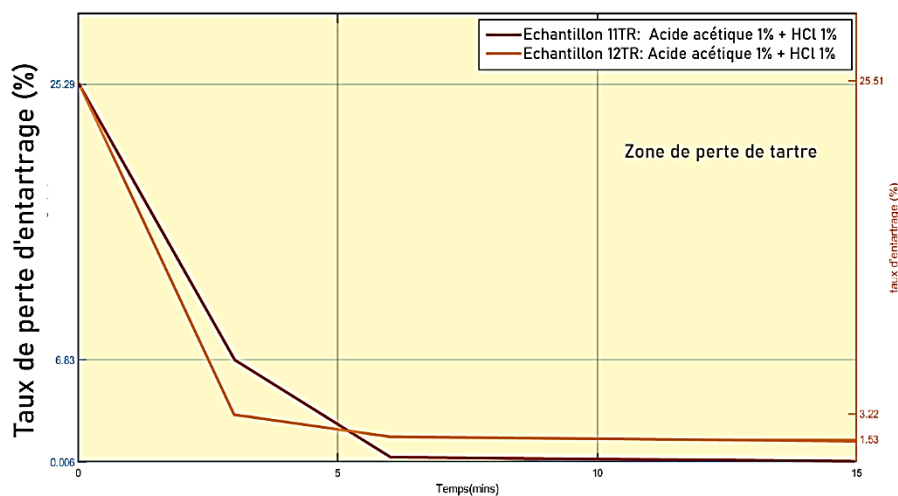


Figure IV.17: Taux d'entartrage des échantillons 11TR, 12TR en fonction du temps.

## Conclusion générale

En conclusion , il est conseillé de mettre en œuvre un protocole de nettoyage visant à éliminer les dépôts calcaires et crasses huileuses présents dans les chaudières industrielles, responsables de problèmes de bouchage et perte de performances.

- D'après les résultats obtenus on conclut que : Le **NaOH** fonctionne comme un agent gonflant dans le cas du tartre, pénétrant entre les molécules du dépôt et rompant les différentes liaisons pour faciliter l'élimination du tartre.
- **L'acide acétique** est efficace contre les encrassements dus aux huiles à faible concentration et a donné des résultats plus satisfaisants que l'acide HCl.
- **L'acide chlorhydrique** est efficace pour les échantillons entartrés, il rompt les liaisons entre le substrat (tartre) et le solide (échantillon). Cependant, l'utilisation d'une concentration élevée d'HCl peut parfois entraîner la corrosion du métal.
- **La peinture alimentaire** n'est pas résistante à l'HCl et à l'acide acétique, même à faible concentration.
- **La peinture blanche à base d'eau** est plus résistante que la peinture alimentaire.

En conclusion, Voici quelques recommandations pour protéger les chaudières industrielles contre l'encrassement et l'entartrage :

- Utiliser de l'eau adoucie.
- Installer des systèmes de traitement de l'eau.
- Effectuer un nettoyage régulier.
- Surveiller les paramètres de fonctionnement.
- Installer des systèmes anti-tartre et effectuer un entretien régulier.

# Références bibliographiques

## Chapitre 1

- [1] Mimoun. Hadji, exploitation des chaudières, séminaire IAP/Boumerdes/GRP, juin 2022
- [2] ENSPM Formation -FA Training, Matériel thermique-description des chaudières, 92500 Rueil-Malmaison-France 18/04/2005
- [3] Temperature control units, <https://www.htt.de/en/products/temperature-control-units>
- [4] ZEROUALI ADEL, L'impact physico-chimique de la qualité d'eau sur la chaudière à tube de fumée (l'industrie du textiles), mémoire de master, université de Biskra, jeudi 17 septembre 2020
- [5] Xinli Boiler, SZL Biomass Fuel Water Tube Steam Boiler, <https://m.xinliboiler.com/products/biomass-boiler/szl-biomass-fuel-water-tube-steam-bo.html>
- [6] Metline industries, Stainless Steel 347/347H Condenser Pipes & Tubes, <https://steeltubes.co.in/manufacturers-suppliers/stainless-steel-347-347h-condenser-pipes-tubes/>
- [7] CNIM BABCOCK Spares & Services, Files de surchauffeur, <https://cnimbabcockspares.com/produits-services/parties-sous-pression/files-epingles-surchauffeur/>
- [8] Viessmann – Brochure technique : Les chaudières à vapeur ; 2011
- [9] L'agence de SENOVA, Article intitulé de Mieux comprendre sa chaufferie : le bruleur écrit en 21 juin 2016, lien : <https://coproprietes.senova.fr/conseils-techniques/mieux-comprendre-sa-chaufferie-le-bruleur>, date de consultation : 25/02/2023
- [10] Boilers info, Pressure safety valve theory and PSV valve mechanism <https://boilersinfo.com/psv-pressure-safety-valve-theory>
- [11] CHABI ABDERRAHMANE, MEKZINE LILA, Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4tonnes/heurs de l'ECFERAL, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Juin 2014

[12] Lycée professionnel privé "Marc Seguin", Maintenance et efficacité énergétique : Les chaudières au sol, lien : <https://www.nouvenergie.fr/chaudières-au-sol/conception/>, date de consultation : 26/02/2023

[13] Alain RIOU et Jean Pierre DEPAUW, Différents types de chaudières industrielles, Techniques de l'ingénieur B1 480. 10/02/1990

## Chapitre 2

[14] J.S. Truelove, « Furnaces and combustion chamber », Hemisphere publishing corporation 1983

[15] Mourad BOUGUETTAH, Etude thermique d'une chaudière MITSUBISHI CE-VU 60 X, mémoire de Master, Ecole National Polytechnique El-Harrach, Juin 2006

[16] L'équipe de rédaction par EFFY, Chaudière : les problèmes les plus fréquents et leurs solutions, le lien : [La chaudière : les principaux problèmes et pannes | Quelle Énergie \(quelleenergie.fr\)](#) , la date de consultation : 29/03/2023

[17] Amira Bouras, Etude de phénomène d'encrassement de l'échangeur EDM/MEA de la section de décarbonatation du complexe GL1/Z, mémoire de master, Juin 2019

[18] Alaoune Dahmane, Soufi Moussa, Etude de problèmes d'encrassement dans un échangeur de chaleur type faisceau-calandre 12X20400, Mémoire de Master, 15.06.2019

[19] Thermal engineering, qu'est-ce que l'encrassement, le lien : <https://www.thermal-engineering.org/>, date de consultation : 28/05/2023

[20] PLOCK, Bündelrohrwärmetauscher und Plattenwärmetauscher, le lien: [Bündelrohrwärmetauscher und Plattenwärmetauscher - Plock Kälte- und Klimatechnik \(plock-kaelte.de\)](#), date de consultation : 28/05/2023

[21] L. GERMAIN, L. COLAS, J. ROUQUET « Le traitement des eaux destinées à l'alimentation des chaudières à vapeur, aux circuits de réfrigération et aux réseaux de distribution d'eau industrielle et potable », Ed 5e Dunod- Paris, 1976. [22 :48] « F. ELLIS, S. CARLSON « Le traitement des eaux dans l'industrie pétrolière », Ed technique- Paris, 1954.

[22] R. DJEBABLIA et W. MESSIKH. « Etude et impact de la qualité de l'eau de refroidissement du circuit semi-ouvert de la centrale et utilités II FERTIAL-ANNABA

» Mémoire de fin d'études. Département génie des Procédés, Université BADJI MOKHTAR- Annaba, 2008

[23] Duffau, C, Grillot, J, Navorro, J, M, Vidilr, R, Echangeurs de chaleur, l'encrassement dans les échangeurs : description, prévention et remèdes-Paris Edition Tec et Doc, 1991.

### **Partie expérimentale**

[24] Encyclopédie Universalis. (s.d.). Gravimétrie - Analyse. Dans Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/gravimetrie-analyse/>

[25] Le garrec : Qu'est-ce que le nettoyage en place ? <https://www.legarrec.com/entreprise/nep/> date de consultation : 05/24/2013

[26] Gujimmy, Acier 1020 | AISI 1020 | 1.0402 | 070M20 : <https://waldunsteel.com/fr/des-produits/1020-acier/> , date de consultation: 24/05/2023