

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie  
Département : Génie des procédés  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie des procédés  
Spécialité : Génie des procédés de  
environnement

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème:

**ETUDE ET ANALYSE DE L'EFFICACITE DE L'EAU POUR  
L'ALIMENTATION DE LA CHAUDIERE DE LA ZONE-EST DU  
COMPLEXE SIDERURGIQUE D'EL-HADJAR.**

Présenté par :

GUERBATTOU INES

DRIHEM RIHEM

Encadrant : Mme.Hamouche Grade: MAA, Université: Badji Mokhtar-Annaba

### Jury de Soutenance :

Mr. TOUBAL Abdelaziz	Pr	UBMA	Président
Mme. HAMOUCHE Karima	MAA	UBMA	Encadrant
M. EULMI Amina	Dr	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

## ***Remerciements***

Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu qui nous a donné la force et la patience pour terminer nos études.

Je tiens à remercier sincèrement mon encadrante, **Mme. Hamouche**, pour son soutien, ses conseils avisés et sa patience tout au long de ce projet. Son expertise et son engagement ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire. Merci infiniment.

Mes vifs remerciements vont au Complexe Sidérurgique d'El Hadjar de la ville de Annaba et à l'Université Badji Mokhtar de Annaba d'avoir permis le déroulement de mon stage, sans oublier tous les responsables de ces secteurs.

De manière plus proche, je tiens à remercier tous les membres du laboratoire Central et de la zone EST du Complexe Sidérurgique de m'avoir accueilli et à tous ceux qui m'ont permis de réaliser l'étude pratique et expérimentale ; un grand merci.

Je remercie tous les enseignants du département de Génie des Procédés qui ont contribué à ma formation.

Merci également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, d'assister à la soutenance et d'enrichir ce dernier via leurs commentaires.

Nous ne pourrions pas mettre fin à ces remerciements sans associer nos familles et nos amis pour leurs encouragements.

**Merci**

## *Dédicace*

Ce travail est dédié à **Mon Père**, dont l'amour, la sagesse et les enseignements continuent de guider mes pas chaque jour. Bien que tu ne sois plus parmi nous, ta présence se fait sentir dans chaque réussite, et ton souvenir m'inspire à donner le meilleur de moi-même. Tes valeurs, ton courage et ta bienveillance restent gravés dans mon cœur.

À **Ma Mère**, pour son soutien inébranlable, son amour inconditionnel et ses innombrables sacrifices. Ta force, ton dévouement et ta persévérance m'ont permis de croire en mes rêves et de les réaliser. Je te dois tout ce que je suis aujourd'hui.

À **Mon frère Hichem**, pour sa présence rassurante et ses encouragements constants. Ta camaraderie, ton soutien et ton exemple m'ont aidé à persévérer même dans les moments les plus difficiles. Merci de toujours être là pour moi.

À **Ma sœur Besma**, pour sa compréhension, sa gentillesse et son aide précieuse tout au long de ce parcours. Ton écoute, tes conseils et ton soutien ont été d'une aide inestimable. Tu as toujours su trouver les mots justes pour me motiver et m'encourager.

À **Mes chers petits : Ghaith, Mirale et Manissa.**

Je tiens également à remercier mon binôme, **Rihem**, pour sa confiance et son partenariat tout au long de cette aventure. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans toi.

Enfin, un grand merci à toute la promotion de Master Génie des Procédés de l'Environnement pour votre soutien et votre camaraderie.

**Guerbattou Ines**

## *Dédicace*

Après de longues années d'études, sachant l'importance de l'aide des êtres qui m'aiment, je voudrais humblement leurs dédier ce modeste travail tout en sachant qu'ils méritent le meilleur qui soit.

À mes premiers professeurs dans la vie, **ma mère** et **mon père** qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes mes années d'études et dans les moments les plus difficiles dans ma vie.

À mes chères frères : **Mahdi, Abed El Nour, Bilel, Abed El Rahmen, Mohamed El Saleh, Bourhen** et **Abed El Karim**.

À mes chères sœurs : **Narimen, Zahra, Feryel**, et **Darine** et ma tante (**Laila** ma deuxième maman) Sans oublier : **Azo** et **Wassim** et **Abed El Wadoud** .

À Ma binôme ma meilleure et ma sœur **Ines**.

À ma promotion 2023/2024 À toutes les personnes que je n'ai pas citées mais que je porte dans mon cœur.

A toutes ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot

D'encouragement ET de la gentillesse.

**Drihem Rihem**

## **Résumé :**

Ce mémoire porte sur le traitement des eaux pour l'alimentation des chaudières, avec une étude de réalisée au sein de SIDER EL HADJAR.

L'objectif principal est d'assurer une qualité optimale de l'eau utilisée, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement et la longévité des équipements. Le processus de traitement commence par le prélèvement de l'eau du barrage de Cheffia, suivi de son acheminement au réservoir du complexe industriel. Des contrôles réguliers sont effectués pour surveiller divers paramètres physico-chimiques tels que la dureté, l'alcalinité, le pH, la salinité et la présence de matières en suspension. Ces analyses sont menées dans le laboratoire central du complexe, garantissant que l'eau respecte les normes requises avant son utilisation dans les chaudières.

Le mémoire décrit en détail les méthodes de traitement et les résultats obtenus, soulignant l'importance de la qualité de l'eau dans les processus industriels.

**Mots clés :** Paramètres physico-chimiques, Dureté, Alcalinité, pH, Salinité, Matières en suspension.

**Abstract :**

This thesis focuses on water treatment for boiler feedwater, with a study conducted at SIDER EL HADJAR.

The primary objective is to ensure optimal water quality, which is essential for the efficient operation and longevity of the equipment. The treatment process begins with the extraction of water from the Cheffia dam, followed by its transport to the complex's reservoir. Regular monitoring is conducted to assess various physico-chemical parameters such as hardness, alkalinity, pH, salinity, and suspended solids. These analyses are carried out in the central laboratory of the complex, ensuring that the water meets the required standards before being used in the boilers.

The thesis provides a detailed description of the treatment methods and the results obtained, highlighting the importance of water quality in industrial processes.

**Keywords :** Physico-chemical parameters, Hardness, Alkalinity, pH, Salinity, Suspended solids.

## ملخص:

يركز هذا البحث على معالجة المياه لتغذية الغلايات، مع دراسة أجريت داخل مجمع الحديد في الحجار - عنابة  
الهدف الرئيسي هو ضمان جودة مثلى للمياه، وهو أمر ضروري لكفاءة تشغيل المعدات وطول عمرها. تبدأ عملية المعالجة  
باستخراج المياه من سد الشافية، ثم نقلها إلى خزان المجمع. يتم إجراء مراقبة منتظمة لتقييم مختلف المعايير الفيزيائية  
والكيميائية مثل العسرة، القلوية، الرقم الهيدروجيني، الملوحة، والمواد العالقة. تُجرى هذه التحليلات في المختبر المركزي  
للمجمع، لضمان أن المياه تفي بالمعايير المطلوبة قبل استخدامها في الغلايات.  
يقدم البحث وصفًا تفصيليًا لطرق المعالجة والنتائج المحققة، مما يبرز أهمية جودة المياه في العمليات الصناعية.  
**الكلمات المفتاحية:** المعايير الفيزيائية والكيميائية، العسرة، القلوية، الرقم الهيدروجيني، الملوحة، المواد العالقة.

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
RESUME//ملخصABSTRACT	III
LISTDESFIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
<b>CHAPITRE I : Présentation du complexe sidérurgique</b>	
Introduction	1
I.1 Historique de l'entreprise	1
I.2. Situation géographique du complexe	1
I.3 Organigramme de l'entreprise	2
I.4. Principales activités	4
I.5 Division fluide	5
I.5.1 Organisation de la division fluide	5
I.6 La Zone EST	6
I.7 Cycle d'eau dans l'entreprise	6
I.7.1L'eau brute	7
I.7.2 L'eau industrielle	7
I.7.3 L'eau ultrafiltrée	7
I.7.4 L'eau déminéralisée	7
Conclusion	8
<b>Chapitre II : Traitement des eaux dans la Zone EST</b>	
Introduction	10
II.1. Approvisionnement en eau brute	10
II.2. Traitement préliminaire de l'eau brute	10
II.2.1 le dégrillage	10
II.2.2 le Tamisage	11
II.2.3 le dessablage	12
II.2.4 le déshuilage et le dégraissage	12
II.3. Fabrication d'eau industrielle dans la zone EST du complexe Sider El-Hadjar	12
II.3.1. Coagulation- Flocculation	12
II.3.2. Décarbonations à la chaux	14
II.3.3. Décantation	15
II.3.4. Filtration à sable	16
II.4. Fabrication d'eau déminéralisée dans la zone EST du complexe Sider El-Hadjar	17
II.4.1 Ultrafiltration (UF)	17

II.4.2. Les caractéristiques de la membrane d’ultrafiltration	18
II.4.3. L’osmose inverse (OI)	19
II.4.4 Les caractéristiques de la membrane d’osmose inverse	21
Conclusion	22
<b>Chapitre III : Chaudières à Vapeurs</b>	
Introduction	24
III.1. Chaudières à Vapeurs	24
III.1.1. Chaudière à tube fumée	25
III.1.1.1. Fonctionnement de la chaudière à tubes de fumées	25
III.1.2. Chaudières à tube d’eau	26
III.1.2.1. Fonctionnement de la chaudière à tube d’eau	26
III.2. Structure globale des chaudières	27
III.2.1. Composants principaux	27
III.2.2. Appareils de récupération	27
III.3. La chaudière utilisée dans la zone EST	28
III.4. Les problèmes rencontrés dans les chaudières	30
III.4.1. Primage	30
III.4.2. Le Moussage	30
III.4.3. Entartage	30
III.4.4. Corrosions	31
III.4.4.1. Les facteurs agissant sur la vitesse de corrosion	33
III.5. Protection contre les problèmes rencontrés dans la chaudière	34
III.5.1. Protection contre le moussage et le primage	34
III.5.2. Protection contre l’entartage	34
III.5.3. Protection contre la corrosion	34
III.6. Conditionnement des eaux de chaudières	35
III.7. Les normes d’exploitation pour éviter les problèmes techniques de chaudière	38
Conclusion	39
<b>CHAPITRE IV : Partie Expérimentale</b>	
IV.1. Problématique	41
IV.2. Objectif de l’étude	42
IV.3 Le Prélèvement des Échantillons	43
IV.4. Paramètres Physico-chimiques Analysés	43
IV.4.1 Détermination de l’alcalinité (Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet)	43
IV.4.2 Détermination du titre hydrotimétrique TH	45
IV.4.3 Dosage du titre calcique	46
IV.4.4 Dosage des chlorures	47
IV.4.5 Détermination du PH	48
IV.4.6. Détermination de la conductivité	50
IV.4.7. Détermination des matières en suspension	51
IV.4.8. Dosage du Fer total	52

IV.4.9. Dosage de l'acide ortho phosphorique	53
IV.4.10. Détermination de la turbidité	54
IV.5 Variation des paramètres physico-chimiques de l'eau brute et industrielle	55
IV.5.1 Représentation graphique des paramètres et discussions des résultats	56
IV.6 Expression des résultats des analyses de l'eau d'alimentation et de l'eau de chaudière	63
IV.6.1 Résultats des analyses de l'eau alimentaire	63
IV.6.1.1 Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau alimentaire	64
IV.6.2. Résultats des analyses de l'eau de chaudière	66
IV.6.2.1. Expression des résultats	66
IV.6.2.2. Interprétation des résultats	67
IV.6.2.3. Représentation graphique	68
Conclusion	71
Conclusion générale	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	74
ANNEXE 01	78
ANNEXE 02	83

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Image satellite du complexe d'El Hadjar	<b>2</b>
<b>Figure I.2</b> : Organigramme d'installation et produits de l'entreprise	<b>3</b>
<b>Figure I.3</b> : Organisme de l'entreprise	<b>4</b>
<b>Figure I.4</b> : Organisation de la division fluide	<b>6</b>
<b>Figure I.5</b> : Cycle de l'eau dans l'entreprise	<b>6</b>
<b>Figure II.1</b> : le dégrilleur	<b>11</b>
<b>Figure II.2</b> : un tamis rotatif pour les eaux usées	<b>11</b>
<b>Figure II.3</b> : Le dégraissage	<b>12</b>
<b>Figure II.4</b> : le bac de coagulant (Fe Cl <sub>3</sub> )	<b>13</b>
<b>Figure II.5</b> : bac à flocculent	<b>14</b>
<b>Figure II.6</b> : Processus de coagulation, floculation et de sédimentation	<b>14</b>
<b>Figure II.7</b> : Machine de la production du lait de chaux	<b>15</b>
<b>Figure II.8</b> : Le décanteur	<b>16</b>
<b>Figure II.9</b> : Le filtration à sable	<b>16</b>
<b>Figure II.10</b> : les étapes de la production de l'eau industrielle au niveau de la zone EST	<b>17</b>
<b>Figure II.11</b> : UF Module Dizzer XL 0 9 MB 70 WT	<b>18</b>
<b>Figure II.12</b> : Installation d'ultrafiltration Zone Est-Complexe SEH-Annaba	<b>20</b>
<b>Figure II.13</b> : Phénomène d'osmose inverse	<b>20</b>
<b>Figure II.14</b> : Membrane d'osmose inverse model CPA5-LD	<b>20</b>
<b>Figure II.15</b> : Installation d'osmose inverse -Zone Est- Complexe SEH-Annaba	<b>25</b>
<b>Figure III.1</b> : Chaudière a tube fumée	<b>26</b>
<b>Figure III.2</b> : chaudière a tube d'eau	<b>26</b>
<b>Figure III.3</b> : Schéma d'une chaudière	<b>28</b>
<b>Figure III.4</b> : La chaudière Siterm de la zone fluide	<b>29</b>
<b>Figure III.5</b> : Entartrage dans les chaudières	<b>31</b>
<b>Figure III.6</b> : Corrosion par O <sub>2</sub>	<b>32</b>
<b>Figure III.7</b> : Fragilisation caustique	<b>32</b>
<b>Figure III.8</b> : Effet de la corrosion caustique	<b>33</b>
<b>Figure IV .1</b> : Capture de fuite au niveau de la chaudière	<b>41</b>

<b>Figure IV .2 : Dosage volumétrique du TA et TAC</b>	<b>45</b>
<b>Figure IV .3 : Dosage volumétrique du TH</b>	<b>46</b>
<b>Figure IV .4 : Dosage volumétrique du TCa<sup>++</sup></b>	<b>47</b>
<b>Figure IV .5 : Dosage volumétrique du Cl-</b>	<b>48</b>
<b>Figure IV .6 : Couple pH- mètre/Conductimètre</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV .7 : PH- mètre consort « C832 »</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV .8 : Conductimètre « E587 »</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV .9 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 »</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV .10 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total</b>	<b>53</b>
<b>Figure IV .11 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » dosage de l'acide ortho phosphorique</b>	<b>55</b>
<b>Figure IV .12 : Turbidimètre AL450T-IR</b>	<b>56</b>
<b>Figure IV .13 : Variation du titre alcalimétrie simple des eaux (eau brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>57</b>
<b>Figure IV .14 : Variation du titre alcalimétrie complet des eaux (eau brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>58</b>
<b>Figure IV .15 : Variation de la dureté totale des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV .16 : Variation de la dureté calcique des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>59</b>
<b>Figure IV .17 : Variation des chlorures dans l'eau (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>60</b>
<b>Figure IV .18 : Variation des TDS des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV .19 : Variation de conductivité des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV .20 : Variation du MES des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV .21 : Variation des PH des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV .22 : Variation des Températures des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV .23 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV .24 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV .25 : Variation du TH de l'eau alimentaire en fonction du temps</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV .26 : Variation du PH de l'eau alimentaire en fonction du temps</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV .27 : Variation du TA de l'eau de la chaudière en fonctionne du temps</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV .28 : Variation du TAC de l'eau de la chaudière en fonction temps</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV .29 : Variation du Cl- de l'eau de la chaudière en fonction temps</b>	<b>71</b>
<b>Figure IV .30 : Variation du PH de l'eau de la chaudière en fonction temps</b>	<b>71</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1:</b> Principales activités du complexe	<b>5</b>
<b>Tableau II.1 :</b> Caractéristiques de la membrane ultrafiltration	<b>19</b>
<b>Tableau II.2 :</b> Caractéristique de la membrane d'osmose inverse	<b>21</b>
<b>Tableau III.1 :</b> Caractéristiques de la chaudière Siterm	<b>29</b>
<b>Tableau III.2:</b> Les produits de conditionnement	<b>36</b>
<b>Tableau III.3 :</b> Les normes d'eau d'alimentation des chaudières	<b>38</b>
<b>Tableau III.4 :</b> Les normes d'eau de chaudière	<b>38</b>
<b>Tableau IV.1 :</b> Caractère des eaux selon le TH (BERNE F. et CORDONNIER J., 1991)	<b>46</b>
<b>Tableau IV.2 :</b> Caractère de l'eau selon le PH	<b>50</b>
<b>Tableau IV.3 :</b> Caractéristiques de l'eau industrielle	<b>56</b>
<b>Tableau IV.4 :</b> Les normes pour les chaudières à tube d'eau	<b>64</b>
<b>Tableau IV.5 :</b> Tendances de l'eau selon l'indice de RYZNAR	<b>68</b>
<b>Tableau IV.6 :</b> Résultats de calcul de l'indice de RYZNAR	<b>69</b>
<b>Tableau 14 :</b> Résultats des analyses de l'eau brute (Février-Mars 2024)	<b>79</b>
<b>Tableau 15 :</b> Résultats des analyses de l'eau industrielle (Février-Mars 2024)	<b>80</b>
<b>Tableau 16 :</b> Résultats des analyses de l'eau industrielle (Février-Mars 2024)	<b>81</b>
<b>Tableau 17 :</b> Résultats des analyses de l'eau de chaudière (Février-Mars 2024)	<b>82</b>
<b>Tableau 18 :</b> Détermination du facteur des sels dissous	<b>84</b>
<b>Tableau 19 :</b> Détermination du facteur de température	<b>84</b>
<b>Tableau 20 :</b> Détermination du facteur de dureté de calcium	<b>85</b>
<b>Tableau 21 :</b> Détermination du facteur de l'alcalinité totale	<b>86</b>

## Liste des abréviations

<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Lait de chaux
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	Chlorure ferrique
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	Ion fer
<b>Al<sup>3+</sup></b>	Ion aluminium
<b>Cl<sup>-</sup></b>	Ion chlorure
<b>Ca(HCO<sub>3</sub>)</b>	Bicarbonate de calcium
<b>Mg(HCO<sub>3</sub>)</b>	Bicarbonate de magnésium
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonate de calcium
<b>MgCO<sub>3</sub></b>	Carbonate de magnésium
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	Ion calcium
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	Ion magnésium
<b>HCO<sub>3</sub></b>	Bicarbonate
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Eau
<b>CO</b>	Oxyde de carbone
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>µm</b>	Micromètre
<b>nm</b>	Nanomètre
<b>mm</b>	Millimètre
<b>µs</b>	Micro siemens
<b>t/h</b>	Tonnes par heure
<b>°C</b>	Degré Celsius
<b>°F</b>	Degré français
<b>L</b>	Litre
<b>OI</b>	Osmose inverse
<b>UF</b>	Ultra filtration
<b>HP</b>	Haute pression
<b>TPM</b>	Pression transmembranaire
<b>GN</b>	Gaz naturel
<b>pH</b>	Potentiel d'hydrogène
<b>pH<sub>s</sub></b>	Potentiel d'hydrogène de saturation
<b>MES</b>	Matière en suspension
<b>TDS</b>	Totalité des sels dissous
<b>TA</b>	Titre alcalimétrique
<b>TAC</b>	Titre alcalimétrique complet
<b>TH</b>	Titre hydrotimétrique
<b>ACO</b>	Aciérie à Oxygène

<b>HF</b>	Haut fourneau
<b>PMA</b>	Préparation de matière première et agglomération
<b>ACE</b>	Aciérie Electrique
<b>LAC</b>	Laminoir à Chaud
<b>LFR</b>	Laminoir à fils et ronds
<b>COX</b>	Centrale à oxygène
<b>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	Hydrazine
<b>O<sub>2</sub></b>	Dioxygène
<b>N<sub>2</sub></b>	Azote
<b>Cu</b>	Cuivre
<b>CuO</b>	Oxyde de cuivre
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniac
<b>P</b>	Phosphate
<b>Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	Phosphate de sodium
<b>Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b>	Hydrogénophosphate de sodium
<b>NaOH</b>	Hydroxyde de sodium
<b>SiO<sub>3</sub></b>	Silicate

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

L'eau joue un rôle vital dans l'industrie, où elle est utilisée à divers niveaux et dans de nombreux secteurs, notamment dans l'industrie lourde pour les circuits de chaleur et de refroidissement.

Le traitement des eaux pour l'alimentation des chaudières est une composante essentielle des processus industriels, car les chaudières fournissent la vapeur nécessaire à des opérations telles que la production d'électricité et la fabrication de produits chimiques. Pour garantir une performance optimale et prolonger la durée de vie des équipements, il est crucial d'utiliser une eau de haute qualité.

Les chaudières peuvent rencontrer des problèmes liés à la qualité de l'eau, tels que la corrosion, l'entartrage et le primage. Ces problèmes dépendent de la nature du métal en contact avec l'eau, des conditions opératoires de l'installation et de la qualité des eaux d'appoint. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont l'objectif est de contrôler la qualité de l'eau d'alimentation des chaudières à vapeur, en suivant les différentes étapes de traitement depuis l'eau brute jusqu'à son état déminéralisé dans la zone Est du complexe sidérurgique d'El-Hadjar.

Cette étude a été réalisée sur une période de 15 jours, sur des échantillons d'eaux brutes, industrielles d'alimentation et des eaux de chaudière. La rédaction de ce mémoire est organisée en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

- ✓ La première partie théorique contient trois chapitres :
  - Le premier chapitre présente le complexe SIDER EL-HADJAR situé dans la zone industrielle d'Annaba, et décrit la division fluide ainsi que les installations de traitement de l'eau.
  - Le second chapitre se consacre aux différentes techniques et technologies de traitement des eaux, en détaillant des méthodes telles que la filtration, la coagulation, la floculation, la désinfection et la déminéralisation. Chaque méthode est examinée en termes de principes de fonctionnement.
  - Le troisième chapitre traite des chaudières à vapeur, présentant les types de chaudières à combustible, leur fonctionnement, les problèmes rencontrés, et le conditionnement des eaux de chaudières.
- ✓ La partie pratique est une étude expérimentale dédiée à l'analyse de la qualité de l'eau de la chaudière sur le site étudié.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus, accompagnée des références bibliographiques et des annexes. Ces annexes incluent les méthodes d'analyse utilisées, les tableaux de conversion, et divers éléments essentiels pour la compréhension de notre étude.

# **Chapitre I**

## **PRESENTATION DU COMPLEXE SIDERURGIQUE**

## **Introduction**

Pendant le développement économique mondial, l'Algérie a investi dans plusieurs domaines à savoir, parmi lesquels les activités sidérurgiques, qui ont eu une place très importante dans l'industrie du pays, concrétisé par le complexe d'El Hadjar en 1969[1].

Ce chapitre se penchera sur le complexe sidérurgique d'El-Hadjar, emblème de l'industrie lourde et pilier de la sidérurgie nationale. Nous examinerons également son organisation, en mettant l'accent sur le département fluide, et plus spécifiquement sur la zone Est que nous avons visitée.

### **I.1 Historique de l'entreprise**

L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société bônoise de sidérurgie (SBS) en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine.

Après l'indépendance, celle-ci devient Société Nationale Sidérurgie (SNS) et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays.

Elle fut créée le 03 septembre 1964 en tant que moyen pour assurer le développement du pays et améliorer les conditions de vie du peuple, c'est-à-dire répondre aux impératifs économiques et sociaux du développement du pays.

La SNS a bénéficié des différents plans de développement pour s'étendre aux files des nécessités et devenir enfin Entreprise Nationale de Sidérurgie (ENS).

L'ENS a développé en 1969 un pôle sidérurgique à EL HADJAR pouvant répondre à une gamme de produit très variée, en devenant SIDER.

En 2000, et avec la nouvelle politique de partenariat, le complexe prend le sigle ISPAT et 5 ans après prend le nom MITTAL STEEL et actuellement il est ensuite nommé ARCELOR MITTAL et actuellement nommé [2].

### **I.2. Situation géographique du complexe**

Le complexe sidérurgique d'EL HADJAR est situé à l'est du pays dans la zone industrielle d'Annaba. Il est implanté à 15 Km au sud de la ville et occupe une superficie de 800ha. La superficie se répartie approximativement en trois zones :

- ✓ Les ateliers de la production « 300ha ».
- ✓ Les zone de stockage « 300ha ».
- ✓ Les surfaces des services « 200ha ».



**Figure I.1 :** Image satellite du complexe d'El Hadjar

### **I.3 Organigramme de l'entreprise**

En juin 1969, le haut fourneau et la production des matières sont équipés des premières unités de coulée de fonte. On a créé des hauts fours de coulée ainsi que des unités de laminage à froid et à chaud. Le complexe possède la capacité de produire des produits sidérurgiques finis et semi-finis destinés au marché national et international, tels que des brames, des billettes, des lingots, du fil machine et des ronds en béton [1].

L'organisation des différentes installations et de leurs produits finis est illustrée dans l'organigramme ci-dessous, avec les principaux utilisateurs.

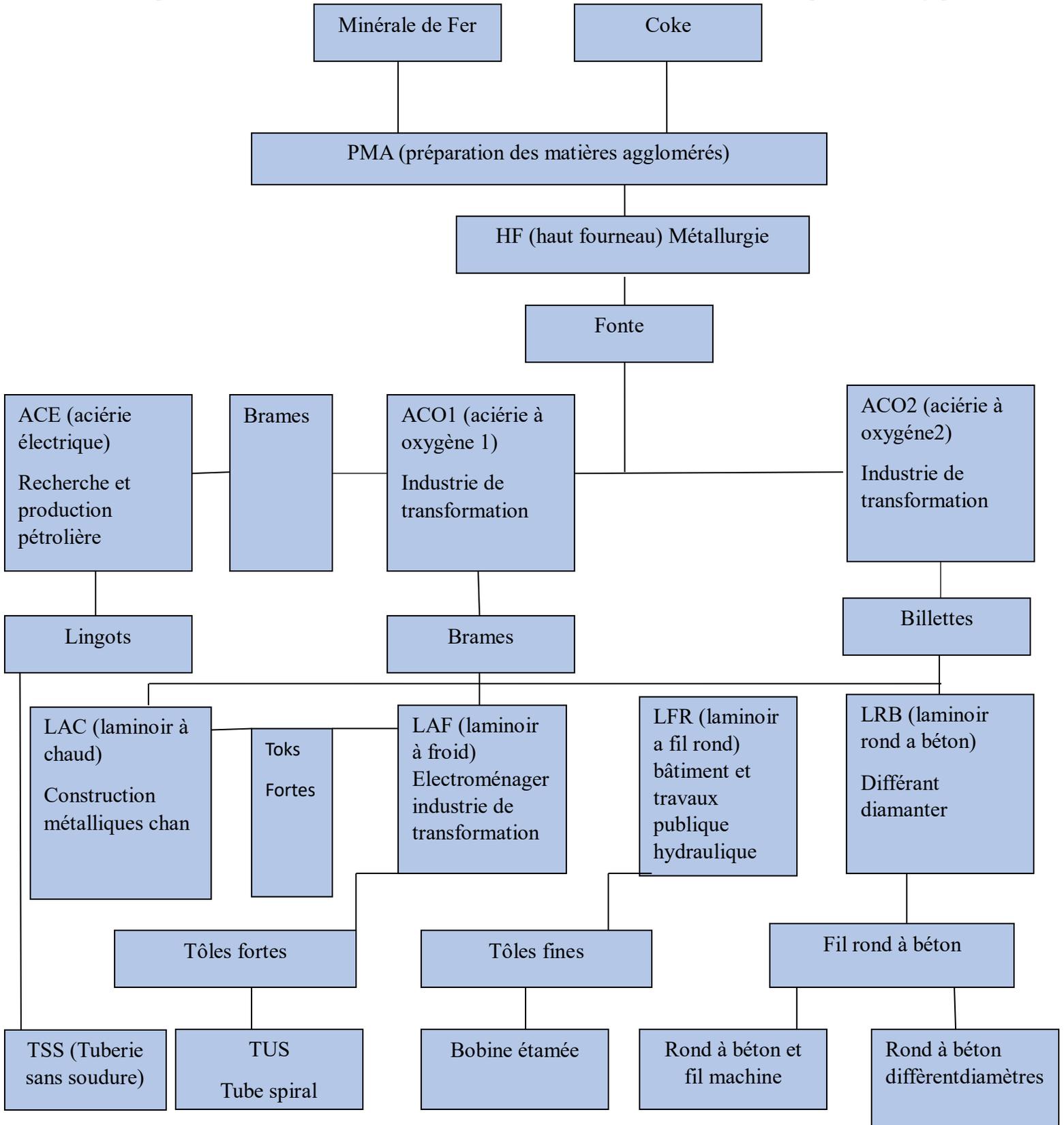


Figure I.2 : Organigramme d'installation et produits de l'entreprise

Le complexe est constitué de 7 directions dont la plus important est la direction des productions qui assure un directoire sur plusieurs unités de production quant à leur fonctionnement et stratégies adoptées

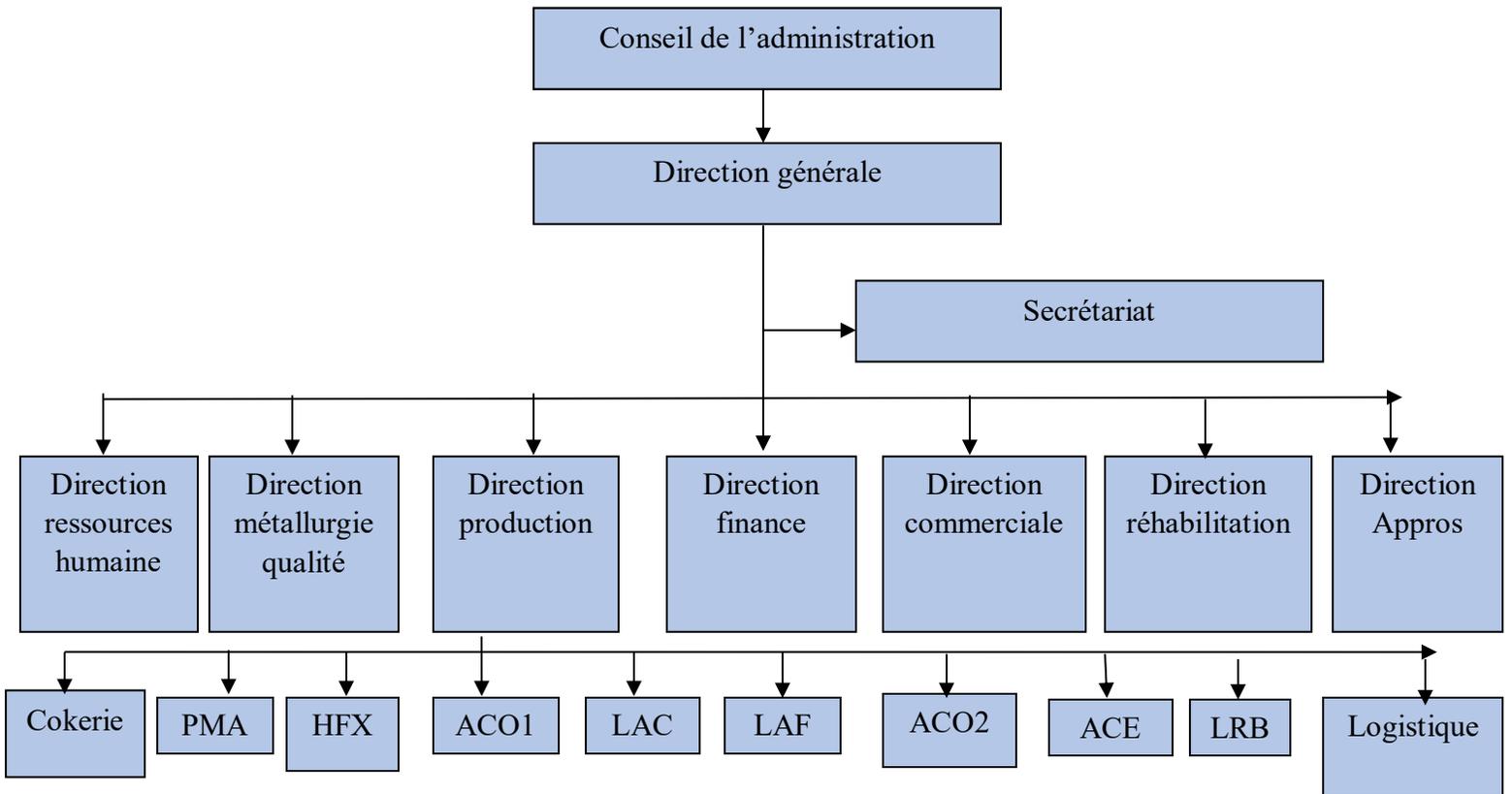


Figure I.3 : Organisme de l'entreprise

**I.4. Principales activités**

« SIDER EL-HADJAR » est une entreprise qui comprend tous les ateliers intervenant dans le processus de production de l'acier. Les installations intervenantes dans ce processus sont regroupées dans le tableau suivant :

Tab I.1: Principales activités du complexe

Installation	Utilisations
PMA	Production de la matière première (agglomérée et coke)
HF1, HF2	Produisent de la fonte liquide, et le laitier sert pour les cimenteries
ACO1	Solidifier l'acier sous forme de brame qui sera acheminé vers le laminoir à chaud.
ACO2	L'acier liquide est solidifié sous forme de billette qui sera laminé par la suite au niveau des laminoirs à fil et rond.
(ACE)	Alimente principalement la tuerie sans soudure en lingots. Elle produit également des billettes pour le LFR et le LRB.
LAC	Transforme les brames produites par l'ACO1 en bobines.
LFR	Produit du rond à béton lisse et du fil à machine à partir des billettes
COX	Produit les gaz industriels de l'air et approvisionne sans arrêt les différents ateliers et installations du Complexe.

Pendant le stage, nous avons organisé des visites pour explorer la division fluide, en nous concentrant particulièrement sur la zone Est et le laboratoire central.

## I.5 Division fluide

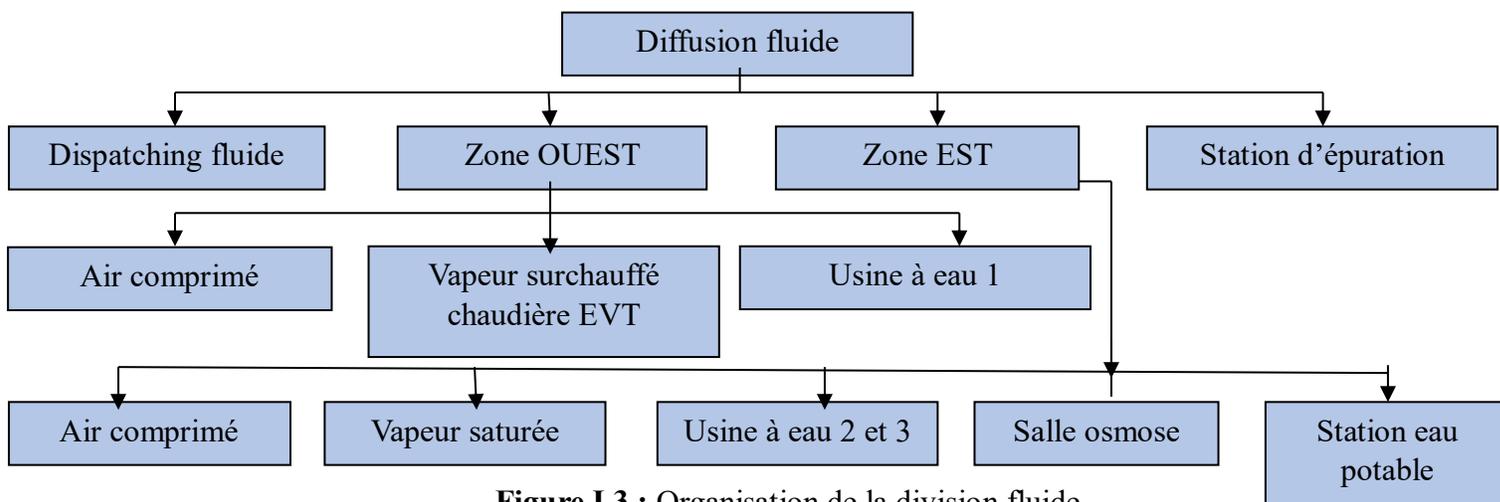
La division fluide s'occupe principalement de la distribution des différents fluides à travers le Complexe et assure la protection à partir d'un réseau de conduite (le rack), tout diamètre confondu, qui s'étend à plus de 25 Km [3].

Ce service assure la production de plusieurs fluides :

- La distribution et la protection de l'eau industrielle.
- La distribution et la protection de l'air service.
- La distribution et la protection de la vapeur saturée.
- La distribution et la protection du gaz naturel.
- La distribution et la protection de l'eau potable.

### I.5.1 Organisation de la division fluide :

Cet organigramme montre la planification et l'organisation des différents Équipements de la division fluide [4].



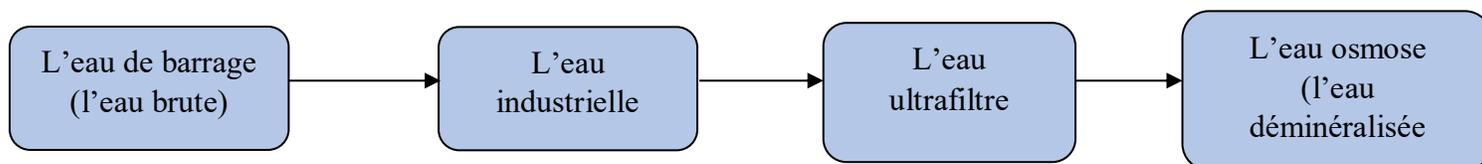
### I.6 La Zone EST

La division des fluides de la zone Est joue un rôle essentiel dans la croissance de la production du complexe car elle traite une quantité considérable d'eau qui est utilisée pour alimenter les autres secteurs du complexe. Parmi les utilisations importantes de cette eau, on retrouve la production de vapeur surchauffée par les chaudières. Dans cette section, nous allons suivre l'évolution de l'eau depuis son introduction dans la zone jusqu'à son utilisation finale dans les chaudières, en étudiant attentivement toutes les étapes de son traitement tout au long de ce processus.

### I.7 Cycle d'eau dans l'entreprise

L'eau joue un rôle essentiel dans de nombreux processus industriels. Elle a la capacité de contribuer au processus industriel en lui-même, d'être employée pour le lavage et l'évacuation des déchets, pour le refroidissement des installations ou pour le fonctionnement des chaudières [5].

Dans le complexe sidérurgique, le cycle de l'eau commence à sa source, l'algérienne des eaux, qui provient du barrage de CHEFFIA. Il traverse ensuite plusieurs étapes de traitement pour aboutir à la production d'une eau d'une pureté remarquable.



**I.7.1 L'eau brute :**

L'eau brute désigne l'eau qui n'a pas encore subi de traitement ou de purification. Cela englobe les eaux de surface provenant d'étangs, de lacs ou de puits situés à proximité de la surface, ainsi que les eaux souterraines filtrées. Cependant, l'eau des pluies est aussi incluse dans l'eau brute, tout comme le filtrat des berges des rivières. Les particules, les minéraux, les engrais, les bactéries ou les agents pathogènes peuvent être présents dans l'eau brute. En général, l'eau brute nécessite un traitement avant d'être utilisée dans les applications désirées [6].

Les différentes utilisations de l'eau brute incluent le refroidissement, le rinçage, la production chimique, la purification et la consommation d'eau potable. Toutefois, à cause des éventuels contaminants, il est nécessaire de traiter l'eau brute avant d'être autorisée à être utilisée pour la consommation humaine ou pour certains autres usages industriels [7].

**I.7.2 L'eau industrielle :**

Les eaux industrielles correspondent aux eaux usées issues de différentes activités industrielles. Les caractéristiques de cette eau varient considérablement en fonction du type d'industrie. On peut le transmettre au réseau d'eau ou d'assainissement en fonction de ses caractéristiques [8].

Quand on utilise de l'eau industrielle lors de la production, il est possible que des matériaux indésirables affectent la qualité du produit. Dans les processus de production, l'utilisation d'eau peut avoir un impact direct sur la qualité du produit, entraînant des tartres et de la corrosion [9].

**I.7.3 L'eau ultrafiltrée :**

L'eau ultrafiltrée se distingue par son traitement physique élevé et sa résistance exceptionnelle. On procède à la filtration par ultrafiltration, qui consiste à passer l'eau à une pression élevée à travers une membrane. L'eau purifiée à haute température est complètement dépourvue d'impuretés, de virus et de bactéries [10].

On l'utilise fréquemment dans les secteurs pharmaceutiques, des semi-conducteurs, et autres. Le processus de brassage utilise l'eau ultrafiltrée comme prétraitement par osmose inverse et comme traitement final [11].

**I.7.4 L'eau déminéralisée :**

L'eau déminéralisée est une eau qui a subi un processus de filtration par osmose inverse. L'eau traverse différents filtres avant de traverser une membrane osmotique qui ne permet de passer que les molécules d'eau et les minéraux les plus petits (calcium et magnésium). Le taux de ces minéraux est extrêmement faible. En outre, il ne conduit pas et ne peut pas être consommé. Elle est également appelée eau déionisée (bien qu'il y ait des traces d'ions)[12].

Le choix de l'eau déminéralisée pour alimenter la chaudière permet de garantir la protection des véhicules de l'unité chaudière et d'éviter les problèmes de canalisations causés par les polluants présents dans l'eau d'alimentation (éviter l'entartrage, la corrosion et le pelage). La préservation des systèmes de traitement des eaux des tours de refroidissement est essentielle [9].

**Conclusion :**

L'une des plus grandes réalisations économiques de l'Algérie est le complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Les produits des unités de production du complexe ont joué un rôle majeur dans l'essor de l'industrie algérienne et dans la construction d'une infrastructure nationale très solide depuis des décennies.

Pour assurer la continuité de la production, il est toujours nécessaire d'utiliser une quantité importante d'eau. La zone EST est le principal secteur de cette continuité, car elle traite une quantité importante d'eau.

# **Chapitre II**

## **Traitement des eaux dans la Zone EST**

## **Introduction**

L'importance de l'eau dans l'industrie, du point de vue du traitement de l'eau, réside dans la nécessité de purifier et de recycler l'eau utilisée pour garantir la qualité des produits, protéger les équipements, et respecter les normes environnementales. Un traitement adéquat permet de réduire les impuretés, contrôler les contaminants, et optimiser l'efficacité des processus industriels.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les divers procédés de traitement de l'eau employés dans la partie Est du complexe sidérurgique de Sider El-Hadjar. Notre objectif est de décrire les différentes méthodes et techniques utilisées pour garantir la qualité de l'eau dans cette région.

### **II.1. Approvisionnement en eau brute**

La source principale est l'Algérienne des Eaux (ADE), alimentée par le barrage de CHAFFIA.

- Débit maximal : 1800 m<sup>3</sup>/h
- Débit moyen réel : 900 m<sup>3</sup>/h
- Réserve (retenue collinaire) : L'usine dispose d'une réserve en eau pouvant être utilisée en cas d'urgence, avec un débit de 310 000 m<sup>3</sup>/h.
- Salle de pompage EBS : Sa fonction est de réguler la pression de l'eau brute provenant des conduites d'approvisionnement. Cette eau est dirigée vers un bassin amortisseur appelé brise-charge, conçu pour réduire la pression de l'eau en provenance du barrage et la freiner [13].

### **II.2. Traitement préliminaire de l'eau brute**

Le prétraitement des eaux, qui peut se définir comme l'ensemble des opérations que subit l'eau en amont de la station, constitue une étape essentielle dans le processus du traitement [14].

Un prétraitement est nécessaire de manière à protéger le relèvement des eaux brutes, les conduites contre les obstructions et les autres appareils de traitement contre l'abrasion, et plus généralement pour éliminer tout ce qui pourrait gêner les traitements ultérieurs[15].

#### **II.2.1 le dégrillage :**

Le dégrillage est le premier procédé de prétraitement des eaux permettant la séparation mécanique solide liquide des déchets contenus dans des eaux brutes. Deux types de dégrillage se distinguent, le dégrillage grossier avec un entrefer de filtration compris entre 50mm et 10mm suivi d'un dégrillage fin de 10mm à 6mm. Le dégrillage est pour souvent automatiser grâce à une motorisation du système du ramassage et d'éjection. Des solutions manuelles existent aussi demandant l'action d'un opérateur moyennant un coût plus abordable. Les déchets solides peuvent ensuite être déchargés dans un système de compactage permettant une réduction poids/volume et une siccité optimale [16].



**Figure II.1 : le dégrilleur**

### II.2.2 le Tamisage :

Le dégrillage ne permet pas seul d'éliminer certains éléments véhiculés par les eaux. Il en est ainsi par exemple des feuilles ou des insectes ; c'est pour cette raison on a recours au tamisage [14].

Le tamisage est le second procédé de prétraitement mécanique permettant une séparation plus fine que le dégrillage des déchets contenus dans les eaux brutes [17].



**Figure II.2 : un tamis rotatif pour les eaux usées**

### II.2.3 le dessablage :

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines, ainsi que les filasses de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduits, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion [18].

### II.2.4 le déshuilage et le dégraissage :

Le dégraissage est une opération de séparation liquide-liquide, tandis que le déshuilage est une opération de séparation solide-liquide (à condition que la température de l'eau soit suffisamment basse). L'opération consiste à utiliser des grattoirs pour récupérer les huiles et graisses domestiques ou industrielles présentes naturellement ou à la surface des eaux usées par flottation (injection de fines bulles d'air). Le but des deux procédés est d'éliminer la présence de corps gras dans les eaux usées, susceptibles de nuire à l'efficacité du traitement biologique ultérieur.



Figure II.3 : Le dégraissage

## II.3. Fabrication d'eau industrielle dans la zone EST du complexe Sider El-Hadjar

### II.3.1. Coagulation- Flocculation :

La coagulation est un procédé chimique largement utilisé dans le traitement de l'eau, réputé pour son efficacité dans le traitement primaire. Son objectif principal est de se débarrasser des particules (matières en suspension) qui ne se sédimentent pas et peuvent être présentes dans l'eau. Ce processus consiste à ajouter un coagulant afin de favoriser l'agglutination des particules en suspension. Généralement, ces coagulants ont une charge opposée à celle des particules en suspension. Cette action réduit le caractère électronégatif des particules, diminuant ainsi leur capacité de répulsion. Lorsque cette réaction se produit, les particules se lient entre elles pour

former des agglomérats, un processus souvent suivi d'une étape mécanique appelée floculation[19].

Divers agents coagulants sont disponibles, tous partageant une caractéristique commune : leur charge est opposée à celle des matières en suspension. Généralement, ce sont des sels inorganiques d'aluminium ou de fer. Parmi les plus couramment utilisés, on retrouve :

- Sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$
- Chlorure d'aluminium  $AlCl_3$
- Aluminate de sodium  $NaAlO_2$
- Chlorure ferrique  $FeCl_3$
- Sulfate ferrique  $Fe(SO_4)_3$
- Sulfate ferreux  $FeSO_4$

Dans la zone EST du complexe Sider El-Hadjar, le coagulant privilégié est le Chlorure ferrique  $FeCl_3$ . Sa sélection repose sur sa remarquable efficacité dans la clarification et son rôle essentiel en tant qu'agent de déshydratation des boues. Malgré une légère coloration résiduelle, ce produit chimique assure une élimination remarquable de la turbidité.

Quelques caractéristiques physico-chimiques de ce coagulant sont également à noter : il est présent sous forme liquide, avec une légère odeur âcre et une couleur rougeâtre. Son pH est inférieur à 1, ce qui le rend très acide.



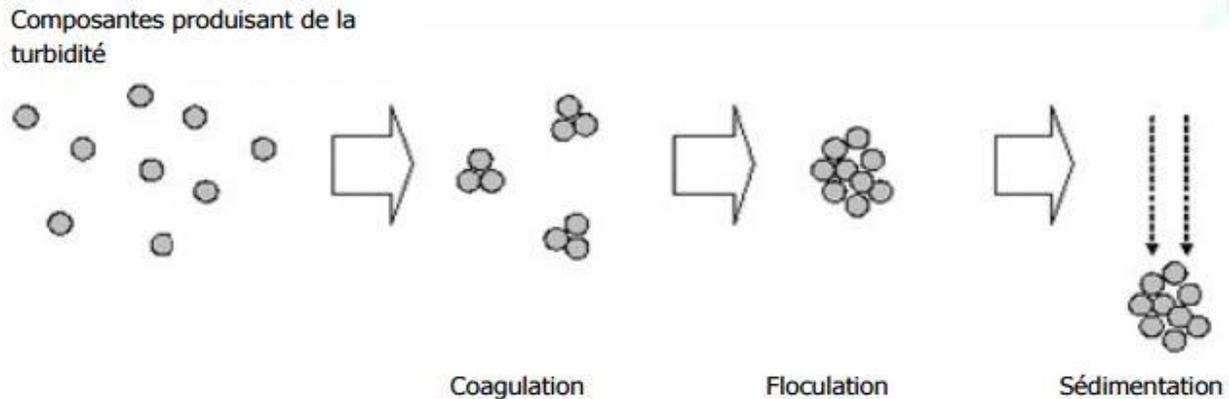
**Figure II.4** : le bac de coagulant ( $FeCl_3$ )

La floculation, étape suivant la coagulation, est essentielle pour garantir l'efficacité de la première phase de traitement, la coagulation. Une fois que les particules de déchets sont agglomérées par la coagulation, des agents floculants sont utilisés pour éliminer ces agglomérats.

Au sein du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, des polymères sont employés en tant qu'agents flocculants pour agir comme des liants entre les floccs, accélérant ainsi le processus de coagulation. Les floccs, constitués de masses de particules formées lors de la floculation, peuvent précipiter après un temps de repos et sont facilement éliminables [20].



Figure II.5 : bac à flocculent



### Processus de coagulation, floculation et de sédimentation

Figure II.6 : Processus de coagulation, floculation et de sédimentation

#### II.3.2. Décarbonations à la chaux :

L'eau brute qui provient d'algérienne des eaux (ADE) est chargée d'un pourcentage élevé de calcium et de magnésium, deux minéraux responsables de la formation de calcaire. Pour réduire leur pourcentage dans l'eau, on utilise la technique de décarbonation de la chaux.

La décarbonation à la chaux est un processus de traitement de l'eau dans lequel de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte) est utilisé pour éliminer le dioxyde de carbone dissous ( $\text{CO}_2$ ) de l'eau. Lorsque la chaux est ajoutée à l'eau contenant du  $\text{CO}_2$ , elle réagit chimiquement avec celui-ci pour

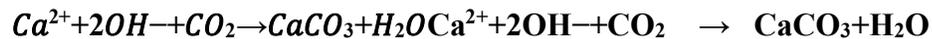
former du carbonate de calcium insoluble, qui précipite et peut être éliminé par filtration ou décantation. Ce processus est souvent utilisé pour ajuster le pH de l'eau et éliminer les substances carbonatées dissoutes [21].

La décarbonatation à la chaux implique généralement les réactions chimiques suivantes :

1. Réaction entre le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pour former du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) :



2. La réaction de précipitation du carbonate de calcium formé :



Ces équations montrent comment le dioxyde de carbone réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium insoluble, qui précipite et peut être éliminé du système.



**Figure II.7 :** Machine de la production du lait de chaux

### II.3.3. Décantation :

Une fois que la hauteur d'eau atteint le décanteur, le processus le plus important se produit dans le décanteur. Lorsque la hauteur d'eau brute est trop élevée pour être directement utilisée pour la filtration sans provoquer un colmatage trop rapide du filtre, une décantation doit être effectuée.

La décantation est une technique largement utilisée dans les stations d'épuration et de traitement des eaux ; c'est un séparateur solide-liquide qui sépare les matières en suspension et les colloïdes collectés après l'étape de coagulation et de floculation [22].

La carafe est en forme d'entonnoir et possède un pont racleur. Au fur et à mesure que le pont tourne, des racleurs circulaires transportent les boues vers la fosse centrale et des râteliers favorisent l'épaississement des boues en favorisant leur séparation. L'eau propre est collectée au sommet pour être filtrée. Ces particules seront périodiquement retirées du fond du décanteur centrifuge.



**Figure II.8 :** Le décanteur

Dans la région Est, deux décanteurs fonctionnent habituellement en parallèle pour garantir un traitement optimal. Cependant, actuellement, leur fonctionnement est interrompu en raison de problèmes de performance du pont-racler. Cela a pour conséquence un problème de qualité des eaux industrielles.

#### **II.3.4. Filtration à sable :**

Un filtre à sable est un dispositif de purification de l'eau qui emploie un lit de sable comme moyen filtrant pour éliminer les particules en suspension, les substances organiques et d'autres impuretés présentes dans l'eau. L'eau traverse ce lit de sable, où les impuretés sont capturées et retenues, permettant à l'eau filtrée de traverser le système de traitement [23].



**Figure II.9 :** Le filtration à sable

À partir de ce point, l'eau industrielle est distribuée aux différentes unités du complexe sidérurgique d'El-Hadjar à l'aide de trois pompes. La bêche de relevage, équipée de trous plats, permet l'évacuation de l'excès d'eau des réservoirs pleins vers la bêche de recyclage de 120 m<sup>3</sup>/h. De là, deux pompes renvoient l'eau à la brise de charge pour sa réutilisation, évitant ainsi tout

gaspillage. À l'intérieur de la salle de traitement de l'eau, plusieurs pompes sont présentes, chacune ayant un rôle spécifique, notamment les pompes de lavage utilisées pour nettoyer les filtres.

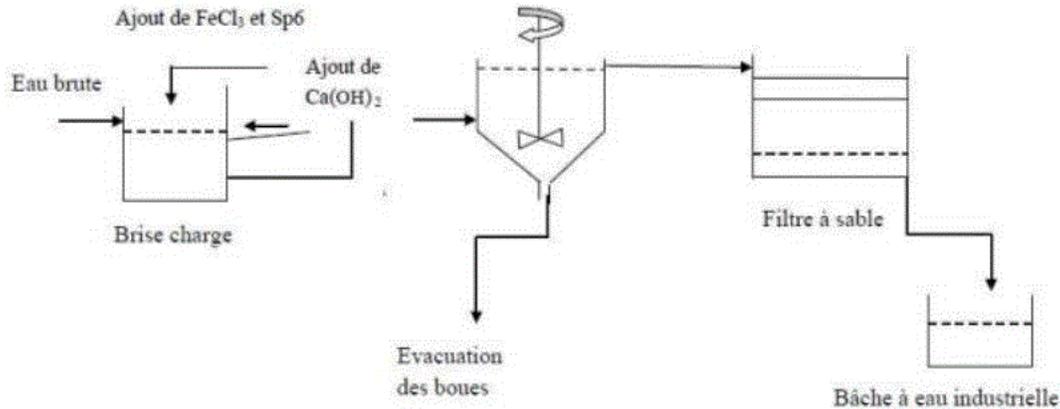


Figure II.10 : les étapes de la production de l'eau industrielle au niveau de la zone EST

## II.4. Fabrication d'eau déminéralisée dans la zone EST du complexe Sider El-Hadjar

### II.4.1 Ultrafiltration (UF) :

Le processus d'ultrafiltration consiste à séparer la membrane sous-pression afin de retirer les substances suspendues ou les particules (comme les colloïdes et le sable) de l'eau. L'ultrafiltration présente une plus grande fiabilité par rapport à la filtration conventionnelle de multi-environnements qui élimine des particules de 10 microns ou plus. L'ultrafiltration élimine également de manière efficace les bactéries et la majorité des virus. Les systèmes d'Ultrafiltration permettent d'éliminer l'utilisation de clarificateurs et de filtres pour différents milieux. La conception standard repose sur le module d'Ultrafiltration, avec une orientation du flux de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui permet de réduire les connexions, d'augmenter les charges de solides, d'améliorer le flux et de faciliter le nettoyage. [24]

Les principales utilisations industrielles de l'ultrafiltration incluent :

- Le processus d'électrophorèse pour traiter les bains de peinture.
- Les bains de dégraissage sont traités pour éliminer les matières en suspension (MES) et l'huile émulsifiée.
- La capture des cations métalliques grâce à l'utilisation d'une ultrafiltration assistée par complexation
- La normalisation des protéines du lait
- La concentration des protéines du lactosérum

- Les biologiques à membranes
- La méthode d'ultrafiltration assistée par modélisation pour la rétention des ions

**La membrane d'ultrafiltration utilisée est fabriquée par Prominent, Model Dizzer XL 0.9 MB 70 WT For T-Rack 3.0**



**Figure II.11 : UF Module Dizzer XL 0.9 MB 70 WT**



**Figure II.12 : Installation d'ultrafiltration Zone Est-Complexe SEH-Annaba**

#### **II.4.2. Les caractéristiques de la membrane d'ultrafiltration**

Les caractéristiques de la membrane d'ultrafiltration sont présentées dans le tableau ci-dessous :  
[13]

Tableau II.1 : Caractéristiques de la membrane ultrafiltration

<b>Module/Elément</b>	<b>Dizzer XL 0.9 MB 70 WT</b>
<b>Type de membrane</b>	<b>Poreuse composite</b>
<b>Surface membranaire totale</b>	<b>980 m<sup>2</sup></b>
<b>Mode de transfert de masse</b>	<b>Convection</b>
<b>Perméation de</b>	<b>Solvants, sels et petites molécules</b>
<b>Rétention de</b>	<b>Macromolécule, colloïdes</b>
<b>Taille nominale des pores</b>	<b>0.01µm</b>
<b>Tolérance de température</b>	<b>0°C – 40°C</b>
<b>Débit de perméation</b>	<b>50 à 300 l/h/m<sup>2</sup></b>
<b>Pression d'opération</b>	<b>2 à 10 bar</b>
<b>Dimension (L, D)</b>	<b>L = 1,720 mm (67.7 in) D = 250 mm (9.875 in)</b>

#### II.4.3. L'osmose inverse (OI) :

L'osmose est le processus par lequel un solvant se déplace à travers une membrane en réponse à un gradient de concentration. Dans un système composé de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable contenant des solutions de concentrations différentes, l'osmose entraîne un flux d'eau de la solution diluée vers la solution concentrée. L'application d'une pression sur la solution concentrée réduit le flux d'eau transféré par osmose. Lorsque cette pression atteint un niveau suffisant, le flux d'eau s'annule, définissant ainsi la pression osmotique. Au-delà de cette pression osmotique, un flux d'eau inverse peut être observé, dirigé de manière opposée au flux osmotique, phénomène connu sous le nom d'osmose inverse [25].

Couramment utilisée pour le dessalement de l'eau de mer ou la déminéralisation des eaux saumâtres, l'osmose inverse est l'une des techniques les plus anciennes de séparation par membrane. Elle emploie des membranes denses pour retenir la plupart des solutés et permet seulement le passage du solvant (généralement de l'eau). Le principe repose sur l'application d'une pression côté alimentation supérieure à la différence de pression osmotique entre le retentat et le perméat, afin de contraindre le solvant à traverser la membrane. Les pressions appliquées varient généralement entre 30 et 80 bars[26].

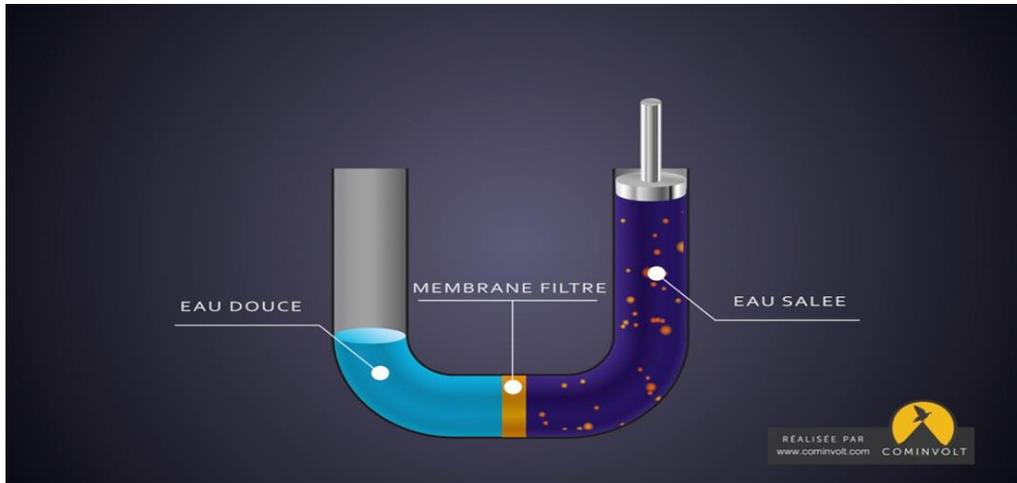


Figure II.13 : Phénomène d'osmose inverse

La membrane d'osmose inverse utilisée est produite par NittoHydranautics (société allemande du groupe Nitto), modèle CPA5-LD. Il s'agit d'un module membranaire enroulé en spirale autour d'un noyau central pour former une unité de filtration qui filtre et élimine l'eau. Sels, minéraux et produits chimiques. il est en polyamide



Figure II.14 : Membrane d'osmose inverse model CPA5-LD



Figure II.15 : Installation d'osmose inverse -Zone Est- Complexe SEH-Annaba

#### II.4.4 Les caractéristiques de la membrane d'osmose inverse :

Les caractéristiques de la membrane d'osmose inverse sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II.2 :** Caractéristique de la membrane d'osmose inverse

Caractéristique		
<b>Performance</b>	Débit de perméat	41.6 m <sup>3</sup> /d
	Rejet du sel	99.7% (99.6% minimum)
<b>Type</b>	Configuration	Plaie en spirale à faible encrassement
	Membrane Polymère	Composite Polyamide
	Surface active de la membrane	37.1 m <sup>2</sup>
	Surface membranaire totale	1038.8 m <sup>2</sup> (0.864 mm)
<b>Application</b>	Pression maximale appliquée	600 psig (4.14 MPa)
	Concentration maximale de chlore	< 0.1 PPM
	Température de fonctionnement maximale	113 °F (45 °C)
	Turbidité maximale de l'eau d'alimentation	1.0 NTU
	Débit d'alimentation maximale	75 GPM (17,0 m <sup>3</sup> /h)
<b>Caractéristiques physiques</b>	Longueur (cm)	101.6
	Diamètre (mm)	7.80
	Poids (kg)	16.4

**Conclusion :**

En conclusion, le traitement de l'eau est crucial pour garantir l'efficacité, la durabilité et le respect des normes environnementales dans les processus industriels. La purification et le recyclage de l'eau permettent d'éliminer les contaminants susceptibles de nuire à la qualité des produits et des équipements. Un traitement inadéquat de l'eau peut entraîner des problèmes tels que l'entartrage et la corrosion dans les chaudières, diminuant ainsi leur performance et leur durée de vie.

# **Chapitre III**

## **Chaudières à Vapeurs**

## Introduction

La production de vapeur ou d'eau chaude est cruciale dans la plupart des secteurs industriels, qu'ils soient liés à l'alimentation ou non. Pour ce faire, on utilise un dispositif appelé chaudière, qui chauffe l'eau pour produire de la vapeur lorsque celle-ci est chauffée au-delà de la pression atmosphérique. La chaudière fonctionne en chauffant un fluide caloporteur par l'apport de chaleur, pouvant entraîner un changement d'état, tel que la vaporisation. Elle agit donc comme un générateur de vapeur, exploitant la chaleur générée par la combustion de combustibles pour produire de la vapeur à partir d'eau.

Dans le domaine industriel, les chaudières sont essentielles pour alimenter les processus en vapeur. La source de chaleur peut provenir de divers combustibles tels que le gaz, le fioul, le charbon, ou encore d'une résistance électrique.

### III.1. Chaudières à Vapeurs

Les chaudières à vapeur représentent des appareils thermiques spécialisés dans la production de vapeur à haute pression à partir de l'eau. Cette vapeur trouve de multiples applications dans divers secteurs industriels, commerciaux, et résidentiels, notamment pour le chauffage, la production d'électricité, le fonctionnement des turbines ou des moteurs à vapeur, entre autres.

Typiquement, ces chaudières se composent de deux parties distinctes :

- Un foyer, où le combustible est brûlé pour générer de la chaleur.
- Une zone de chauffage, où l'eau est portée à ébullition et transformée en vapeur sous pression.

Cette division fonctionnelle permet d'optimiser le processus de production de vapeur tout en garantissant une efficacité énergétique maximale et une utilisation sûre de l'appareil [27].

Ces chaudières se distinguent par leur conception qui comprend deux compartiments distincts :

- Le premier compartiment, appelé foyer, est destiné à la combustion du combustible.
- Le second compartiment est dédié au chauffage de l'eau.

En fonction du parcours emprunté par l'eau à chauffer par rapport à la source de chaleur de combustion, on peut classer ces chaudières en deux catégories principales :

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

Cette classification repose sur la manière dont l'eau est chauffée et circule à travers la chaudière, ce qui influence leurs performances et leurs applications spécifiques dans divers contextes industriels et commerciaux [28].

### III.1.1. Chaudière à tube fumée :

Ce type de chaudière fournit des débits de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure à basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est du gaz naturel ou du fioul.

Les chaudières à tubes de fumée sont des chaudières à circulation naturelle. Le volume d'eau chaude est assez important. Si ces chaudières sont chauffées au fioul ou au gaz, elles peuvent fonctionner automatiquement. Ils sont très compacts et peuvent donc être entièrement assemblés et testés en atelier avant d'être envoyés sur site pour la mise en service. Mais à partir de 20 bars, la construction devient délicate en raison de l'épaisseur de caisse requise.

Ces chaudières ont une puissance relativement faible. La puissance maximale actuelle est Le débit de vapeur est de 30 tonnes/heure, la pression maximale est de 25 bars.

Les principes de base de ces chaudières ne sont guère adaptés à l'obtention de vapeur surchauffée. Cependant, de la vapeur surchauffée peut être générée. La surchauffeur est ensuite placée dans la boîte ou chambre de retour. Dans ces types de chaudières, la combustion se produit dans le tube du four, qui est le plus susceptible d'être endommagé par la surchauffe du métal (rayonnement de la flamme). Afin de limiter sa température, la surface extérieure du tube du four doit être maintenue parfaitement propre pour obtenir un échange thermique optimal. Le tube à fumée est situé dans le réservoir de la chaudière, sous la surface de l'eau, et collecte les gaz chauds à la sortie de brûleur.

Les gaz chauds accumulés dans le premier caisson à l'arrière de la chaudière sont acheminés vers un deuxième caisson à l'avant de la chaudière par un ensemble de canalisations immergées dans l'eau du réservoir [29].



**Figure III.1 :** Chaudière a tube fumée

#### III.1.1.1. Fonctionnement de la chaudière à tubes de fumées

Une chaudière à vapeur à tubes de fumée est composée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes par lesquels la fumée circule. Le premier tube du conduit de fumée, de diamètre plus large, constitue le foyer. Un brûleur placé en amont produit de la fumée lors de la combustion, qui se déplace ensuite vers les tubes immergés de la chaudière via un processus thermodynamique, générant ainsi de la vapeur redistribuée tout au long du processus.

Ces chaudières sont principalement adaptées aux processus industriels, tels que ceux dans les secteurs agroalimentaire, pharmaceutique, hospitalier, de la papeterie, de la chimie et de la pétrochimie. Elles sont robustes et peuvent supporter diverses fluctuations et pics de puissance, offrant une durée de vie typique de 30 à 40 ans avec un entretien minimal et une conformité satisfaisante.

Généralement, les chaudières à tubes de fumée ne dépassent pas une capacité de 38 MW (50 t/h) et une pression de 32 bars [30].

### III-1-2 chaudière à tube d'eau

Ce modèle de chaudière offre un débit moyen de vapeur saturée dépassant les 60 tonnes par heure, à haute pression, pouvant atteindre jusqu'à 100 bars. Les combustibles utilisés peuvent être le gaz naturel, le pétrole, le charbon ou les déchets [31].



Figure III-2 : chaudière a tube d'eau

#### III-1-2-1-Fonctionnement de la chaudière à tube d'eau

Contrairement aux chaudières à tubes de fumée, les chaudières à vapeur à tubes d'eau sont équipées d'un ensemble de tubes disposés verticalement. Le foyer produit des gaz chauds qui entrent en contact avec les tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur.

Ces tubes sont alimentés par deux réservoirs : un réservoir de distribution situé en bas et un réservoir de collecte en haut. Cela permet à l'eau de circuler du bas vers le haut de la chaudière tout en étant chauffée.

Les chaudières à tubes d'eau sont moins courantes et plus coûteuses que leurs homologues à tubes de fumée. Elles sont généralement utilisées dans des processus spécifiques, notamment dans les centrales thermiques et les installations de cogénération chaleur-électricité. Ces chaudières sont principalement utilisées dans des applications industrielles à grande et moyenne échelle.

Leur capacité peut atteindre jusqu'à 400 tonnes de vapeur par heure, avec une pression pouvant aller jusqu'à 160 bars [32].

## III.2. Structure globale des chaudières

### III.2.1. Composants principaux :

- **Le foyer ou chambre de combustion** : Cette section constitue le cœur de la chaudière, chargée de transférer la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau.
- **Le brûleur** : Cet équipement régule l'introduction du combustible et du comburant dans la chambre de combustion, ajustant ainsi la flamme selon les besoins spécifiques (longueur, volume, température, intensité), et permettant le réglage de la combustion à la sortie. Il existe deux types de brûleurs en fonction du combustible utilisé : à fuel ou à gaz.
- **Faisceau de vaporisation** : Il comprend un ensemble de tubes entourant la chambre de combustion ou le circuit eau-vapeur. La vapeur ainsi générée est recueillie dans un réservoir où la séparation entre la vapeur et l'eau a lieu. Pour limiter les pertes importantes lors de l'évacuation des fumées, d'autres surfaces de chauffe sont prévues, telles que les réchauffeurs d'eau ou économiseurs, et les réchauffeurs d'air.
- **Ventilateur** : Il assure la circulation des gaz, y compris des fumées, dans le générateur de vapeur, ainsi que l'air de combustion.
- **Cheminée** : Elle permet l'évacuation des fumées refroidies après leur passage dans la chaudière.
- **Armature (Robinetterie)** : Elle comprend divers registres, soupapes de sécurité, voyants de flamme, robinets permettant l'ouverture et la fermeture des conduites, ainsi que divers instruments de mesure de la vapeur, garantissant ainsi la sécurité et le bon fonctionnement de l'ensemble.
- **Isolation** : Les parois extérieures des chaudières sont revêtues d'un isolant, soit de la laine de verre soit de matériau réfractaire.
- **Le ballon** : C'est un réservoir où se séparent les phases liquide et vapeur de l'eau, assurant ainsi la circulation naturelle de la vapeur.
- **Armoire électrique** : Elle contient un réseau de distribution électrique, fonctionnant avec des résistances chauffantes et, éventuellement, à différentes fréquences.

### III.2.2. Appareils de récupération :

- **Réchauffeur d'eau ou économiseur** : Les économiseurs, constitués de faisceaux de tubes horizontaux, récupèrent une partie des calories des gaz de combustion afin d'augmenter la température de l'eau d'alimentation avant son retour à la chaudière. Cela permet d'améliorer le rendement de la chaudière en réduisant les pertes de chaleur.

- **La surchauffeur de vapeur :** Les surchauffeurs sont constitués d'une série de serpentins tubulaires généralement identique, ils servent à chauffer la vapeur saturée venant du ballon, et la rendre vive afin d'améliorer le rendement du cycle thermodynamique
- **Réchauffeur d'air :** Ce dernier échangeur récupère la chaleur des gaz de combustion pour réchauffer l'air destiné à la combustion. Habituellement constitué de tubes inoxydables, il permet à l'air de circuler à l'intérieur tandis que les fumées circulent à l'extérieur.
- **Réchauffeur :** Il remplit une fonction similaire à celle de la surchauffeur et est situé derrière ce dernier [33].

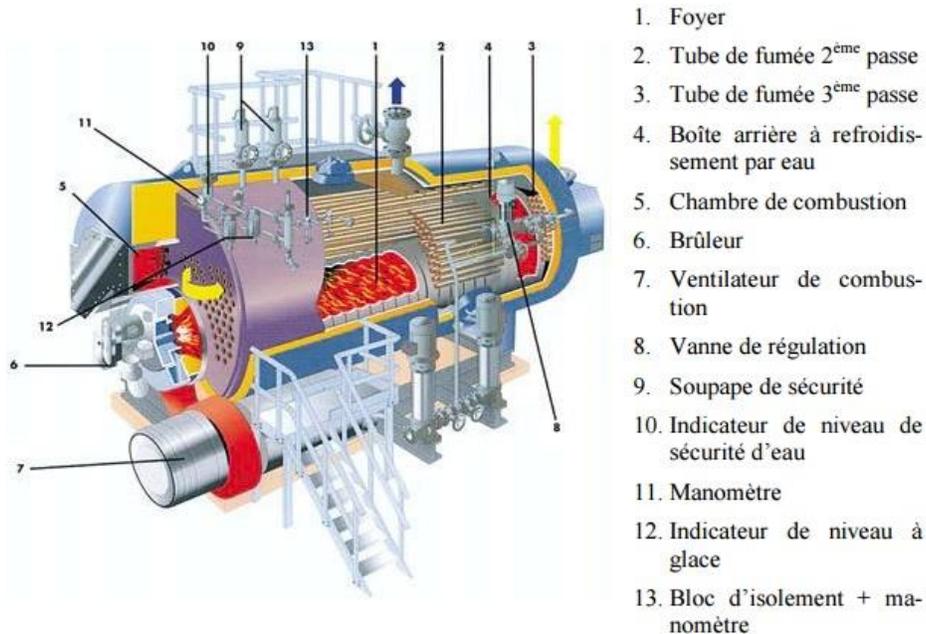


Figure III-3 : Schéma d'une chaudière

### III.3. La chaudière utilisée dans la zone EST :

La chaudière utilisée dans la zone EST c'est une chaudière à tube d'eau nommé SITERM de type SB-30/176/24OC/NG une marque Turque fabriquée en Istanbul en 2016.



**Figure III.3 :** La chaudière Siterm de la zone fluide

**Tableau III.1 :** Caractéristiques de la chaudière Siterm

Capacité	30 t/h
Volume	15m <sup>3</sup>
Pression de travail	17 bars
Pression de désigne	25bars
Pression max	45 bars
Pression de valve de purge	22 bars
Température de travail	0-240 C°
T° de l'eau d'alimentation	100-110C°
Combustible	Gaz naturelle
Pression d'alimentation	155KW -28-A-380V-50HZ

### III.4. Les problèmes rencontrés dans les chaudières :

Les opérations régulières d'extraction et de purge continue sont cruciales pour maintenir la qualité de l'eau des chaudières et assurer leur bon fonctionnement. Une gestion efficace de l'eau est donc indispensable pour prévenir les problèmes courants rencontrés par les chaudières à vapeur, tels que le primage, le moussage, l'entartrage et la corrosion.

#### III.4.1. Primage :

Un problème crucial rencontré dans le fonctionnement des chaudières est celui de l'entraînement d'eau de chaudière dans la phase vapeur, également connu sous le nom de phénomène de primage. Ce phénomène peut être causé par différents facteurs :

- Un effet mécanique, tel que la vaporisation de l'eau de chaudière au niveau d'une chicane endommagée.
- La volatilité de certains sels présents dans l'eau de chaudière, tels que la silice ou les sels de sodium.
- La formation de mousse peut également contribuer à ce problème.

Le phénomène de primage peut être causé par plusieurs facteurs :

- Une conception inappropriée de la chaudière.
- Une viscosité excessive de l'eau.
- La présence de matières en suspension.
- La présence de produits tensioactifs, qui réduisent la tension superficielle et favorisent la formation de mousse.

#### III.4.2. Le Moussage :

La mousse est constituée de bulles ou de mousse générées à la surface de l'eau de chaudière en raison de la concentration élevée de solides dans l'eau de chaudière et évacuées avec la vapeur. Cependant, il est généralement admis que certaines substances tels que les graines alcalines, les huiles, les graisses, certains types de substances

Les solides organiques et les matières en suspension sont particulièrement bénéfiques à la formation de mousse.

Théoriquement, les matières en suspension vont s'accumuler sur le film à la surface autour de la bulle, la rendant plus dure. Par conséquent, les bulles de vapeur sont moins susceptibles d'éclater et de s'accumuler en mousse. Plus les particules sont fines, mieux elles s'accumulent dans les bulles.

### III.4.3. Entartage :

L'incrustation se réfère à la formation de dépôts cristallins directement sur les surfaces métalliques ou autres, causée par les impuretés présentes dans l'eau telles que le carbonate de calcium, le sulfate de calcium, etc. Ces impuretés se transforment en sels peu solubles ou non solubles en raison de l'élévation de la température, et le composé de tartre peut être constitué de plus d'un composant. La formation de couches de tartre sur la surface du métal réduit le coefficient de transfert de chaleur et peut entraîner la rupture des tubes en raison de la formation de points chauds.



Figure III.4 : Entartrage dans les chaudières

### III.4.4. Corrosions :

Les surfaces d'échange des chaudières, tant du côté des fumées que du côté de l'eau, sont susceptibles de subir la corrosion. Les principaux facteurs responsables sont l'eau elle-même, l'oxygène dissous, ainsi que, dans une moindre mesure, la soude caustique et la salinité[36].

L'eau : L'eau pure désaérée attaque lentement le fer à la température ambiante selon la réaction suivante :



Aux températures plus élevées, telle que celles rencontrées dans les générateurs de vapeur, l'attaque s'accélérerait par l'augmentation de la dissociation des molécules d'eau.

- **L'oxygène dissous** : La corrosion par l'oxygène est le problème le plus grave rencontré lors de l'observation des chaudières. Un mauvais contrôle de l'oxygène peut entraîner une corrosion par piqûre, qui « creuse » rapidement la surface métallique. Ces points faibles peuvent provoquer l'explosion du réchauffeur et de l'économiseur. D'une manière générale, l'oxygène dissous a un effet très nocif sur le processus de corrosion du fer par l'eau. [37].

La présence simultanée d'oxygène et d'eau est un facteur favorable à la corrosion, qui provoque des réactions impliquant des produits chimiques et des charges électriques. On parle alors de corrosion électrochimique.

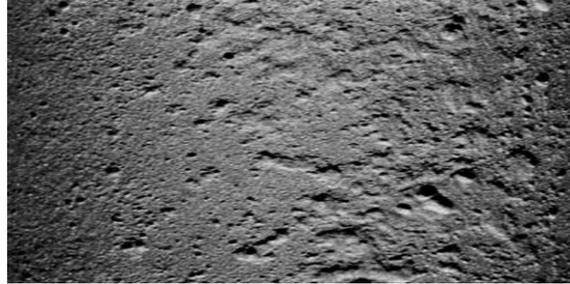


Figure III.11 : Corrosion par O<sub>2</sub>

- **La soude caustique :** La présence de petites quantités de soude caustique est généralement bénéfique (fixation du pH dans une zone légèrement alcaline), mais lorsque sa concentration est très élevée, elle peut provoquer un phénomène corrosif appelé fragilisation par la soude caustique.



Figure III.12 : Fragilisation caustique

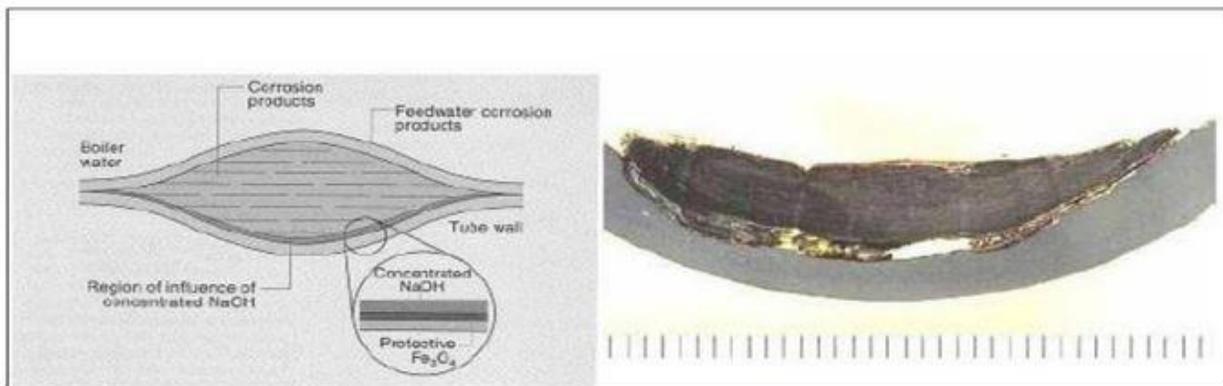


Figure III.13 : Effet de la corrosion caustique

• **La salinité** : Les fuites d'eau de mer dans les condensateurs peuvent entraîner l'introduction de sels tels que le chlorure de magnésium et de calcium, lesquels peuvent subir une hydrolyse pour former de l'acide chlorhydrique[37].



L'acide résultant attaque le métal selon la réaction suivante :



#### III.4.4.1. Les facteurs agissant sur la vitesse de corrosion :

Trois paramètres influent sur la vitesse de corrosion par l'oxygène dans une chaudière :

- La teneur en oxygène ;
- La température ;
- Le pH.
  - **La teneur en oxygène** : La vitesse de corrosion est proportionnelle à la concentration en oxygène dissous même à température ambiante de 25°C. Autrement dit afin de protéger les lignes des appoints dans un circuit fermé d'eau vapeur il faut réduire au maximum la diffusion de l'oxygène dans ces lignes.
  - **La température** : L'élément principal déclencheur de la corrosion reste toujours l'oxygène, les autres facteurs comme la température ont une influence directe sur la vitesse de cette corrosion par l'oxygène comme la vitesse de corrosion pour une concentration donnée en oxygène passe pratiquement au double. C'est le cas de la corrosion dans les économiseurs et les chaudières.
  - **Le pH** : Le pH de l'eau alimentaire doit être supérieur à 7.5 pour avoir élimination efficace de l'oxygène. La corrosivité de l'oxygène diminue quand le pH de l'eau alimentaire augmente. Le pH optimum est de 9.

### III.5. Protection contre les problèmes rencontrés dans la chaudière

#### III.5.1. Protection contre le moussage et le primage :

Une méthode largement adoptée pour prévenir le moussage et le primage consiste à maintenir une concentration en solides relativement basse dans l'eau de la chaudière. En évitant les concentrations élevées dans l'eau, ainsi que les charges excessives et les changements brusques de charge dans les chaudières, on peut contribuer à éviter ces phénomènes. Souvent, les condensats contaminés retournent dans les systèmes de chaudières, ce qui entraîne des problèmes de transfert. Dans de tels cas, il est recommandé d'évacuer temporairement le condensat jusqu'à ce que la source

de contamination soit identifiée et éliminée. L'utilisation d'agents chimiques anti-moussage et anti-primage, qui sont des mélanges d'agents tensio-actifs, permet d'éliminer la formation de mousse, d'empêcher le transfert de fines particules dans la vapeur, et peut s'avérer très efficace pour prévenir le primage causé par de fortes concentrations d'impuretés dans l'eau des chaudières.

### **III.5.2. Protection contre l'entartrage :**

Les procédés les plus fréquemment utilisés comprennent :

- Les décarbonations à la chaux et sur les résines carboxyliques
- L'injection d'acides (lessivages).
- La séquestration par polyphosphate.
- L'adoucissement sur des résines échangeuses d'ions.

L'ingestion de corps minéraux volatils dans la vapeur à la température d'ébullition, dont la silice est la plus dangereuse, se produit au-dessus de 250°C. La présence de ces sels sur les ailettes des turbines provoque des problèmes importants dans leur fonctionnement. Les séances d'entraînement sont d'autant plus cruciales que la pression, et par conséquent la température, augmente. La concentration des éléments concernés dans l'eau du ballon est liée à ces éléments.

### **III.5.3. Protection contre la corrosion :**

Les techniques les plus couramment employées pour lutter contre la corrosion incluent :

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

## **III.6. Conditionnement des eaux de chaudières : [38]**

Le traitement et le conditionnement de l'eau doivent répondre aux trois objectifs prioritaires suivants :

- Au maintien de l'échange thermique par prévention de l'entartrage et de la formation de dépôts sur les parois ;
- À la protection contre la corrosion ;
- À la qualité de la vapeur produite.

Les postes de traitement de l'eau assurent l'épuration et le dégazage de l'eau d'appoint ou de l'eau alimentaire. Le conditionnement est le complément indispensable du programme de traitement et comporte l'introduction rationnelle de « produits de conditionnement » au moyen de groupes de dosage.

On résume les produits les plus utilisés dans le tableau suivant :

**Tableau III.2: Les produits de conditionnement**

Produits	Rôle
<b>Les phosphates</b>	Associés à l'alcalinité de l'eau de chaudière, ils neutralisent la dureté par formation de phosphate tricalcique, composé insoluble que l'on peut disperser puis évacuer par les purges de fond ou par les purges continues. Pour les systèmes où l'eau alimentaire est à moins de 1° TH, les phosphates sont utilisés pour contrôler l'alcalinité ou le pH de l'eau en chaudière et par conséquent, permettre d'éviter la corrosion acide ou alcaline des parois internes de la chaudière. On les associe souvent à des dispersants naturels et/ou de synthèse
<b>Les séquestrant</b>	Tel que l'EDTA qui permet de maintenir les impuretés en solution
<b>Les réducteurs d'oxygène</b>	Comme le sulfite de sodium, bisulfite, hydrazine, carbohydrazine etc. Ces réducteurs, catalysés ou non, permettent la rétrogradation des oxydes, la réduction de l'oxygène ainsi que, pour certains, la passivation des surfaces métalliques. Leur choix et leur dosage, diffèrent suivant que l'on dispose ou non d'un dégazage thermique et suivant l'utilisation de la vapeur (certains produits tels que l'hydrazine sont interdits en industrie agroalimentaire).
<b>Les antimousses ou antiprimage</b>	Mélanges de tensioactifs qui modifient les tensions superficielles du liquide et suppriment les mousses réduisant ainsi l'entraînement de fines gouttelettes d'eaux dans la vapeur (primage).
<b>Les phosphates organiques</b>	Qui apportent une inhibition avec effet de seuil

Au niveau du Complexe (zone Est), les produits qui ont été injectés dans la chaudière étudié, étant:

- **L'hydrazine [39]** : Malgré sa toxicité et son caractère éventuellement cancérigène, l'hydrazine est l'additive anticorrosion le plus utilisé depuis les années 1960.

A la fois anti - oxygène et inhibiteur de corrosion, il agit aussi bien en phase liquide qu'en phase vapeur. Cependant sa volatilité est faible et il restera essentiellement dans l'eau. Il n'augmente pas la teneur en sel de l'eau en chaudière.

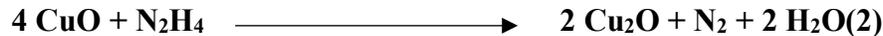
- Sa réaction avec l'oxygène est :



La température, l'excès d'hydrazine, les pH élevés et la présence de catalyseur sont les principaux facteurs qui favorisent la vitesse de réaction.

- Son action inhibitrice de la corrosion :

• **L'hydrazine** convertit les couches oxydées d'oxyde cuivrique en oxyde cuivreux plus stable :



L'hydrazine se décompose au-dessus de 300°C :



En formant essentiellement de l'ammoniac et un peu d'hydrogène :



L'ammoniac qui est extrêmement volatil suivra le cheminement de la vapeur et peut être la cause de corrosions sur des éléments en cuivre ou alliage de cuivre.

• **Le phosphate** : une technique maintenant ancienne pour assurer un pH alcalin dans l'eau de chaudière consiste en l'addition de phosphate trisodique ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), éventuellement en mélange avec du phosphate disodique ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ).

- Dans l'eau il est capable de libérer de la soude en provoquant l'augmentation du pH.



Le principal avantage du traitement aux phosphates est un effet tampon qui augmente la tolérance aux intrusions d'impuretés pouvant affecter le pH de l'eau.

- Un autre avantage de ce traitement est la réaction avec les sels de calcium, de magnésium et la silice pour former des précipités non adhérents qui peuvent être aisément éliminés, sous forme de boues, avec les purges :



Différentes méthodes de traitement utilisant des phosphates de soude sont disponibles, visant à :

- Maintenir un pH adéquat ;
- Prévenir la corrosion caustique résultant d'un excès de soude, qu'il soit localisé ou généralisé ;
- Empêcher la précipitation de phosphate sur les surfaces chaudes.

En résumé, les impuretés présentes dans l'eau sont responsables de divers problèmes affectant les systèmes de chauffage. Le traitement de l'eau devient donc d'une importance capitale. Un programme de traitement chimique bien conçu, associé à des pratiques appropriées, améliore l'efficacité des systèmes, réduit les coûts d'exploitation et de maintenance, tout en prolongeant la durée de vie des équipements.

### III.7. Les normes d'exploitation pour éviter les problèmes techniques de chaudière

**Tableau III.3 : Les normes d'eau d'alimentation des chaudières**

Analyse d'eau à l'entrée des pompes d'alimentation de chaudière		
Aspect général		Propre & Sans couleur
Crudité totale (CaCO <sub>3</sub> )	Ppm	0.00
Fe total	Ppm	0.01
Cu total	Ppm	0.005
O <sub>2</sub> dissous	Ppm	0.007
Huile & Organique	Ppm	0.00
25°C valeur pH		8,5 – 9,5
Solides dissous totaux	Ppm	0.1
Silice SiO <sub>2</sub>	Ppm	< 0.02

**Tableau III.4 : Les normes d'eau de chaudière**

Analyse d'eau qui circule dans la chaudière		
Crudité totale	Ppm	Propre & Sans couleur
PH		0.00
TDS	Ppm	0.01
Silice – max.	Ppm	0.005
PO <sub>4</sub>	Ppm	0.007
Solides dissous totaux	Ppm	0.00
Huile & Organique		8,5 – 9,5

Afin d'atteindre les normes mentionnées dans les deux tableaux précédents, il est nécessaire d'effectuer des opérations technologiques sur l'eau brute et de suivre différentes étapes techniques liées à la conception du traitement des eaux.

**Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé la chaudière examinée, son mécanisme, ainsi que les divers éléments annexes. Selon cette étude, il est possible de conclure que la chaudière est un système assez complexe en raison de sa structure en plusieurs sous-systèmes. Chacun d'entre eux assure une fonction spécifique (combustion, évaporation, surchauffage...etc.) et nécessite une surveillance intensive pour garantir un niveau de sécurité adéquat.

# **CHAPITRE IV**

## **Partie Expérimentale.**

## IV.1- Problématique

Dans le cadre de notre formation en Master, nous avons été encouragés à acquérir une expérience professionnelle en entreprise. Nous avons eu la chance de réaliser nos travaux de fin d'études au Complexe sidérurgique d'El Hadjar à Annaba, un des plus grands complexes industriels en Afrique, offrant une expérience professionnelle de grande envergure.

La production continue au sein du Complexe sidérurgique nécessite une utilisation considérable d'eau. Dans ce contexte, notre encadreur de stage nous a recommandé de concentrer notre étude sur la zone Est de la division des fluides. Cette zone est essentielle pour la croissance de la production du Complexe, car elle traite de grandes quantités d'eau utilisées dans divers processus industriels, notamment l'eau industrielle, l'eau déminéralisée, la vapeur surchauffée, et l'air comprimé. La vapeur surchauffée, produite exclusivement par les chaudières, est cruciale pour plusieurs applications, y compris l'alimentation des turbines de production d'électricité et le maintien de la température du haut fourneau lors de son arrêt, afin de préserver la température élevée requise.

Au cours des années d'exploitation de l'installation, les chaudières, qui produisent la vapeur, ont rencontré divers problèmes récurrents. Parmi ces problèmes, nous avons identifié :

- La rupture des pores du bac lorsque le débit et la pression sont élevés ;
- Les fuites au niveau des vannes pneumatiques ;
- La rupture des canalisations d'alimentation, entraînant des fuites, comme illustré dans l'image ci-dessous :



**Figure IV.1** : Capture de fuite au niveau de la chaudière

Les problèmes persistants de corrosion et d'entartrage sont dus à plusieurs facteurs :

- Avant l'installation du système de filtration membranaire, l'adoucissement de l'eau était effectué à l'aide d'une résine cationique. Cependant, la qualité de l'eau obtenue ne répondait pas pleinement aux exigences pour l'alimentation des chaudières, où le titre hydrotimétrique devrait être compris entre 0,3 °f et 0,5 °f. Le titre hydrotimétrique de l'eau traitée se situait entre 2 °f et 10,2 °f.
- Pendant les périodes de pluie, l'eau provenant du barrage était fortement chargée en matières en suspension (MES), ce qui compliquait le processus de traitement. En revanche, pendant les périodes sèches, l'eau était traitée conformément aux normes habituelles.
- Pendant notre stage, l'eau utilisée par le Complexe provenait du barrage habituel, mais la qualité de cette eau brute n'était pas entièrement maîtrisée par le traitement actuel.
- Le dégazage thermique de l'oxygène était insuffisant car la température de l'eau dans la cuve n'atteignait pas les 70 °C. Une augmentation de la température jusqu'à 105 °C est recommandée pour un dégazage efficace.

**Pour prendre en compte l'historique de l'équipement, nous avons proposé de suivre les traitements effectués dans la zone Est, depuis l'eau brute jusqu'à son traitement par osmose inverse. Cela nous permettra d'identifier et de visualiser certains des problèmes répertoriés dans cette problématique.**

## IV.2 Objectif de l'étude

L'objectif de notre travail est d'évaluer la qualité de l'eau utilisée pour alimenter la chaudière SITERM. Pour cela, nous avons suivi divers paramètres et collecté des données analytiques fournies par le laboratoire central du complexe sidérurgique EL HADJAR concernant l'eau distribuée au cours de l'année 2024, sur une période de quinze jours.

Les paramètres analysés incluent des paramètres physico-chimiques comme le pH, la température, le titre alcalimétrique simple (TA), le titre alcalimétrique complet (TAC), le titre hydrotimétrique (TH) ; conductivité, les chlorures....

Nous avons analysé l'eau brute, l'eau industrielle, l'eau d'alimentation et l'eau de la chaudière, dont l'objectif ultime de contrôler la qualité de l'eau de la chaudière. Ce contrôle permettra de vérifier si l'eau distribuée à l'installation de filtration membranaire est conforme aux normes établies par le fabricant de l'équipement. Ensuite, en utilisant des indices de stabilisation, nous pourrons déduire les caractéristiques de l'eau d'alimentation et de la chaudière.

Par ailleurs, nous proposons de surveiller régulièrement les performances du système de filtration membranaire et de comparer les résultats avec les données historiques pour identifier d'éventuelles variations saisonnières ou anomalies dans la qualité de l'eau. Nous suggérons également de mettre en place un programme de maintenance préventive basé sur les résultats de notre étude, afin d'optimiser l'efficacité du traitement de l'eau et de prolonger la durée de vie des équipements de la chaudière.

### IV.3 Le Prélèvement des Échantillons

- **Eaux brutes** : Les échantillons d'eaux brutes, provenant du barrage de Cheffia, ont été prélevés directement à la source d'alimentation de l'usine de traitement. Ils ont été placés dans des flacons en plastique de 1,5 L.
- **Eau décarbonatée** : L'eau décarbonatée a été collectée dans des flacons en plastique de 1,5 L directement depuis la bêche de stockage. Après prélèvement, les échantillons ont été soigneusement fermés pour éviter toute évaporation et transportés au laboratoire dans une glacière.
- **Eau d'alimentation** : Les échantillons d'eau d'alimentation ont été prélevés à partir de l'adoucisseur, qui fournit l'eau utilisée pour alimenter la chaudière.
- **Eau de chaudière** : L'eau de chaudière a été collectée à partir des purges continues, situées près du ballon inférieur de la chaudière, et placée dans des flacons appropriés.

### IV.4 Paramètres Physico-chimiques Analysés

Durant la période de stage, des analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire du complexe sur des échantillons d'eau brute, d'eau industrielle, d'eau d'alimentation et d'eau de chaudière afin d'évaluer leur qualité. Les paramètres pris en compte comprennent le titre alcalimétrique (TA), le titre alcalimétrique complet (TAC), la dureté totale (TH), la conductivité, le pH, les chlorures et les solides dissous totaux (TDS), principalement. Dans la suite, nous détaillerons la description des paramètres analysés au laboratoire des eaux.

#### IV.4.1 Détermination de l'alcalinité (Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet)

##### IV.4.1.1 Principe :

Ces mesures sont réalisées en neutralisant un volume spécifique d'eau avec un acide minéral dilué, en utilisant un indicateur coloré, et sont évaluées à l'aide de la méthode volumétrique standard pratiquée au laboratoire central d'Arcelor-Mittal (sidérurgie).

##### IV.4.1.2 Réactifs :

- Acide sulfurique à 0.02N
- Phénolphtaléine à 0.5%
- Méthylorange à 0.5%

##### IV.4.1.3 Mode opératoire :

###### A). Détermination de TA :

- Un échantillon de 100 ml d'eau à analyser est prélevé dans un erlenmeyer.
- 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine sont ajoutées.
- Une coloration rose devrait apparaître ; si ce n'est pas le cas, le titre alcalimétrique est nul.

- L'acide sulfurique est ensuite ajouté lentement dans l'erlenmeyer à l'aide d'une burette graduée, tout en agitant constamment, jusqu'à ce que la solution soit complètement décolorée. À ce stade, le pH est d'environ 8,3.
- Le titre alcalimétrique est ensuite directement lu sur la burette, exprimé en degré français (°F).

### B). Détermination de TAC :

- L'échantillon traité précédemment est utilisé, ou la prise d'essai initiale est conservée si aucune coloration n'a été obtenue.
- Deux à trois gouttes de solution de méthylorange sont ajoutées à l'échantillon, puis l'acide est versé ou continué à être versé à l'aide de la burette, tout en agitant constamment, jusqu'à ce que la solution vire du jaune au jaune orangé. À ce stade, le pH est d'environ 4,3.
- Le volume lu sur la burette au moment du nouveau virage est ensuite noté.

#### IV.4.1.4 Expression des résultats :

$V_1$  : volume d'acide en millilitres lu à la burette et exprime le TA en °F.

$V_2$  : volume d'acide en millilitre lu à la burette.

Soustraire ce volume  $V_2$  de 0.5 ml correspond à la quantité d'acide nécessaire pour le changement de couleur de l'indicateur, qui est légèrement inférieur au pH de neutralisation des bicarbonates.

Ainsi,  $V_2 - 0.5$  exprime le titre alcalimétrique complet en degrés français (°F°F).

Pour ensuite convertir le titre alcalimétrique et le titre alcalimétrique complet en milligrammes de  $\text{CaCO}_3$  par litre, on applique la relation suivante : **1°F=10 mg de  $\text{CaCO}_3$  /L.**



**Figure IV.2 :** Dosage volumétrique du TA et TAC

## IV.4.2 Détermination du titre hydrotimétrique TH

### IV.4.2.1. Principe :

La mesure de la dureté totale repose sur la formation de complexes entre les ions alcalino-terreux et le sel disodique de l'acide éthylènediamine tétra-acétique (EDTA), en présence du noir ériochrome T dans un milieu tamponné.

### IV.4.2.2 Réactifs :

- Sel di sodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique : solution à 0.01 N
- Solution indicateur noir ériochrome T
- Solution tampon ammoniacale (pH 10).

### IV.4.2.3 Mode opératoire :

- Un échantillon de 100 ml d'eau à analyser est prélevé dans un erlenmeyer.
- Environ 2 ml de la solution tampon sont ajoutés.
- 4 à 5 gouttes de noir ériochrome T sont ensuite introduites.
- Si la coloration est bleue, cela indique l'absence de calcium (Ca) et de magnésium (Mg).
- En revanche, si la coloration vire au rose violet, cela signifie la présence de calcium (Ca) et de magnésium (Mg) dans l'échantillon analysé ; dans ce cas, un titrage avec l'EDTA est nécessaire jusqu'à l'obtention d'une coloration bleue.
- Le titre hydrotimétrique est ensuite lu directement sur la burette, exprimé en degrés français (°F).

### IV.4.2.4 Expression des résultats :

V : volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le TH en °F. Pour convertir le TH en milligrammes de CaCO<sub>3</sub> au litre, on a : **1°F = 10mg de CaCO<sub>3</sub> /L**



**Figure IV.3:** Dosage volumétrique du TH

On classe généralement le caractère des eaux de la manière suivante :

**Tableau IV.1 :** Caractère des eaux selon le TH (BERNE F. et CORDONNIER J., 1991) [38]

La dureté (°F)	Caractère de l'eau
TH < 6	Eaux très douces
6 < TH < 15	Eaux douces
15 < TH < 30	Eaux moyennement dures
TH > 30	Eaux très dures

### IV.4.3 DOSAGE DU TITRE CALCIQUE

#### IV.4.3.1 Principe :

La mesure du  $T_{Ca}$  repose sur la formation de complexes entre les ions calcium et le sel disodique de l'acide éthylène-diamine tétraacétique (EDTA), en présence de calconne carboxylique dans un milieu tamponné.

#### IV.4.3.2 Réactifs :

- Hydroxyde de potassium 20% (solution tampon pH 12)
- Sel disodique de l'acide éthylène diamine tétraacétique : solution à 0.01 N .
- Acide calconne carboxylique (indicateur coloré).

**IV.4.3.3 Mode opératoire :**

- Prélevez un échantillon de 100 ml d'eau à analyser.
- Ajoutez 2 ml de KOH et environ 0,4 g de l'indicateur.
- Mélangez et dosez immédiatement. Pendant le dosage, continuez d'agiter tout en ajoutant la solution d'EDTA.
- Versez lentement la solution d'EDTA vers la fin du dosage. Le point d'équivalence est atteint lorsque la couleur devient nettement bleue.
- Le  $T_{Ca^{++}}$  est ensuite directement lu sur la burette, exprimé en degrés français (°F).

**IV.4.3.4 Expression des résultats :**

V : volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le  $T_{Ca^{++}}$  en °F. Pour convertir le TH en milligrammes de  $CaCO_3$  au litre, on a :  $1^{\circ}F = 10\text{mg de } CaCO_3 / L$



**Figure IV.4:** Dosage volumétrique du  $T_{Ca^{++}}$

**IV.4.4 DOSAGE DES CHLORURES**

Cela est réalisé au moyen d'un spectrophotomètre, un instrument permettant de mesurer l'absorbance d'une solution homogène à une longueur d'onde spécifique dans une plage spectrale définie [39].

**IV.4.4.1 Principe :**

Cette méthode consiste à doser le chlore combiné aux chlorures à l'aide de nitrate d'argent, en utilisant le chromate de potassium comme indicateur.

**IV.4.4.2 Réactifs :**

- Chromate de potassium ( $K_2CrO_4$ ) à 5% (indicateur).
- Nitrate d'argent ( $AgNO_3$  à 0.1 N).

**IV.4.4.3 Mode opératoire :**

- Prélevez un échantillon de 100 ml d'eau à analyser.
- Ajoutez 1 ml de chromate de potassium.
- Si la solution prend une coloration rouge brique, cela indique une absence de chlorures.
- Si la solution devient jaune, cela indique la présence de chlorures dans l'échantillon. Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer un titrage avec du nitrate d'argent à 0,1 N jusqu'à l'apparition d'une teinte rouge brique.
- Le volume de nitrate d'argent utilisé est ensuite directement lu sur la burette.

**IV.4.4.4 Expression des résultats :**

V : Volume de nitrate d'argent lu directement sur la burette dont la teneur en ions chlorures est mesuré par la relation :  $Cl^- \text{ (en mg/L)} = V \text{ nitrate d'argent en ml} \times 35,5$

Avec : V : volume du nitrate d'argent en ml ; 35,5 : est la masse molaire du chlorure ( $Cl^-$ )



**Figure IV.5 :** Dosage volumétrique du  $Cl^-$

**IV.4.5 DETERMINATION DU pH**

Cette opération est effectuée à l'aide d'un pH-mètre, un dispositif électronique qui fournit la mesure du pH d'une solution.

**IV.4.5.1 Principe :**

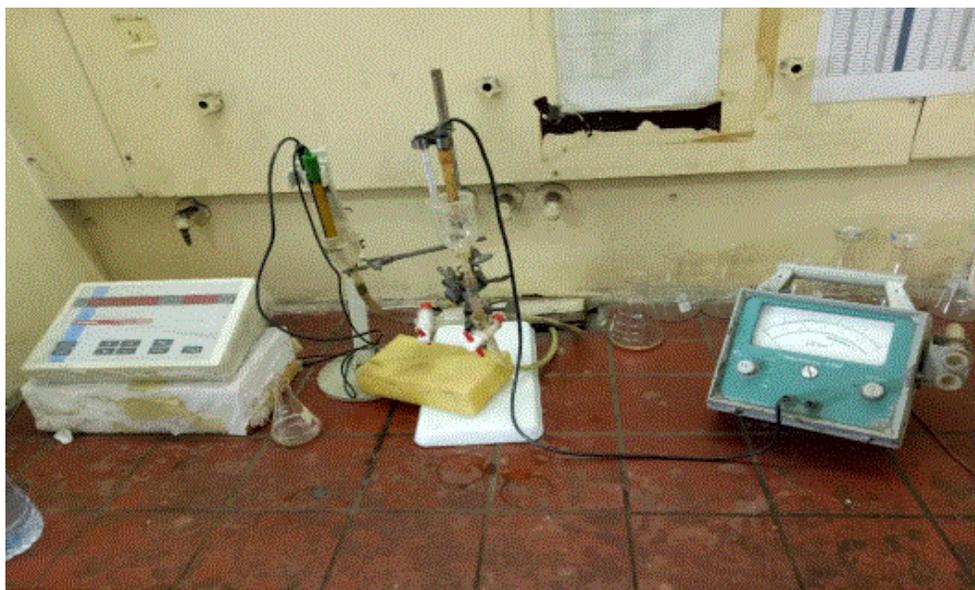
Le pH de l'eau à analyser est mesuré à l'aide d'un pH-mètre doté d'une électrode en verre préalablement étalonnée.

**IV.4.5.2 Le pH mètre :**

Le pH-mètre comprend une électrode que l'on immerge dans la solution pour évaluer son acidité ; les valeurs de pH sont ensuite affichées sur l'écran de l'appareil. Avant chaque mesure, il est nécessaire de rincer soigneusement l'électrode à l'eau distillée, et l'appareil doit être étalonné régulièrement pour garantir la fiabilité des mesures.

**IV.4.5.3 Expression des résultats :**

Les résultats sont exprimés en unités de pH à la température de l'eau .



**Figure IV.6 :Couple pH- mètre/Conductimètre**



**Figure IV.7 :** pH- mètre consort « C832 »

**Tableau IV.2 :** Caractère de l'eau selon le Ph

Valeur du pH	Caractère d'eau
PH < 7	Acide
PH = 7	Neutre
PH > 7	Basique

#### IV.4.6. DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE

##### IV.4.6.1 Principe :

La conductivité de l'eau à analyser est mesurée en utilisant un conductimètre équipé de deux électrodes en verre calibrées.

##### IV.4.6. 2 Le conductimètre :

Ce dispositif de mesure comprend une électrode immergée dans la solution dont on souhaite déterminer la salinité totale ; les résultats s'affichent sur l'écran du conductimètre. Avant chaque mesure, il est essentiel de rincer soigneusement l'électrode avec de l'eau distillée, et l'appareil doit être périodiquement calibré pour garantir la fiabilité de ses mesures.

##### IV.4.6. 3 Expression des résultats :

Les résultats sont présentés en unités de microsiemens par centimètre à la température de l'eau. En utilisant un facteur de conversion approprié, la conductivité peut être exprimée en concentration totale de solides dissous en milligrammes par litre (TDS en mg/L).



**Figure IV.8 :** Conductimètre « E587 »

#### **IV.4.7. DETERMINATION DES MATIERES EN SUSPENSION**

Elle est réalisée en utilisant un spectrophotomètre, un dispositif permettant de mesurer l'absorbance d'une solution homogène à une longueur d'onde spécifique dans une plage spectrale déterminée [39].

##### **IV.4.7.1 Principe :**

L'analyse est réalisée par une méthode photométrique, où la mesure est effectuée à l'aide d'un instrument appelé "spectro H Dr 5000". Cette méthode ne nécessite aucune étape de filtration ou de pesage.

##### **IV.4.7.2 Mode opératoire :**

- Choisissez le programme d'analyse "MES" sur le spectrophotomètre ;
- Calibrez l'appareil avant de procéder à la mesure de l'échantillon ;
- Prélevez un échantillon d'eau à analyser dans une cuve ;
- La valeur des matières en suspension (MES) sera directement affichée sur l'écran de l'appareil.

##### **IV.4.7.3 Expression des résultats :**

Les valeurs lues sur l'écran de l'appareil expriment la teneur en MES en mg /L.

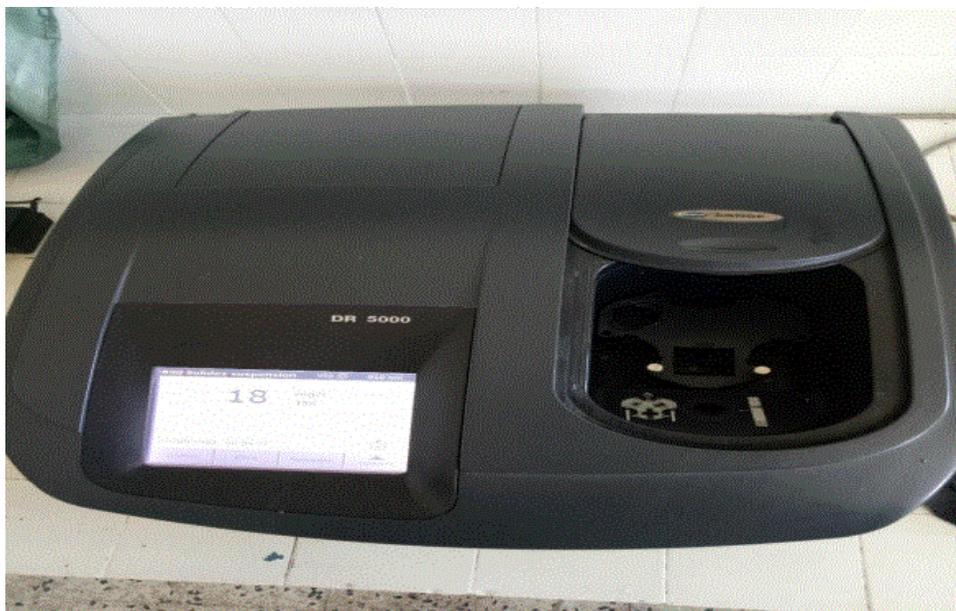


Figure IV.9 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 »

#### IV.4.8. DOSAGE DU FER TOTAL

On utilise un spectrophotomètre pour mesurer l'absorbance d'une solution homogène à une longueur d'onde spécifique dans une plage spectrale déterminée.

##### IV.4.8.1 Principe :

Lorsqu'il est porté à ébullition, l'acide chlorhydrique libère le fer sous forme ionique. Ensuite, l'acide ascorbique réduit le fer à l'état ferreux, qui peut être dosé colorimétriquement en utilisant la coloration rouge provoquée par les sels ferreux avec l'orthophénanthroline.

##### IV.4.8.2 Réactifs :

- Solution saturée d'acétate de sodium ;
- 0,3 ml de solution d'acide ascorbique à 1% ;
- Solution d'orthophénanthroline à 0,1% ;

##### IV.4.8.3 Mode opératoire :

Dans un tube à essai en verre Pyrex, prélevez 10 ml de l'eau à analyser. Ajoutez 1 ml de solution d'acide chlorhydrique et chauffez jusqu'à ébullition pour garantir la solubilisation du fer. Ensuite, laissez refroidir.

Ajustez le volume à 10 ml en ajoutant de l'eau bidistillée bouillie. Ensuite, ajoutez successivement :

- 0,5 ml de solution saturée d'acétate de sodium

- 0,3 ml de solution d'acide ascorbique à 1%
- 1 ml de solution d'orthophénanthroline à 0,1%.

Préparez un témoin avec 10 ml d'eau bidistillée. Traitez ce témoin dans les mêmes conditions que l'échantillon.

Laissez reposer les deux tubes à température ambiante pendant 30 minutes. Enfin, effectuez les lectures au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 510 nm.

#### IV.4.8.4 Expression des résultats :

La courbe donne la teneur en fer exprimée en mg /L.



Figure IV.10 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total

#### IV.4.9. DOSAGE DE L'ACIDE ORTHOPHOSPHORIQUE :

Elle est réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre, un instrument conçu pour mesurer l'absorbance d'une solution homogène à une longueur d'onde spécifique dans une plage spectrale définie.

##### IV.4.9.1 Principe :

En solution acide et en présence de molybdate d'ammonium, les phosphates forment un complexe phosphomolybdique qui, lorsqu'il est réduit par l'acide ascorbique, produit une coloration bleue. Les lectures sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre.

##### IV.4.9.2 Réactifs :

- Sulfomolybdique ;

- Acide ascorbique à 20 g / L.

#### IV.4.9.3 Mode opératoire :

- Prélevez 40 ml d'échantillon.
- Ajoutez 4 ml de solution sulfomolybdique, puis environ 0.1 g d'acide ascorbique.
- Placez sur une plaque chauffante et faites bouillir pendant une minute.
- Assurez un mélange homogène.
- Laissez refroidir, puis complétez jusqu'à 50 ml avec de l'eau distillée.
- Réglez la longueur d'onde à 608 nm.
- Effectuez la mesure de l'absorbance sur le spectrophotomètre.
- Effectuez la lecture en comparaison avec l'essai blanc.

#### IV.4.9.4 Expression des résultats :

La lecture d'absorbance sur le spectrophotomètre donne directement la teneur en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> exprimé en mg/L.



Figure IV.11 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » dosage de l'acide ortho phosphorique

#### IV.4.10. Détermination de la turbidité

Elle est réalisée à l'aide d'un turbidimètre, un dispositif conçu spécifiquement pour évaluer la turbidité. Cette mesure est utilisée pour évaluer le niveau de contamination physique de l'eau.

#### IV.4.10.1 Principe :

La turbidimétrie, une méthode de la photométrie, repose sur la comparaison entre la lumière diffusée par les particules en suspension, détectée à un angle de 90 degrés, et celle émise par une solution standard de turbidité préalablement établie.

#### IV.4.10.2 Mode opératoire :

- Calibrez l'appareil avant de procéder à la mesure de l'échantillon d'eau.
- Effectuez la mesure de la turbidité de l'échantillon ; l'unité de mesure courante est le NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

#### IV.4.10.3 Expression des résultats :

Les valeurs lues sur l'écran de l'appareil expriment la valeur de la turbidité en NTU



**Figure IV.12** : Turbidimètre AL450T-IR

### IV.5 Variation des paramètres physico-chimiques de l'eau brute et industrielle

Les données relatives aux paramètres physico-chimiques étudiés pour l'analyse de l'eau brute et de l'eau industrielle sont présentées dans les graphiques suivants, permettant ainsi d'observer leur évolution au fil du temps.

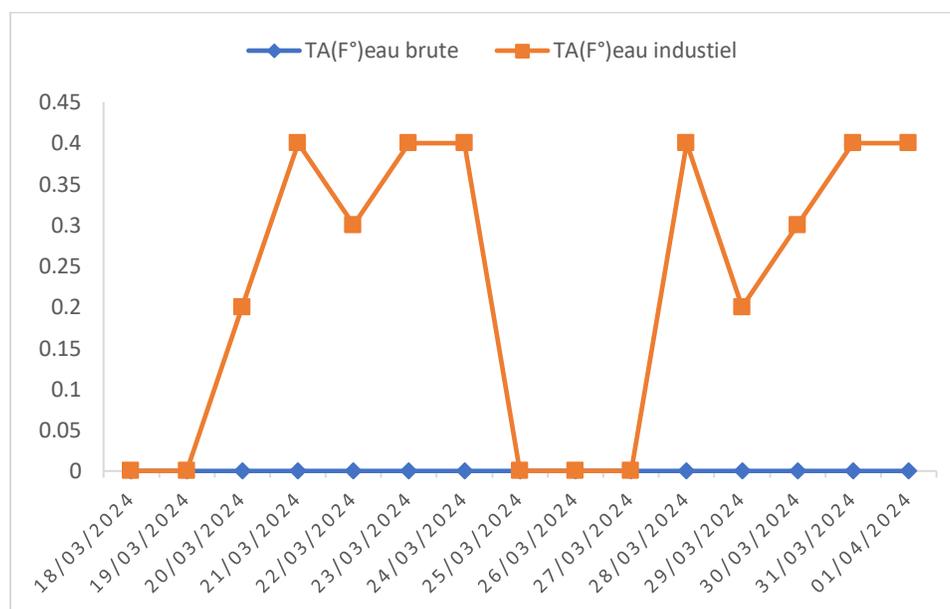
La qualité de l'eau industrielle à traiter est représentée dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Caractéristiques de l'eau industrielle.

Paramètres	Unités	Min	Max
TA	°F	1,0	2,0
TAC	°F	2,5	6,0
Ca <sup>2+</sup>	°F	6	8,0
Mg <sup>2+</sup>	°F	1	3,0
TH	°F	9	11,0
Cl <sup>-</sup>	mg/L	35	60,0
TDS	mg/L	300	400
MES	mg/L	10,0	/
pH	/	8,5	9,5
Température	°C	10,0	26,0
Conductivité 25°C	μS/cm	300,0	400,0

## IV.5.1 Représentation graphique des paramètres et discussions des résultats :

## ❖ Variation du TA :

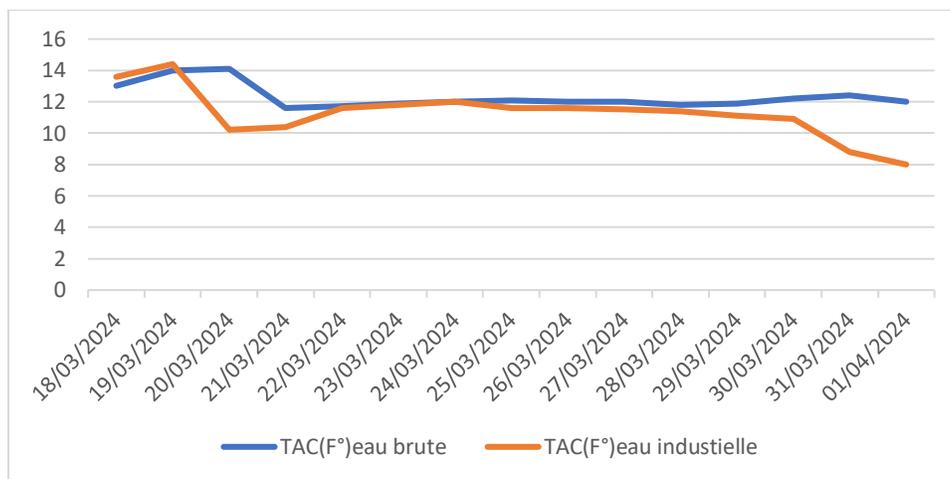


**Figure IV.13 :** Variation du titre alcalimétrie simple des eaux (eau brute et industrielle) dans la période de stage

D'après la Figure (IV.13) le titre alcalimétrique simple (TA) de l'eau brute reste constamment à 0 durant la période d'étude, tandis que celui de l'eau industrielle fluctue entre 0 et 0,4 °F. Le pH de l'eau brute est inférieur à 8,1 lorsque le TA est nul. Les variations observées du TA dans l'eau industrielle pourraient être attribuées à un traitement inadéquat de l'eau. Il est essentiel de maintenir un niveau minimum d'alcalinité pour permettre la formation d'une couche protectrice de carbonate

sur les canalisations, les préservant ainsi de certains types de corrosion. Un pH supérieur à 7 indique que l'eau est alcaline, c'est-à-dire basique

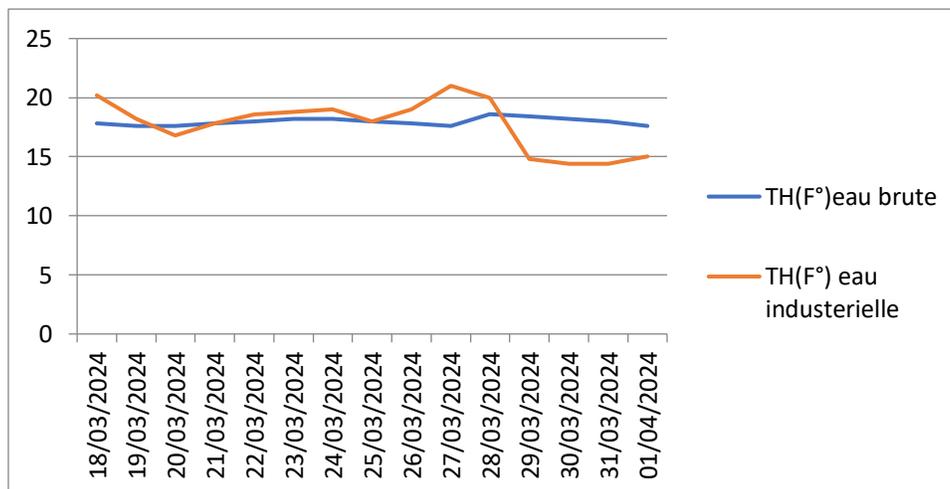
❖ Variation du TAC :



**Figure IV.14 :** Variation du titre alcalimétrique complet des eaux (eau brute et industrielle) dans la période de stage

L'analyse des titres alcalimétriques complets (TAC) pour les deux types d'eaux indique que les concentrations en bicarbonates atteignent des valeurs maximales de 14,1 °F pour l'eau brute et 14,4 °F pour l'eau industrielle. Ces valeurs dépassent les normes recommandées (TAC < 1) pour l'eau industrielle, ce qui affecte les caractéristiques de l'eau de chaudière et entraîne la présence de micro-flocs en suspension, susceptibles de se décomposer dans les conduites. Cette augmentation du titre alcalimétrique total pourrait être due à l'ajout excessif de chaux, résultant de l'introduction de grandes quantités en une seule fois.

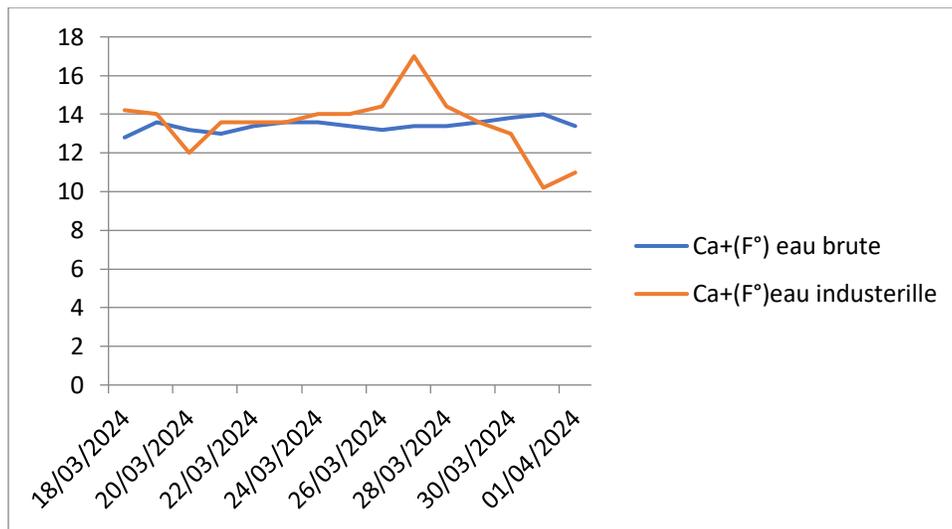
❖ Variation du TH :



**Figure IV.15 :** Variation de la dureté totale des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

La figure (IV.15) illustre la variation de la dureté totale de l'eau brute et de l'eau industrielle au cours de la période d'étude. L'eau brute affiche une dureté inférieure à celle de l'eau industrielle, avec une valeur maximale de TH de 18,6 °F, par contre pour l'eau industrielle est 20.2°F. L'eau brute est classée comme moyennement dure, avec des valeurs de TH comprises entre 17,6 et 18,6 °F. Par ailleurs, l'eau industrielle présente des valeurs de TH inférieures à 20,2 °F, indiquant qu'elle est extrêmement dure

❖ **Variation du  $T_{Ca^{2+}}$  :**



**Figure IV.16 :** Variation de la dureté calcique des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

La figure (IV.16) montre la dureté calcique des eaux brutes et industrielles. L'analyse du titre calcique révèle des variations pour les deux types d'eau. On observe que la teneur en calcium dans l'eau industrielle est plus élevée que dans l'eau brute. Cependant, ces valeurs ne respectent pas la norme de 3-8 °F.

❖ Variation du Cl<sup>-</sup> :

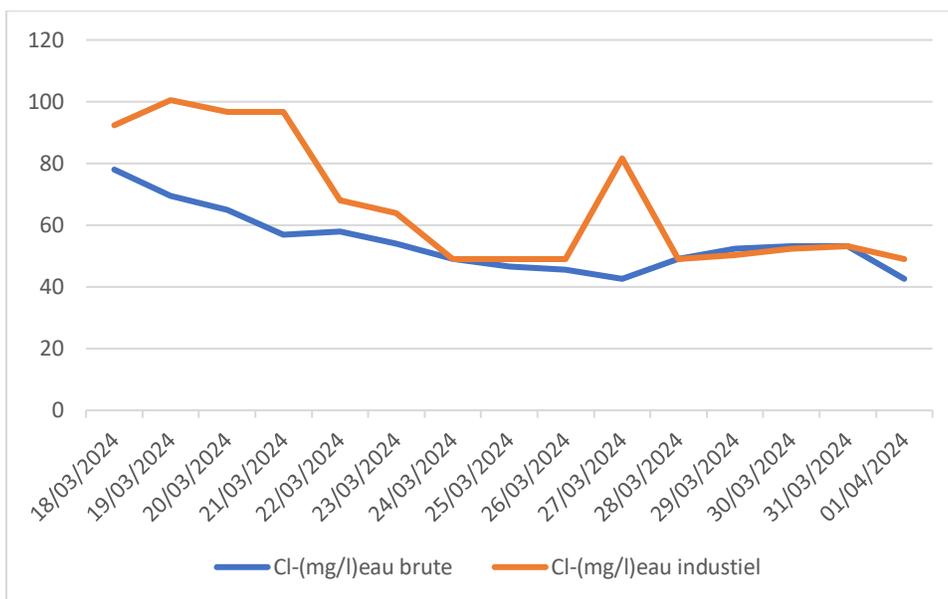


Figure IV.17 : Variation des chlorures dans l’eau (brute et industrielle) dans la période de stage

La figure (IV.17) illustre la variation des niveaux de chlorures dans l'eau. On remarque que les concentrations de chlorures dans les eaux industrielles dépassent celles de l'eau brute. Toutefois, les niveaux de chlorures dans les deux types d'eau étudiés restent en dessous de la norme établie à 250 mg/L.

❖Variation du TDS :

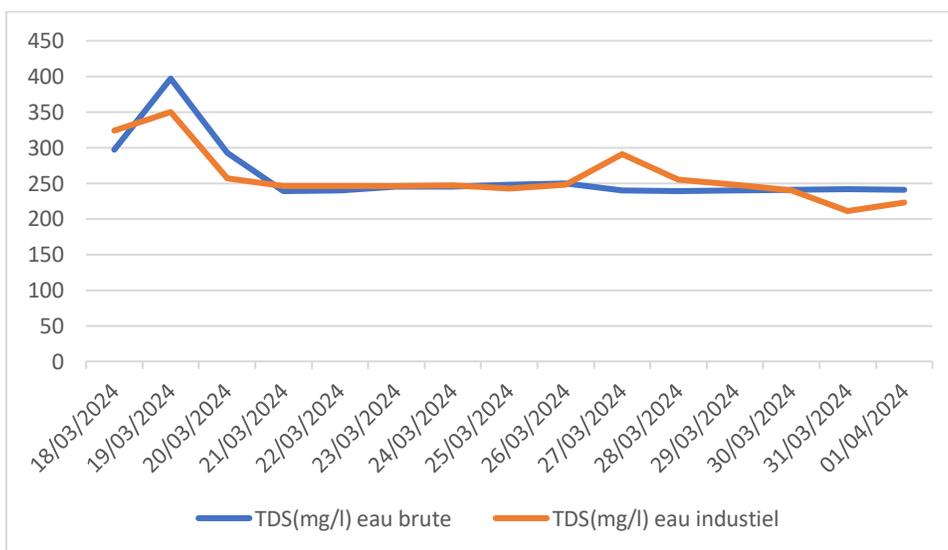
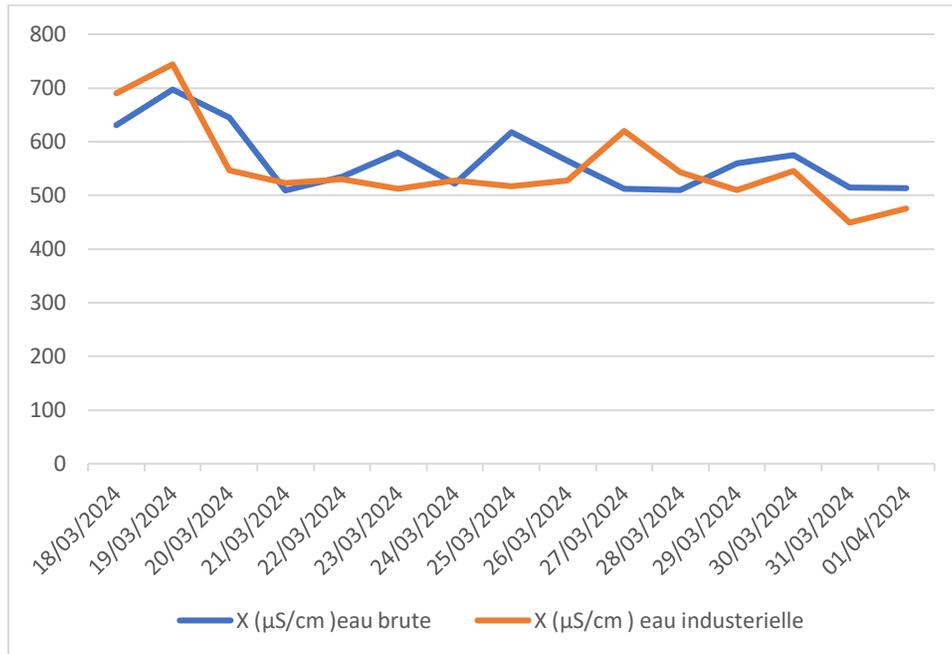


Figure IV.18 : Variation des TDS des eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

D'après la figure (IV.18), représentant la variation des taux de sels dissous, les deux types d'eau présentent une apparence similaire, avec une légère variation dans les taux de sels dissous, qui restent inférieurs à 500 mg/L. En effet, la minéralisation de ces eaux est généralement comprise entre 300 et 1000 mg/L, comme largement reconnu

#### ❖Variation du La conductivité :



**Figure IV.19 :** Variation de conductivité des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

On remarque sur la figure (IV.19). Les mesures de conductivité électrique pour tous nos échantillons d'eau se situent entre 449 et 744  $\mu\text{s/cm}$ . Par conséquent, on peut conclure que ces échantillons présentent des caractéristiques électriques conformes aux normes recommandées ( $<2800 \mu\text{s/cm}$ ). Il est à noter qu'une conductivité élevée peut être associée à un pH anormal ou à une salinité accrue.

❖ Variation du MES :

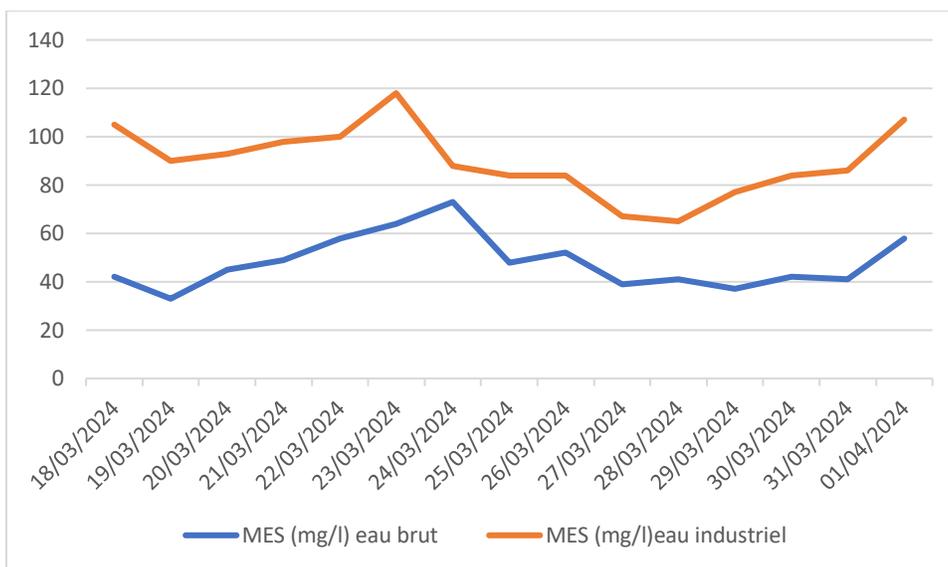


Figure IV.20 : Variation du MES des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

D'après les observations de la figure (IV.20), la concentration de matières en suspension (MES) dans l'eau brute varie considérablement. Les niveaux élevés de MES peuvent perturber l'équilibre écologique en favorisant certaines espèces aquatiques au détriment d'autres.

❖ Variation du PH :

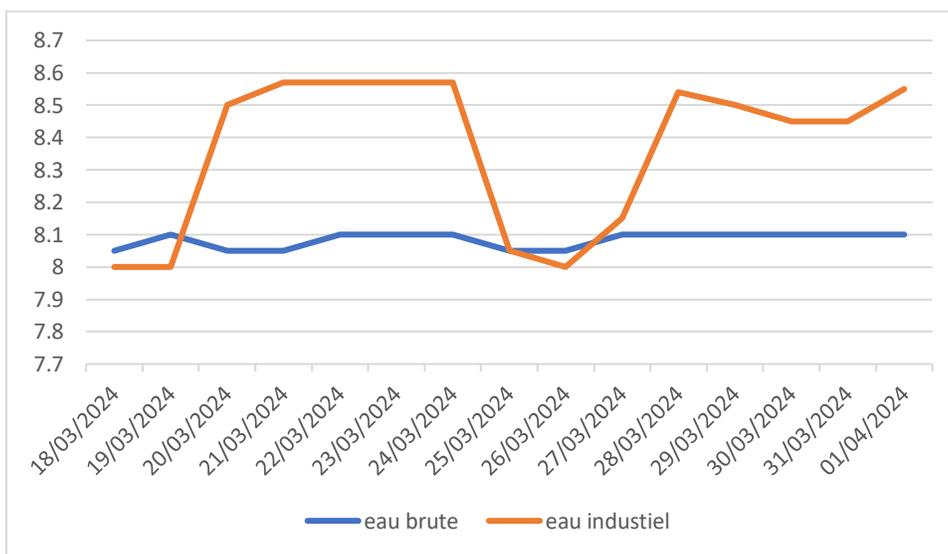
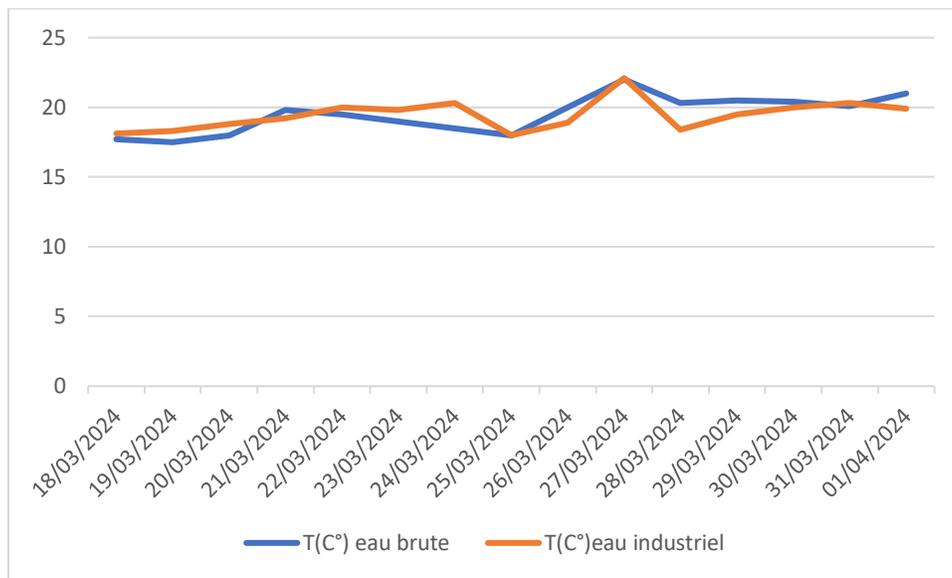


Figure IV.21 : Variation des PH des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

Par ailleurs, il est remarquable que tous nos échantillons présentent des pH basiques. Cette tendance peut être attribuée à l'augmentation de la température, qui augmente la dissolution du CO<sub>2</sub>, entraînant ainsi une hausse de PH de l'eau.

❖Variation de température :



**Figure IV.22** : Variation des Températures des deux eaux (brute et industrielle) dans la période de stage

## IV.6 Expression des résultats des analyses de l'eau d'alimentation et de l'eau de chaudière

Le Tableau IV. 4 représente les caractéristiques des eaux pour les chaudières à tube d'eau à circulation naturelle et à eau d'appoint déminéralisée [40].

**Tableau IV.4 :** les normes pour les chaudières à tube d'eau

Pression de service (bar)	5-15	15-40	40-60	60-75
<b>Eau d'alimentation</b>				
PH	≥8.5	≥8.5	≥8.5	≥8.5
TH (F°)	<0.20	<0.10	<0.05	<0.05
O2 (mg/l)	<0.2			
Fe total (mg/l)	<1	<0.05	<0.05	<0.03
Cu total (mg/l)	<0.05	<0.03	<0.03	<0.01
<b>Eau de chaudière</b>				
PH	10-12	10-11	10-11	10-11
TAC (F°)	≤25	≤20	≤15	≤10
TA (F°)	TA≥0.5TAC impératif			
Salinité totale (mg/l)	≤900	≤700	≤500	≤300
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	≤200	≤150	≤100	≤50
NaOH(mg/l)	<30	<20	<10	<5
Si O <sub>2</sub> (mg/l)	≤20	≤20	≤15	≤10
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	30-80	20-60	10-40	5-20

### IV.6.1 Résultats des analyses de l'eau alimentaire :

Les résultats d'analyses de l'eau alimentaire dégazée par un dégazage thermique (dégazage physique) sont représentés dans annexées en page 81.

## IV.6.1.1 Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau alimentaire :

## ❖ Variation du TA :

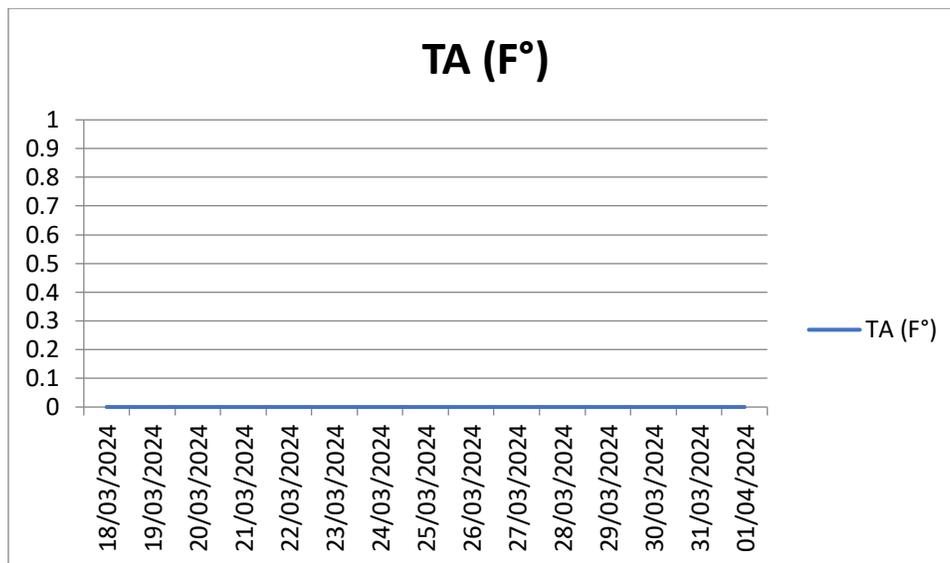


Figure IV.23 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps

## ❖ Variation du TAC :

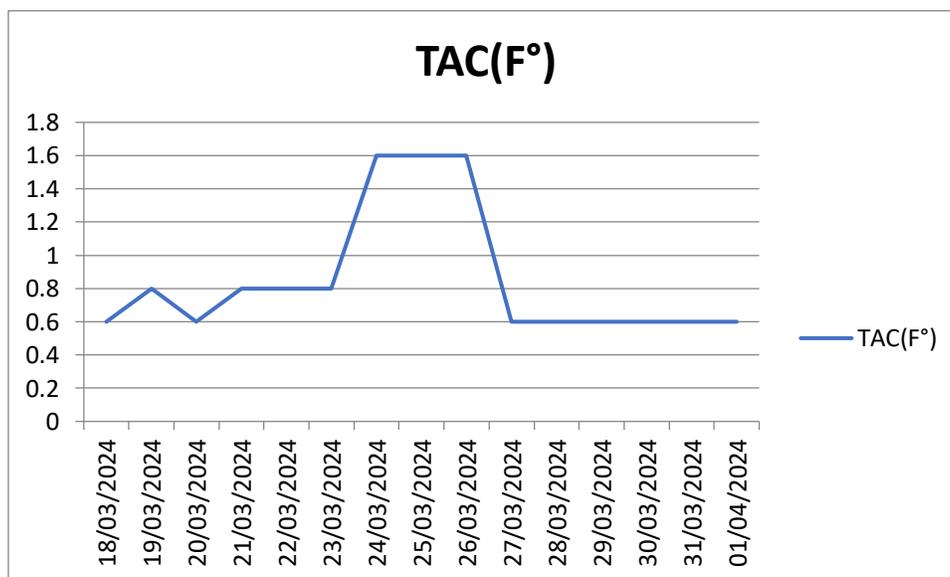
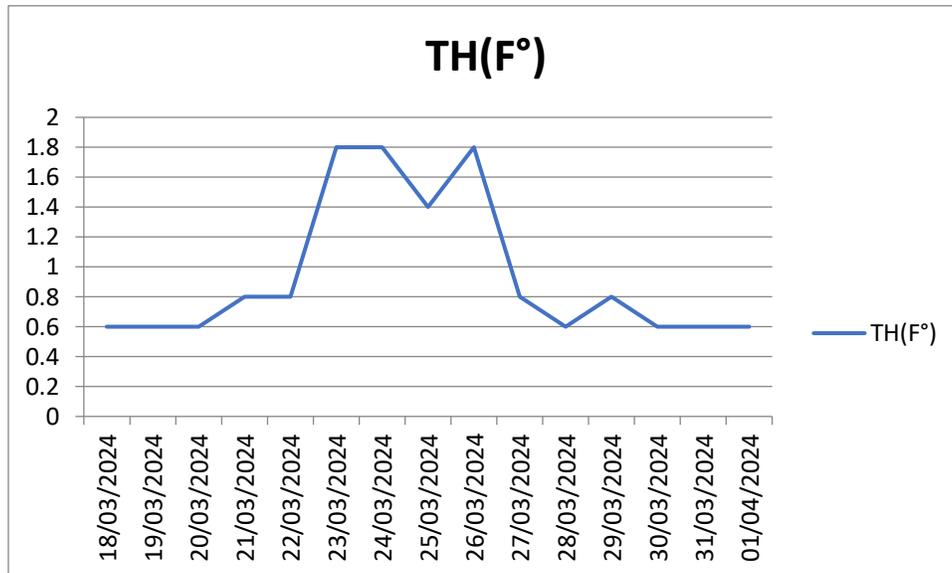


Figure IV.24 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps

Les résultats du TA (Titre Alcalimétrique) et du TAC (Titre Alcalimétrique Complet) permettent de déterminer les concentrations en bicarbonates, carbonates, et éventuellement en hydroxydes présents dans l'eau. Un écart significatif entre les valeurs du TA et du TAC indique la présence de bicarbonates, qui peuvent libérer du  $\text{CO}_2$  libre, agressif pour les chaudières. Il est évident que le

TAC est supérieur aux normes, ce qui signifie que la teneur en bicarbonates dans notre échantillon analysé est élevée.

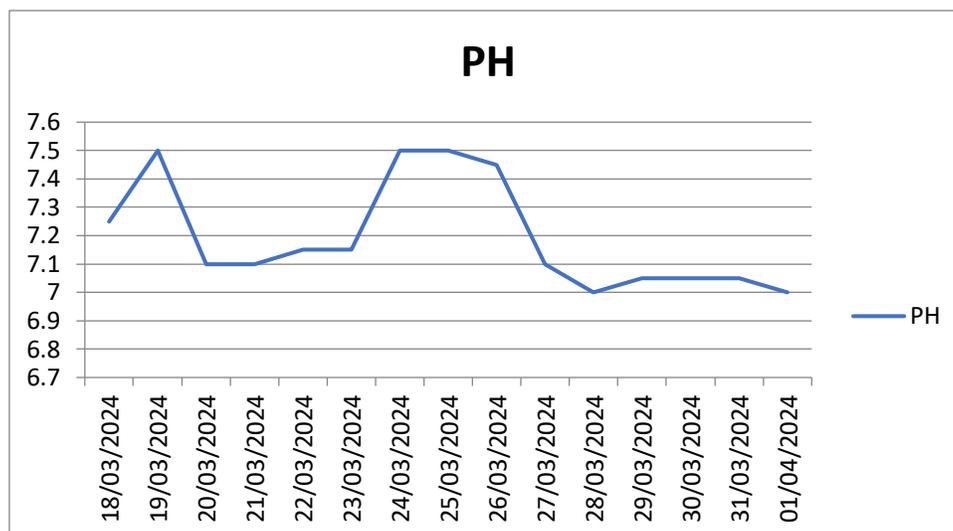
❖ **Variation du TH :**



**Figure IV.25 :** Variation du TH de l'eau alimentaire en fonction du temps

D'après les résultats regroupés dans le tableau et le graphique ci-dessus, il apparaît clairement que la valeur de la dureté totale de l'eau adoucie se situe entre 0,6 °F et 1,6 °F. On constate que cette dureté totale est supérieure à celle des normes opérationnelles, qui ne devraient pas dépasser 0,20 °F. Cela révèle un mauvais fonctionnement des membranes d'ultrafiltration et des osmoseurs. Cette fuite de dureté est probablement due soit à une mauvaise régénération des résines, soit au colmatage des résines à cause de la mauvaise qualité de l'eau d'alimentation des membranes d'ultrafiltration. Une dureté non conforme entraîne évidemment la formation de tartre au niveau des tubes de la chaudière, ainsi que divers problèmes perturbant le fonctionnement de l'installation.

## ❖ Variation du PH



**Figure IV.26 :** Variation du PH de l'eau alimentaire en fonction du temps

Les valeurs de pH de l'eau d'alimentation doivent se situer entre 8 et 9, avec des valeurs optimales supérieures à 8,5. Les résultats d'analyses actuels montrent des valeurs légèrement inférieures aux normes recommandées. L'ajustement du pH à ce niveau peut être effectué par l'injection de soude ou d'acide sulfurique.

#### IV.6.2 Résultats des analyses de l'eau de chaudière :

##### IV.6.2.1. Expression des résultats :

Le gaz carbonique joue un rôle crucial dans l'équilibre des bicarbonates de calcium en solution dans l'eau, influençant la formation de carbonate de calcium peu soluble. Ce processus dépend de plusieurs facteurs tels que la teneur en calcium, l'alcalinité, le pH, la concentration totale des sels dissous et la température. Toute modification de ces éléments peut perturber l'équilibre physico-chimique de l'eau, augmentant ses tendances à l'incrustation ou à l'agressivité.

Pour évaluer et prévoir le comportement de l'eau, on utilise le pH d'équilibre ou pH de saturation (pHs), calculé avec la formule de Langelier :

$$\text{pHs} = (\text{pK}'2 - \text{pK}'s) + \text{pCa} - \text{pAlc.}$$

Des abaques et diagrammes permettent un calcul rapide du pHs. La formule de Langelier a été simplifiée par Larson et Buswell :

$$\text{pHs} = 9,3 + A + B - (C + D)$$

Où A, B, C et D sont des facteurs liés à la TDS, la température, la dureté du calcium et l'alcalinité totale.

L'index de stabilité de Ryznar (IR), défini comme  $IR = 2 \text{ pHS} - \text{pH}$ , est utilisé pour évaluer si une eau est incrustante, agressive ou stable, et pour mesurer l'importance de ces tendances.

Où le caractère de l'eau est défini comme nous montre le tableau **IV.5** :

**Tableau IV.5** : Tendances de l'eau selon l'indice de RYZNAR [41]

<b>Les valeurs d'IR</b>	<b>Caractère de l'eau</b>
<b>IR &lt; 3.7</b>	<b>Très entartrant</b>
<b>3.7 &lt; IR &lt; 6.4</b>	<b>Moyennement entartrant</b>
<b>6.4 &lt; IR &lt; 6.65</b>	<b>Légèrement entartrant</b>
<b>IR = 6.65</b>	<b>A l'équilibre</b>
<b>6.65 &lt; IR &lt; 6.9</b>	<b>Légèrement corrosive</b>
<b>6.9 &lt; IR &lt; 8.7</b>	<b>Moyennement corrosive</b>
<b>IR &gt; 8.7</b>	<b>Très corrosive</b>

#### **IV.6.2.2. Interprétation des résultats :**

D'après les résultats de l'analyse de l'eau d'alimentation (page 81) nous avons observé que les valeurs de TA et de TAC ne sont pas toujours nulles, mais restent dans les normes. Cela indique que l'eau d'alimentation est correctement traitée et ne contient pas d'ions indésirables. En conséquence, nous ne pouvons pas effectuer de calculs pour déterminer le caractère de l'eau d'alimentation.

Nous avons donc suivi le caractère de l'eau de chaudière, qui peut être analysé à l'aide de la relation définie précédemment.

On a suivi le caractère de l'eau de chaudière, et les résultats sont indiqués dans les tableaux suivant:

Tableau IV.6 : Résultats de calcul de l'indice de RYZNAR

PH	A	B	C	D	PHs	IR
11,7	0,2	2,1	1,3	2,3	8	4,3
11,2	0,2	2,1	1,4	2,2	8	4,8
11,7	0,2	2,1	1,5	2,2	7,9	4,1
10,1	0,2	2	1,4	2,1	8	5,9
10,8	0,2	2,1	1,4	2,2	7,9	5
11	0,2	2,1	1,6	2,2	7,8	4,6
11,9	0,2	2	1,6	2,2	7,7	3,5
11,8	0,2	2,1	1,6	2,2	7,8	3,8
7,95	0,2	2,1	1,6	2,3	7,7	7,45
11,89	0,2	2,1	1,6	2,3	7,7	3,51
11,45	0,2	2,1	1,4	2,1	8,1	4,75
11,6	0,2	2,1	1,4	2,1	8,1	4,6
11,2	0,2	2,1	1,4	2	8,2	5,2
11,7	0,2	2,1	1,3	2	8,3	5,53
10,4	0,1	2,1	1,4	2	8,1	5,8

- À partir des résultats de l'indice de RYZNAR obtenus du tableau précédent, nous avons calculé un indice moyen de 4.85. Ce résultat indique, d'après l'analyse du tableau IV.6, que l'eau de chaudière présente un potentiel moyennement entartrant. En conséquence, cela favorise la formation d'un léger dépôt de tartre sur les équipements de la chaudière, ce qui peut entraîner des problèmes de performance à long terme.

#### IV.6.2.3. Représentation graphique :

On représente graphiquement les résultats d'analyses l'eau de chaudière de dans annexées en page 82.

❖ Variation du TA :

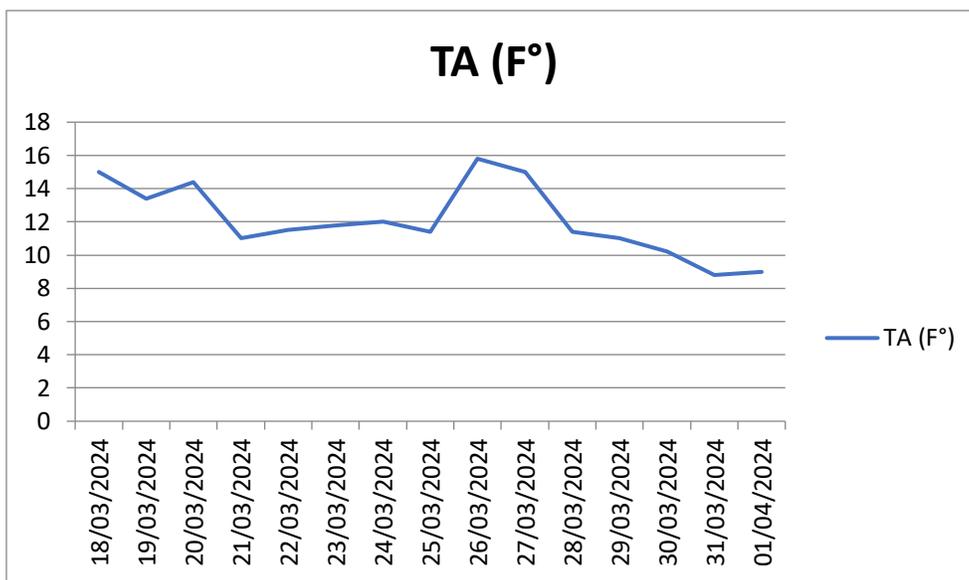


Figure IV.27 : Variation du TA de l'eau de la chaudière en fonctionne du temps

❖ Variation du TAC :

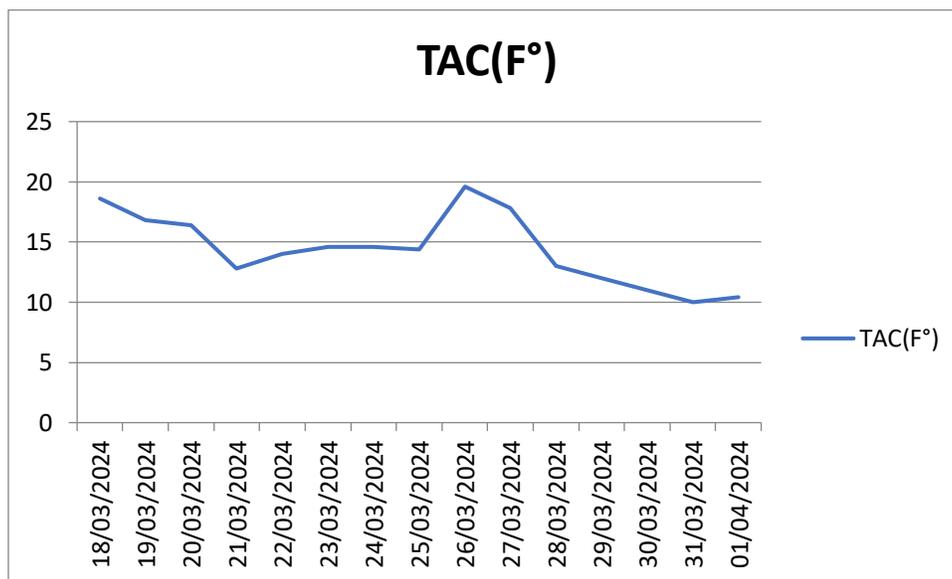


Figure IV.28 : Variation du TAC de l'eau de la chaudière en fonction temps

Les résultats du TA et du TAC permettent de déterminer les concentrations en bicarbonates, carbonates et éventuellement en hydroxydes présents dans l'eau. Nous avons constaté un écart significatif entre les valeurs du TA et du TAC. En règle générale, le TA doit être supérieur ou égal à 0,5 fois le TAC. Dans notre cas, le TA est supérieur à cette proportion, ce qui indique la présence de bicarbonates, susceptibles de libérer du CO<sub>2</sub> libre, agressif pour les chaudières. Il est évident

que le TAC est plus élevé que les normes recommandées, ce qui signifie que la teneur en bicarbonates est élevée dans notre échantillon d'eau.

❖ Variation du  $Cl^-$  :

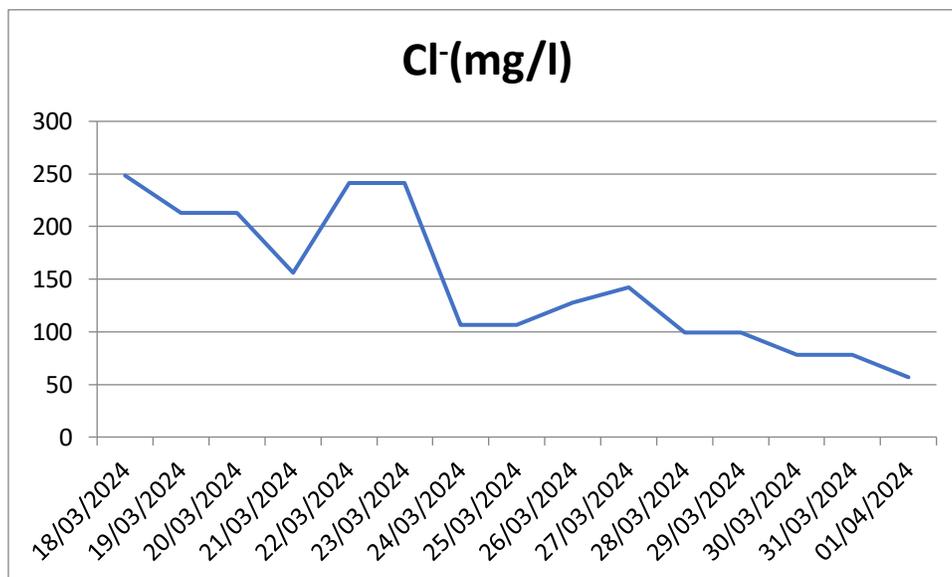


Figure IV.29 : Variation du  $Cl^-$  de l’eau de la chaudière en fonction temps

L’analyse de l’eau de chaudière a révélé des valeurs supérieures aux normes, notamment une concentration en chlorures dépassant les 200 mg/L. Cette situation est préoccupante, car elle peut causer des dommages importants dans le circuit, favorisant la corrosion par piqûres.

❖ Variation du PH :

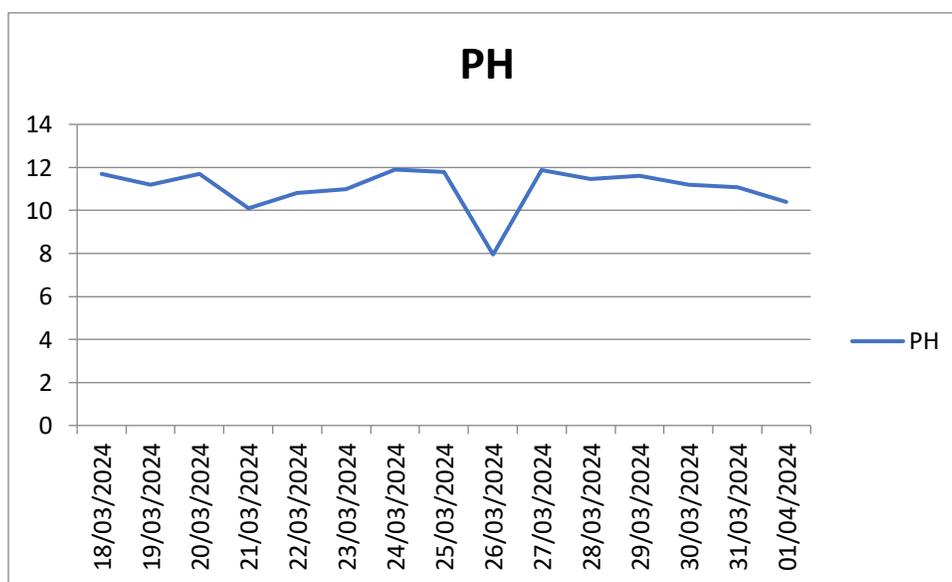


Figure IV.30 : Variation du PH de l’eau de la chaudière en fonction temps

On observe que le PH de la chaudière est dans les normes.

### **Conclusion**

L'ensemble des résultats obtenus grâce à nos analyses indique clairement que l'eau d'alimentation et l'eau de chaudière présentent un caractère moyennement entartrant. Pour remédier à cette situation, nous proposons les correctifs suivants :

- Vérification des modes opératoires pour confirmer la répétitivité des résultats.
- Soins particuliers dans la préparation des solutions.
- Ajustement nécessaire du pH.
- Ajustement et suivi des inhibiteurs.
- Analyse quotidienne des paramètres NaOH, SiO<sub>2</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.
- Conformité aux normes préconisées par le constructeur.

Ces mesures correctives sont essentielles pour améliorer la qualité de l'eau et assurer une protection adéquate des équipements, garantissant ainsi une exploitation plus efficace et sécurisée des chaudières.

# **CONCLUSION GENERALE**

## **CONCLUSION GENERALE**

---

Au cours de notre stage de fin d'études, dont ce mémoire est le fruit, nous avons porté notre attention sur les principaux procédés de traitement des eaux.

Les résultats obtenus montrent que la minimisation des dépôts de tartre et de la corrosion dans les installations de production de vapeur est essentielle pour une exploitation efficace et économique des chaudières.

Un traitement rigoureux des eaux industrielles et des eaux déminéralisées avant leur entrée dans la chaudière est indispensable pour protéger celle-ci contre les attaques agressives de l'eau. Pour garantir une qualité optimale de l'eau et répondre aux exigences sévères du design, nous recommandons l'installation d'un système de contrôle et de correction automatique de la qualité de l'eau, ce qui augmenterait la fiabilité de la chaudière.

Ce stage, bien que de courte durée, effectué à SIDER EL HADJAR, nous a permis de mieux comprendre le traitement des eaux par différentes méthodes. Nous avons également pu approfondir notre compréhension du phénomène de corrosion des circuits de l'eau de chaudière, qui influence grandement le rendement de ces machines, et appris comment agir contre ce problème par un conditionnement approprié des eaux d'alimentation.

En somme, cette expérience nous a fourni une vision claire des défis et solutions liés au traitement des eaux dans un contexte industriel, mettant en lumière l'importance d'une gestion rigoureuse et continue de la qualité de l'eau pour la performance et la durabilité des équipements.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] <https://www.aps.dz/economie/144336-sider-el-hadjar-a-annaba-le-symbole-de-l-industriesiderurgique-algerienne-face-au-defi-de-l-efficience-economique>; consulté
- [2] Document Arcelor Mittal.
- [3] Document technique (zone fluide) : paramètres physicochimiques des eaux brutes et industrielles
- [4] Document technique (zone fluide)
- [5] <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eauxusees/connaissez-vous-les-usages-non-domestiques-de-leau/>
- [6] <https://www.lovibond.com/fr/PW/L%E2%80%98analyse-de-%E2%80%98eau/Applications/Traitement-de-leau-brute>
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau\\_brute](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_brute)
- [8] [https://www.dictionnaire-environnement.com/eau\\_industrielle\\_ID1237.html](https://www.dictionnaire-environnement.com/eau_industrielle_ID1237.html)
- [9] <https://ar.pureaqua.com/industrial-water-purification/>
- [10] <http://m.ar.hbmembrane.net/uf-system/ultrafiltration-definition.html>
- [11] <https://www.rotec-hid.com/ar/news/what-is-the-difference-between-the-ultrafiltrationmembrane-and-the-reverse-osmosis-membrane/>
- [12] <https://www.josmose.fr/blog/29-l-eau-osmosee-est-elle-gratuite->
- [13] documents technique, Type d'installation ultrafiltration 03/03/2017
- [14] <https://facmed.univ-constantine3.dz/wp-content/uploads/2022/11/Traitement-des-eaux-de-consommation.pdf>
- [15] <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/pretraitements#:~:text=Un%20pr%C3%A9traitement%20est%20n%C3%A9cessaire%20de,pourrait%20g%C3%AAner%20les%20traitements%20ult%C3%A9rieurs.>
- [16] <https://www.equipwater.com/fr/equipements/degrillage/#:~:text=Le%20d%C3%A9grillage%20est%20le%20premier,fin%20de%2010mm%20%C3%A0%206mm.>
- [17] [https://www.equipwater.com/fr/equipements/tamisage/#:~:text=Le%20tamisage%20est%20le%20second,\(aussi%20appel%C3%A9%20maille%20johnson\)](https://www.equipwater.com/fr/equipements/tamisage/#:~:text=Le%20tamisage%20est%20le%20second,(aussi%20appel%C3%A9%20maille%20johnson))
- [18] <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/pretraitements/dessablage/generalites#:~:text=Le%20dessaillage%20a%20pour%20but,autres%20appareils%20contre%20l'abrasion.>
- [19] [https://www.1h2o3.com/apprendre/traitement-physico-chimique/la-coagulation/.](https://www.1h2o3.com/apprendre/traitement-physico-chimique/la-coagulation/)

## Références Bibliographiques

---

[20] Raymond Desjardins, Le traitement des eaux, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 317 pages, 1997.

[21] [https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/industries/traitement\\_eaux-procede.pdf](https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/industries/traitement_eaux-procede.pdf)

[22] La filière filtres plantés de roseaux (seine-et-marne.fr)

[23] [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-09/documents/slow\\_sand\\_filtration\\_1.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-09/documents/slow_sand_filtration_1.pdf)

[24] <https://fr.pureaqua.com/systeme-dultrafiltration-industrielle-uf/>

[25] M. PHILLIPE-« chaudière de récupération technique de l'ingénieur », génie énergétique, volume W1, Ed ISTA 1980.

[26] Cour master 2 procédés d'adsorption et procédés membranaire : osmose inverse.

[27] <https://www.cleaverbrooks.com/reference-center/resource-library/steam-its-generation-and-use.fr.html>

[28] [https://ww2.ac-poitiers.fr/sc\\_phys/IMG/pdf/Chaudieres\\_a\\_vapeur\\_a\\_combustible.pdf?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR1P6qa0-fEMG3BAPcbHna5HelwvZNRLYgDOLK-jl99XECVaEKWusw0V5gY\\_aem\\_Aal1QwxsAp8jGNOREYbkq\\_l8-hCYMLkDJAL8rDED1e\\_xQEDlxZOemcFKvweshJta5vm27etXUKxp5tfpr3qVdrTV](https://ww2.ac-poitiers.fr/sc_phys/IMG/pdf/Chaudieres_a_vapeur_a_combustible.pdf?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR1P6qa0-fEMG3BAPcbHna5HelwvZNRLYgDOLK-jl99XECVaEKWusw0V5gY_aem_Aal1QwxsAp8jGNOREYbkq_l8-hCYMLkDJAL8rDED1e_xQEDlxZOemcFKvweshJta5vm27etXUKxp5tfpr3qVdrTV)

[29] Viessmann – Brochure technique : Les chaudières à vapeur ; 2011.

[30] <https://miditec.fr/produits/chaudieres-industrielles/chaudiere-tubes-de-fumees/>

[31] N. Lokchiri, Etude analytique et statistiques de l'eau d'alimentation et de l'eau de chaudière du GL1K de SKIKDA, Mémoire de master génie de l'environnement, Département de génie des procédés

[32] <https://miditec.fr/produits/chaudieres-industrielles/chaudiere-tubes-deau/>

[33] <https://fr.scribd.com/document/582607400/les-chaudieres>

[34] [https://protec.pagesperso-orange.fr/26\\_index\\_de\\_stabilite\\_des\\_eaux.htm](https://protec.pagesperso-orange.fr/26_index_de_stabilite_des_eaux.htm), consultée le 29-

[35] Farida HARRLEKAS. « Couplage des procédés membranaires aux techniques physicochimiques ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie textile » .thèse de doctorat en Génie des Procédés et des produits, . Université Cadi ,Marrak.

[36] K. Reggab, contribution à l'évaluation de la charge polluante des eaux résiduaires industrielles de fertial à travers une approche analytique, Mémoire de Master, Génie des procédés de l'environnement, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2016.

## **Références Bibliographiques**

---

**[37]** TAMAS, Adrian Paul. « Étude comparée du colmatage en nano filtration et en ultrafiltration d'eau de surface » . Mémoire de Master en Génie Civil,. Université Laval, : s.n., Québec (2004).

**[38]** Lydia ADJED et Lydia BENANOUNE. « Etude de Colmatage des Membranes d'Osmose Inverse du Complexe de CEVITAL-Bejaia », . Mémoire de Master en Génie des Procédés de l'Environnement, Université Abderrahmane Mira,. Bejaïa : s.n., (2018).

**[39]**F. MORAN « Chauffage climatisation installation sanitaire et traitement des eaux », Ed Parisienne, 2002.

**[40]** Mémento technique de l'eau. Processus élémentaire du Génie physico-chimique en traitement de l'eau. Tome1, 10ème édition, Degrèment, mai 2005 p-185.

**[41]** TAMAS, Adrian Paul. « Étude comparée du colmatage en nano filtration et en ultrafiltration d'eau de surface » . Mémoire de Master en Génie Civil, . Université Laval, : s.n., Québec (2004).

**ANNEXE 01 : RELEVES  
DES ANALYSES DES EAUX  
ETUDIEES**

Tab 14 : Résultats des analyses de l'eau brute (Février-Mars 2024)

LES JOURS	TA (F°)	TAC (F°)	TH (F°)	Ca <sup>2+</sup> (F°)	Mg <sup>2+</sup> (F°)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	PH	TDS (mg/l)	MES (mg/l)	X (µs/cm)	T(C°)
18/03/2024	0	13	17,8	12,8	5	78	8,05	297	42	631	17,7
19/03/2024	0	14	17,6	13,6	4,9	69,4	8,1	397	33	697	17,5
20/03/2024	0	14,1	17,6	13,2	4,8	64,9	8,05	293	45	650	18
21/03/2024	0	11,6	17,8	13	4,8	56,9	8,1	239	49	509	19,8
22/03/2024	0	11,7	18	13,4	4,7	58	8,1	240	58	545	19,5
23/03/2024	0	11,9	18,2	13,6	4,6	54	8,1	245	64	580	19
24/03/2024	0	12	18,2	13,6	4,6	49	8,05	245	73	521	18,5
25/03/2024	0	12,1	18	13,4	4,6	46,6	8,05	248	48	600	18
26/03/2024	0	12	17,8	13,2	4,6	45,5	8,1	250	52	690	20
27/03/2024	0	12	17,6	13,4	4,6	42,6	8,1	240	39	512	22
28/03/2024	0	11,8	18,6	13,4	5,2	49	8,1	239	41	510	20,3
29/03/2024	0	11,9	18,4	13,6	4,8	52,3	8,1	240	37	450	20,5
30/03/2024	0	12,2	18,2	13,8	4,4	53,2	8,1	241	42	475	20,4
31/03/2024	0	12,4	18	14	4	53,2	8,1	242	41	515	20,1
01/04/2024	0	12	17,6	13,4	4,2	42,6	8,1	241	58	513	21

Tab.15 : Résultats des analyses de l'eau industrielle (Février-Mars 2024).

LES JOURS	TA (F°)	TAC (F°)	TH (F°)	Ca <sup>+</sup> (F°)	Mg <sup>+</sup> (F°)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	PH	TDS (mg/l)	MES (mg/l)	X (µs/cm)	T(C°)
18/03/2024	0	13,6	20,2	14,2	6	92,3	8	324	63	690	18,1
19/03/2024	0	14,4	18,2	14	7,2	100,5	8	350	57	744	18,3
20/03/2024	0,2	10,2	16,8	12	4,8	96,6	8,5	257	48	547	18,8
21/03/2024	0,4	10,4	17,8	13,6	4,2	96,6	8,57	246	49	523	19,2
22/03/2024	0,3	11,6	18,6	13,6	4,6	68	8,57	246	42	530	20
23/03/2024	0,4	11,8	18,8	13,6	4,8	64	8,57	246	54	515	19,8
24/03/2024	0,4	12	19	14	5	49	8,57	247	15	527	20,3
25/03/2024	0	11,6	18	14	4	49	8,05	243	36	517	18
26/03/2024	0	11,6	19	14,4	4,6	49	8	248	32	528	18,9
27/03/2024	0	11,5	21	17	5	81,6	8,15	291	28	620	22,1
28/03/2024	0,4	11,4	20	14,4	5,6	49	8,54	255	24	543	18,4
29/03/2024	0,2	11,1	14,8	13,6	5	50,2	8,5	248	40	520	19,5
30/03/2024	0,3	10,9	14,4	13	4,8	52,3	8,45	240	42	513	20
31/03/2024	0,4	8,8	14,4	10,2	4,2	53,2	8,45	211	45	449	20,3
01/04/2024	0,4	8	15	11	4	49	8,55	223	49	475	19,9

Tab.16 : Résultats des analyses de l'eau d'alimentation (Février-Mars 2024).

LES JOURS	TA (F°)	TAC (F°)	TH (F°)	Ca <sup>+2</sup> (F°)	Mg <sup>+2</sup> (F°)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	PH	TDS (mg/l)	X ( $\frac{\mu S}{cm}$ )	T(C°)
18/03/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	10,6	7,25	13	28,4	19,3
19/03/2024	0	0,8	0,6	0,4	0,2	10,6	7,5	16	34,6	19,1
20/03/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	10,6	7,1	16	33,6	19,1
21/03/2024	0	0,8	0,8	0,6	0,2	10,6	7,1	20	42	19,8
22/03/2024	0	0,8	0,8	0,6	0,4	10,6	7,15	30	42	28
23/03/2024	0	0,8	1,8	0,6	0,4	10,6	7,15	35	42	28,5
24/03/2024	0	1,6	1,8	1	0,6	14,2	7,5	35	74,5	28,5
25/03/2024	0	1,6	1,4	1	0,4	14,2	7,5	37	79,5	19,1
26/03/2024	0	1,6	1,8	1	0,8	14,2	7,45	36	76,2	20,4
27/03/2024	0	0,6	0,8	0,6	0,2	10,6	7,1	11	23,2	21,3
28/03/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	3,55	7	4	9,5	20,2
29/03/2024	0	0,6	0,8	0,4	0,2	3,55	7,05	4	9,5	21
30/03/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	3,55	7,05	3	9,5	21
31/03/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	3,55	7,05	3	6,5	21,1
01/04/2024	0	0,6	0,6	0,4	0,2	1,71	7	4	7,9	21,3

Tab.17 : Résultats des analyses de l'eau de chaudière (Février-Mars 2024)

LES JOURS	TA (F°)	TAC (F°)	TH (F°)	Ca (F°)	Mg (F°)	Cl (mg/Cl-)	PH	TDS (mg/l)	X( $\frac{\mu S}{cm}$ )	T(C°)
18/03/2024	15	18,6	5	4	1	248,5	11,7	846	808	20
19/03/2024	13,4	16,8	5,6	4,8	0,8	213	11,2	737	1568	19
20/03/2024	14,4	16,4	8,6	4,4	0,2	213,2	11,7	767	1623	21,2
21/03/2024	11	12,8	5,8	5,2	0,6	156,2	10,1	601	1282	22,5
22/03/2024	11,5	14	5,8	5,2	0,6	241,4	10,8	820	1450	20,5
23/03/2024	11,8	14,6	10	5,2	0,6	241,4	11	854	1650	21
24/03/2024	12	14,6	10	9,2	0,8	106,5	11,9	943	2010	22,4
25/03/2024	11,4	14,4	10	9	1	106,5	11,8	562	1197	19,5
26/03/2024	15,8	19,6	10,6	9,6	1	127,8	7,95	746	1590	20
27/03/2024	15	17,8	10,2	6,2	0,6	142	11,89	698	1483	21,4
28/03/2024	11,4	13	6,8	7	0,6	99,4	11,45	511	1087	19,4
29/03/2024	11	12	6,8	7,2	0,8	99,4	11,6	645	1645	20
30/03/2024	10,2	11	6,8	7,4	0,8	78	11,2	495	1872	20,6
31/03/2024	8,8	10	5,2	7,8	0,2	78	11,07	735	908	21,1
01/04/2024	9	10,4	6	5,4	0,6	56,8	10,4	339	722	20,9

# **ANNEXE 02 : DIVERS**

**Tab.18** : Détermination du facteur des sels dissous

<b>Valeur de A (facteur de totalité des sels dissous en ppm)</b>	
<b>TDS en ppm</b>	<b>A</b>
85 à 425	0.1
425 à 10 000	0.2

**Tab.19** : Détermination du facteur de température

<b>Valeur de B (Facteur de température)</b>	
<b>Température en C°</b>	<b>B</b>
<b>0-1</b>	<b>2.6</b>
<b>2-5.5</b>	<b>2.5</b>
<b>6.5-9</b>	<b>2.4</b>
<b>10-13.5</b>	<b>2.3</b>
<b>14.5-16.5</b>	<b>2.2</b>
<b>17.5-21</b>	<b>2.1</b>
<b>22-26.5</b>	<b>2</b>
<b>27.5-31</b>	<b>1.9</b>
<b>32-36.5</b>	<b>1.8</b>
<b>37.5-43.5</b>	<b>1.7</b>
<b>44.5-50</b>	<b>1.6</b>
<b>51-56</b>	<b>1.5</b>
<b>56.5-63.5</b>	<b>1.4</b>
<b>64.5-71</b>	<b>1.3</b>
<b>72-81</b>	<b>1.2</b>
<b>82-89</b>	<b>1.1</b>
<b>90-96</b>	<b>1</b>
<b>96-100</b>	<b>0.9</b>

**Tab.20** : Détermination du facteur de dureté de calcium

<b>Valeur de C (Facteur de dureté de calcium)</b>	
<b>TH<sub>ca</sub> en F°</b>	<b>C</b>
1-1.1	0.6
1.2-1.3	0.7
1.4-1.7	0.8
1.8-2.2	0.9
2.3-2.7	1
2.8-3.4	1.1
3.5-4.3	1.2
4.4-5.5	1.3
5.6-6.9	1.4
7.0-8.7	1.5
8.8-11	1.6
11.1-13.8	1.7
13.9-17.4	1.8
17.5-22	1.9
23-27	2
28-34	2.1
35-43	2.2
44-55	2.3
56-69	2.4
70-87	2.5
88-100	2.6

**Tab.21 : Détermination du facteur de l'alcalinité totale**

<b>Valeur de D (Facteur de l'alcalinité totale)</b>	
<b>TAC en F°</b>	<b>D</b>
<b>1-1.1</b>	<b>1.0</b>
<b>1.2-1.3</b>	<b>1.1</b>
<b>1.4-1.7</b>	<b>1.2</b>
<b>1.8-2.2</b>	<b>1.3</b>
<b>2.3-2.7</b>	<b>1.4</b>
<b>2.8-3.4</b>	<b>1.5</b>
<b>3.5-4.4</b>	<b>1.6</b>
<b>4.5-5.5</b>	<b>1.7</b>
<b>5.6-6.9</b>	<b>1.8</b>
<b>7.0-8.8</b>	<b>1.9</b>
<b>8.9-11</b>	<b>2</b>
<b>11.1-13.9</b>	<b>2.1</b>
<b>14-17.6</b>	<b>2.2</b>
<b>17.7-22.2</b>	<b>2.3</b>
<b>23-27</b>	<b>2.4</b>
<b>28-35</b>	<b>2.5</b>
<b>36-44</b>	<b>2.6</b>
<b>45-55</b>	<b>2.7</b>
<b>56-69</b>	<b>2.8</b>
<b>70-88</b>	<b>2.9</b>
<b>89-100</b>	<b>3</b>