



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Chimie Industrielle

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

---

Présenté et soutenu par :

**BEKHOUCHE Inas**

Le : lundi 27 juin 2022

## Traitement et conditionnement des eaux de la chaudière de l'usine ENASEL EL- OUTAYA de Wilaya de Biskra

---

### Jury :

Dr. Ghebghoub Fatima	MCA Université de Biskra	Présidente
Dr. Aidi Amel	MCA Université de Biskra	Rapporteur
M <sup>r</sup> . Mouaki Benani Aimen	Ingénieur de labo ENASEL de Biskra	Co-encadreur
Dr. Hadjeb Rihana	MCB Université de Biskra	Examinatrice

Année universitaire : 2021 – 2022



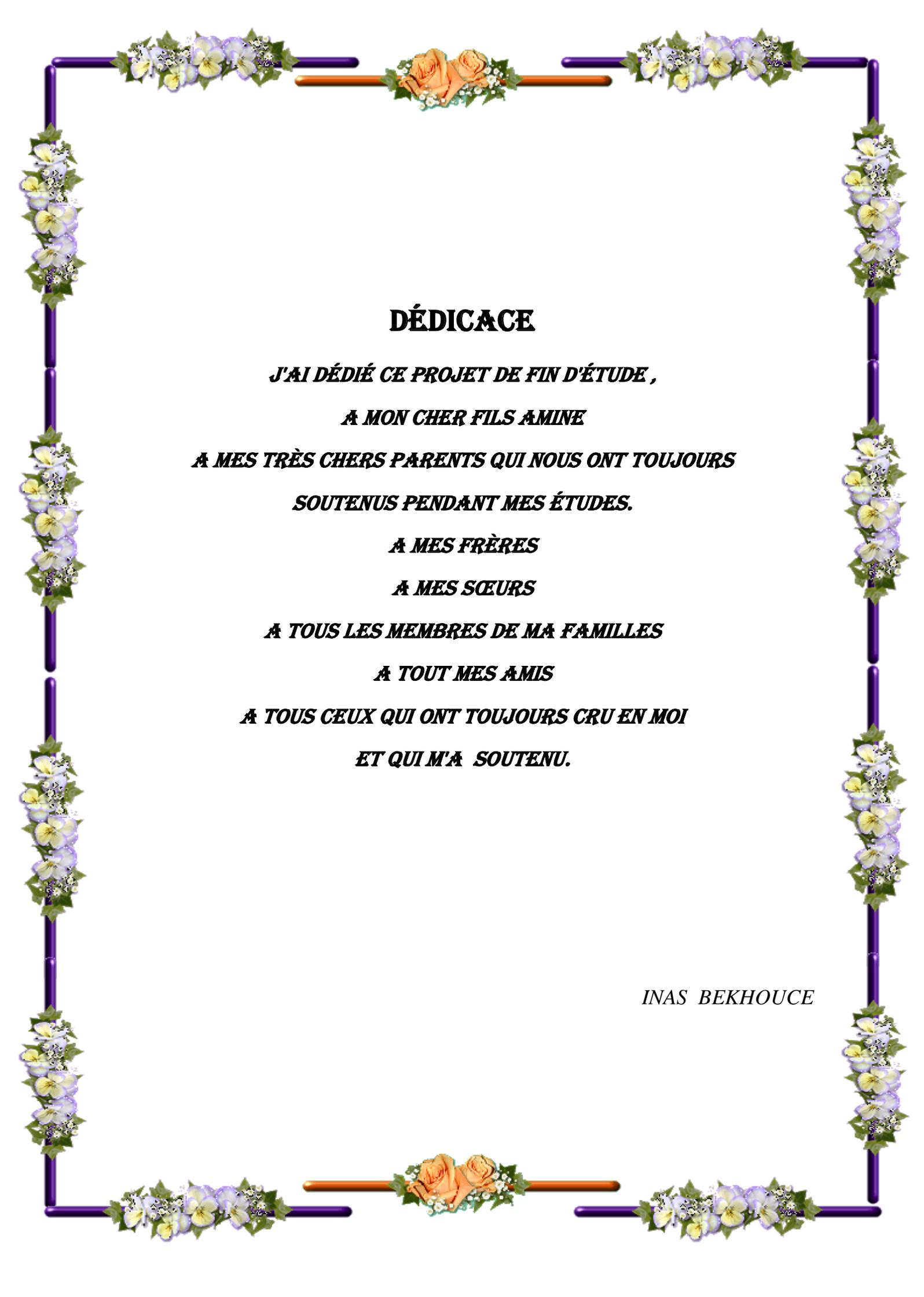
## *Remerciement*

*Avant tout je remercie **ALLAH** tout puissant, de m'avoir donné la force , le courage, la volonté et la patience pour terminer ce travail .*

*Tout d'abord je voudrais remercier : Mm . AIDI AMEL Pour la proposition de ce thème et pour son encadrement, son aide, et ses orientations.*

*Je tiens également à remercier profondément Mr. MOUAKI BENANI Aimen d'avoir co-encadré la mémoire.*

*Exprimons notre gratitude pour son soutien et ses encouragements et Ses conseils, mes sincères remerciements à ceux qui ont accepté de juger ce travail avec tous Peser ses compétences*



## **DÉDICACE**

***J'AI DÉDIÉ CE PROJET DE FIN D'ÉTUDE ,***

***À MON CHER FILS AMINE***

***À MES TRÈS CHERS PARENTS QUI NOUS ONT TOUJOURS***

***SOUTENUS PENDANT MES ÉTUDES.***

***À MES FRÈRES***

***À MES SŒURS***

***À TOUS LES MEMBRES DE MA FAMILLES***

***À TOUT MES AMIS***

***À TOUS CEUX QUI ONT TOUJOURS CRU EN MOI***

***ET QUI M'A SOUTENU.***

***INAS BEKHOUCHE***

## **Résumé**

Nous avons étudié le phénomène de l'entartrage dans les installations de chauffage qui peut entraîner une augmentation des coûts d'exploitation et perturber la pression des vapeurs dans la chaudière et entraîner des problèmes de sécurité. Pour étudier ce problème, nous avons fait une étude sur le terrain à l'usine de sel ENASEL El-Outaya, où nous avons constaté que pour réduire le calcaire dans la chaudière et améliorer sa durée de vie, l'une des méthodes utilisées est l'ajout d'un adoucisseur d'eau qui a donné de bons résultats car il élimine toutes les traces de calcaire ce qui permet l'augmentation de la pression de vapeur d'eau dans la chaudière.

**Mot clés :** Sel - Chaudière - Sédimentation - Entartrage - Traitement des eaux .

## **Abstract :**

We have studied the phenomenon of scaling in heating installations, which can lead to increased operating costs and disturb the vapour pressure in the boiler and lead to safety problems. To study this problem, we did a field study at the salt plant ENASEL El-Outaya, where we found that to reduce the limestone in the boiler and improve its lifespan, one of the methods used is the addition of a water softener that has given good results because it removes all traces of limestone which allowed the increase of the pressure of water vapor in the boiler.

**Keywords :** Salt - Boiler - Sedimentation - Scaling - Water treatment.

## ملخص

خلال هذا العمل قمنا بدراسة ظاهرة الترسيب في منشآت التدفئة والتي يمكن أن تسبب زيادة في تكاليف التشغيل وتعطيل ضغط الأبخرة في الغلاية وتؤدي إلى مشاكل السلامة والأمن . لدراسة هذه المشكلة قمنا بالدراسة الميدانية في مصنع الملح ايناسيل الوطاية حيث وجدنا أنه من أجل التقليل أو الحد من التحجيم في الغلاية وتحسين زيادتها في العمر الافتراضي، فإن إحدى الطرق المستخدمة هي: إضافة منقي الماء والذي أثبت نتائج جيدة حيث أنه يزيل كل آثار الحجر الجيري وبالتالي يزيد من ضغط بخار الماء في الغلاية.

**الكلمات المفتاحية:** ملح - غلاية - ترسيب - تحجيم - معالجة المياه.

# Sommaire

---

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des Figures et Tableaux

Liste d'Abréviation

Introduction Générale

## Chapitre I : Présentation de la Zone d'Etude

I.1. Salin ENASEL El- Outaya wilaya de Biskra.....	1
I.2. Groupes ENASEL .....	1
I.3.Complexe ENASEL El- Outaya wilaya de Biskra .....	2
I.4. Structure ENASEL .....	3
I. 5. Chaines industrielle de l'usine ENASEL .....	4
I.6.Description du sel (matière première) de l'usine ENASEL .....	6
I.6.1.Bulletin d'analyse chimique du sel brut .....	6
I.6.2. Lessivage et préparation de la saumure.....	7
I.7.Compartiment chaudière de l'usine ENASEL .....	8
I.8.Description et fonctionnement de la chaudière MYRA 4000 .....	9

## Chapitre II : Généralités sur le Sel

II.1. Le Sel.....	10
-------------------	----

## Sommaire

---

II.1.1. Définition .....	10
II.1.2. Historique .....	11
<b>II.2.Types de sel .....</b>	<b>11</b>
II.2.1. Sel gemme .....	11
II.2.2. Sel Ignigène.....	12
II.2.3. Sel de mer.....	12
II.2.4.Sel des chotts .....	12
<b>II.3 .Type de procédés de production du sel .....</b>	<b>13</b>
II.3.1. Sel naturel.....	13
II.3.2. Sel raffiné .....	13
II.3.3. Sel de table .....	13
<b>II.4.Utilisation du sel .....</b>	<b>14</b>
<b>II.5. Composition des eaux naturelles .....</b>	<b>14</b>
II.5.1. Sels minéraux .....	15
II.5.2. Gaz dissous.....	15
<b>II.5.3Mesure de la qualité de l'eau .....</b>	<b>16</b>
<b>II .6. Notion d'entartrage .....</b>	<b>18</b>
II.6.1. Introduction .....	18
II.6.2. Définition de l'entartrage .....	19
II.6.3.Causes de l'entartrages .....	20

## Chapitre III : Généralités sur les Chaudières

<b>III .1.Introduction .....</b>	<b>22</b>
III.1.2. Définition .....	22
III.1.3. Historique .....	23

## Sommaire

---

III.1.4. Rôle d'une Chaudière .....	23
<b>III.2.Principe de fonctionnement d'une chaudière .....</b>	<b>24</b>
<b>III.3.Types de chaudières .....</b>	<b>24</b>
<b>III.4.Différents organes d'une chaudière et accessoires .....</b>	<b>27</b>
<b>III.5. Niveaux de Chaudière .....</b>	<b>29</b>
<b>III.6.Problèmes rencontrés avec une chaudière .....</b>	<b>30</b>
III.6.1 Manque d'eau d'alimentation .....	30
III.6.2. Fatigue et fragilisation du métal .....	31
III.6.3 . Qualité d'eau .....	31
<b>III.7. Caractéristiques des eaux de chaudière .....</b>	<b>32</b>
III.7.1.Corrosion .....	32
III.7.2.Primage (priming) .....	32
III.7. 3. L'entartrage .....	33

## Chapitre IV : Analyse et Résultats

<b>IV.1.Traitement de l'eau de chaudière .....</b>	<b>34</b>
IV.1.1. Filtration sur sable.....	34
IV.1.2 Membrane d'osmose inverse .....	35
<b>IV.2. Principes de l'osmose inverse .....</b>	<b>35</b>
<b>IV.3. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse .....</b>	<b>36</b>
IV.3.1.Pression osmotique.....	36
IV.3.2.Taux de conversion .....	36
IV.3.3. Sélectivité .....	37
IV.3.4.Mécanisme de transfert.....	37
<b>IV.4.Entartrage dans les chaudières .....</b>	<b>38</b>

# Sommaire

---

IV.4.1.Définition l'adoucesseur .....	38
IV.4.2.Principe de l'adoucesseur .....	39
<b>IV.5.Détermination du TH</b> .....	<b>41</b>
IV.5.1.Matérielles et produits .....	41
IV.5.2.Mode opératoire .....	41
<b>IV.6.Analyse des Résultats</b> .....	<b>46</b>

## **Conclusion Générale**

## **Références Bibliographiques**

## Liste de Figures et Tableaux

<b>Figure</b>	<b>Titre de Figure et Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Complexe ENASEL EI- Outaya wilaya de Biskra.	<b>01</b>
<b>Figure I.2</b>	Carte géographique d'ENASEL EI- Outaya wilaya de Biskra	<b>03</b>
<b>Figure I.3</b>	Schéma de Le complexe ENASEL EI- Outaya wilaya de Biskra	<b>04</b>
<b>Figure I.4</b>	La chaine industrielle de l'usine ENASEL.EL-OUT	<b>05</b>
<b>Figure I .5</b>	Défirents Stations de l'Usine ENASEL	<b>05</b>
<b>Figure I.6</b>	Gerbage du sel lavé, stocké en camelle (pour séchage naturel)	<b>07</b>
<b>Figure I.7</b>	Chaudière MYRA 400 utilisée à l'usine ENASEL EI-Outaya	<b>09</b>
<b>Figure II.1</b>	Répartition de l'anhydride carbonique dans l'eau	<b>15</b>
<b>Figure III.1</b>	Une chaudière à tubes d'eau	<b>25</b>
<b>Figure III.2</b>	Schéma représentatif de la composition d'une chaudière à tube de fumées	<b>26</b>
<b>Figure III.3</b>	Chaudières de récupération.	<b>27</b>
<b>Figure IV.1</b>	Filtre à sable utilisé à l'usine ENASEL EI-Outaya.	<b>34</b>
<b>Figure IV.2</b>	Pression osmotique	<b>36</b>
<b>Figure IV.3</b>	Adoucisseur utilisée à l'usine ENASEL EI-Outaya	<b>38</b>
<b>Figure IV.4</b>	Fonctionne un adoucisseur	<b>39</b>
<b>Figure IV.5</b>	Comment fonctionne la Résine	<b>40</b>
<b>Figure IV.1</b>	Variation de TH et la pression de vapeur Sans l' adoucisseur	<b>44</b>
<b>Figure IV.2</b>	Variation de TH et la pression de vapeur Avec adoucisseur	<b>45</b>
<b>Tableau I.1</b>	Bulletin d'analyse chimique de sel brut	<b>06</b>
<b>Tableau IV .1</b>	Les résultats du traitement de l'eau d'alimentation de la chaudière à l'usine ENASEL EI-Outaya	<b>40</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Résultats de manipulation de notre travail ,le TH et la pression de vapeurs dans le chaudière.	<b>43</b>

## Liste des abréviations

---

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>ONA</b>	Algérienne Des Eaux
<b>ENASEL</b>	Entreprise Nationale du Sel
<b>C°</b>	Degré Celsius
<b>DCO</b>	Demande Chimique en Oxygène
<b>Mg</b>	Magnésium.
<b>N°</b>	Numéro
<b>Cl</b>	Chlore
<b>pH</b>	Potentiel d'Hydrogène
<b>Ca</b>	Calcium
<b>%</b>	Pourcentage
<b>OECD</b>	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
<b>CL<sub>50</sub></b>	La Concentration Létale
<b>Mb</b>	Millibar
<b>T</b>	Température
<b>C°</b>	Degré Celsius
<b>kg</b>	Kilogramme
<b>t/an :</b>	Tonnes/ ans
<b>Ca(OCl)<sub>2</sub></b>	Hypochlorite de Calcium
<b>NaOH</b>	Soude Caustique
<b>NaCl</b>	Chlorure de Sodium
<b>NaOCl</b>	Eau de Javel
<b>HCl</b>	Chlorure d'Hydrogène
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	Carbonate de Soude
<b>p/v</b>	Poids par Volume
<b>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup></b>	Ion Hydronium
<b>OH</b>	l'Ion Hydroxyde
<b>SO<sub>4</sub></b>	l'Ion Soufré

# Introduction Générale

---

L'intensification des domaines en besoin d'énergie justifie d'une part l'évolution rapide des technologies au cours de ces dernières années. Ce besoin est en croissance incessant et la chaudière est l'une parmi ces éléments constitutifs de production d'énergie ; on en distingue : les chaudières domestiques, productrices d'énergie et industrielles.

L'eau, lors de son transport ou son utilisation dans les installations de chauffage peut causer aux différents matériaux avec lesquels elle est en contact des altérations de diverses natures dont les plus fréquentes : l'entartrage et la corrosion. Ces deux phénomènes sont particulièrement dangereux car ils peuvent conduire à des ruptures et des explosions qui mettent en péril la durée de vie de l'installation, augmentent les coûts d'exploitation et entraînent des problèmes de sécurité et de perte de vie.

Afin de réduire les dégâts occasionnés par l'eau et pour garantir un fonctionnement optimisé de la chaudière et des équipements auxiliaires, il est indispensable que les eaux d'alimentation soient dépourvues des sels minéraux, de gaz en particulier l'oxygène et le dioxyde de carbone et débarrassées des matières en suspension. Pour toutes ces raisons, il ne suffit pas seulement de pomper l'eau du réservoir, mais encore il faut la traiter avant d'arriver à la chaudière. Les méthodes de traitement sont très variables selon la composition de l'eau brute. D'une manière générale l'eau doit être débarrassée des matières solides en suspension, dessalée, déminéralisée, dégazée puis conditionnée par addition d'espèces réductrices.

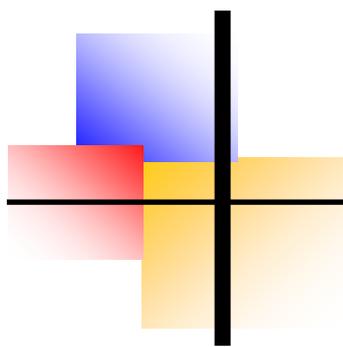
Les objectifs de notre travail est ajouté un adoucisseur pour réduire la dureté de l'eau, c'est-à-dire sa teneur en sels de calcium et de magnésium , évité entartrage dans les chaudières.

Dans le premier chapitre nous présentons tout d'abord l'usine ENASEL à El-Outaya Wilaya de Biskra où qui on le faire de notre stage pratique.

Le second chapitre décrit généralité sur le sel et leurs méthodes de production, et un petit rappel sur les déférents composites des eaux.

Dans le troisième chapitre nous présentons une généralité sur les chaudières.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats posées par les impuretés de l'eau ou de la vapeur dans les échangeurs de chaleur et les méthodes de traitement de ce dernier, ainsi que le protocole retenu pour tous les mesures des valeurs de TH et la pression de vapeurs dans les chaudière.



# CHAPITRE I

**Présentation de la zone d'étude**

## I.1. Salin ENASEL El- Outaya wilaya de Biskra



**Figure I.1 :** Complexe ENASEL El- Outaya wilaya de Biskra.

L'entreprise nationale de sel « ENASEL » est une entreprise publique et économique, c'est le plus grand producteur et distributeur algérien du sel, créée en 1983 issue de la restructuration de la Société Nationale des Recherches Minières (SONAREM), par le décret n°83-444 du 16/07/1983. [1]

- Chiffre d'affaires : 160.000 000 DA
- Siège social : zone industrielle le Rhumel-Constantine. ALGERIE.
- Effectif moyen de 600 personnes.

L'ENASEL a pour vocation d'exploiter les Chotts de sel. Son domaine d'activité est principalement de développer, produire, distribuer et commercialiser le sel alimentaire et industriel et plusieurs types de sels chimiques. Avec une panoplie de sous-produits.

## I.2. Groupes ENASEL

Sa production provient des cinq salins localisés à :

- ✓ Béthioua (Oran),
- ✓ Sidi Bouziane (Relizane),
- ✓ Guer gour lamri (Sétif),
- ✓ El Outaya (Biskra) .
- ✓ El Meghaïer (El Oued), pour une quantité annuelle de 110 000 Tonnes de sel.

On trouve aussi des centres de distribution et des unités de services dans différentes villes.

### **I.3.Complexe ENASEL El- Outaya wilaya de Biskra**

- **Création :**

Complexe du sel EL-OUTAYA, abréviation : « CEO » Créé par décret n° 83-444 du 16/07/1983.

- **Activité principale :**

Production, traitement, distribution et commercialisation du sel alimentaire, Industriel et spéciaux.

- **Présentations de complexe :**

**Intitulé de complexe :** réalisation d'un module de production de sel raffiné à haute pureté .

**Branche d'activité :** marché pharmaceutique agroalimentaire et industriel.

**Nature de l'investissement :** diversification de la gamme des produits par la fabrication de Nouveaux produits.

**Capacité de production annuelle :** 80 000 Tonnes / an au Minimum.

**Régime de travail :** 3x8 continu.

**Effectif:** 170 agents.

**Technologie utilisée :** (MVR) Mécanique d'Evaporation et Ré compression. Production de sel raffiné à haute pureté (99.98 % en Na Cl) spécifique pour la pharmacie et à (99.95 % en Na Cl) pour autres industries alimentaire et industrielle.

**Analyse du marché :** national et international.

**Impact sur l'environnement :** Néant. [1]

- **Programme de production :**

**Gamme des produits :** sel raffiné de haute pureté (99.98 % en Na Cl)

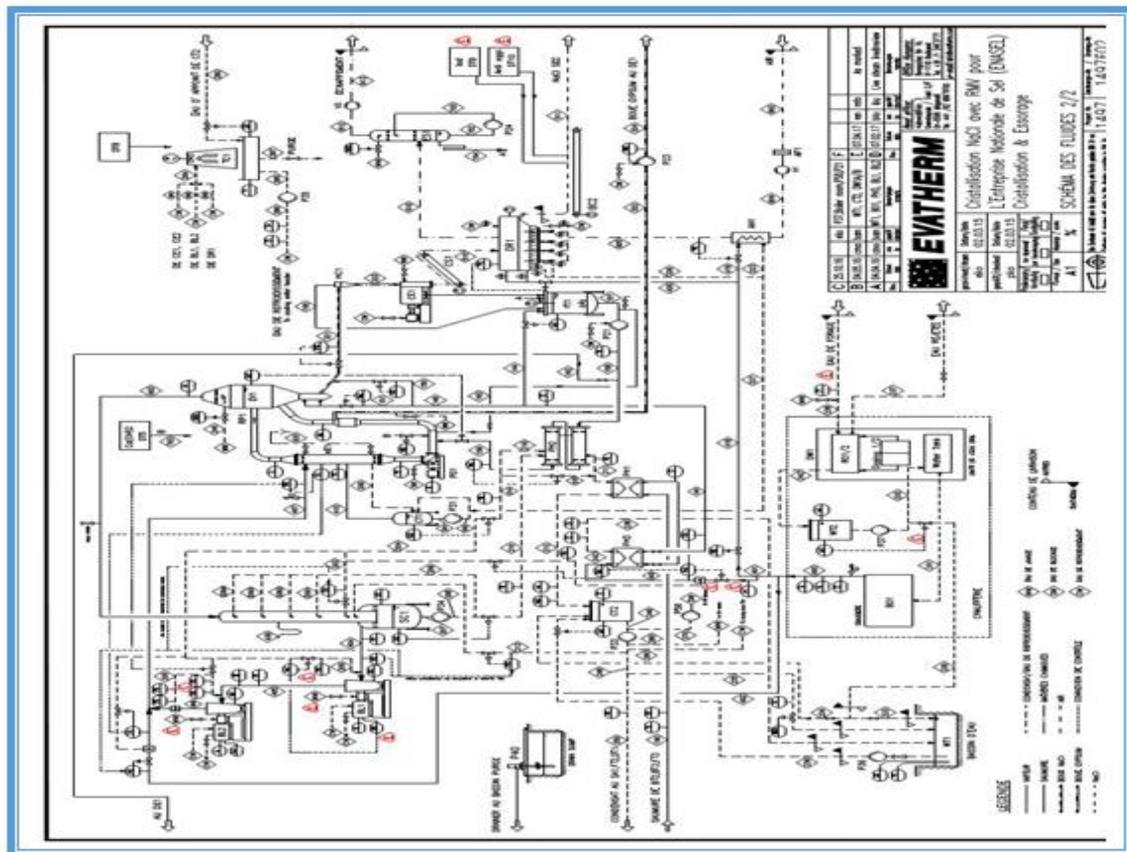
**Quantités à produire:** 80 000 Tonnes/an dont

20 000 T à 25 000 T / an: sel pharmaceutique ; pureté (99,98% en NaCl)

25 000 T à 30 000 T/an: sel en pastille : pureté (99,95% en NaCl)

25.000 T à 30 000 T/an: sels alimentaires et industriels, pureté (99,95 % en NaCl)





**Figure I.3 :** Schéma de Le complexe ENASEL EI- Outaya wilaya de Biskra

## I. 5. Chaines industrielle de l'usine ENASEL

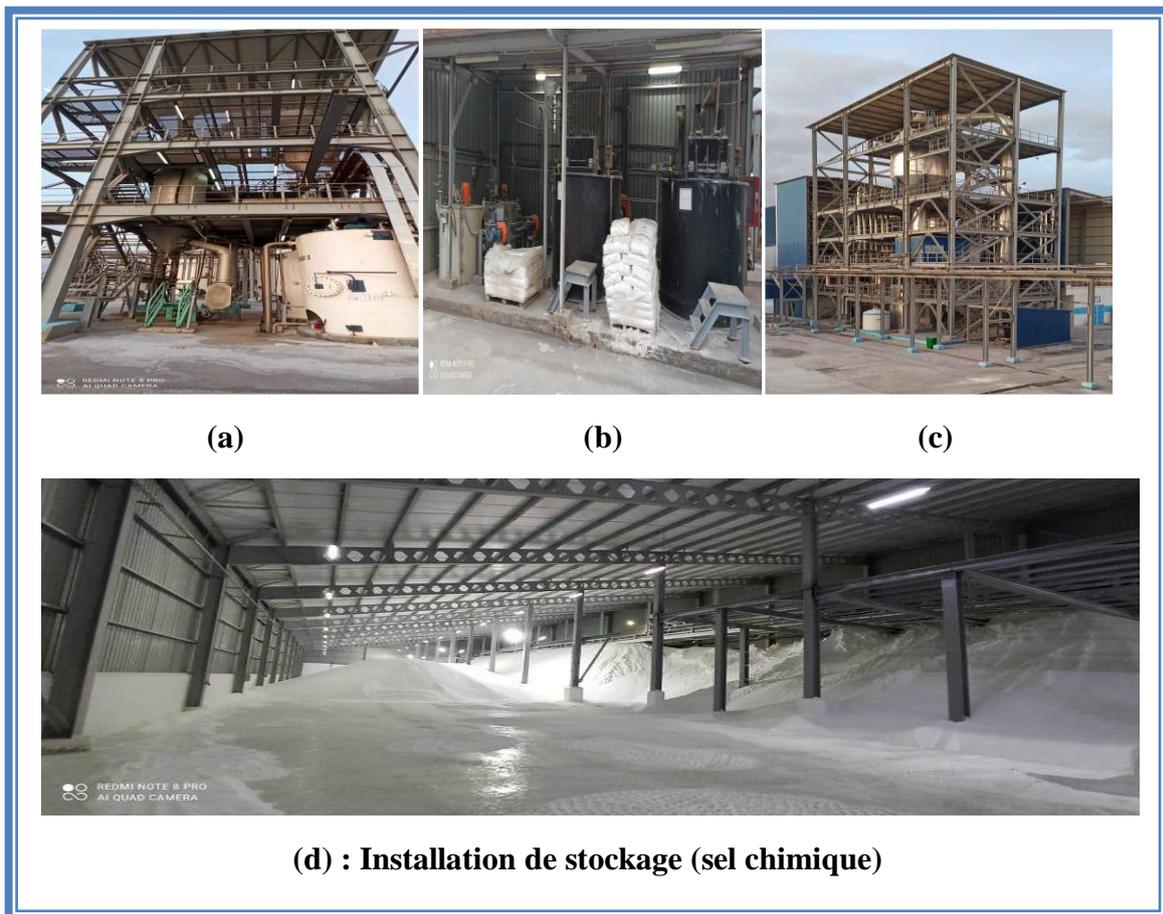
Dans le cadre du développement de l'industrie du sel l'ENASEL 'EI- Outaya à lancé la réalisation d'une unité de raffinerie et de conditionnement de sel. L'usine comprend les parties suivantes :

- Laboratoire et laboratoire centrale
- Station lessivage de préparation de saumure
- Station de dosage chimique
- Station cristallisation (évaporateur, les compresseurs, sécheur)
- Installation de stockage (sel chimique), de manutention et d'expédition
- Installation de conditionnement du sel (produit fini)
- Station de traitement des eaux et la chaudière (la production de vapeur et d'air comprimé).
- La sous-station électrique et l'énergie de secours

Les infrastructures industrielles générales comprenant l'adduction d'eau, les Magasins, les ateliers.



**Figure I.4 : Chaine industrielle de l'usine ENASEL.EL-OUT**



**(a)**

**(b)**

**(c)**

**(d) : Installation de stockage (sel chimique)**

**(a) : Station lessivage de préparation de saumure.**

**(b) : Station de dosage chimique**

**(c) : Station cristallisation.**

**Figure I.5 : Défilements Stations de l'Usine ENASEL**

## I.6. Description du sel (matière première) de l'usine ENASEL

La matière première utilisée est un dépôt de minerai contenant une concentration élevée en sel comestible. Ces gisements du sel ont été constitués par l'opération des lacs du sel durant la préhistoire. Ces dépôts peuvent être extraits par injection d'eau qui dissout le sel et qui sera de plus en plus concentrés. Lorsque la saumure (l'eau salée) atteinte le degré de saturation, elle est transvasée vers les marais salants ou le sel sédimente et peut être récolté par raclage [35].

### I.6.1. Bulletin d'analyse chimique du sel brut

Le sel récolté contient environ 99% en NaCl et d'autres éléments chimiques avec des quantités variantes (tableau I.1).

Désignation	formule chimique	résultats d'analyses en %
Humidité	H <sub>2</sub> O	0.155
Résidu insoluble	R I	0.0660
Calcium	Ca <sup>+2</sup>	0.1092
Magnésium	Mg <sup>+2</sup>	0.1773
Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0.7706
Carbonate	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	/
Bicarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	/
Sulfate de Calcium	Ca SO <sub>4</sub>	0.3706
Sulfate de Magnésium	Mg SO <sub>4</sub>	0.6381
Sulfate de sodium	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.1896
Chlorure de Calcium	Ca Cl <sub>2</sub>	/
Chlorure de Magnésium	Mg Cl <sub>2</sub>	/
Chlorure de sodium	NaCl	98.7357
Iodate de potassium	KIO <sub>3</sub>	/

Tableau I.1 : Bulletin d'analyse chimique de sel brut



**Figure I.6 :** Gerbage du sel lavé, stocké en camelle (pour séchage naturel)

### **I.6.2. Lessivage et préparation de la saumure**

Le sel brut provient du Chott Merouane, El Meghaïer' sera lavé plusieurs fois afin D'éliminer les impuretés physiques et chimiques et biologiques. Puis il passe par les étapes De lessivage et préparation suivant :

- Convoyage du sel par chargeur et des élévateurs avec trémie sous terrain.
- Élimination de résidus d'acier par aimant magnétique.
- Elimination du gros sel par crible.
- Mélanger le sel avec l'eau de lavage dont l'élimination des impuretés chimique par essorage du mélange.
- Saturation du sel par dissolution avec l'eau du condensat.
- Transfère la saumure vers le bac de stockage (saumure primaire).
- Elimination des résidus insoluble par dosage chimique (floculant) de la saumure.
- Stockage final de la saumure. [1]

## I.7. Compartiment chaudière de l'usine ENASEL

La chaudière joue le rôle du cœur à l'usine ENASEL El-Outaya, elle permet de produire la vapeur utilisée dans les différentes sections d'usine. Les principaux rôles de la chaudière sont :

- ✓ **Rôle 1** : Chauffer la saumure avant qu'elle entre dans le cristalliseur, pour éviter le choc thermique.
- ✓ **Rôle 2** : Soumettre de la vapeur au compresseur, pour le pomper au cristalliseur afin d'assurer le processus de cristallisation.
- ✓ **Rôle 3** : Assurer l'opération du séchage du produit fini au sein du sécheur.

La chaudière utilisée dans l'usine ENASEL est une chaudière de type tubes de fumées.

Ce type dérive, actuellement, des premières chaudières à bouilleur et des chaudières semi-tubulaires dans lesquelles, en fonction des progrès de la technologie de construction, on a cherché à augmenter la surface d'échange initialement limitée aux parois des corps cylindriques lésés extérieurement par les fumées.

Dans ce type de chaudière, les fumées circulent à l'intérieur des tubes et l'eau baigne ces tubes à l'extérieur. L'évolution s'est faite tout d'abord par l'adjonction d'un gros tube de « retour de flamme » immergé dans le corps principal, remplacé ensuite par une multitude de tubes de fumées de petit diamètre offrant dans le même volume une surface de contact supérieure, d'où le nom de chaudière semi-tubulaire. Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 5 à 20 tonnes/heure en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul. [1]

Il y a trois emplacements de la boîte de fumée qui diffèrent selon les caractéristiques de la chaudière à tubes de fumées :

- ✚ Boîte immergée.
- ✚ Boîte semi-immergée.
- ✚ Boîte extérieure.

La chaudière sur laquelle notre étude se porte est la MYRA 4000 à tubes de fumées, notons que c'est une chaudière à 3 parcours afin d'avoir un rendement maximal. Comme son nom l'indique son rôle est de fournir un débit de vapeur saturée de 4000 Kg/h à une pression de service de 12 bar. Le brûleur utilisé (bicom bustible) peut la faire fonctionner au gaz naturel ou au fuel qui est du modèle ELCO N7 4500.

## I.8. Description et fonctionnement de la chaudière MYRA 4000

La chaudière MYRA 4000 est une chaudière à vapeur cylindrique et horizontale, constituée d'un tube de foyer lisse intérieur en tôle (par où circulent la flamme et les gaz de fumées) placé en bas de la chaudière car les fumées se meuvent naturellement du bas vers le haut et une boîte de retour des fumées extérieure à l'arrière de la chaudière qui emmagasine les fumées avant qu'elles ne soient transportées par les tubes de fumées immergés dans l'eau, pour lesquelles nous verrons par la suite la température.

Les tubes de fumées sont divisés en deux groupes ; le premier transporte les fumées de la boîte de retour à l'avant de la chaudière et le second transporte les fumées de l'avant de la chaudière vers la cheminée. De ce fait, on dit qu'il y a transfert de chaleur des gaz de fumées vers l'eau. Par la suite cette dernière subit une vaporisation ainsi on a production de la vapeur qui se dégage de la «vanne de départ vapeur».

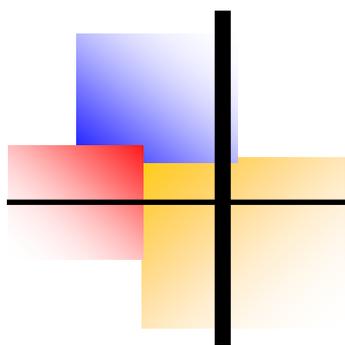
Elle est fermée des deux côtés par des plaques tubulaires, sur lesquelles sont soudés les tubes. Des portes montées sur les deux extrémités de la chaudière permettant l'accès au foyer, aux plaques tubulaires et à la boîte de retour des fumées.

L'enveloppe cylindrique (virole) comporte aussi des ouvertures appelées, trous de visite (trou de poing sur les flancs et trou d'homme sur la génératrice supérieure) pour accéder et visiter les faisceaux tubulaires et le corps intérieur. [1]

La MYRA4000 est protégée de l'extérieur pour prévenir l'anticorrosion par une peinture antirouille, comme isolant thermique et acoustique dans la construction par de la laine de roche (matériau fait des fibres minérales ne propageant pas le feu et n'est pas cancérigène) de 80 mm d'épaisseur (en bicouches) et enfin, un revêtement en tôle inoxydable de 6/10 mm. En outre, elle a aussi des accessoires de sécurité nécessaires à son bon fonction. [1]



**Figure I.7 :** La chaudière MYRA 400 utilisée à l'usine ENASEL El-Outaya



# CHAPITRE II

## Généralité sur le Sel

## II.1. Le Sel

### II.1.1. Définition :

Le sel de table ou sel alimentaire ou sel de cuisine est un condiment composé essentiellement de chlorure de sodium Na Cl (99,9%).

Le sel est produit par exploitation de gisements minéraux et par évaporation de l'eau de mer. On a essentiellement 2 types de sel : le sel gemme (sel des mines) et le sel marin (sel solaire). Le sel marin est sous forme d'un solide blanc, cristallisé, récolté dans les marais salants qui favorisent sa cristallisation par évaporation.

Le sel gemme provient des vestiges de mers asséchées sous forme de roches dans les profondeurs de la terre.[2] Le sel de mer contient en moyenne 30g/l des sels divers:

- Chlorure de Sodium : 28,5g/l.
- Chlorure de Magnésium : 3,7g/l.
- Sulfate de Magnésium : 2,2g/l.
- Chlorure de Potassium : 0,7g/l.
- Carbonate de Calcium : 1,4g/l .
- Bromure de Potassium : 0,1g/l

Le chlorure de sodium (Na Cl) est formé de deux ions : le chlorure (Cl<sup>-</sup>) et le sodium (Na<sup>+</sup>), dans la proportion 60%-40% environ. C'est celui qui est principalement récolté et dont je parlerai tout au long de ce mémoire sous le terme vulgarisé de «sel».[3]

### II.1.2. Historique

Au Paléolithique, l'homme trouve le sel dans la chair du gibier et du poisson dont il se nourrit. Les premières formes d'exploitation du sel sont apparues au Néolithique.

A l'âge de fer, les premières techniques d'extraction minière sont apparues en Autriche.

Des affleurements de couches salées ont donné naissance vers la fin de l'âge de bronze à Marsal (commune française) située dans le département de la Moselle en Lorraine ; à une vaste industrie de sel . Il existe des vestiges gigantesques, d'immenses dépôts parsèment le paysage sur plus de 10 Km le long de la vallée. L'extraction du sel se faisait en deux étapes :

- L'eau salée était mise dans des cuvettes d'une vingtaine de litres de capacité :

Posées sur des cales en terre, ces cuvettes étaient placées dans des fours circulaires creusés dans le sol sur un lit de braises incandescentes. La saumure se concentre alors par l'évaporation de l'eau.

- La 2ème étape consistait à la cristallisation du sel :

Un montage en forme de grille était soumis au feu allumé en dessous . Le sel se cristallisait alors dans les moules. Le pain de sel se formait et il était récupéré en brisant le godet.

Les fours pouvaient être utilisés une douzaine de fois avant d'être détruits.[3,4]

## II.2.Types de sel

Récolté dans les marais salants, extrait des mines de sel gemme, produit par Dissolution, recristallisé dans des salines ignigènes, le sel connaît plus d'une méthode de production. Il n'a pourtant qu'une seule origine : la mer.

### II.2.1. Sel gemme

Le sel gemme est extrait des mines de sel, sous forme des massifs à la nature. Après que le sel brut est été remonté des mines par explosion, il est raffiné pour l'épurer . La purification comporte habituellement une phase de recristallisation.

Durant cette phase, une solution de saumure est traitée avec des produits chimiques qui précipitent les impuretés sous forme de boues (en grande partie des sels de magnésium et de Calcium et de la silice).

Des étapes multiples d'évaporation sont alors employées pour récupérer les cristaux purs de chlorure de sodium, qui sont séchés au four ou en autoclave [7]

### II.2.2. Sel Ignigène

Cette très ancienne technique repose sur la cristallisation du sel par l'évaporation de saumure . Dès le néolithique, l'eau de mer ou la saumure provenant de sources salées était mise à cuire dans des récipients placés sur un foyer, d'où le qualificatif « ignigène » (d'ignis, le feu).

Cette technique possède un point faible notamment la grande consommation de combustible en l'occurrence du bois. Pour le cas de notre siratany , si nous nous référons aux définitions il est considéré comme un sel de dissolution dans un premier temps puisqu'il

provient de la saumure et dans un second temps il s'agit d'un sel ignigène car il a subi le processus d'évaporation.

En conclusion c'est un sel de type ignigène et cela est bien confirmé par les informations recueillis auprès des filières oeuvrant dans le domaine, il s'agit bien du sel ignigène par son procédé d'obtention. En fait la présence de sel ignigène sur la surface du sol est la preuve de la présence du sel gemme mais ce dernier se trouve en profondeur donc il faut creuser en profondeur pour le recueillir.

D'après les enquêtes effectuées auprès de la société SGM , le sel gemme ne subit ni saumurage ni évaporation, il suffit tout simplement de le broyer ou bien de le faire sécher ou égoutter afin de le conditionner.

### **II.2.3. Sel de mer :**

Du sel est également obtenu par évaporation de l'eau de mer, habituellement en bassins peu profonds chauffés par la lumière du soleil ; du sel ainsi obtenu s'est autrefois appelé le sel de compartiment, et s'appelle maintenant souvent sel de mer. A noter que les changements climatiques pourraient affecter certains producteurs de sel de mer en raison de l'augmentation de la nébulosité et de la pluviométrie dans certaines régions [7].

### **II.2.4.Sel des chotts**

C'est un dépôt de minerai contenant une grosse concentration de sel comestible. Ces gisements de sel ont été constitués par l'évaporation des lacs de sel durant la Préhistoire. Ces dépôts peuvent être extraits par injection d'eau. L'eau injectée dissout le sel qui est de plus en plus concentré. Lorsque saumure (l'eau salée) atteint le degré de saturation, Cette dernière est transvasée vers les marais salants où le sel sédimente et peut être récolté par raclage. [9]

## **II.3 .Type de procédés de production du sel**

Les cristaux de sel obtenus par ces différents procédés seront séchés puis emballés tandis que d'autres vont passer par l'étape de raffinage qui consiste à purifier le sel pour le rendre plus blanc .

### **II.3.1. Sel naturel**

Le sel naturel n'est pas raffiné et contient encore tous ses minéraux naturels. Les sels naturels ont donc des propriétés gustatives et un aspect différent suivant la quantité de minéraux qu'ils contiennent. Ainsi, la fleur de sel ou le sel de mer récolté à la main ont une saveur unique qui change d'une région à une autre.

La fleur de sel ou le sel des marais salants ou le sel gemme non raffinés rentrent dans cette catégorie. Le sel non raffiné de mer est plus sain car plus riche en magnésium (sous forme de chlorure de magnésium) ainsi qu'en oligo-éléments.

Cependant, les sels naturels peuvent ne pas contenir suffisamment d'iode pour empêcher les maladies dues à des insuffisances d'iode comme le goitre . [10]

### **II.3.2. Sel raffiné**

Le raffinage permet d'obtenir un sel de la couleur blanche jusqu'ici fréquemment préférée par le consommateur. Il est alors composé de NaCl pratiquement pur (99,9%), ceci au détriment de ses qualités alimentaires. Des adjuvants, anti-agglomérants et composés fluorés ou iodés, lui sont habituellement rajoutés.

Le sel du type raffiné reste le plus employé dans l'alimentation. Environ 7 % du sel raffiné est aussi utilisé comme additif, mais la plus grande partie est destinée aux usages industriels (fabrication du papier, réglage de la teinte des textiles et des tissus, production de savons et détergents). Le sel a une forte valeur marchande[11]

### **II.3.3. Sel de table**

Le sel de table contient de 98% ou plus du chlorure de sodium (selon la réglementation algérienne) il est presque pur. Il est principalement utilisé en cuisine comme condiment, souvent associé au poivre. Le sel iodé de table a permis de réduire les insuffisances d'iode dans les pays où il est employé.

L'iode est important pour empêcher la production insuffisante des hormones thyroïdiennes (Hypothyroïdisme), qui peut causer des graves complications. [12]

## II.4. Utilisation du sel

Le sel est utilisé dans différents domaines :

En chimie, pour le déneigement, dans des industries diverses et enfin dans l'alimentation. Avec 32 %, le domaine de la chimie est le plus gros consommateur de sel et en dernière position l'alimentation avec 14,5 % de sel utilisé. [5;6]

Directement ou indirectement, le sel joue un rôle dans la fabrication d'une très vaste gamme de produits chimiques et de produits dérivés. Les quatre principales utilisations finales du sel sont : [6]

- ✚ la production de chlore et de soude caustique (38,5 %).
- ✚ la synthèse de carbonate de sodium anhydre (20 %).
- ✚ la production de sel de table (17,5 %).
- ✚ élaboration d'agents de déglacage (14 %).

les 10 % restants sont utilisés comme ingrédient dans la nourriture pour animaux et comme agents de traitement de l'eau.

## II.5. Composition des eaux naturelles

### II.5.1. Sels minéraux

Ce sont essentiellement des composés ioniques, anions et cations, qui proviennent de la dissolution des roches dans l'eau qui circule à leur contact. Les principaux anions et cations contenus dans une eau sont les suivant [16]:

<b>anions</b>		<b>cations</b>
carbonates	} de }	calcium
bicarbonates		magnésium
sulfates		sodium
chlorures		Potassium
nitrate, etc		ammonium, etc.

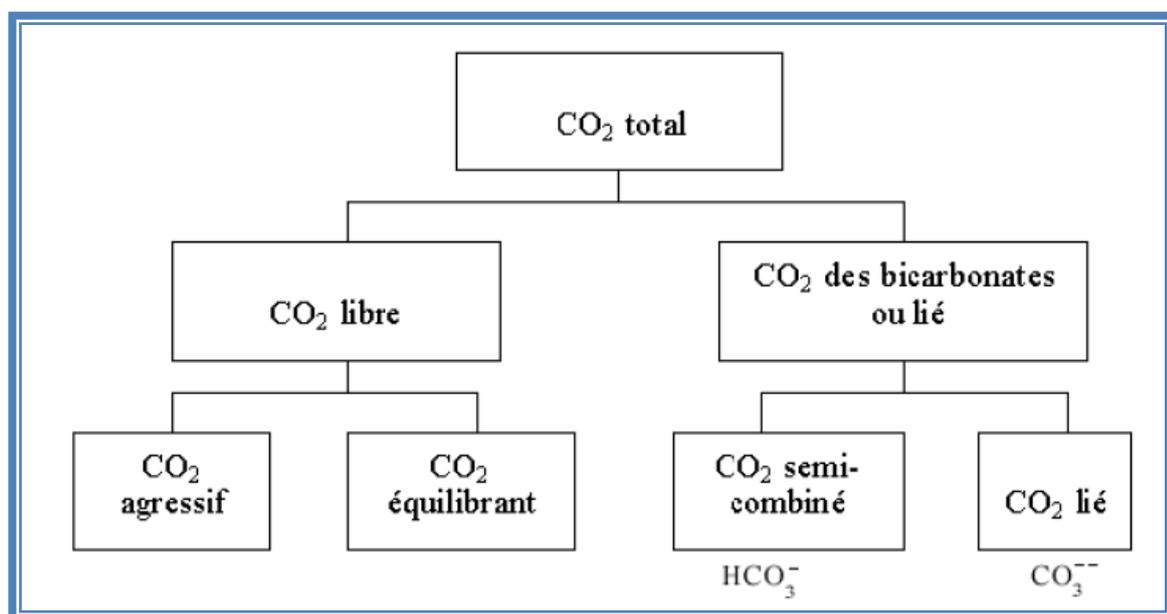
### II.5.2. Gaz dissous

#### ✚ Oxygène dissous

L'oxygène, toujours présent dans l'eau, n'en est pas un élément constitutif, sa solubilité est fonction de la température et de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité. L'oxygène dissous conserve ses propriétés oxydantes, d'où son importance dans les phénomènes de corrosion.

#### ✚ CO<sub>2</sub>

La répartition de l'anhydride carbonique dans les eaux est la suivante [16]:



**Figure II.1** : Répartition de l'anhydride carbonique dans l'eau

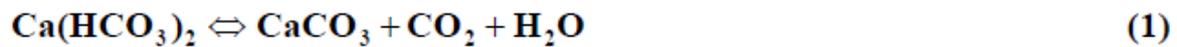
Dans ce schéma:

- **CO<sub>2</sub> total:** représente la somme des espèces carbonatées: CO<sub>2</sub> dissous moléculaire, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>--</sup>.
- **CO<sub>2</sub> libre** est la somme de: CO<sub>2</sub> dissous moléculaire à l'état de microbulles et H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> c'est-à-dire en fait le CO<sub>2</sub> dissous.
- **CO<sub>2</sub> des bicarbonates** est la somme de: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>--</sup>
- **CO<sub>2</sub> libre équilibrant** est la fraction de CO<sub>2</sub> dissous (non combiné en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou CO<sub>3</sub><sup>--</sup>) juste nécessaire pour qu'il n'y ait ni dissolution ni précipitation de carbonate de calcium.

- **CO<sub>2</sub> libre agressif** est la fraction de CO<sub>2</sub> dissous présente dans l'eau en excès par rapport au CO<sub>2</sub> équilibrant et qui confère à l'eau son caractère agressif [17].

#### ✚ Equilibre d'une eau

Dans les eaux naturelles, les carbonates et des bicarbonates de calcium et de magnésium , se trouvent en équilibre avec le CO<sub>2</sub> suivant les équations ci-après [18 ]:



Toute variation dans la teneur en CO<sub>2</sub> déplacera les équilibres:

- si l'eau renferme une dose de CO<sub>2</sub> supérieure à celle correspondant à l'équilibre, la teneur supplémentaire en CO<sub>2</sub> constitue ce que l'on appelle le CO<sub>2</sub> agressif. Une telle eau sera alors agressive.
- si l'eau renferme une dose de CO<sub>2</sub> inférieure à celle de l'équilibre .Il y aura une transformation des bicarbonates solubles en carbonates insolubles qui précipiteront [18] [19].

#### ✚ Matières organiques

Ce sont, par définition, des composés du carbone, de l'hydrogène ,de l'oxygène et de l'azote .Ces matières proviennent soit de l'érosion des sols , soit de la décomposition de matières animales ou végétales qui se retrouvent dans l'eau [20].

## II.5.Mesure de la qualité de l'eau

### ✓ pH

Le pH =-log (H<sup>+</sup>) , il varie de 0 à 14.Il exprime l'acidité ou la basicité .La neutralité est acquise pour un pH voisin de 7. En dessous, on tend vers l'acidité, au dessus vers la basicité [4].

### ✓ la dureté

La dureté d'une eau est due à la présence d'ions métalliques bivalents, les plus abondants étant les ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> .

**Type de duresté:**

- **La duresté calcique** correspond seulement aux ions calcium.
- **La duresté magnésienne** correspond seulement aux ions magnésium.
- **TH totale** est la somme de la duresté calcique et magnésiennes.
- **La duresté carbonatée ou temporaire**

La duresté carbonatée correspond à la partie de la duresté totale, chimiquement équivalente à la quantité de bicarbonates présents dans une eau.

- **La duresté non carbonatée ou permanente**

Ce type de duresté est en général associé aux sulfates, chlorures, nitrates. On ne peut pas l'éliminer ou faire précipiter par ébullition.

- **Alcalinité**

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence d'hydrogène carbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), de carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), d'ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) et d'une façon plus limitée aux ions silicates ( $\text{HSiO}_3^-$ ), phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) [16]. On distingue :

- **Le titre alcalimétrique (TA)**

Le TA mesure la somme hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) et la moitié des carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

- **Le titre alcalimétrique complet (TAC)**

Pour une eau naturelle:

$$\text{TAC} = (\text{OH}^-) + (\text{CO}_3^{2-}) + \text{bicarbonates}(\text{HCO}_3^-)$$

Pour une eau de chaudière :

$$\text{TAC} = (\text{OH}^-) + (\text{CO}_3^{2-}) + (\text{HCO}_3^-) + \frac{2}{3} \text{PO}_4^{3-}$$

➤ **Salinité**

C'est la quantité totale des sels solubles. Le contrôle de La salinité peut se faire avec une bonne approche en mesurant la résistivité de l'eau.

résistivité > 10000  $\Omega \cdot \text{cm}$  : minéralisation très faible.

5000  $\Omega \cdot \text{cm}$  < résistivité < 10000  $\Omega \cdot \text{cm}$  : minéralisation faible.

3000  $\Omega \cdot \text{cm}$  < résistivité < 5000  $\Omega \cdot \text{cm}$  : minéralisation moyenne.

1500  $\Omega \cdot \text{cm}$  < résistivité < 3000  $\Omega \cdot \text{cm}$  : minéralisation moyenne accentuée

1000  $\Omega \cdot \text{cm}$  < résistivité < 1500  $\Omega \cdot \text{cm}$  : minéralisation importante.

résistivité < 1000  $\Omega \cdot \text{cm}$  minéralisation élevée [16].

➤ **Le C.O.T**

Indique la présence de matières organiques dissoutes [4].

## II .6. Notion d'entartrage

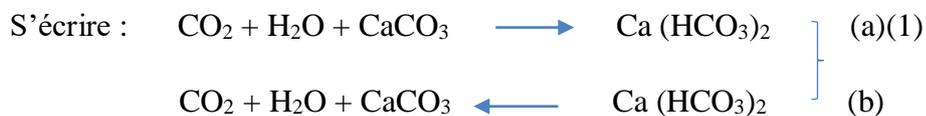
### II.6.1. Introduction

Les eaux naturelles contiennent différents éléments chimiques dissous, du fait de leur cheminement dans le sol et en contact de l'atmosphère :

- Des cations tels que:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  ...
- Des anions tels que  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , ...
- Des gaz dissous, essentiellement  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ .
- Des acides humiques comme la matière organique.

Certains de ces éléments sont susceptibles de réagir entre eux au sein d'un système appelé : système calcocarbonique.

La réaction de base, qui illustre toutes ces possibilités de réactions, peut



Le  $\text{CO}_2$  atmosphérique peut se dissoudre dans l'eau et après hydratation et ionisation.

Le  $\text{CO}_2$  donne lieu à une réaction acide qui permet l'attaque du  $\text{CaCO}_3$  présent dans toutes les roches sédimentaires.[13]

Celui-ci est dissous et passe en solution sous forme d'hydrogénocarbonate beaucoup plus soluble que le carbonate et qui constitue une forme de transport du futur tartre. Cette transformation qui correspond au sens (a) dans la réaction (1) est celle qui correspond au processus de solubilisation des roches sédimentaires dans le sol quand l'eau est en contact de la rhizosphère riche en  $\text{CO}_2$ .

Si par la suite, cette eau perd du  $\text{CO}_2$  par dégazage et/ou échauffement, la réaction (1) peut être déplacée dans le sens (b) et donner lieu à une précipitation du  $\text{CaCO}_3$  qui, s'il adhère aux parois, va constituer le tartre. Si le carbonate de calcium adhère aux parois, on parle de phénomène d'entartrage. Le tartre formé à partir des eaux naturelles est constitué principalement de carbonate de calcium, sel le moins soluble. Le carbonate de calcium est le composant principal du tartre.

Il peut aussi comporter d'autres produits tels que: sulfates de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ), carbonates de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ) et hydroxydes de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Selon l'origine de l'eau, le traitement qu'elle a subis, la nature des canalisations, l'eau peut renfermer certains sels et pas d'autres, que l'on rencontre dans certains procédés de dessalement de l'eau de mer ou avec d'autres sels peu solubles tels que:  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ou des sulfates de fer, généralement provoqués par mélange d'eaux d'origine profonde en cours d'exploitation de certains gisements pétroliers. [13]

### II.6.2. Définition de l'entartrage

L'entartrage est un processus qui résulte de la rupture de l'équilibre calco-carbonique de l'eau naturelle. Le tartre est le nom donné à un dépôt cristallin adhérent, constitué majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , lorsqu'il est formé à partir des eaux de surface.

Dans les installations industrielles, le  $\text{CaCO}_3$  est fréquemment associé à des produits de corrosion du fer issus de la circulation de l'eau dans des conduites en acier, de la silice et des matières en suspension (sables ou argiles) retrouvées dans les eaux naturelles utilisées pour le refroidissement des installations.

Dans l'industrie ce sont surtout les circuits de refroidissement et les chaudières qui sont concernés à cause de la dégradation des coefficients de transfert thermique dû à la formation dans les échangeurs de chaleur de dépôts cristallins. Dans les procédés à membranes, la formation de tartre provoque des colmatages plus ou moins difficiles à éliminer, ce qui dégrade très rapidement les performances.[13]

En exploitation pétrolière et en géothermie, de redoutables problèmes de colmatage des structures géologiques se posent aussi, d'autant plus gênantes qu'une intervention in-situ devient ici très compliquée.[13]

### II.6.3.Causes de l'entartrage

Le tartre est un dépôt généralement dur et adhérent, quelquefois poreux, formé principalement par les carbonates de calcium présents dans l'eau. Les dépôts de tartre dans les tuyauteries d'eau, les échangeurs à plaques ou les corps de chauffe de chaudières, les thermoplongeurs (épingles électriques des chauffe-eau), ... posent des problèmes importants et récurrents. Les dépôts calcaires occasionnent des coûts non négligeables de remise en état des conduites d'eau et des installations de chauffage et sont aussi responsables de pertes énergétiques importantes. L'entartrage va être plus ou moins important en fonction de : [14]

#### Dureté de l'eau :

La présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartrant de l'eau.

Ainsi, plus la dureté de l'eau est élevée, plus il y a prédisposition au dépôt de calcaire (en fait, du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) sur les parois en contact avec l'eau.[14]

#### Température de l'eau :

La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température qui, en libérant du gaz carbonique, accélère la précipitation du tartre. Ainsi, il n'y a pas ou très peu d'entartrage sur les canalisations d'eau froide. En revanche, les circuits d'eau chaude sanitaire représentent un terrain favorable à l'entartrage. A un degré plus important, les résistances des chauffe-eau ou les échangeurs de chaleur sur une chaudière par exemple sont très facilement entartrables.

De l'eau avec une dureté totale de 10°f H (1 mol/m<sup>3</sup>) peut former lors de l'échauffement dans les surfaces d'échange un maximum de 100g de pierre par m<sup>3</sup> d'eau, dont environ 80-90g de calcaire.[14]

Les circuits de chauffage, en circuit fermé, s'entartrent normalement moins malgré la température puisqu'il n'y a pas ou peu de renouvellement d'eau. Le phénomène d'entartrage s'arrête de lui-même lorsque tout le  $\text{CaCO}_3$  contenu a été déposé.

Mais recommence lorsque l'appoint en eau de chauffage est effectué (il faut donc veiller à en avoir à faire le moins souvent possible).

#### **Éléments favorisants :**

La présence d'ions  $\text{Fe}^{2+}$ , issu de la corrosion des parties métalliques d'une installation, même en faible quantité (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre) favorise l'entartrage.

En revanche, la présence dans l'eau d'ions cuivre ou d'ions zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau.

Néanmoins, même des éléments en cuivre peuvent s'entartre dans le temps comme les chaudières Frisquet en cuivre qui réclameront un détartrage du corps de chauffe.[14]

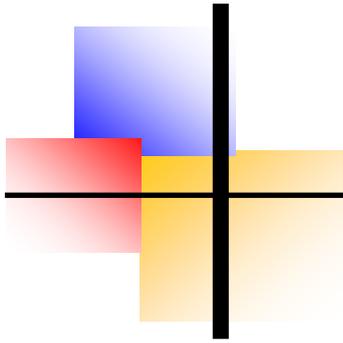
#### **Nature des canalisations :**

Avec par exemple des canalisations en inox ou en PER, il y a toujours amorçage de l'entartrage. Or la couche de tartre favorise l'accrochage et le développement de certaines bactéries comme celles de la légionellose.

Avec des tuyauteries en cuivre, dans le cas d'eaux moyennement ou peu entartrantes, ce dernier peut empêcher l'apparition des premières traces de tartre et bloquer ainsi le développement naturel du processus d'entartrage.

Dans le cas d'eaux très entartrantes, du tartre peut se déposer sur un tube de cuivre.

Mais comme la couche de tartre contient elle-même des traces de cuivre, elle joue alors le rôle de barrière bactéricide vis-à-vis des eaux transportées par la canalisation : le cuivre va inhiber le risque de prolifération de ces micro-organismes.[14]



# CHAPITRE III

## **Généralités sur les Chaudières**

### III .1.Introduction

Les productions de vapeur ou d'eau chaude occupent une place prépondérante dans la majeure partie des activités industrielles (alimentaires ou non). Ce dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique est la chaudière.

Une chaudière est un appareil dans lequel, par apport de chaleur, un fluide caloporteur subit un chauffage et éventuellement un changement d'état (la vaporisation). La chaudière est, en fait, un générateur de vapeur. La vapeur d'eau est obtenue à l'aide de l'eau et de la chaleur dégagée par la combustion des combustibles. Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. La source de chaleur peut-être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon...) ou une résistance électrique.

#### III.1.2. Définition

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

Les appareils qui modifient la température d'un fluide thermique (grâce à la combustion) sont également considérés comme étant des chaudières. [15]

#### III.1.3. Historique

L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1er siècle Apr JC avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de la fin du 17ème siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes. En 1800, l'ingénieur américain Evans mis au point la première chaudière à tubes de fumée qui servit dans les premières locomotives.

La nécessité d'avoir des débits et pressions de vapeur importants aboutit en 1867 à la mise au point de la chaudière à tubes d'eau par les ingénieurs américains Babcock et Wilcox. Depuis, celles-ci se sont sans cesse perfectionner permettant d'avoir notamment des rendements de 90,0 %.

**Années 1955-1970 :** apparition des foyers au fuel avec les premières chaudières à éléments en fonte, et l'apparition de nouvelles chaudières plus performantes après crise du pétrole de 1973.

**Après 1973** : chaudières chauffage central avec rendements plus élevés et réductions des pertes par les gaz brûlés par rayonnement ainsi qu'à l'arrêt du brûleur.

**Années 1980** : Amélioration des rendements avec les lois d'eau soit des chaudières dont la température d'eau varie progressivement en fonction de la température extérieure. Apparition des chaudières basse température (chaudière dont la température d'eau chaude ne dépasse pas 75°C et qui peut descendre à 40°C)

**Années 1990** : montée en puissance de la chaudière à condensation qui récupère la chaleur latente des fumées. Les rendements dépassent les 100% sur PCI.

**Années 2000** : mixage des énergies avec pompes à chaleur et solaire. Apparition de l'éco générateur, de la chaudière hybride (avec pompe à chaleur).

### III.1.4. Rôle d'une Chaudière

Le rôle de la chaudière, quelle que soit la technologie employée et le combustible sélectionné, est de produire de l'eau chaude.

Cette eau chaude pourra être destinée à deux usages différents :

- ✚ Le premier concerne le besoin de chauffage.
- ✚ Le second vise la fourniture d'eau chaude sanitaire.

Lors, la chaudière est catégorisée dans les générateurs à eau chaude basés sur le vecteur "eau". Un vecteur qui ouvre, contrairement au vecteur "air", sur la possibilité de mise en œuvre de systèmes de production à haute performance énergétique. [16]

## III.2.Principe de fonctionnement d'une chaudière

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la chaleur.
- Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".

- Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur, qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.
- Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne.[17]

### III.3.Types de chaudières

#### III.3.1 Chaudières à tubes d'eau

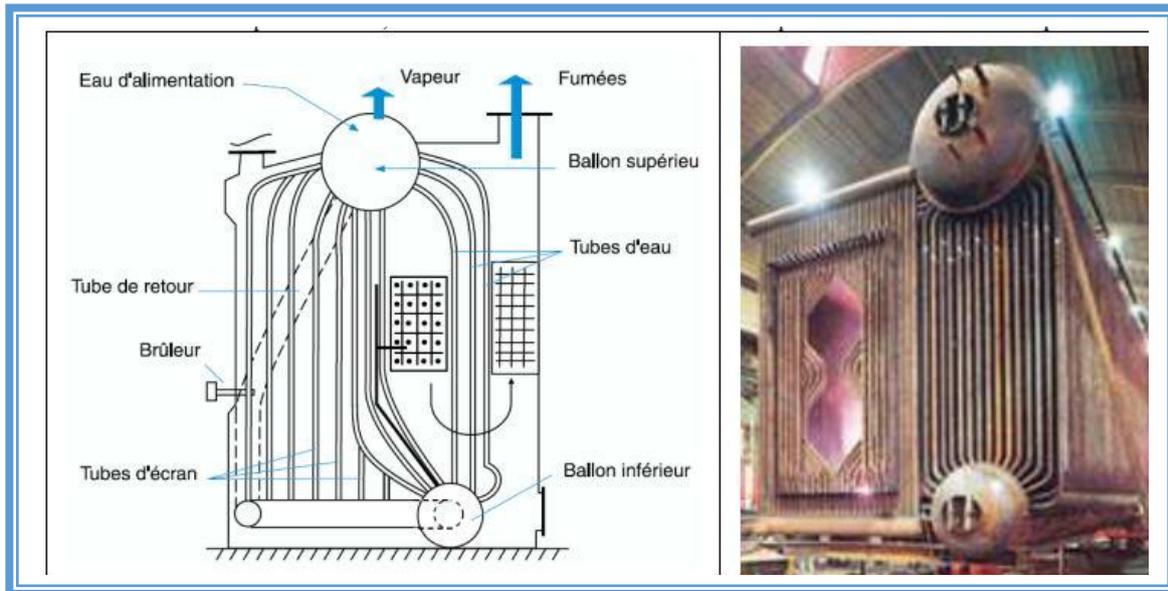
Les chaudières à tubes d'eau représentent la grande majorité des chaudières en service. Elles ne subissent pas les contraintes des chaudières à tubes de fumées (dimensions du corps cylindrique, tubes soumis à la pression extérieure, etc.) et permettent de couvrir toute la gamme de vaporisation des chaudières industrielles de 0,1 à 400 t / h.

Elles permettent une réduction importante du volume d'eau contenu dans les tubes par rapport au débit de vapeur produite, le réservoir ayant la dimension juste nécessaire à la séparation eau-vapeur. [18]

Elles sont réputées « inexplosibles » depuis leur création parce qu'une rupture éventuelle d'un tube de petit diamètre n'entraîne généralement pas d'accident grave, mais seulement un passage intempestif de vapeur dans le circuit fumées par un orifice de faible dimension. Ce phénomène occasionne une perte de charge non négligeable et entraîne une surpression accessible au calcul, contre laquelle le circuit des gaz peut être protégé soit par une trappe d'explosion, soit, plus simplement et de plus en plus fréquemment, par sa résistance propre ; cette augmentation du débit de fumées est évacuée alors immédiatement par la cheminée. [18]

Parmi les chaudières à tubes d'eau, passons en revue :

- ✚ les petites chaudières à vaporisation instantanée
- ✚ les petites chaudières à tubes borgnes de type Field et dérivées
- ✚ les chaudières à tubes inclinés ou verticaux.



**Figure III.1:** Une chaudière à tubes d'eau.

### III.3.2. Chaudières à eau chaude :

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

Une telle chaudière comprend donc une chambre de combustion et des surfaces d'échange fumées/eau fonctionnant en réchauffeur d'eau, la température finale  $T_1$  de l'eau étant inférieure à sa température de saturation  $T_{1sat}$  à la pression de sortie  $p_1$  voisine de  $p$ . [18]

### III.3.3. Chaudières à fluide caloporteur

L'apparition des chaudières à fluide caloporteur, encore appelées chaudières à fluide thermique, est liée au développement des industries chimiques et pétrochimiques après la Première Guerre mondiale. Ces industries exigeaient en effet, pour leur fabrication, des niveaux de température de plus en plus élevés, difficiles à atteindre avec des générateurs thermiques classiques, sauf au prix de pressions de travail très élevées.

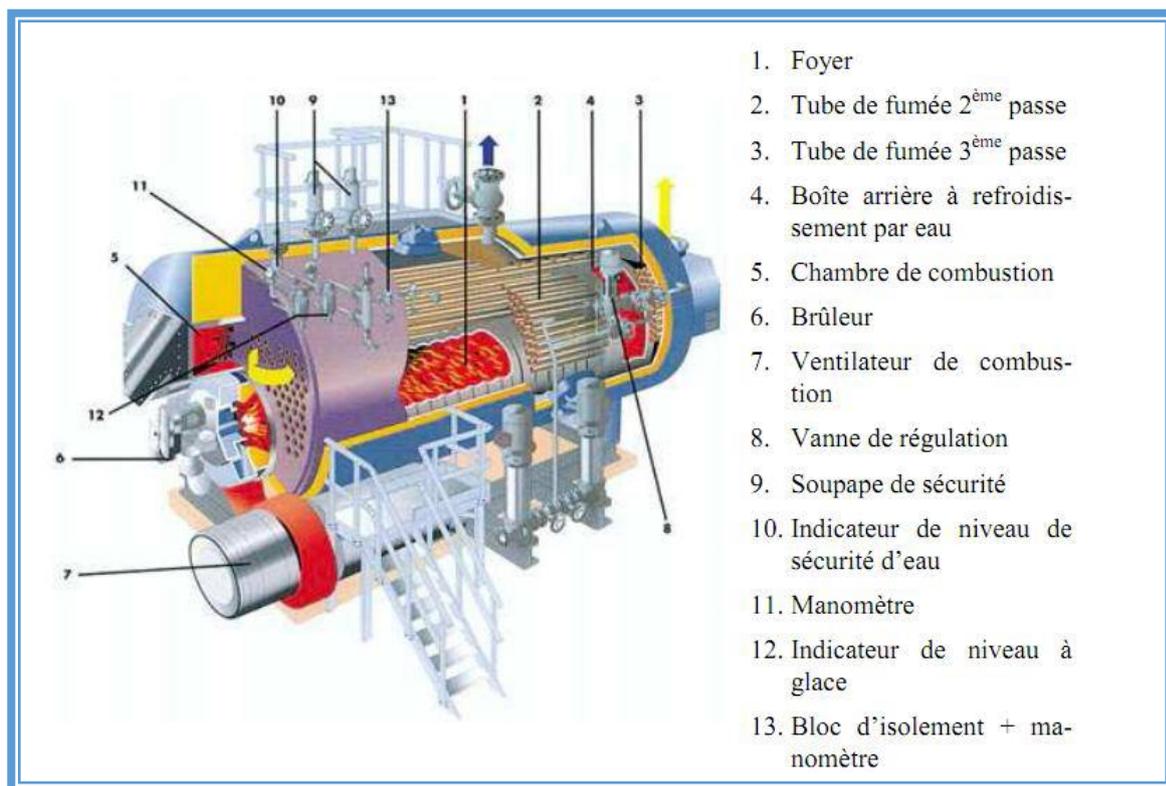
La propriété marquante des fluides caloporteurs est, en effet, de permettre un réchauffage dans la plage de température 300 à 400 °C à des pressions inférieures à 10 bar. [18]

### III.3.4 Chaudières à tubes de fumées :

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

- ✓ Perte minimum par rayonnement.
- ✓ N'exige aucune maçonnerie ou arrangement réfractaire.
- ✓ La conception empêche les fuites d'air frais et de combustibles.
- ✓ Grande capacité de production de vapeur pour un volume fini.
- ✓ N'exige pas de grandes espaces pour son installation
- ✓ Robustesse et stabilité.
- ✓ Facilité d'exploitation.
- ✓ La teneur en eau est excellente pour des applications de chauffage.
- ✓ N'exige pas un établissement spécial.

C'est le type qui sera expliqué dans la partie expérimentale.



**Figure III.2 :** Schéma représentatif de la composition d'une chaudière à tube de fumées

### III.3.5. Chaudières de récupération

Les chaudières de récupération ont, elles aussi, des caractéristiques très variées, Dictées par les processus industriels auxquelles elles sont associées. Elles produisent soit de la vapeur de chauffe, utilisée en d'autres points de l'installation qui nécessitent un apport de chaleur, soit de la vapeur énergétique, dont la détente dans des turbines permet d'entraîner certaines machines, telles que des compresseurs, des pompes ou alors des alternateurs connectés à un transformateur pour la production d'électricité. Ou la production de l'eau chaude pour le chauffage.

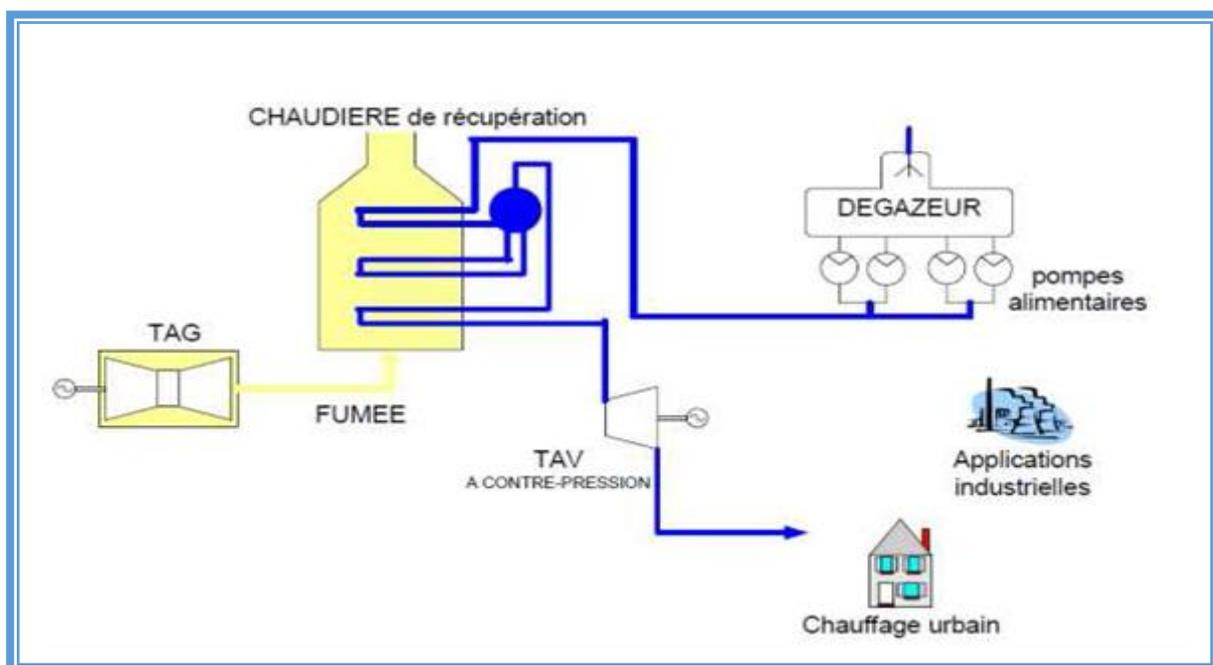


Figure III.3 : Chaudières de récupération. [19]

## III.4. Différents organes d'une chaudière et accessoires

### III.4.1. Foyer ou chambre de combustion

C'est la partie principale du générateur de vapeur son rôle est d'assurer l'échange thermique de la chaudière en dégagant une quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau.

[20]

### III.4.2. Réservoir d'eau

Stockage de d'eau et propagation d'eau en cas de besoin.

**III.4.3. Remplissage de la chaudière**

Quand le niveau d'eau de la chaudière diminue la commande des accélérateurs et des vannes d'admission s'enclenche si le réservoir est plein. [21]

**III.4.4. Bruleur**

Pièce maîtresse du système, son rôle est de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour la production de la vapeur, et assurer le mélange carburant - comburant dans les proportions choisies et réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales il est équipé de:

- Ventilateur.
- Servomoteur.
- Transformateur d'allumage. [21]

**III.4.5. Pressostat**

Sert à mesurer la pression dans différentes parties de la chaudière. [21]

**III.4.6. Sonde de niveau**

Mesure le niveau d'eau dans chacun des réservoirs et de la chaudière, il y a également des sondes de sécurité. [21]

**III.4.7. Les accélérateurs ( les circulateurs )**

Compte tenu du très grand nombre et de la très grande variété des applications ayant recours aux accélérateurs, il est normal de rencontrer un foisonnement de technologies dans le domaine des accélérateurs, l'idée est de citer les principes les plus courants. [21]

**III.4.8. Armoire électrique**

L'armoire électrique est un boîtier qui contient un réseau de distributions électriques, fonctionnant avec des résistances chauffantes et éventuellement, à différentes fréquences. Son rôle essentiel est de protéger ce réseau de tout incident dangereux et elle nous assure le fonctionnement automatique de la chaudière.

**III.4.9. Vannes de régulation**

Constituée de deux éléments principaux :

- Le servomoteur (c'est l'élément qui assure la conversion du signal de commande en mouvement de la vanne) ;
- Le corps de vanne (c'est l'élément qui assure le réglage du débit). [21]

### III.5. Niveaux de Chaudière

➤ **Niveau 1 (réservoir et remplissage) :**

Conditions de validité :

- Accélérateur de remplissage opérationnel.
- Capteurs au point.
- Existence de substance liquide (eau).
- Vidange fermée. [21]

➤ **Niveau 2 (accélérateur et vannes d'admission, remplissage de chaudière)**

- Accélérateur et vannes opérationnelle.
- Capteurs chaudière au point.
- Capteurs réservoir état valide.
- Vidange fermée. [21]

➤ **Niveau 3 (bruleur)**

- Disponibilité substance gazeuse (combustible)
- Validité des deux soupapes à gaz
- Validité de la photocellule
- Disponibilité entrée air
- Capteurs chaudière état valide
- Le ventilateur opérationnel

➤ **Niveau 4 (distributeur)**

- Pression valide (pressostat)
- Vanne de distribution opérationnelle.

### III.6. Problèmes rencontrés avec une chaudière

#### III.6.1 Manque d'eau d'alimentation

Le manque d'eau d'alimentation est considéré comme l'accident de référence pour les installations thermiques équipées avec des générateurs de vapeur [22]. Il peut être provoqué par l'arrêt des pompes alimentaires, la rupture de la tuyauterie principale d'alimentation, le blocage de la vanne principale d'alimentation, par négligence ou encore par la défaillance de

la régulation [23]. Ces accidents menacent l'intégrité structurale du système et provoquent l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur [24]

### **III.6.2. Fatigue et fragilisation du métal**

Les chocs thermiques provoquent des cycles de dilatations restreintes, engendrent des gradients de contraintes qui s'initieront généralement sur les défauts géométriques des surfaces [24]. La *fatigue à chaud* est un autre facteur qui traduit une évolution en fonction du temps et sous l'effet des contraintes de service qui ont la tendance à accélérer des phénomènes de précipitation [25].

### **III.6.3 . Qualité d'eau**

La qualité d'eau influe fortement sur les facteurs qui accélèrent la destruction des surfaces internes des tubes vaporisateurs [26]. Il est obligé de traiter l'eau de la chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube du foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression température plus long, un risque de surchauffe au niveau du tube du foyer, une surconsommation du combustible, une augmentation de la température des fumées à la sortie du générateur de vapeur.

## **III.7. Caractéristiques des eaux de chaudière**

L'eau brute étant d'une qualité insuffisante pour être utilisée directement, et ayant des caractéristiques ne répondant pas aux divers cahiers des charges des constructeurs. Plusieurs étapes seront nécessaires avant de pouvoir l'utiliser [27]. Ces traitements permettent principalement de lutter contre :

### **III.7.1. Corrosion**

La corrosion est le retour d'un métal à sa forme de minerai. Le fer, par exemple, retourne sous forme d'oxyde de fer sous l'effet de la corrosion. Cependant, le procédé de corrosion est une réaction électrochimique complexe et prend diverses formes. La corrosion peut produire une attaque générale sur une large surface ou peut résulter en une attaque très localisée. La corrosion est un problème pertinent causée par l'eau dans les chaudières. La corrosion peut avoir énormément d'origine et de nature différentes dû à l'action de l'oxygène dissous, elle peut résulter d'hétérogénéités à la surface du métal ou au fer directement attaqué par l'eau. [28] La corrosion est généralement décelée par les effets qu'elle induit, par exemple la diminution du poids [29]

### III.7.2. Primage (priming)

Le primage est le transfert néfaste de grandes quantités de solides sous forme de gouttelettes d'eau dans la vapeur produite par une chaudière un appareil de distillation ou tout type de bouilleur.

Ces gouttelettes se présentent sous la forme de mousse ou de brume. Ce phénomène est dû à la contamination de l'eau par des sels minéraux ou des matières en suspension, présents dans l'eau lorsqu'elle est portée à ébullition.[30]

### III.7.3. L'entartrage

L'entartrage est un problème des sels minéraux contenants dans l'eau qui a tendance à se former un dépôt de tartre sur les surfaces d'échanges et les parois des conduites. Les dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), de l'hydroxyde de magnésium ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) et du sulfate de calcium. Pour qu'il y ait dépôts de tartre sur les parois, deux conditions principales doivent être réunies :

- une condition thermodynamique : il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait sursaturation.
- une condition cinétique : il faut que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide.[31].

#### III.7.3.1. Mécanisme de l'entartrage

La dureté de l'eau est principalement causée par la présence d'ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans l'eau, une eau dure peut poser des problèmes d'entartrage des appareils et des canalisations d'eau chaude, il est possible de réduire la dureté de l'eau en l'adoucissant par un système d'échanges d'ions.

#### ✓ La présence de calcaire dans l'eau :

La présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartrant de l'eau ainsi, plus la dureté de l'eau est élevée, plus il y a prédisposition au dépôt de calcaire (en fait, du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) sur les parois en contact avec l'eau. Mais la présence de sels de calcium dans l'eau n'est pas à elle seule suffisante pour provoquer l'entartrage.



#### ✓ La température de l'eau :

La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température qui, en libérant du gaz carbonique,

accélère la précipitation du tartre. Il n'y a pas ou très peu d'entartrage sur les canalisations d'eau froide. En revanche, les circuits d'eau chaude sanitaire représentent un terrain favorable à l'entartrage.

On peut noter que les circuits de chauffage s'entartrent très peu malgré la température est élevée où il n'y a pas de renouvellement d'eau, le phénomène d'entartrage s'arrêtant de lui-même lorsque tout le  $\text{CaCO}_3$  contenu a été déposé. [32]

### **III.7.3.2. Conséquences de l'entartrage**

Le tartre, dépôt adhérent, est formé principalement par la précipitation du carbonate de calcium d'environ 90% du précipité global. A l'état alcalin, il est formé principalement des carbonates de calcium et d'hydroxyde de magnésium. Par contre à l'état non alcalin, il est formé de sulfate de calcium sous les trois formes suivantes:  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ces trois formes sont beaucoup plus solubles que le carbonate de calcium et l'hydroxyde de magnésium. Donc, ces tartres ne se forment que dans le cas où la solution serait sursaturée en sulfate de calcium à des températures élevées [33].

#### **III.7.3.2.1. Conséquences hydrauliques :**

L'accumulation d'une épaisseur de tartre dans les équipements conduit à une diminution des sections de passage, ce qui occasionne une augmentation de la résistance hydraulique des réseaux qui conduit dans tous les cas à une augmentation de la dépense énergétique des pompes dans le cas de réseaux fermés ou sur pressés [34].

#### **III. 7.3.2.2. Conséquences bactériologiques :**

Il a été démontré que les réservoirs, les réseaux et les points de puisage (tel que les robinets), ainsi que les réseaux d'eau chaude sanitaire entartrés pourraient être favorables à « l'accueil » et à la prolifération de bactéries Légionnelles. Ceci conduit à des opérations régulières de détartrage nécessaires avant toute désinfection [34].

#### **III. 7.3.2.3. Conséquences technologiques :**

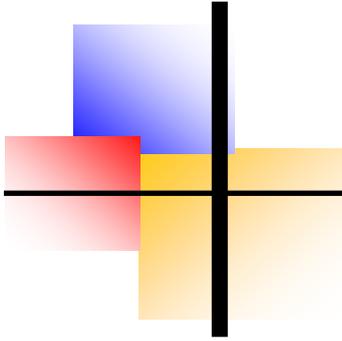
- Blocage des organes de manœuvre des robinetteries,
- Impossibilité d'obtenir de l'étanchéité siège-clapet des robinetteries,
- Blocage des soupapes de sécurité,
- Diminution du volume utile des réservoirs,
- Dégradations des états de surface des appareils sanitaires,
- Entraînement de particules en suspension qui peuvent être abrasives [34].

**III.7.3.2.4. Conséquences thermiques et énergétiques :**

Les tartres ont des conductivités thermiques très faibles en regard des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs de chaleur : acier ou cuivre. Les matériaux ne sont pas tous sensibles à l'entartrage de la même façon. Pour qu'un entartrage puisse se produire il faut :

- Une précipitation de sels minéraux,
- Un accrochage des sels aux parois.

Cette dernière phase n'est pas forcément réalisable, ainsi, les matériaux de synthèse qui présentent des coefficients de dilatation très élevés seront relativement peu sensibles à l'entartrage s'ils sont soumis à des variations de température et donc à des dilatations. De même pour les aciers inoxydables de part leur état de surface. L'augmentation dans de fortes proportions des dépôts entraînent une augmentation de la résistance thermique des parois et donc une diminution du coefficient d'échange thermique [34].



# CHAPITRE IV

## CHAPITRE IV

### **Analyse et Résultats**

## IV.1.Traitement de l'eau de chaudière

Avant qu'il entre à la chaudière, l'eau doit être traitée afin d'assurer la protection de la chaudière contre les problèmes provoqués par l'eau et la température élevée à savoir l'entartrage, le Primage et la corrosion. A l'usine ENASEL El-Outaya, le traitement et le conditionnement de l'eau se réalise dans une usine de traitement d'eau pour alimenter la chaudière en eau traitée. Ce champ contient une station d'épuration qui se compose de :

### IV.1.1. Filtration sur sable

Le filtre à sable monobloc automatique FAS, est utilisé pour les eaux chargées ensable, boue, et autres matières en suspension, et dont l'indice de colmatage est très élevé. Le filtre est fabriqué en polyéthylène renforcé de fibre de verre avec double couche de filtration de silex de granulométries différentes et équipé d'une vanne automatique préprogrammée de type Fleck.



**Figure IV.1:** Filtre à sable utilisé à l'usine ENASEL El-Outaya.

### IV.1.2 Membrane d'osmose inverse

Une membrane semi-sélective est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres ou plus généralement en favorisant certains par rapport à d'autres. L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane.

## IV.2. Principes de l'osmose inverse

Le principe de l'osmose est basé sur l'équilibre de concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Considérons un système à deux compartiments séparés par une membrane perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. La quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. Si pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée **pression osmotique**. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique. C'est à dire de la solution concentrée vers la solution diluée c'est le phénomène d'osmose inverse [33].

## IV.3. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse

### IV.3.1. Pression osmotique

La pression osmotique ( $\pi$ ) est d'autant plus importante que la concentration est élevée et que la masse molaire est faible. La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui exprime que  $\pi = i \times C \times R \times T$  Avec :

$\pi$  : Pression osmotique (bar).

$i$  : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte.

$C$  : Concentration molaire (mol.L<sup>-1</sup>).

$R$  : Constante des gaz parfaits (0,082 L.bar.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>).

$T$  : Température absolue (K).

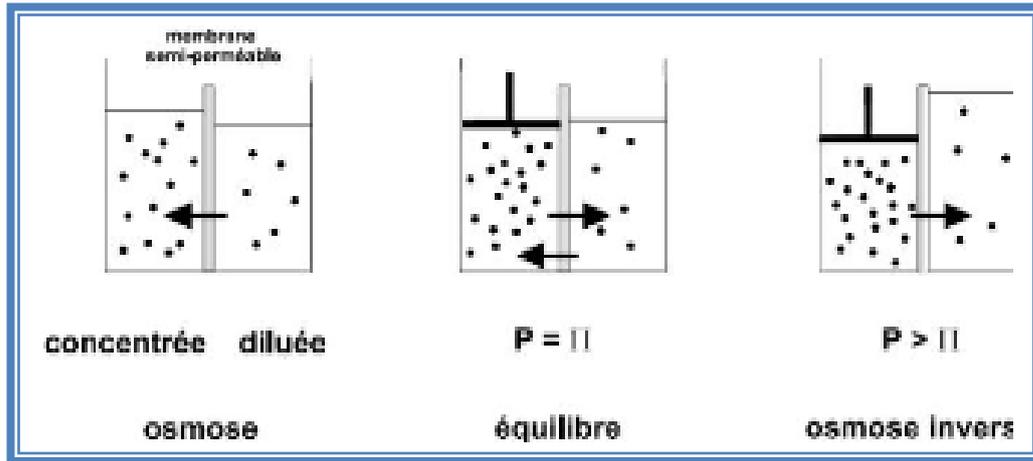


Figure IV.2 : Pression osmotique

### IV.3.2. Taux de conversion

La solution à traiter (l'eau micro filtrée) à débit  $Q_0$  se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentration différentes :

- Une partie qui passe à travers la membrane appelée perméat à débit ( $Q_p$ ).
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane qui contient les molécules ou les particules retenues par les membranes et elle est appelée concentrât

Le taux de conversion est défini comme la fraction de débit du liquide qui traverse la membrane [34].

$$Y = Q_p / Q$$

### IV.3.3. Sélectivité

La sélectivité est une caractéristique de surface de la membrane qui est définie comme la possibilité de laisser passer ou de retenir les solutés en fonction de leur poids moléculaire . En générale ; elle est définie par le taux de rétention ou le taux de rejet de l'espèce que la membrane est censée retenir.

$$Tr = ((C_0 - C_p) * 100) / C_0 = ((1 - C_p) / C_0) = (Q_p / Q_0)$$

Avec :

$C_p$  : concentration finale (perméable).

$C_0$  : concentration initiale.

Il y a deux valeurs particulières du  $Tr$  :

$Tr = 0 \%$  signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane.

$Tr = 100 \%$  signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane.

#### IV.3.4.Mécanisme de transfert

Dans le cas de l'osmose inverse, les transferts des solvants et de soluté au travers d'une membrane semi-perméable se font par solubilisation et diffusion : Toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieure de celle-ci comme à travers un solide ou un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression [35].

#### IV.4.Entartrage dans les chaudières

Après ma formation à l'usine ENASEL El-Outaya , mon encadrant à l'usine a mis en avant le problème dans lequel se trouvait l'usine, qui est les Dépôts formé à l'intérieur de la chaudière à vapeur, et ce dernier représente le cœur battant de l'usine, car l'usine dépend entièrement de la vapeur et tous les processus en dépendent, ce qui signifie que tout défaut de la chaudière à vapeur est considéré comme un défaut dans toute l'usine.

L'usine s'appuie sur la vapeur dans le processus de cristallisation et le processus de séchage du sel. A noter que la pression suffisante pour l'usine est de **(10-12) bar**

Le problème des dépôts dans la chaudière à vapeur conduit au manque de pression de vapeur suffisante dont l'usine a besoin, car des dépôts se forment entre les tubes de la chaudière et empêchent l'écoulement de l'eau entre les tubes, ce qui conduit à un processus d'évaporation incomplet complètement, et c'est la raison du manque de pression de vapeur.

Après avoir recherché la cause des sédiments dans la chaudière, il a été découvert que la qualité de l'eau qui alimentait la chaudière en **TH** était élevée. Notez que la chaudière doit avoir l'eau qui l'alimente avec **TH = 0F°**, c'est dans des conditions normales Quant à l'eau nutritive dans l'usine se situe TH entre **(18 et 25) F°** C'est la principale raison de la formation de tartre à l'intérieur de la chaudière. Nous avons proposé une solution simple et peu coûteuse pour l'entreprise : l'adoucisseur

#### IV.4.1. Définition l'adoucisseur

Un adoucisseur d'eau est un dispositif visant à réduire la dureté de l'eau, c'est-à-dire sa teneur en sels de calcium et de magnésium. Cet appareil favorise l'interaction des ions calcium et des ions magnésium avec les ions sodium.[35] Ce dernier fait de l'eau d'alimentation de la chaudière TH=0F°.

$$TH = \frac{V_{\text{dep}} \cdot N(\text{EDTA}) \cdot 1000 \cdot 5}{V_{\text{aliq}}}$$

Avec :

$V_{\text{dep}}$  : volume dépense d'EDTA (ml)

$N_{\text{EDTA}}$  : normalité

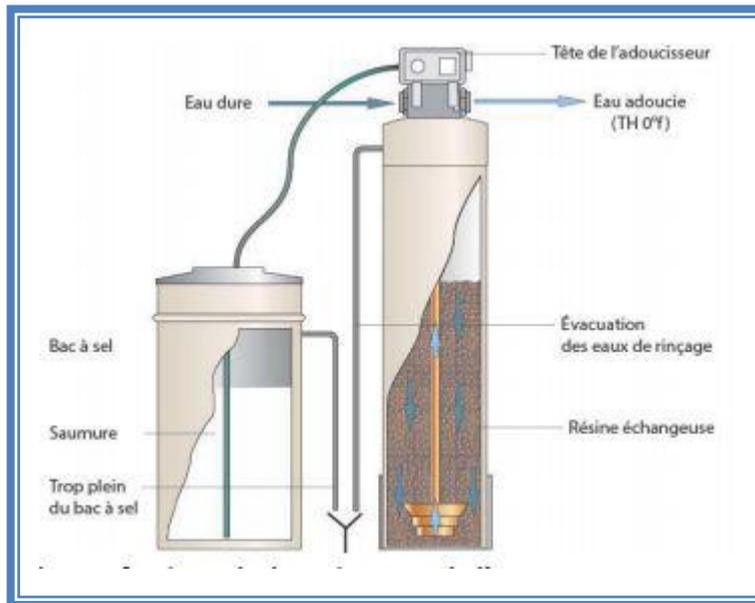
$V_{\text{aliq}}$  : volume prélèvement d'eau (ml)



**Figure IV.3** : Adoucisseur utilisée à l'usine ENASEL El-Outaya

### IV.4.2.Principe de l'adoucisseur

Un adoucisseur se compose principalement d'un bloc renfermant une résine échangeuse d'ions, d'un bac contenant du sel régénérant et d'une tête avec des vannes servant à distribuer l'eau en fonction des étapes de fonctionnement. Selon les attentes du consommateur une vanne de mitigeage permet de laisser un résiduel de dureté.



**Figure IV.4 :** Principe de fonctionne d'un adoucisseur

Le fonctionnement de l'adoucisseur d'eau repose sur le principe de l'échange ionique . Les ions calcium et magnésium de l'eau dure passent au travers d'une résine dite «échangeuse d'ions » chargée en ions sodium. Lors de leur passage les ions calcium et magnésium se fixent sur la résine qui libère en retour ses ions sodium. L'eau est alors débarrassée de son calcaire et on parle d'eau adoucie (phase d'adoucissement). La quantité de calcium et de magnésium que peut retenir une résine est appelée capacité d'échange. Lorsque la résine arrive à saturation, il faut alors la recharger en ions sodium, c'est la régénération.

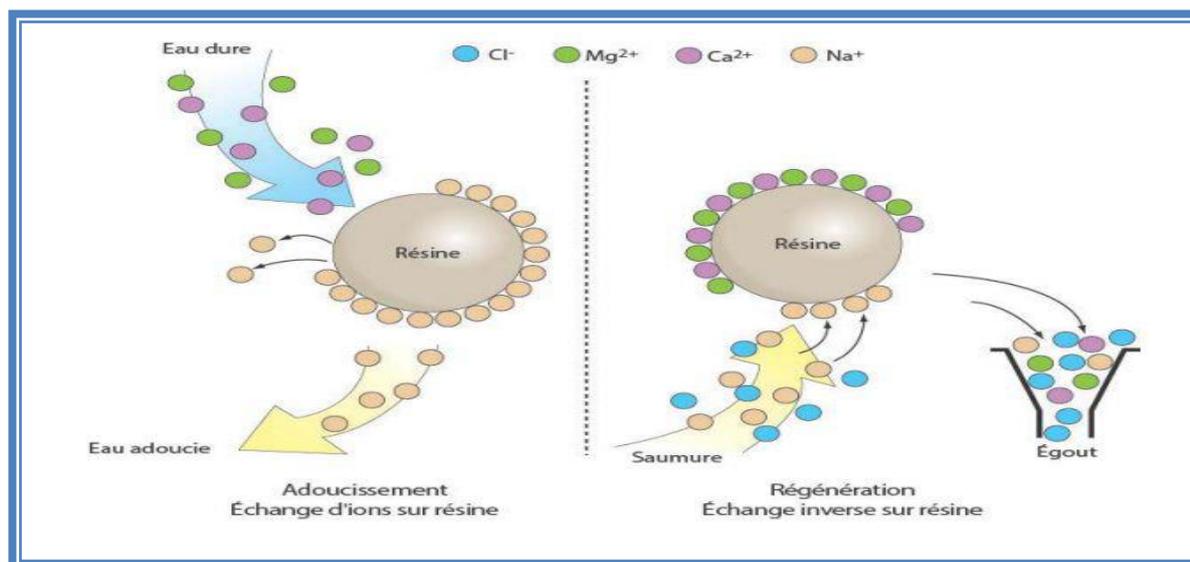


Figure IV.5 : Comment fonctionne la Résine

	Eau de forage	Filtration sur Sable	Membrane d'osmose inverse	L'adoucissement de l'eau
<b>PH</b>	<b>7,40</b>	<b>7,45</b>	<b>7,30</b>	<b>7,35</b>
<b>Conductivité µs</b>	<b>9680</b>	<b>9680</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	<b>531,1</b>	<b>531,1</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	<b>176,30</b>	<b>176,30</b>	<b>24,36</b>	<b>0</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	<b>1094</b>	<b>1094</b>	<b>50,1</b>	<b>50,2</b>
<b>Cl<sup>-</sup> (mg/l)</b>	<b>2600,2</b>	<b>2600,2</b>	<b>35,45</b>	<b>34,45</b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	<b>213,5</b>	<b>213,5</b>	<b>26,84</b>	<b>26,84</b>
<b>TDS (mg/l)</b>	<b>5615,1</b>	<b>4715,1</b>	<b>196,75</b>	<b>0,00029</b>
<b>TH</b>	<b>205</b>	<b>205</b>	<b>20</b>	<b>0</b>
<b>RESIDUE INSOLUBLE (mg/l)</b>	<b>0,5</b>	<b>0,0001</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tableau IV.1** : Les résultats du traitement de l'eau d'alimentation de la chaudière à l'usine ENASEL El-Outaya.

Le **Tableau IV.1** rassemble les résultats du traitement de l'eau d'alimentation de la chaudière à l'usine ENASEL El-Outaya. Nous remarquons que l'eau obtenue après traitement obéit à la norme des eaux des chaudières.

Pour illustrer le procédé, le rôle de l'adoucisseur et du rapport TH dans le rendement de la chaudière, On trace le graphique suivant: (**Figure IV.6**) et (**Figure IV.7**)

## IV.5.Détermination du TH

### IV.5.1.Matérielles et produits

- Une pipette jaugée (+ une pro pipette)
- Bécher de 500 ml
- Fiole jaugée de 1000 ml
- Une pissette d'eau distillée
- Une burette graduée
- Agitateur
- PH 10
- indicateur eriochrome noir T.

### IV.5.2.Mode opératoire

- Prendre une aliquote de 50 ml ( $V_{\text{aliq}}$ )
- Ajoute 10-15 ml de pH 10
- Ajoute une pince de l'indicateur eriochrome noir T
- Titrer avec une solution standard (S) l'EDTA du 0,05 N noter le volume V.  
la couleur se transforme du violet au bleu.

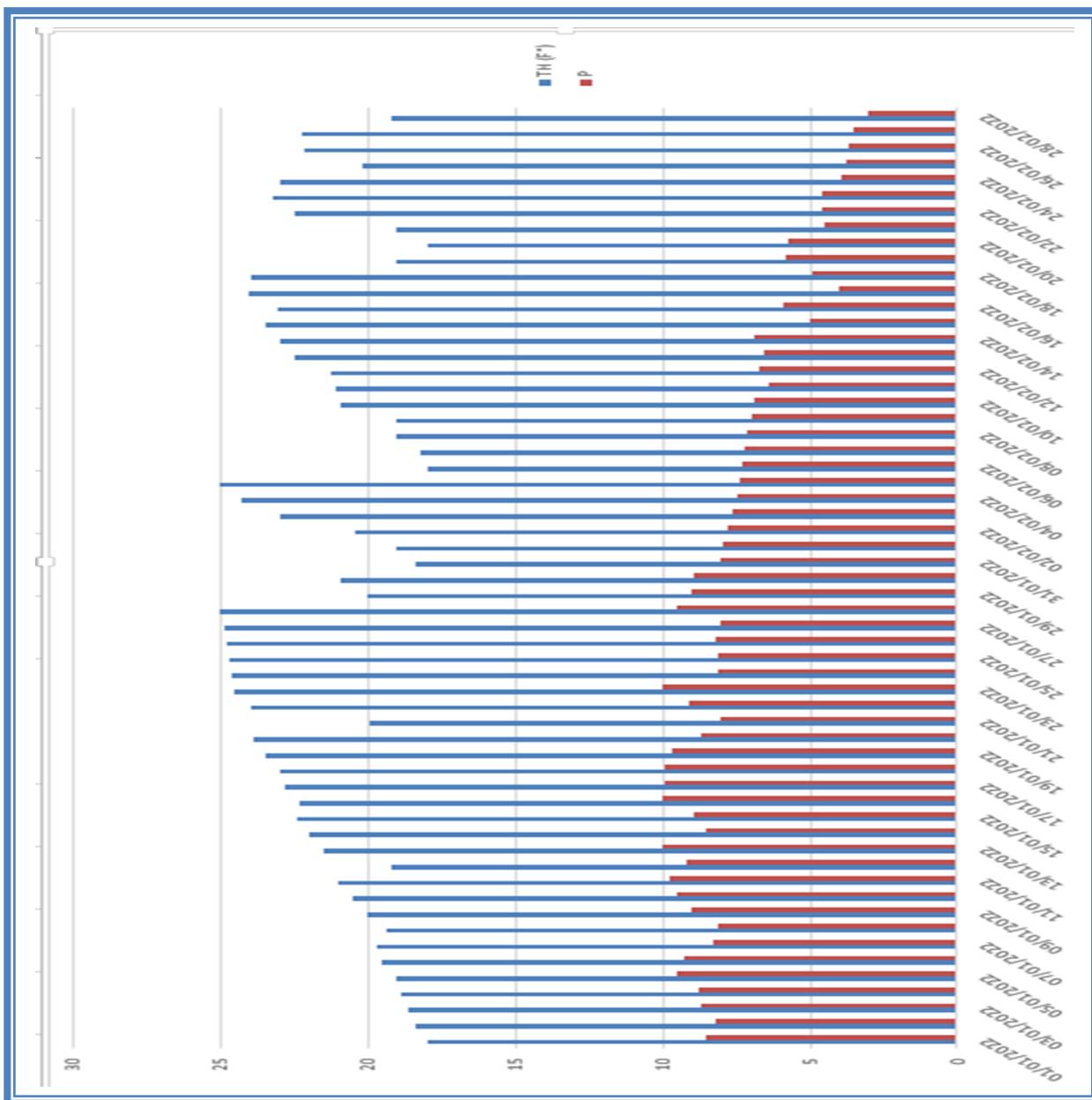
**Calcul TH** : On peut calculer la valeur de TH par la loi suivante :

$$TH(^{\circ}F) = \frac{V \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 0,05}{50}$$

JOURS	TH (F°)	P(bar)		JOURS	TH (F°)	P(bar)
01/01/2022	18	8.5		15/02/2022	23.45	5
02/01/2022	18.4	8.22		16/02/2022	23.04	5.9
03/01/2022	18.6	8.7		17/02/2022	24.01	4
04/01/2022	18.9	8.8		18/02/2022	24	4.9
05/01/2022	19	9.5		19/02/2022	19	5.8
06/01/2022	19.5	9.23		20/02/2022	18	5.7
07/01/2022	19.7	8.29		21/02/2022	19.06	4.5
08/01/2022	19.4	8.15		22/02/2022	22.5	4.6
09/01/2022	20	9.01		23/02/2022	23.24	4.6
10/01/2022	20.5	9.5		24/02/2022	23.01	3.9
11/01/2022	21	9.8		25/02/2022	20.15	3.8
12/01/2022	19.2	9.2		26/02/2022	22.13	3.7
13/01/2022	21.5	10		27/02/2022	22.20	3.5
14/01/2022	22	8.5		28/02/2022	19.20	3
15/01/2022	22.4	8.9		<b>Nettoyage de chaudière + adoucisseur</b>		
16/01/2022	22.3	10		01/03/2022	0	12
17/01/2022	22.8	9.9		02/03/2022	0	11.99
18/01/2022	23	9.9		03/03/2022	0	11.8
19/01/2022	23.5	9.7		04/03/2022	0	11
20/01/2022	23.9	8.7		05/03/2022	0	11.5
21/01/2022	19.9	8.05		06/03/2022	0	11.9
22/01/2022	24	9.09		07/03/2022	0	11.4

<b>23/01/2022</b>	24.5	10		<b>08/03/2022</b>	0	12
<b>24/01/2022</b>	24.6	8.15		<b>09/03/2022</b>	0	10.99
<b>25/01/2022</b>	24.7	8.1		<b>10/03/2022</b>	0	11
<b>26/01/2022</b>	24.8	8.20		<b>11/03/2022</b>	0	11.8
<b>27/01/2022</b>	24.9	8		<b>12/03/2022</b>	0	12
<b>28/01/2022</b>	25	9.5		<b>13/03/2022</b>	0	10.8
<b>29/01/2022</b>	20	9		<b>14/03/2022</b>	0	10.7
<b>30/01/2022</b>	20.9	8.9		<b>15/03/2022</b>	0	11.1
<b>31/01/2022</b>	18.4	8		<b>16/03/2022</b>	0	11.5
<b>01/02/2022</b>	19.04	7.99		<b>17/03/2022</b>	0	11.9
<b>02/02/2022</b>	20.4	7.8		<b>18/03/2022</b>	0	11.7
<b>03/02/2022</b>	23.01	7.6		<b>19/03/2022</b>	0	10.9
<b>04/02/2022</b>	24.30	7.5		<b>20/03/2022</b>	0	10.6
<b>05/02/2022</b>	25	7.4		<b>21/03/2022</b>	0	10.5
<b>06/02/2022</b>	18.01	7.3		<b>22/03/2022</b>	0	10.4
<b>07/02/2022</b>	18.20	7.2		<b>23/03/2022</b>	0	11
<b>08/02/2022</b>	19	7.1		<b>24/03/2022</b>	0	11.99
<b>09/02/2022</b>	19.07	7		<b>25/03/2022</b>	0	11.8
<b>10/02/2022</b>	20.9	6.9		<b>26/03/2022</b>	0	12
<b>11/02/2022</b>	21.08	6.4		<b>27/03/2022</b>	0	11
<b>12/02/2022</b>	21.25	6.7		<b>28/03/2022</b>	0	10
<b>13/02/2022</b>	22.45	6.6		<b>29/03/2022</b>	0	11.9
<b>14/02/2022</b>	22.98	6.9		<b>30/03/2022</b>	0	11.5

**Tableau IV .2 :** Résultats de manipulation de notre travail ,le TH et la pression de vapeurs dans le chaudière



**Figure IV.6 :** Variation de TH et la pression de vapeur Sans l' adoucisseur



Figure IV.7 : Variation de TH et la pression de vapeur Avec adoucisseur

## IV.6. Analyse des Résultats

D'après les deux graphiques ci-dessus et selon les données fournies par les archives de l'institution du 01/01/2022 au 28/02/2022 :

- On constate que le TH eau d'alimentation de la chaudière est élevé et varie entre **(18 et 25) F°** Cela a conduit à la formation progressive de dépôts représentés par la diminution de la pression de vapeur sortant de la chaudière, puisqu'elle a atteint 3bar le 28/02/2022, ce qui a conduit à l'arrêt de l'usine.
- Le 01/03/2022, les surveillants ont nettoyé manuellement la chaudière des boues puis ajouté l'adoucisseur, car l'eau alimentant la chaudière entre dans l'adoucisseur **(18 et 25) F°** et sort à **0 F°** et c'est ce que faut .
- Et le retour de ceci représente les résultats de la date du 01/03/2022 jusqu'au 30/03/2022, Où l'on note que **TH = 0 F°**, et la pression de vapeur de la chaudière est comprise entre **(10-12) bar** et cette pression est nécessaire pour la consommation en usine.

## Conclusion

---

L'eau, lors de son transport ou son utilisation dans les installations de chauffage peut causer aux différents matériaux avec lesquels elle est en contact des altérations de diverses natures dont les plus fréquentes : l'entartrage. Ce phénomène est particulièrement dangereux car il peut conduire à des ruptures et des explosions qui mettent en péril la durée de vie de l'installation, augmentent les coûts d'exploitation et diminuent la pression des vapeurs dans la chaudière et entraînent des problèmes de sécurité et de perte de vie.

Dans ce mémoire, nous avons traité ce problème de la sédimentation dans la chaudière, où au début de l'attente que nous avons faite dans l'usine, qui a **duré 45 jours**, nous avons constaté le problème de diminution de la pression de la chaudière, et c'était un gros problème dans l'usine ENASEL, où la cause principale était la formation progressive de sédiments à l'intérieur de la chaudière .

Donc la résolution de notre problème est l'ajouté un adoucisseur pour l'eau d'alimentation de la chaudière qui permet de augmenter la pression de vapeur d'eau dans la chaudière et élimine tous les traces de calcaire.

- [1] Sel alimentaire- [http : // fr.wikipedia.org/wiki/sel alimentaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/sel_alimentaire)
- [2] PERNYE CARINE,( 2015) LE METIER D'AYGADIER.SAUNIER.DE CAMARGUE .Analyse de poste,4p.
- [3] Ministère de l'éducation de la recherche et de la jeunesse (Académie bordeaux), [2002] ; Le sel ; [en ligne] ; cité sur [http : // www . google . mg / url , sa](http://www.google.mg/url,sa)  
[Fwww.futurasciences.com%2Fgetpdf%2Fdossier](http://www.futurasciences.com%2Fgetpdf%2Fdossier)
- [4] COLIN C. et TEISSIER T. ; ( 2004 ) ; Le sel dans les industries alimentaires ; [en ligne] ; sur <http://www.salines.com/producteur/securite.htm>
- [5] DUMONT M., ( 2009 ) ;Annuaire des minéraux du Canada (AMC) ; [en ligne] ; cité le 25/06/2014 sur [www.nrcan-rncan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/cmy-amc/com-fra.htm](http://www.nrcan-rncan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/cmy-amc/com-fra.htm)
- [6] Anonyme ; ( 2014 ) , Les minéraux et oligo-éléments ; sur[http://umvf.univ-nantes.fr/nutrition/enseignement/nutrition\\_11/site/html/cours.pdf](http://umvf.univ-nantes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_11/site/html/cours.pdf)
- [7] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Sel-alimentaire-page-2.html>
- [8] A.BENAIRIA, N.EL KHARMECHEN, Impact de la turbidité de l'eau de mer sur la station de dessalement de Mainis à Ténès (W.Chlef).
- [9] [https://www.memoireonline.com/01/14/8616/m\\_Impact-de-la-salinite-due-au-traitement-de-sel-sur-l-environnement-Cas-d-ENASEL-El-Outaya-wilaya8.html](https://www.memoireonline.com/01/14/8616/m_Impact-de-la-salinite-due-au-traitement-de-sel-sur-l-environnement-Cas-d-ENASEL-El-Outaya-wilaya8.html)
- [10] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Sel-alimentaire-page-2.html>
- [11] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Sel-alimentaire-page-2.html>
- [12] Anonyme; ( 2012 ) -[http://fr.wikipedia.org/wiki/Sel alimentaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Sel_alimentaire).
- [13] C. Hort. (1994). Contribution à l'étude des phénomènes d'entartrages : influence des solides en contact avec le liquide sur la cinétique de précipitation. Thèse de doctorat, INSA Toulouse .
- [14] (<https://desembouage-circuit-de-chauffage.fr/symptome-embouage-chauffage/cause-entartrage-circuit-chauffage>)

- [15] <https://www.cedeeo.fr/conseils/chaudiere-definition-types-fonctionnements-et-rendements>
- [16] <https://www.xpair.com/lexique/definition/chaudiere.htm>
- [17] Chaudière un article de WIKIPEDIA
- [18] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-thermique-industrielle-tiabec/archive-1/differents-types-de-chaudieres-industrielles-b1480/tentative-de-classification-b1480niv10001.html>
- [19] Alain RIOU et Jean Pierre , ( 1990 ) , DEPAUW Différents types de chaudières industrielles Techniques de l'ingénieur B1 480.
- [20] AZZOUG Mohamed abd Hakim, ( 2014 ) “ Modélisation d'une chaudière à l'aide D'un outil graphique”, Commande des processus industriels, Université Ferhat Abbas Sétif.
- [21] Abderrahmane CHABI, ( 2014 ) “ Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4 Tonnes / Heure de l'ECFERAL”, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [22] J. P. Ylén, M. Paljakka, T. Karhela, J. Savolainen & K. Juslin, ( 2005 ) . "Experiences on Utilising Plant Scale Dynamic Simulation in Process Industry", Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation,
- [23] A. Rahmani,( 2007 ) "Modélisation et simulation thermohydraulique d'un générateur de vapeur industriel en régime transitoire par le code RELAP5/Mod3.2", Thèse de Doctorat .
- [24] Boiler Design, ( 2006 ) "Maintenance and Safety Study Guide, Boiler Design and Construction", American Trainco Inc., SGB001 306 .
- [25] Michel F. Asahby, ( 1991 ) , "Matériaux-Microstructure et mise en œuvre". Vol. 02, Edition Dunod,
- [26] "Choix des Alliages Métalliques Réfractaires pour Four de Traitement Thermique", centre des industries mécaniques, (CETIM-1997).
- [27] A. Rahmani, ( 2002 ) . "Etude du phénomène de la crise d'ébullition dans un générateur de vapeur" , Thèse de magistère .

[28] <https://www.lenntech.fr/applications/process/chaudiere/chaudiere/corrosion.htm>

[29] Manuel de formation ingénieur du GL1/Z, module 4: traitement de l'eau, 1993.

[30] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Primage>

[31] [hmf.enseeiht.fr/travoux/bei/beiere/content/entartrage-et-colmatage](http://hmf.enseeiht.fr/travoux/bei/beiere/content/entartrage-et-colmatage) Janvier 2015

[32] [datao, eklablog.net/ocan perso/cours et TP en ligne/les traitements des eaux.PDF](#)

[Janvier 2015](#)

[33] N. Bessa. (2003). Monographie de la vallée de Oued R'Hir. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud,

[34] H. Roques. (1990). Fondements théoriques du traitement chimique des eaux, Technique et Documentation, Paris .

[35] A. Laid.( 2019) . Etude de l'inhibiteur des teneurs en  $\text{Ca}^{+2}$  et  $\text{Mg}^{+2}$  lors des traitement du pissement du sel (station El-MEGHAIER). Génie des procédés et d'environnement. Université Mohamed Khider de Biskra.