

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie des Procédés

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Contribution à l'étude du Traitement des Eaux de  
Chaudières par Osmose Inverse  
(FLU SIDER ANNABA)**

Présenté par : *BICHA Ghazlène*

*SERRAYE Nada*

### Jury de Soutenance :

TOUBAL Abdel Aziz	Pr	Badji Mokhtar - Annaba	Président
SAOUDI Fethi	MAA	Badji Mokhtar - Annaba	Encadrant
KERMICHE Messaoud	MCB	Badji Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022-2023

# ***Dédicace***

Je dédie ce mémoire à :

Ma chère **mère** et mon **père** pour leurs encouragements, leurs conseils et leurs sacrifices.

Mes chères sœurs « **Sara** » et « **Hadjar** » et mon cher frère « **Ismail** ».

Ainsi qu'à mes amis et spécialement « **Nada** ».

A mes collègues de la promotion 2022-2023.

**Ghozléne**

## ***Dédicace***

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que, je dédie cette mémoire de fin d'études à :

A mon cher, et adorable **père**, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être, ce travail et le fruit de vos sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A ma **mère** qui m'a tout le temps comblé par son amour, merci à toi ma chère maman pour tout ce que tu as fait pour moi.

A ma chère sœur « **Nihad** ».

A « **Ghozlène** ».

A mes collègues de la promotion 2022-2023.

**Nada**

## ***Remerciement***

Tout d'abord nous tenons à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir fourni de la patience au moment de besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté contre le désespoir, et de nous avoir permis d'en arriver là.

Nous nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur **Mr. Saoudi Fethi** Maître à Assistant de l'université de Badji Mokhtar Annaba, d'avoir accepté de nous encadrer, orienter et surtout on le remercie pour sa disponibilité au cours de la préparation de ce mémoire.

Ce travail a été réalisé au niveau de La division fluide (FLU) du complexe Sidérurgique d'El-HADJAR Annaba, dans le cadre de l'obtention du diplôme de fin d'études en Master II, option Génie Chimique.

Une pensée particulière est adressée à **Mr Bala Farid**, à **Mr. Abainia Mohammed** et à tous les membres de l'équipe de la zone EST de la division fluide pour leurs disponibilité et gentillesse tout au long du stage.

Nous remercions également le responsable du laboratoire d'analyses des eaux **Mr. Ziyari Abdelhak** et toute l'équipe pour leurs aides et explications.

Merci également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, d'assister à la soutenance et de l'enrichir via leurs commentaires. Nous ne pourrons pas mettre fin à ces remerciements sans associer nos familles et nos amis pour leurs encouragements.

# SOMMAIRE

Introduction Générale :	1
I.1 Présentation du complexe SIDER EL-HADJAR :	3
I.1.1 Historique du complexe :	3
I.1.2 Situation géographique :	4
I.1.3 Principales activités :	5
I.1.4 La division fluide (FLU) :	6
I.1.5 Les utilisations des eaux dans l'entreprise :	7
I.2 Généralités sur les eaux :	7
I.2.1 Cycle de l'eau :	8
I.2.2 Sources des eaux :	8
I.2.2.1 Eau de souterraine :	9
I.2.2.2 Eau de mer :	9
I.2.2.3 Eau de surface :	9
I.2.3 Composition de l'eau :	9
I.2.3.1 Matières minérales :	9
I.2.3.2 Matières organiques :	10
I.2.4 Propriétés de l'eau :	10
I.2.4.1 Propriétés organoleptiques :	10
I.2.4.2 Propriétés physico-chimiques :	11
I.2.5 Polluant des eaux :	13
Conclusion :	14
Partie II :	15
Etude Expérimentale	15
II.1 Traitement des eaux de chaudières :	16
II.1.1 Prétraitement :	16
II.1.1.1 Dégrillage :	16
II.1.1.2 Dessablage :	16
II.1.1.3 Déshuilage et dégraissage :	17

II.1.2 Traitement physico-chimique :.....	17
II.1.2.1 Coagulation- Floculation- Décantation :.....	17
II.1.2.2 Décarbonatation à la chaux : .....	19
II.1.2.3 Filtration sur sable :.....	20
II.1.3 Adoucissement de l'eau : .....	21
II.1.4 Filtration par membrane : .....	22
II.1.4.1 Grandeurs principales et loi de filtration : .....	23
II.1.4.2 Nature chimique des membranes :.....	23
II.1.4.3 Structures des membranes : .....	24
II.1.4.4 Mise en œuvre des membranes : .....	25
II.1.4.5 Configuration des modules : .....	26
II.1.4.6 Séparation membranaire :.....	27
II.1.4.7 Ultrafiltration :.....	28
1) Définition : .....	28
2) Description de l'unité de l'ultrafiltration : .....	28
II.1.4.8 Osmose inverse :.....	29
1) Définition et principe : .....	29
2) Description de l'unité d'osmose inverse :.....	30
3) Pression osmotique :.....	32
4) Force motrice : .....	32
5) Installation d'osmose inverse :.....	32
6) Membranes et modules d'osmose Inverse : .....	33
7) Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :.....	34
8) Problème rencontrés en osmose inverse :.....	35
9) Principales applications de l'osmose inverse :.....	38
10) L'avantages et l'inconvénients de l'osmose inverse :.....	38
11) Procédure de nettoyage des membranes :.....	39
II.2 Les analyses des eaux : .....	39
II.2.1 Détermination de l'alcalinité (Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet) : .....	39
II.2.1.1 Réactifs :.....	39
II.2.1.2 Mode opératoire :.....	39
II.2.1.3 Expression des résultats :.....	40

II.2.1.4 Discussion des résultats d'analyse :	41
II.2.2 Détermination du titre hydrotimétrique TH.....	23
II.2.2.1 Réactifs :	44
II.2.2.2 Mode opératoire :	44
II.2.2.3 Expression des résultats :	45
II.2.2.4 Discussion des résultats d'analyse :	45
II.2.3 Détermination du titre hydrotimétrique $T_{Ca^{++}}$ :	47
II.2.3.1 Réactifs :	47
II.2.3.2 Mode opératoire :	47
II.2.3.3 Expression des résultats :	47
II.2.3.4 Discussion des résultats d'analyse :	27
II.2.4 Détermination du titre hydrotimétrique $T_{Mg^{++}}$ :	50
II.2.4.1 Discussion des résultats d'analyse :	51
II.2.5 Détermination de Chlorure :	52
II.2.5.1 Réactifs :	52
II.2.5.2 Mode opératoire :	52
II.2.5.3 Expression des résultats :	52
II.2.5.4 Discussion des résultats d'analyse :	54
II.2.6 Détermination le potentiel d'hydrogène (pH) :	55
II.2.6.1 Discussion des résultats d'analyse :	56
II.2.7 Détermination la conductivité :	57
II.2.7.1 Discussion des résultats d'analyse :	58
II.2.8 Détermination le taux de salinité :	59
II.2.8.1 Discussion des résultats d'analyse :	60
II.2.9 Détermination des matières en suspension :	61
II.2.9.1 Discussion des résultats d'analyse :	62
II.2.10 Détermination de la température :	62
II.2.10.1 Discussion des résultats d'analyse :	63
Conclusion :	67
Conclusion Générale :	69
Références bibliographiques :	71

## Liste des Figures

Figure I.1 : Localisation du complexe SIDER EL-HADJAR. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I.2 : Logo SIDER EL-HADJAR.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I.3 : Organisation de la division fluide. ....	7
Figure I.4 : Cycle de l'eau .....	8
Figure II.5 : Coagulation-floculation.....	18
Figure II.6 : Décanteur.....	18
Figure II.7 : Machine pour produire le lait de chaux. ....	19
Figure II.8 : Schéma descriptif d'un filtre à sable.....	20
Figure II.9 : Schéma de principe de la production de l'eau industrielle au niveau de la de la zone EST. ....	20
Figure II.10 : Principe de l'adoucissement de l'eau.....	22
Figure II.11: Schéma du mécanisme de filtration sur membrane. ....	22
Figure II.12: Schéma d'un écoulement frontal.....	25
Figure II.13: Schéma d'un écoulement tangentiel.....	26
Figure II.14 : Classification des procédés membranaires. ....	27
Figure II.15 : Procédé de l'ultrafiltration. ....	29
Figure II.16: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse. ....	30
Figure II.17 : Procédé d'osmose Inverse. ....	31
Figure II.18: Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. ....	33
Figure II.19: Structure interne d'une membrane. ....	34
Figure II.20 : Phénomène de polarisation.....	36
Figure II.21: Schématisation des différents mécanismes de colmatage d'une membrane. ....	37
Figure II.22 : Dosage volumétrique du TA et TAC. ....	41
Figure II.23 : Variation de TA des eaux (brute et industrielle). Erreur ! Signet non défini.	
Figure II.24 : Variation de TA de l'eau déminéralisée. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.25 : Variation de TAC des eaux (brute et industrielle).Erreur ! Signet non défini.	

Figure II.26 : Variation de TAC de l'eau déminéralisée.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.27 : Dosage volumique du TH. ....	45
Figure II.28 : Variation de TH des eaux ( brute et industrielle).Erreur !	Signet non défini.
Figure II.29 : Variation de TH l'eau déminéralisée. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.30 : Dosage volumétrique du $T_{Ca^{++}}$ .....	48
Figure II.31 : Variation de calcium $Ca^{++}$ des eaux ( brute et industrielle).Erreur !	Signet non défini.
Figure II.32 : Variation de calcium $Ca^{++}$ de l'eau déminéralisée.Erreur !	Signet non défini.
Figure II.33 : Variation de magnésium $Mg^{++}$ des eaux (brute et industrielle).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.34 : Variation de magnésium $Mg^{++}$ de l'eau déminéralisée.Erreur !	Signet non défini.
Figure II.35 : Dosage volumétrique du $Cl^{-}$ .....	53
Figure II.36 : Variation de $Cl^{-}$ des eaux (brute et industrielle). Erreur !	Signet non défini.
Figure II.37 : Variation de $Cl^{-}$ de l'eau déminéralisée. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.38 : pH- mètre consort « C832 ». ....	55
Figure II.39 : Variation de pH des eaux (brute et industrielle). Erreur !	Signet non défini.
Figure II.40 : Variation de pH de l'eau déminéralisée. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.41 : Conductimètre « E 587 ». ....	57
Figure II.42 : Variation de la conductivité des eaux (brute et industrielle).Erreur !	Signet non défini.
Figure II.43 : Variation de la conductivité de l'eau déminéralisée.Erreur !	Signet non défini.
Figure II.44 : Variation de TDS des eaux ( brute et industrielle).Erreur !	Signet non défini.
Figure II.45 : Variation de TDS de l'eau déminéralisée. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.46 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 ». ....	61
Figure II.47 : Variation des MES des eaux (brute et industrielle).....	48
Figure II.48 : Variation de la température des eaux (brute et industrielle).Erreur !	Signet non défini.

Figure II.49 : Variation de la température de l'eau déminéralisée. **Erreur ! Signet non défini.**

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Principales activités du complexe. ....	5
Tableau I.2 : Les principaux éléments présents dans l'eau . ....	10
Tableau I.3 : Caractère des eaux selon le TH. ....	12
Tableau I.4 : Caractère de l'eau selon le $I_R$ . ....	13
Tableau II.5 : Différents types de dégrillage . ....	16
Tableau II.6 : Qualité de l'eau industrielle demandée. ....	21
Tableau II.7 : Eau osmosée à produire . ....	31
Tableau II.8 : Résultat d'analyse d'eau brute . ....	64
Tableau II.9: Résultat d'analyse d'eau industrielle . ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau II.10 : Résultat d'analyse d'eau déminéralisée . ....	66

## Résumé

L'eau est très utile dans la production industrielle pour : Le traitement, le lavage, le refroidissement et la production d'énergie, l'objectif est axé d'une part sur le traitement des eaux des chaudières par osmose inverse et de suivre les paramètres physico-chimiques des eaux (brute, industrielle et déminéralisée) du complexe sidérurgique d'El-HADJAR Annaba, afin de développer des stratégies visant à minimiser les risques et assurer la qualité d'eau, Et d'autre part sur le suivi des performances et les caractéristiques des membranes utilisées dans cette industrie pour améliorer la production d'eau déminéralisée.

**Mots clés :** Traitement, paramètre physico-chimique, osmose inverse.

## ملخص

الماء مفيد في الإنتاج الصناعي من أجل: المعالجة، الغسيل، التبريد وإنتاج الطاقة، يتركز هدفنا على معالجة مياه آلات إنتاج البخار بواسطة التناضح العكسي ومتابعة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه (الخام، الصناعية والمنزوعة المعادن) لمجمع الحديد والصلب بالحجار عنابة، من أجل تطوير استراتيجيات تقليل المخاطر وضمان جودة المياه، ومن ناحية أخرى رصد أداء وخصائص الأغشية المستخدمة في هذه الصناعة لتحسين إنتاج المياه المنزوعة المعادن.

**الكلمات المفتاحية:** معالجة، معامل فيزيائي وكيميائي، تناضح عكسي.

## Abstract

Water is very useful in industrial production for: Treatment, washing, cooling and energy production, the objective is focused on the one hand on the treatment of boilers water by reverse osmosis and to follow the physical and chemical parameters of the waters (raw, industrial and demineralized) of the EL-HADJAR Annaba iron and steel complex, in order to develop strategies aimed at minimizing risks and ensuring water quality, And on the other hand on the monitoring of performance and characteristics of the membranes used in this industry to improve the production of demineralized water.

**Keywords:** treatment, physical and chemical parameter, reverse osmosis.

## Liste des abréviations

Abréviations	Désignations
ACO	Aciérie à oxygène
ACE	Aciérie électrique
EBS	EBSRAY PUMPS
FI	Force ionique
FLU	Division des fluides
HF	Haute fourneau
HP	Haute pression
J	Flux de perméation

Abréviations	Désignations
OI	Osмосe inverse
pH	Potentiel d'hydrogène
P	Pression
$Q_0$	Débit d'alimentation
$Q_c$	Débit de concentrât
$Q_p$	Débit de perméat
R	Sélectivité
TDS	Taux de salinité

<b>LFR</b>	Laminoir à Fil rond
<b>LAC</b>	Laminoir à chaude
<b>LAF</b>	Laminoir à froid
<b>MIN</b>	Minimum
<b>MAX</b>	Maximum
<b>MES</b>	Matières en suspension
<b>NTU</b>	Unités de turbidité néphélométrie

<b>T</b>	Température
<b>TA</b>	Titre alcalimétrique
<b>TAC</b>	Titre alcalimétrique complet
<b>TH</b>	Titre hydrotimétrique
<b>PTM</b>	Pression transmembranaire
<b>TC</b>	Taux de conversion
<b>UF</b>	Ultrafiltration

**Introduction Générale :**

L'évolution que connaît l'environnement urbain et industriel pose, le problème de la pénurie d'eau dans nombreux pays. Par ailleurs il est certain que nos besoins en eau ne cesseront de croître alors que les réserves en eau de bonne qualité diminuent.

Heureusement, il y a eu récemment beaucoup de développement des nouvelles technologies des traitements des eaux. Les exemples incluent : L'électrodialyses, la filtration, l'ultrafiltration, et l'osmose inverse.

Les procédés membranaires font partie de ces nouvelles technologies qui peuvent jouer un rôle environnemental important. Ces procédés permettent la production d'eau destinée soit à la consommation humaine, soit aux industries qui consomment de l'eau de pureté contrôlée dans leur chaîne de production (industries agroalimentaires, industrie pharmaceutique, ...).

L'osmose inverse est un procédé qui permet l'obtention d'eau pure dépourvue de toute espèce chimique ou bactériologique.

Ce travail pour de suivre et de contrôler la qualité physico-chimique des eaux (brute, industrielle et déminéralisée) du complexe sidérurgique d'El-HADJAR et aussi de suivre les performances des membranes utilisées dans cette industrie pour améliorer la qualité d'eau déminéralisée.

Cette étude est structurée en deux parties :

- Partie I : Etude théorique, elle est consacrée à la présentation du complexe SIDER EL-HADJAR et des généralités sur les eaux.
- Partie II : Etude expérimentale, elle s'intéresse aux traitements des eaux de chaudières et les analyses des différents eaux utilisés.

**Partie I :**  
**Etude Théorique**

## **I.1 Présentation du complexe SIDER EL-HADJAR :**

Le domaine industriel est le plus consommateur d'eau, en quantité et en qualité. Cette consommation d'eau varie selon les pays et les secteurs d'activités, les industries de transformation sont considérées comme les plus consommateurs d'eau, telles que les industries métalliques et chimiques ....

Le complexe SIDER EL- HADJAR s'intéresse à la production d'acier avec une capacité allant jusqu'à 800 tonnes/an, et qui a fait la contribution au redressement économique de l'Algérie.

### **I.1.1 Historique du complexe :**

**Période coloniale :** Le projet de construction d'une usine sidérurgique à Annaba été inscrit en 1958 dans le plan de Constantine. Ce projet a vu la création de la société bônoise de sidérurgie (SBS) qui a été chargée de réaliser un haut fourneau et ses annexes.

**1964, Création de SNS :** Après l'indépendance, l'état algérien a créé, le 03 septembre 1964, la société Nationale sidérurgie (SNS) qui a été chargée de la construction du complexe sidérurgique d'El- HADJAR.

**1969, Première coulée :** Le complexe est entré en production après son inauguration le 19 juin 1969 par le président de l'état algérien Houari Boumediene.

**1983, Création de l'Entreprise Nationale SIDER :** La restructuration de l'industrie algérienne a donné naissance à l'Enterprise Nationale SIDER.

**1999, Création de ALFASID :** Un plan de redressement Internet du groupe SIDER a donné naissance à 25 entreprises industrielles autonomes dont ALFASID qui représente le « cœur du métier » de la sidérurgie.

**2001, ISPAT Annaba :** Le partenariat entre SIDER et LNM (Lakshmi Niwas Mittal) a donné naissance à ISPAT Annaba. LNM détient 70% du capital social et SIDER 30%.

**2004, Mittal Steel Annaba :** La société change de dénomination après la fusion de LNM holding et ISPAT international.

**2007, Arcelor Mittal Annaba :** Résultats de la fusion entre Mittal Stell et Arcelor.

**2013, Arcelor Mittal Algérie :** La société change de dénomination après la signature d'un accord stratégique entre ArcelorMittal et Sider par lequel, la participation d'ArceloMittal dans le capital de la société passe à 49% et celle de Sider à 51%.

**2016** : La société devient Algérienne à 100% suite à la signature de l'accord de transfert de la totalité des actions détenues auparavant par le groupe ArcelorMittal vers le groupe public IMETAL.

### I.1.2 Situation géographique :

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 800 ha. La superficie se répartie approximativement en trois zones : Les ateliers de la production « 300 ha », les zones de stockage « 300 ha » et les surfaces de services « 200 ha ».

Il dispose d'une infrastructure ferroviaire d'une longueur de 60 Km permettant la libre circulation des matières premières et près de 100 Km de route permettant la circulation des engins (autobus, camion, véhicule légers .....) [1].



**Figure I .1** : Localisation du complexe SIDER EL-HADJAR.

**Figure I.2:** Logo SIDRE EL-HADJAR.

### I.1.3 Principales activités :

Les principales activités du complexe sont regroupées dans le tableau I.1[1].

**Tableau I.1 : Principales activités du complexe.**

<b>Installation</b>	<b>Produits</b>	<b>Principaux utilisateurs</b>
Cokerie	Coke	Métallurgie
HF <sub>1</sub> et HF <sub>2</sub>	Fonte	Métallurgie
ACO <sub>1</sub>	Brames	Industrie de transformation
ACO <sub>2</sub>	Billettes	Industrie de transformation
Laminoir à chaude (LAC)	Tôles forte	Emballage métallique Divers pour les industries Alimentation et chimique
Laminoir à froid (LAF)	Tôles fines	Électroménager Mobilier métallique Industrie de transformation
Etamage	Fer blanc	Emballage métallique Divers pour les industries Alimentation et chimique
Galvanisation	Tôles galvanisées	Bâtiments pour l'agronomie Industrie et levage
ACE	Lingots	Recherche et production pétrolière Bâtiments et travaux Hydraulique
Laminoir à fil rond (LFR)	Fil rond a béton	Bâtiments et travaux publics Hydraulique

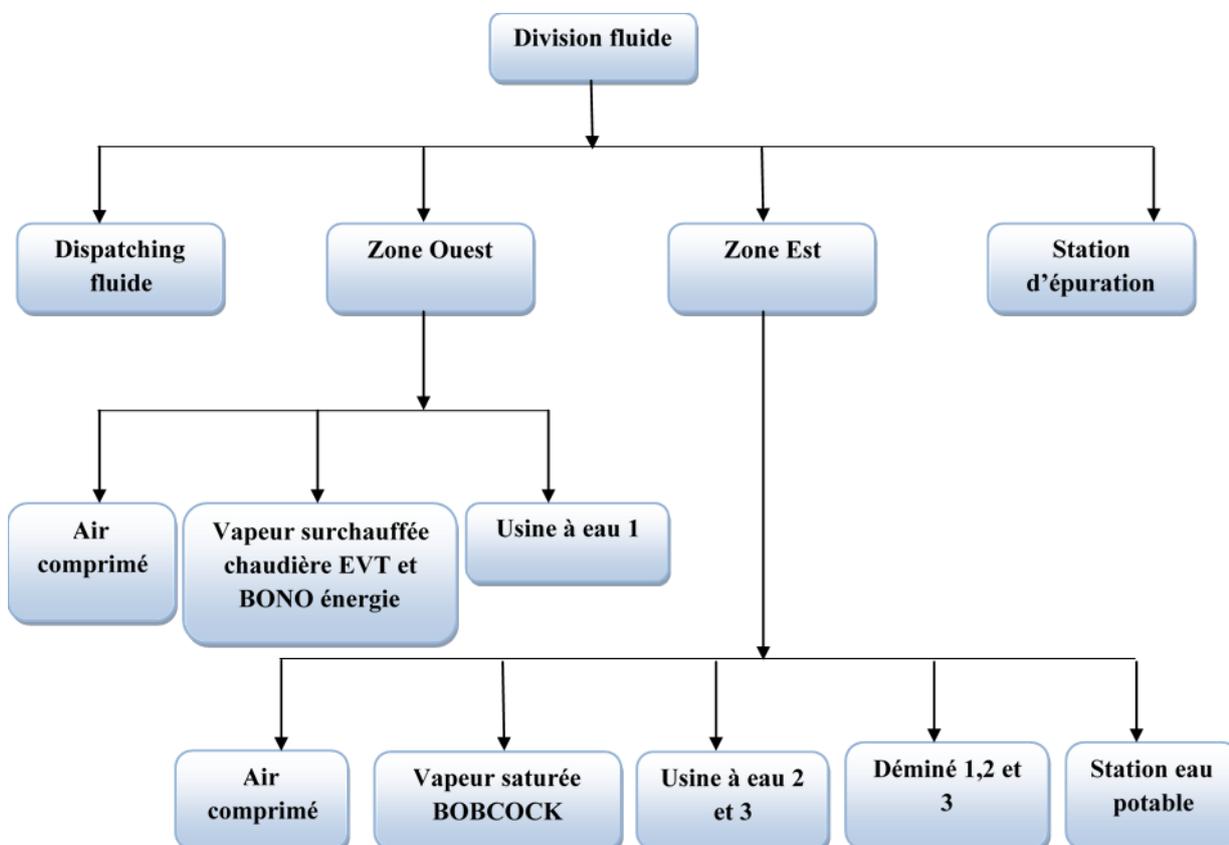
### I.1.4 La division fluide (FLU) :

La division fluide s'occupe principalement de la distribution des différents fluides à travers le complexe et d'assurer la protection à partir d'un réseau de conduite qui s'étend sur plus de 25 Km [1].

Le secteur fluide comprend les principaux circuits :

- Air comprimé.
- Eau potable.
- Eau industrielle.
- Gaz naturel.
- Eau brute.
- Oxygène à une pression de 20 bars.
- Azote à une pression de 10 bars.

L'organisation des différents équipements de la division des fluides est la suivante :



---

**Figure I.3 : Organisation de la division fluide.**

### **I.1.5 Les utilisations des eaux dans l'entreprise :**

Les unités dans le complexe SIDER EL-HADJAR ont besoin de :

- L'eau brute.
- L'eau industrielle.
- L'eau adoucie.
- L'eau déminéralisée.

L'eau brute est utilisée pour :

- Le refroidissement du coke.
- Le refroidissement des brames.
- La pulvérisation de la fonte.
- Les réseaux incendie.

L'eau industrielle est utilisée essentiellement pour le refroidissement de certains mécanismes où la température est moins importante, à titre d'exemple on cite :

- Le refroidissement des machines à couler continue et des billettes.
- Le refroidissement, l'épuration des gaz (CO, CO<sub>2</sub>) et les poussières (calamines et graphites) des convertisseurs.
- Le refroidissement des échangeurs des paliers presse-étoupes des pompes, des moteurs et divers.

L'eau adoucie est destinée spécialement pour le refroidissement des installations si la température est assez élevée pour éviter la corrosion, à titre d'exemple : Les lances, les puits de lance, les goulottes d'addition et les lingotières.

Elle est aussi utilisée pour le refroidissement des systèmes de captation des gaz et des poussières des convertisseurs.

L'eau déminée est destinée à l'alimentation des chaudières à partir de laquelle est produite de la vapeur pour faire fonctionner les turbines qui entraînent les alternateurs, donc à partir de l'énergie thermique on produit de l'énergie mécanique et ensuite de l'énergie électrique.

### **I.2 Généralités sur les eaux :**

L'eau est un élément sous forme liquide en conditions standards (température et pression ambiante) composés sous sa forme pure des molécules qui associent deux atomes d'hydrogènes et un atome d'oxygène [2].

L'eau représente le constituant majeur de la matière vivante. L'eau liquide est souvent perçue comme une substance assez ordinaire car elle est transparente, inodore. Cependant, c'est un composé chimique remarquable, bien que nous la buvions et que nous

l'utilisons pour laver ou cuisiner, nous oublions presque toujours la relation spéciale qu'elle a avec nos vies.

### I.2.1 Cycle de l'eau :

L'eau circule continuellement dans les enveloppes superficielles de la terre, au sein de plusieurs grands compartiments : Les océans, la cryosphère (neige et glaces) et la lithosphère (sols et sous-sol). Ces compartiments sont les éléments constitutifs du système climatique. Le rayonnement solaire, absorbé par la surface du globe, provoque l'évaporation des océans, des lacs, des rivières et des sols, provoque aussi la transpiration des plantes et la sublimation de la glace et de la neige qui contribuent au cycle de l'eau (Figure I.4) [3].

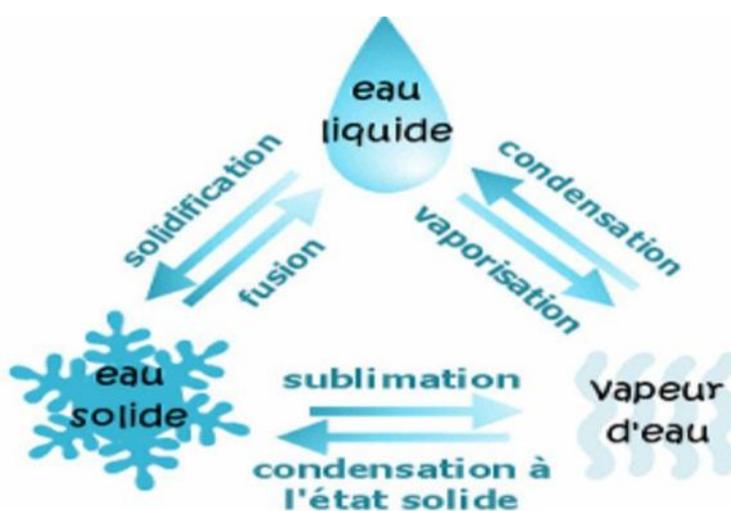


Figure I.4 : Cycle de l'eau [3].

### I.2.2 Sources des eaux :

Sur notre planète, l'eau est partout sous des formes diverses. On trouve trois sources principales d'eau brute : L'eau de souterraine, l'eau de mer et l'eau de surface. Les caractéristiques de chacune de ses sources reflètent l'interaction de l'eau avec le milieu environnant.

### **I.2.2.1 Eau de souterraine :**

Elles sont souvent de meilleures qualités que les eaux de surface. Leurs teneurs en matière organiques dépendent du chemin suivi par les eaux d'infiltration qui alimentent les nappes souterraines. Les caractéristiques principales de ces eaux sont :

- Une turbidité faible.
- Une contamination bactérienne faible.
- Un indice de couleur.
- Une dureté élevée.

Une nappe souterraine est une masse d'eau contenue dans les interstices ou fissures du sous-sol. Le niveau des nappes peut varier en fonction des infiltrations et des prélèvements d'eau [6].

### **I.2.2.2 Eau de mer :**

Les eaux de mers sont une source d'eau brute qu'on utilise lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mer sont caractérisées par leur concentration en sel dissout, c'est ce qu'on appelle salinité. La salinité des eaux de mer est de 35 g/L [5].

### **I.2.2.3 Eau de surface :**

Les eaux de surface sont toutes eaux circulantes ou stagnantes à la surface des continents. On peut y accéder facilement mais elles se polluent rapidement et aisément à cause de l'activité humaine. On peut répartir l'eau de surface en trois catégories : Les eaux de rivières, les eaux de lacs et les eaux de barrages [4].

## **I.2.3 Composition de l'eau :**

### **I.2.3.1 Matières minérales :**

Ce sont essentiellement des composés ioniques (anions et cations) qui proviennent de la dissolution des roches dans l'eau qui circule à leur contact. Celles-ci sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau I.2 : Les principaux éléments présents dans l'eau [7].**

Cations	Anions
Calcium $\text{Ca}^{++}$	Sulfates $\text{SO}_4^{--}$
Magnésium $\text{Mg}^{++}$	Nitrates $\text{NO}_3^-$
Sodium $\text{Na}^+$	Nitrites $\text{NO}_2^-$
Potassium $\text{K}^+$	Chlorures $\text{Cl}^-$
Ammonium $\text{NH}_4^+$	Bicarbonate $\text{HCO}_3^-$

**1.2.3.2 Matières organiques :****- Matières organiques dissoutes :**

La plupart du carbone organique dans l'eau est sous la forme de matière organique dissoute et principalement de molécules à faible poids moléculaire et d'origines diverses. La concentration des matières organiques dissoutes et particulaires dépend de type d'eau et sa profondeur : L'eau de mer surfacique a une concentration plus élevée que l'eau en profondeur.

Le carbone organique dissous est un facteur important dans le cycle du carbone et la chaîne alimentaire. Il influence la pénétration de la lumière [8].

**- Matières organiques particulaires :**

Ce sont les matières en suspension et en émulsion, elles peuvent être classifiées selon leur taille. Les plus petites particules (moins de 1  $\mu\text{m}$  jusqu'à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ) se composent de bactéries et d'autres débris organiques fins. La gamme de taille allant de quelques dizaines à quelques centaines de  $\mu\text{m}$  comporte des grands débris et des produits de l'agrégation biologique [8].

**1.2.4 Propriétés de l'eau :****1.2.4.1 Propriétés organoleptiques :**

Il s'agit de la saveur, de la couleur, de l'odeur et de la transparence de l'eau. Ils ont de signification sanitaire, mais leur dégradation peut indiquer une pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution. Ils permettent au consommateur de porter un jugement succinct sur la qualité de l'eau.

**- Couleur :**

Cette propriété optique est importante elle résulte de l'absorption sélective de certaines radiations. Elle est due à des acides humiques et aux grosses molécules contenant des cycles aromatiques ou polymathiques avec des fonctions hydroxydes ou acides [9].

**- Goût et odeur :**

La flaveur est le terme utilisé pour décrire la sensation ressentie dans la bouche lors de l'absorption de nourriture ou d'un liquide. Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustative, olfactive et sensibilité chimique commune perçue lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche. L'odeur est un paramètre subjectif, et peut être définie comme l'ensemble des sensations perçue par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles [9].

**- Turbidité :**

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence des matières colloïdales d'origine organique ou minérale [9].

**I.2.4.2 Propriétés physico-chimiques :**

**- Conductivité électrique :**

La conductivité électrique est définie comme la puissance à transmettre un courant électrique. Plus la charge en ions dissous est importante, plus la conductivité est importante. Ce paramètre dépend également de la température. La conductivité d'une eau est généralement ramenée à 25°C et s'exprime en micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) [10].

### - Taux de salinité TDS :

La salinité totale d'une eau correspond à la somme des cations et des anions présents exprimée en mg/L.

### - Titre hydrotimétrique (TH) :

Le titre hydrotimétrique (TH) correspond aux sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau. La dissolution résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à

travers les formations rocheuses calcaires. La dureté se mesure en degré français (°f) avec :

$$\text{TH}(\text{°f}) = 10 \left[ \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{40,8} + \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{24,31} \right]$$

**Tableau I.3 :** Caractère des eaux selon le TH.

La dureté (°f)	Le caractère de l'eau
0	Eaux douces
1 à 7	Eaux faiblement dures
8 à 15	Eaux moyennement dures
15 à 35	Eaux dures
≥ 35	Eaux très dures

### - Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC) :

Ils expriment la teneur en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) qui traduisent directement l'alcalinité d'une eau. Cette alcalinité se décompose en deux parties :

- **Le titre alcalimétrique simple (TA) :** C'est la teneur en ions hydroxyde et en ions carbonates [11].
- **Le titre alcalimétrique complet (TAC) :** Définit les teneurs en ions hydroxyde, carbonates et bicarbonates [11].

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

### - Chlorure $\text{Cl}^-$ :

Les teneurs en chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur en chlorures. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé.

#### - Le potentiel d'hydrogène pH :

Le pH détermine la concentration des ions d'hydrogène présent dans une solution [12]. Le pH est aussi un facteur déterminant, il entre dans le calcul de l'indice de RYZNAR ( $I_R$ ) qui reste la meilleure approche pour déterminer le caractère d'une eau, qui est déterminée par la relation suivante :

$$I_R = 2\text{pH}_S - \text{pH}_{\text{réel}}$$

Où :

$\text{pH}_S$  est le pH théorique de saturation.

$\text{pH}_{\text{réel}}$  est mesurer à la température considérée.

**Tableau I.4 :** Caractère de l'eau selon le  $I_R$ .

Les valeurs de l'indice de RYZNAR	Le caractère de l'eau
$I_R < 3.7$	Très entartant
$6.4 < I_R < 6.65$	Légèrement entartant
$I_R = 6.65$	A l'équilibre
$6.65 < I_R < 6.9$	Légèrement corrosif
$6.9 < I_R < 8.7$	Moyennement corrosif
$I_R > 8.7$	Très corrosif

#### - Les matières en suspension MES :

Ce sont des particules solides très fines et généralement visible à l'œil nu théoriquement, elles ne sont ni solubilisées, ni à l'état colloïdale. Elles déterminent la turbidité de l'eau.

#### 1.2.5 Polluant des eaux :

La pollution de la ressource en eau se caractérise par la présence des micro-organismes, des substances chimiques ou encore des déchets industriels. Cette pollution peut avoir des origines diverses :

- **La pollution industrielle** : Avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB rejetés par les industries.
- **La pollution agricole** : Avec les déjections animales et les produits pesticides qui pénètrent dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.
  
- **La pollution domestique** : Avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles des vidanges, ...
- **La pollution accidentelle** : Avec le déversement accidentel des produits toxiques dans le milieu naturel [13].

#### **Conclusion :**

Le complexe SIDER EL-HADJAR est un pôle économique important en Algérie.

La continuité de la production de l'usine nécessite toujours l'utilisation abondante d'eau, l'unité principale pour le bon fonctionnement des installations de l'usine est la zone EST de la division des fluides, car elle traite une importante quantité d'eau brute et industrielle pour l'obtention d'une eau déminéralisée qui alimente les chaudières et assure la production.

**Partie II :**  
**Etude Expérimentale**

## II.1 Traitement des eaux de chaudières :

L'eau que nous rejetons dans la nature n'est pas propre à la consommation humaine ou industrielle, car elle est polluée, par des matières en suspension et des déchets...La présence de ces éléments intrus de différentes natures nécessite un traitement des eaux avant l'utilisation. Dans cette partie on trouve les chaînes de traitement permettant d'obtenir, à partir d'eau brute, une eau déminéralisée de qualité optimale pour alimenter les chaudières.

### II.1.1 Prétraitement :

L'eau qui alimente le complexe de SIDER est extraite au niveau du barrage de BOUNAMOUSA jusqu'à la station de pompage de Sidi Ammar avec une pression de 2 à 6 bars et sa pression est régulée manuellement dans la salle de pompage EBS. D'abord, cette eau est stockée dans un bassin (brise charge) puis, est prétraitée par : Le dégrillage, le dessablage et le déshuilage. Pour éliminer les gros déchets solides et les matières insolubles.

#### II.1.1.1 Dégrillage :

Le dégrillage est une opération indispensable, permettant d'éliminer les corps flottant et les gros déchets qui ne peuvent pas être éliminés par un traitement physico chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Pour ce faire les eaux passent à travers une grille qui retient les gros déchets flottants (bois, plastiques, papiers...).

**Tableau II.5 :** Différents types de dégrillage [14].

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Dégrillage fin	< 10 mm
Dégrillage moyen	10 -30 mm
Pré -dégrillage	30 -100 mm

#### II.1.1.2 Dessablage :

Il consiste à l'élimination des sables présent dans les eaux brute, c'est une opération indispensable pour :

- Eviter les dépôts dans les amenées et installations.
- Protéger les pompes et les autres organes mécaniques contre l'abrasion.

- Eviter de perturber les autres stades de traitement [15].

### **II.1.1.3 Déshuilage et dégraissage :**

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide [16]. C'est généralement le principe de la flottation qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface. Leur élimination se fait ensuite par raclage de la surface.

### **II.1.2 Traitement physico-chimique :**

#### **II.1.2.1 Coagulation- Floculation- Décantation :**

Après le prétraitement, une charge polluante dissoutes et de MES restent dans l'eau alors le traitement physico-chimique permet aux matières en suspension de se déposer par simple gravité sous forme de boues dans un décanteur primaire. Il est possible aussi d'ajouter des produits chimiques coagulants floculants ( $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  ...).

##### **- La coagulation :**

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique appelé coagulant comme le sulfate d'alumine, sulfate de fer, aluminat de soude, la chaux, chlorure ferrique. Elle est utilisée pour agglomérer les particules de très petites tailles. L'ajout de ces coagulants permettent l'accroissement de la taille de MES et une décantation plus rapide, déstabilisation des suspensions colloïdales, réduire la turbidité. Ce procédé permet aussi d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements ultérieurs (décantation et/ou filtration) [17].

Afin de déterminer le type de coagulant et la dose nécessaire pour éliminer les particules et ajuster le pH, il faut utiliser le jar test.

##### **- La floculation :**

La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de contact entre les particules colloïdale instables. Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres, pour former des micros floccs puis des floccs plus volumineux et d'écartables.

Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers [18].

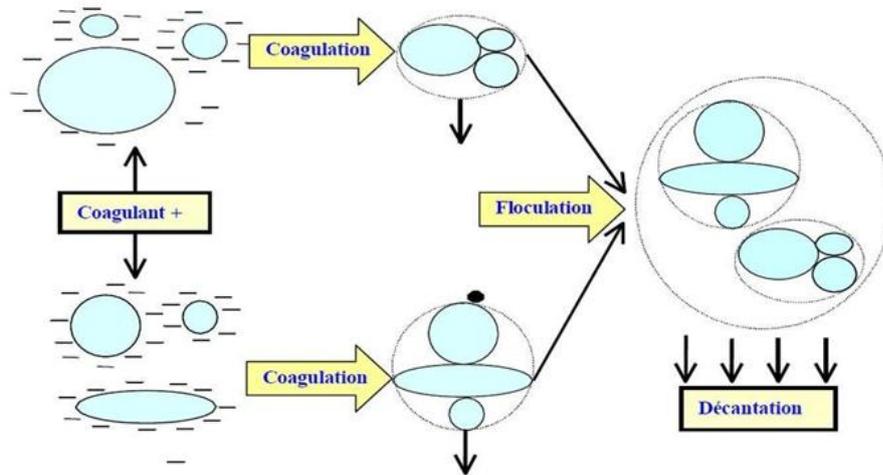


Figure II.5 : Coagulation-floculation.

#### - La décantation :

La décantation est la méthode de séparation gravitaire la plus fréquente de MES et colloïdes (rassemblés sous forme de floc). Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la pesanteur. Cette séparation est induite par réduction de la vitesse horizontale qui doit être inférieure à la vitesse verticale pour favoriser la sédimentation des particules. Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement.

L'eau récoltée en surface est dite décantée [19]. C'est un procédé qu'on utilise dans toutes les usines d'épuration et les traitements des eaux. En utilisant soit un décanteur cylindrique ou un décanteur conique.



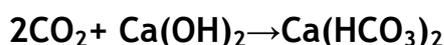
Figure II.6 : Décanteur.

### II.1.2.2 Décarbonatation à la chaux :

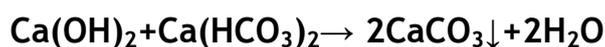
La décarbonatation à la chaux est un traitement de précipitation qui a pour effet de réduire la dureté temporaire d'une eau qui est due à la présence des bicarbonates de calcium  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  et de magnésium  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  [20].

La chaux employée sous forme de lait de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  précipite les bicarbonates de calcium et de magnésium sous forme de cristaux (petits grains fins). Les réactions de décarbonatation sont les suivantes :

En premier temps, l'eau contient du  $\text{CO}_2$ , celui-ci réagit le premier sur la chaux pour former de l'hydrogencarbonate de calcium :



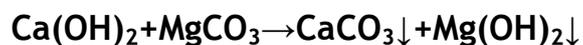
Par conséquent, une augmentation du TAC et de  $T_{\text{Ca}^{++}}$  favorise la précipitation du  $\text{CaCO}_3$ , selon la réaction :



Si  $T_{\text{Ca}^{++}} < \text{TAC}$  on a ensuite la réaction suivante :



Excès de chaux conduira à la réaction :



Il suffit de retirer les petits grains contenus dans l'eau pour avoir une eau partiellement épurée.



Figure II.7 : Machine pour produire le lait de chaux.

### II.1.2.3 Filtration sur sable :

La filtration sur sable est nécessaire pour éliminer les agglomérats produits lors de la coagulation. Une filtration à sable bicouche est suffisante. Donc l'eau qui déborde du décanteur se dirige vers des bassins, où toute au fond se trouve des filtres et au-dessus il y'a du sable, c'est là où se passe la filtration de l'eau pour obtenir une eau industrielle [21].

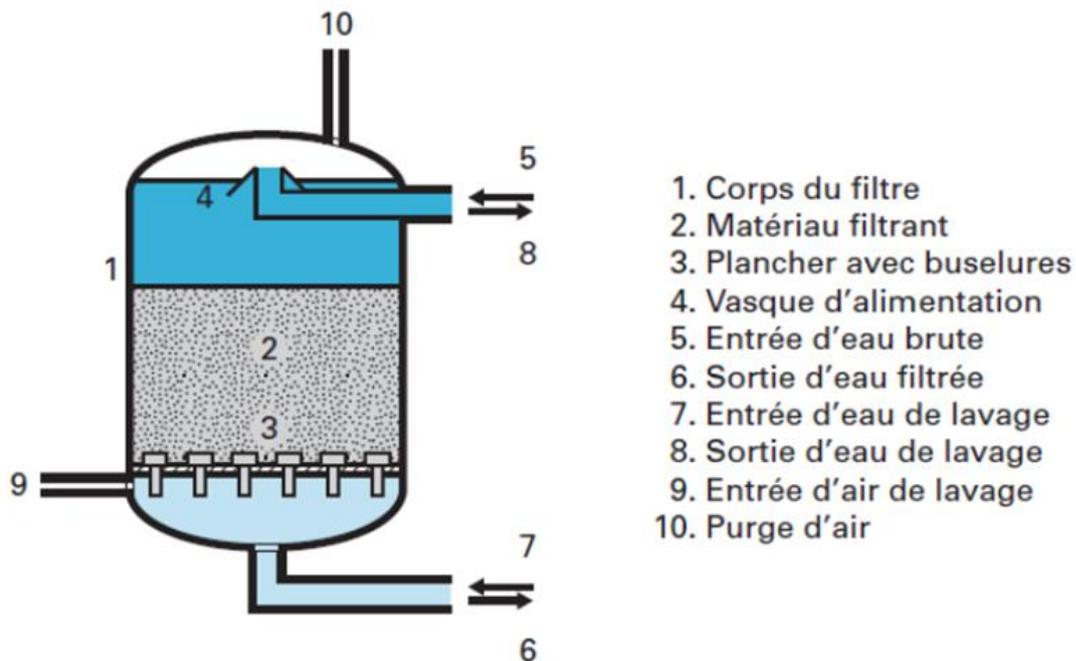


Figure II.8 : Schéma descriptif d'un filtre à sable.

On peut résumer tous les procédés susmentionnés du traitement physico-chimique dans le schéma suivant :

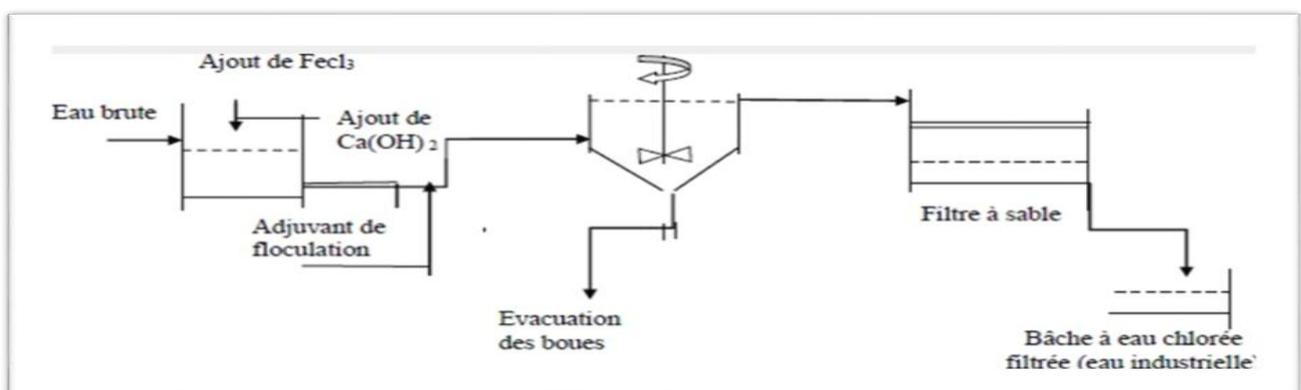


Figure II.9 : Schéma de principe de la production de l'eau industrielle au niveau de la zone EST.

Tableau II.6 : Qualité de l'eau industrielle demandée.

Paramètre	Unité	MIN	MAX
TA	°f	1	2
TAC	°f	2,5	6
Ca <sup>++</sup>	°f	6	8
Mg <sup>++</sup>	°f	1	3
TH	°f	9	11
Cl <sup>-</sup>	mg/L	35	60
TDS	mg/L	300	400
MES	mg/L	/	10
pH	/	8,5	9,5
Température	°C	10	26
Conductivité	µS /cm	300	400

### II.1.3 Adoucissement de l'eau :

Les minéraux que l'eau dissout lors de son passage dans le sol sont sous forme d'ions. Les ions sont des particules électriquement chargées. Les uns sont négatifs, issus des acides, ce sont les anions (ex : Chlorures Cl<sup>-</sup>, bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sulfates SO<sub>4</sub><sup>-</sup>). Les autres, issus des métaux, sont positifs, ce sont les cations (ex : Calcium Ca<sup>++</sup>, magnésium Mg<sup>++</sup>, sodium Na<sup>+</sup>). Les échangeurs d'ions sont des composés capables de fixer certains ions et d'en céder d'autres dont ils sont chargés. Dans les adoucisseurs d'eau, on utilise une résine de synthèse porteuse d'ions sodium. Cette résine se présente sous forme de billes poreuses de 0,2 à 3 mm de diamètre, de densité réelle légèrement supérieure à celle de l'eau. Lorsque cette résine est mise en contact avec de l'eau dure contenant des ions de calcium et de magnésium, ces derniers sont attirés par la résine. Ils se fixent sur la résine en prenant la place des ions sodium qui y étaient à l'origine. Ces ions sodium sont libérés dans l'eau en lieu et place des ions de calcium et de magnésium. L'eau qui a ainsi percolé de haut en bas sur un lit de résine va céder tous les ions calcium et magnésium qu'elle contenait sa dureté tend donc vers zéro. Lorsque la résine a cédé tous les ions sodium dont elle était chargée, l'échange d'ions ne peut plus se faire la

résine est dite « saturée », les ions de calcium et de magnésium ne sont plus fixés, Il est possible de chasser les

ions de calcium de la résine et de les remplacer par des ions sodiques, c'est à dire de redonner à la résine sa forme d'origine. Cette opération est appelée « régénération ». Pour « régénérer » une résine saturée, il suffit de la mettre en contact avec une solution très riche en ions de sodium. Dans la pratique, on utilise une solution concentrée de chlorure de sodium, appelée « saumure », obtenue par dissolution dans de l'eau de sel raffiné commercialisée sous forme de pastilles ou de granulés [22].

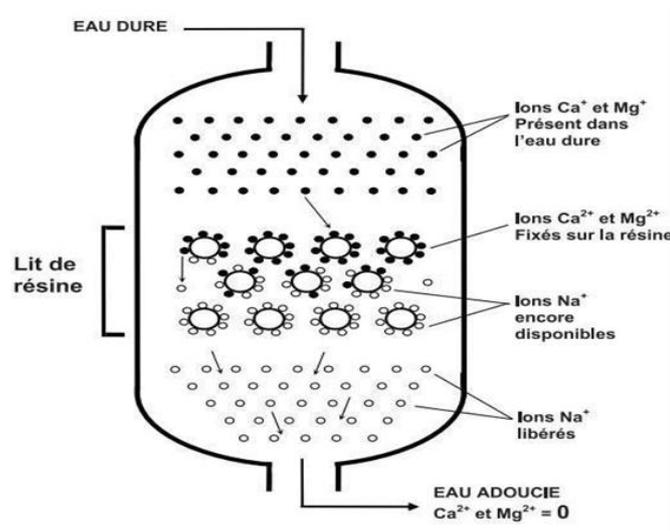


Figure II.10 : Principe de l'adoucissement de l'eau.

#### II.1.4 Filtration par membrane :

La membrane est définie comme une couche mince semi-perméable qui joue le rôle d'une barrière sélective, sous l'effet d'une force motrice, elle permet l'arrêt ou le passage de substances dissoutes [23].

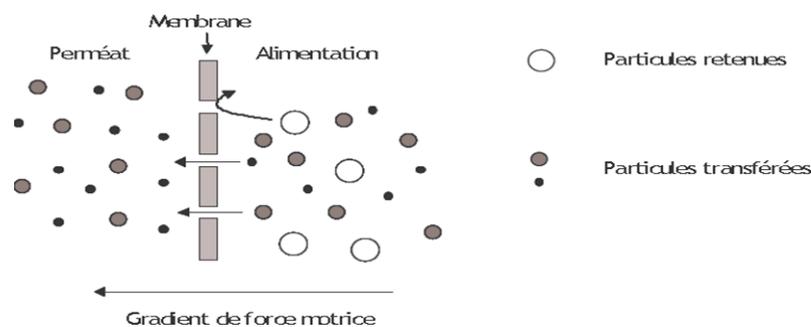


Figure II.11: Schéma du mécanisme de filtration sur membrane.

Le résultat d'une opération de filtration membranaire est la séparation du fluide à traiter en deux parties de concentrations différentes :

- Le retentât qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.
- Le perméat qui contient les molécules qui traversent la membrane.

Les procédés de séparation membranaire regroupent un grand nombre de techniques permettant de réaliser des séparations en phase liquide sous l'action de diverses forces de transfert.

#### II.1.4.1 Grandeurs principales et loi de filtration :

Quels que soient le mode de filtration et la mise en œuvre des membranes en différents modules, les principaux paramètres utilisés dans les modèles de filtration, ainsi que dans la pratique pour le dimensionnement et l'exploitation, sont : La pression transmembranaire ( $\Delta P$  ou PTM), le flux de perméation ( $J$ , par exemple en  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) et le taux de conversion ( $Y$ , sans unité).

La loi de filtration de base, régissant le transfert à travers une membrane poreuse, découle de l'expression de DARCY, comme dans le cas d'un matériau granulaire, mais avec des symboles différents [23].

$$J = A^* \cdot \Delta P = \Delta P \cdot A / \eta_l$$

$J$  : flux de perméation (en  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{S})$ ).

$A$  : perméabilité de la membrane à une température donnée ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ).

$A^*$  : perméabilité standard de la membrane (par exemple en  $\text{L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar})$ ).

$\eta_l$  : viscosité dynamique de l'eau (Pa. S, ou poiseuilles).

$\Delta P$  : pression transmembranaire (Pa).

#### II.1.4.2 Nature chimique des membranes :

Les membranes utilisées dans les procédés de filtration peuvent être classés selon leurs natures chimiques en différents types :

- **Les membranes organiques :**

Sont fabriquées à base de polymères telles que le polyamide, le polysulfone, le polyethersulfone. Ils sont les plus utilisées malgré leurs résistances thermiques et

chimiques relativement limitées car elles sont nettement moins chères que les membranes minérales [24].

- **Les membranes inorganiques (minérales) :**

Sont constituées d'un support macroporeux à base d'alumine ou de carbone sur lequel sont déposées un nombre variable de couches d'oxydes minéraux (bioxyde titanique :  $TiO_2$ ...). Le rôle de ces couches filtrantes de faible épaisseur est d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté, alors que le support assure la résistance mécanique. Ces membranes peuvent travailler dans des conditions plus sévères que les membranes organiques grâce à leur résistance mécanique, chimique et thermique (jusqu'à  $P= 40$  bar,  $T= 120^\circ C$  et  $pH= 1-14$ ) [24].

- **Les membranes composites :**

Elles sont créées à partir des deux types précédents. Il s'agit de membranes minérales sur lesquelles on dépose des polymères ou sur lesquelles on greffe d'autres composés tels que des silanes. Elles possèdent donc des propriétés qui sont un compromis entre les membranes organiques et inorganiques [24].

- **Les membranes échangeuses d'ions :**

Ce sont des membranes organiques denses échangeuses d'ions et composées de matériaux analogues à ceux des résines échangeuses d'ions : Polymères organiques, conducteurs ioniques (membranes cationiques - membranes anioniques) [24].

### II.1.4.3 Structures des membranes :

- **Les membranes symétriques et asymétriques :**

- **Les membranes symétriques (isotropiques) :** Leur structure est homogène sur toute l'épaisseur de la membrane.
- **Les membranes asymétriques (anisotropiques) :** Ont une structure hétérogène, qui varie principalement d'une couche à l'autre. Ces couches sont soit constituées d'un même matériau avec des porosités graduellement variantes suivant l'épaisseur, ou de différents matériaux. Et généralement une membrane asymétrique renferme une couche support macroporeuse résistante et une couche active (propriété de rétention), entre elles s'insèrent une ou plusieurs couches intermédiaires [25].

## - Les membranes poreuses et denses :

- **La structure poreuse** : Résulte par les interstices entre les constituants solides d'une membrane, elle est présentée par les espaces entre les chaînes de polymère pour les membranes organiques, et par les espaces intergranulaires pour les membranes inorganiques.

Selon la taille des pores on distingue trois catégories :

- **Micropores** : De diamètres inférieurs à 2 nm.
- **Mésopores** : De diamètres compris entre 2 et 50 nm.
- **Macropores** : De diamètre supérieur à 50 nm.

La porosité d'une membrane définie comme le rapport entre le volume des espaces vides sur le volume total de la matrice.

- **La structure dense** : Dont la taille des interstices formés entre les constituants de la matrice membranaires [24].

### II.1.4.4 Mise en œuvre des membranes :

Il existe deux types de mise en œuvre des membranes : L'écoulement frontal et l'écoulement tangentiel.

- **Écoulement frontal** :

Ce mode de filtration consiste à amener la solution à filtrer perpendiculairement à la membrane (Figure II .12). Les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux [26].

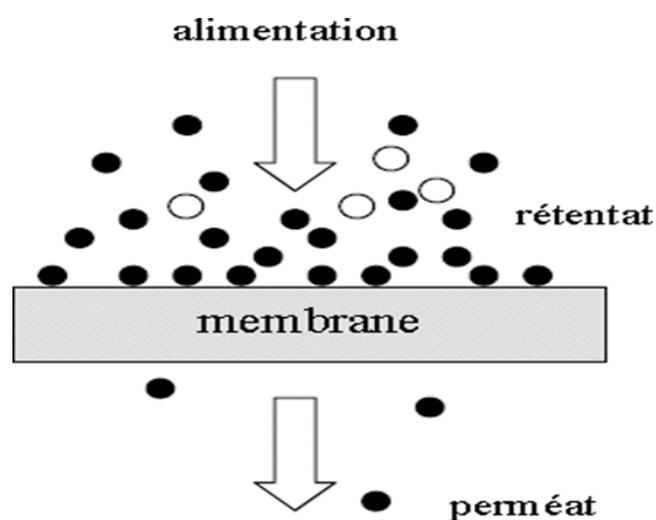


Figure II.12: Schéma d'un écoulement frontal.

### - Ecoulement tangentiel :

Dans ce cas, la solution à filtrer circule parallèlement à la membrane (Figure II.13). Le fonctionnement du système de filtration s'effectue en continu : L'accumulation des

espèces retenues à la surface de la membrane [26].

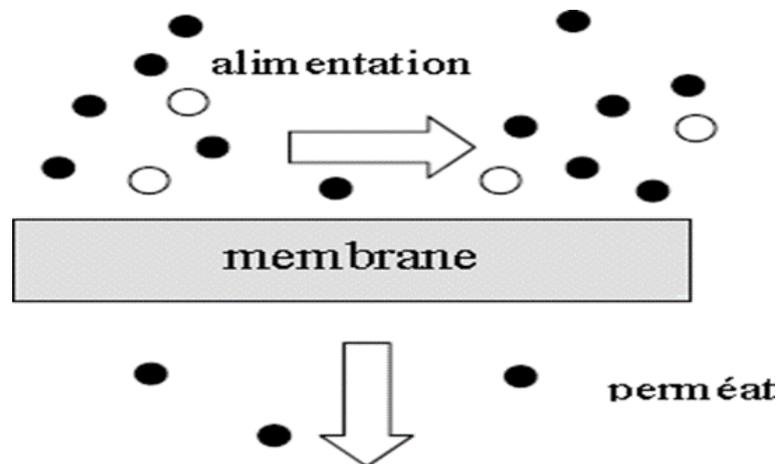


Figure II.13 : Schéma d'un écoulement tangentiel.

#### II.1.4.5 Configuration des modules :

Pour être mise en œuvre, les membranes doivent être montés dans des supports appelés modules qui peuvent être de différentes géométries :

##### - Module plan ou filtre-presse :

Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres et sont séparées par des grilles ou support [27].

##### - Module particulier :

C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux collecteur de perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du retentât [27].

##### - Modules tubulaires :

Ils sont constitués d'une ou plusieurs membranes inorganiques ou organiques de forme tubulaire, ayant des diamètres internes entre 4 et 25 mm. Plusieurs tubes individuels peuvent être placés dans un module. Le module multicanaux (monolithes) fait d'assemblage de tubes parallèles dans une même matrice représente la forme optimisée actuelle [27].

### - Modules fibres creuses :

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm. Les faisceaux obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne externe) ou à l'extérieur (externe- interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse [27].

### II.1.4.6 Séparation membranaire :

La filtration sur membrane est considérée ces dernières années comme une technique d'avenir, très utilisée dans le domaine du traitement de l'eau, à cause du fait qu'elle fonctionne sans ajout de produits chimiques. L'application d'une différence de pression provoque le transfert du solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés. Les différents procédés de séparations sont classés selon une taille des pores décroissantes, on peut citer :

La microfiltration, l'ultrafiltration, la nano filtration et l'osmose inverse mettent en jeu des membranes possédant une structure poreuse tandis que les membranes d'osmose inverse sont des matériaux denses [28].

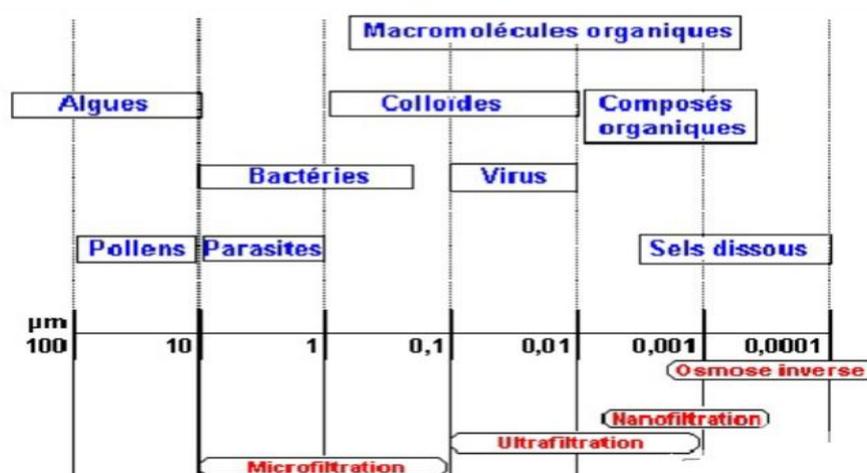


Figure II.14 : Classification des procédés membranaires.

#### **II.1.4.7 Ultrafiltration :**

##### **1) Définition :**

Les membranes d'UF sont des membranes microporeuses dont les diamètres des pores sont compris entre 0,1 et 0,01  $\mu\text{m}$ . Ces membranes laissent passer les petites molécules (eau et sels) et arrêtent les molécules de masse molaire plus élevée (polymères et colloïdes).

##### **2) Description de l'unité de l'ultrafiltration :**

L'eau industrielle est amenée vers chaque voie membranaire (voie 1 et voie 2) via une vanne. La pression de filtration est généralement comprise entre 0,3 et 0,8 bar. Une lecture de débit, du pH et de température a été effectuée.

L'eau industrielle traverse la paroi des fibres creuses de l'extérieur vers l'intérieur. La structure poreuse de la membrane empêche le passage des espèces, particules, microbes, virus dont sa taille se situe entre 0,1 et 0,01  $\mu\text{m}$ . L'eau traitée est ensuite dirigée vers la

production (bâche d'eau traitée) via la vanne de production. Le débit du perméat (filtrat) est contrôlé par un débitmètre, une régulation du débit de production est ainsi effectuée en renvoyant le signal vers le variateur de fréquence de la pompe d'alimentation. La turbidité de l'eau filtrée est contrôlée à la sortie de voie 1 et 2 ainsi que TPM 1 et TPM 2.

La perméabilité des membranes varie en fonction de la pression transmembranaire PTM, le pH, le débit du filtrat, la température et de la turbidité.

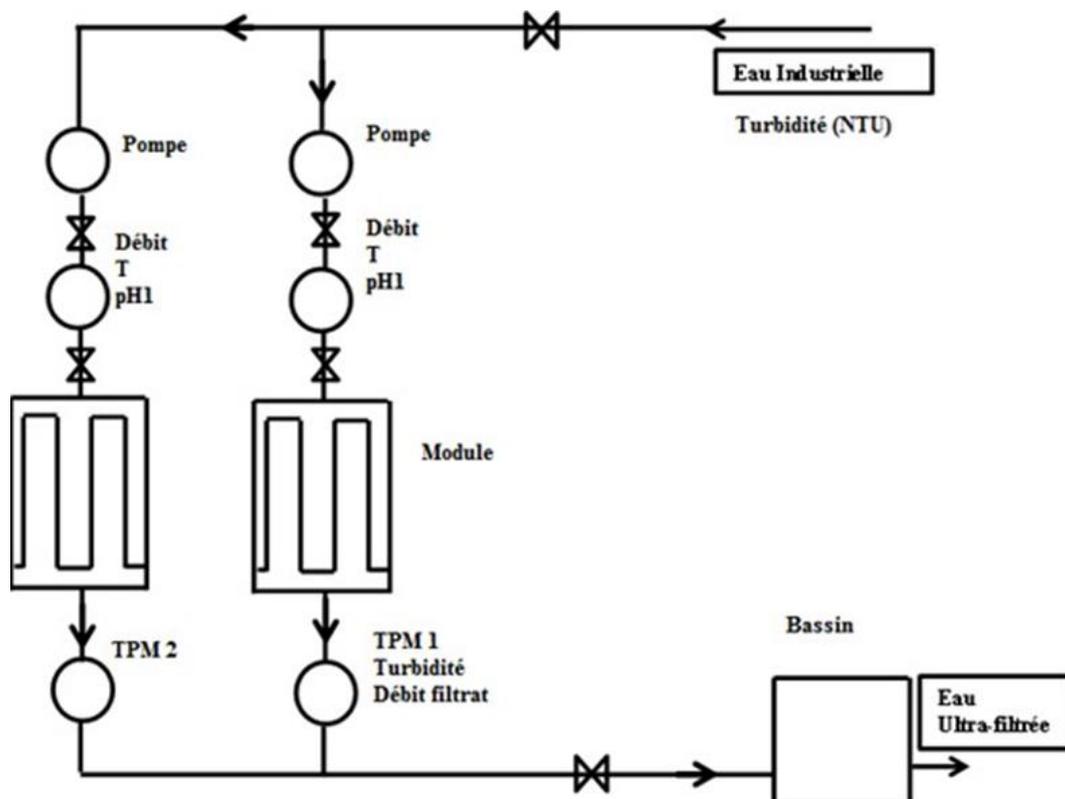


Figure II.15 : Procédé de l'ultrafiltration.

#### II.1.4.8 Osmose inverse :

##### 1) Définition et principe :

L'osmose inverse est un procédé de séparation dont les diamètres des pores sont compris entre 0,001 et 0,0001  $\mu\text{m}$ . L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Considérons un système de deux compartiments séparés par une membrane semi perméable sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le solvant (généralement l'eau) s'écoule à travers la membrane du compartiment de la solution moins concentrée vers le compartiment contenant la solution la plus concentrée, c'est le phénomène d'osmose. Si

on applique progressivement une pression sur le compartiment de la solution la plus concentrée, le flux d'eau qui traverse la membrane va diminuer, puis s'annuler quand la pression appliquée atteindra à la pression osmotique. Si on applique une pression supérieure à la pression osmotique, l'eau va traverser la membrane dans le sens inverse du flux osmotique, c'est le phénomène d'osmose inverse [30].

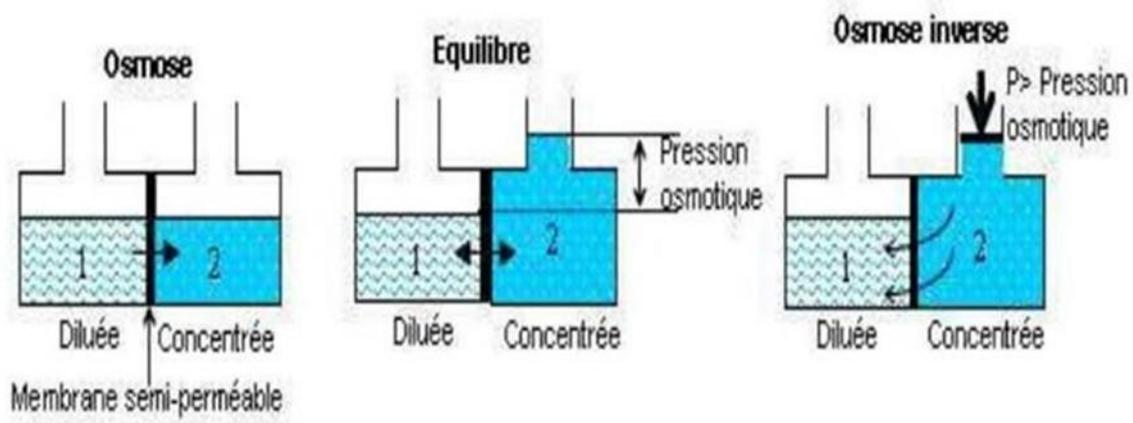


Figure II.16: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

## 2) Description de l'unité d'osmose inverse :

L'eau après ultrafiltration, est dirigée vers la cuve d'eau.

Cette bêche sera équipée d'un capteur de niveau avec deux contacts de niveaux logiques, pour les détections alarmes très haute et très basse.

L'eau UF issue de cette cuve est destinée à être dessalée. Les pompes à basse pression, permettent de transférer l'eau UF vers pompes haute pression de l'osmoseur.

Une injection de séquestrant, destinée à inhiber les diverses précipitations de sels sursaturés, comme le sulfate de calcium et le fluorure de calcium. Les séquestrant est stocké dans un bac, où il pourra être utilisé pur ou dilué. Le dosage s'opère par pompe doseuse.

L'eau filtrée conditionnée, est micro-filtrée au travers les filtres à cartouches ayant une finesse de filtration nominale de 5 micromètres. Une sortie de test plein débit est prévue en aval du filtre à cartouches afin de contrôler la qualité du prétraitement. Un mélangeur statique, placé sur la ligne permet l'homogénéisation de l'eau conditionnée. Une pompe Haute Pression, va remonter la pression à une valeur suffisamment haute

afin de permettre le passage au travers des membranes d'osmose inverse. Ces pompes sont principalement réalisées en inox.

Les pompes HP alimentent directement le premier étage de l'osmoseur, soit 4 carters de pression comprenant chacun 6 membranes d'osmose inverse.

Ce circuit alimente le second étage de l'osmoseur composé de 2 tubes de pression, chargés chacun de 5 membranes, identiques à celles installées au premier étage.

En sortie du second étage le perméat est tout comme au premier étage collecté et contrôlé par mesure la conductivité et le débit.

Les perméats de premier et second étage sont rassemblés et dirigés vers la bêche d'eau traitée. Dans cette unité la capacité de production d'eau déminéralisé est de 30 m<sup>3</sup>/h qui est envoyée aux chaudières.

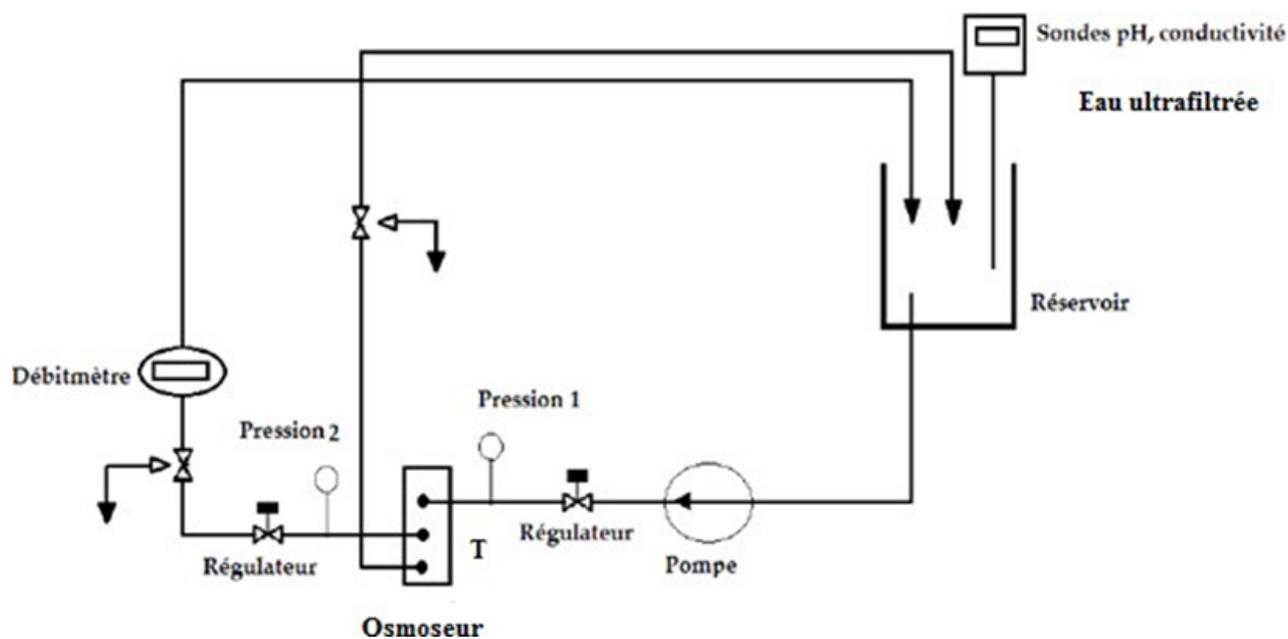


Figure II.17 : Procédé d'osmose Inverse.

Tableau II.7 : Eau osmosée à produire

Paramètres	Unité	Demander par Arcelor
Débit net	m <sup>3</sup> /h	2×35
TA	°f	0
TH	°f	3/5

TAC	°f	<3
Chlorure	/	6,5-8,3
TDS	mg/L	<8
Conductivité	µS /cm	<10
MES	mg/L	<2

### 3) Pression osmotique :

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui stipule que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en n ions, la pression osmotique sera n fois supérieure [31]. La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés :

$$\Pi = n.C.R.T$$

Avec :

$\Pi$  : Pression osmotique (bar).

n : 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 (Kelvin).

### 4) Force motrice :

La force ionique, notée I (ou FI de manière à la distinguer de l'intensité), est un des principaux facteurs influençant l'activité des ions en solution aqueuse. Elle s'exprime en mol/L<sup>-1</sup> et est calculée de la manière suivante :

$$I = 1 / 2 \sum C_i z_i^2$$

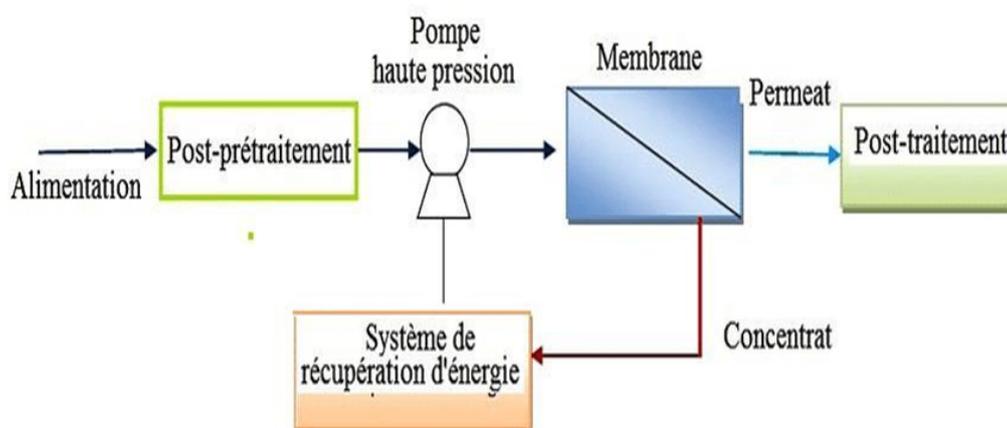
Où C<sub>i</sub> représente la concentration de l'ion i et z<sub>i</sub> sa valence.

### 5) Installation d'osmose inverse :

L'écoulement du fluide sur la membrane est continu et tangentielle. La solution à traité (débit Q<sub>0</sub>, concentration C<sub>0</sub> en soluté) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes :

- Une partie qui passe à travers la membrane ou perméat  $Q_p$ .
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane, appelée concentrât ou retentât ( $Q_c$ ) et qui contient les ions molécules ou particules retenues par la membrane.

L'objectif de l'écoulement tangentiel est d'éviter l'accumulation continue sur la membrane espèces (particules, molécules, ions) retenus par cette dernière.



**Figure II. 18:** Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.

Pour limiter la consommation d'énergie du procédé, on place sur le circuit du retentât une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression.

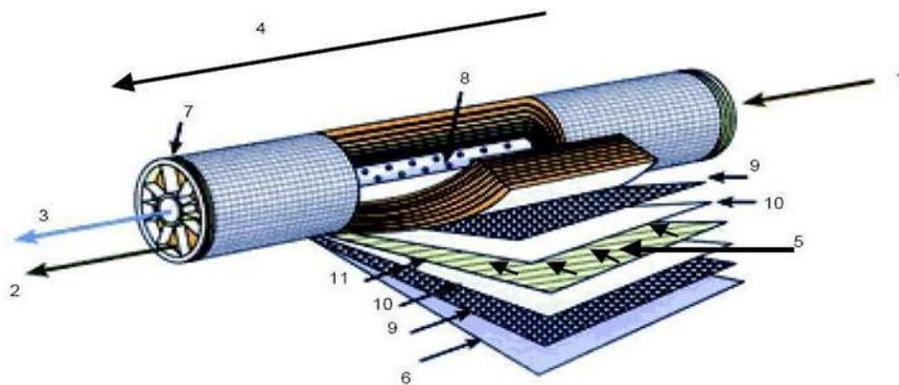
### 6) Membranes et modules d'osmose Inverse :

Les membranes d'osmose inverse utilisées dans l'unité d'OI sont de type dense fabriquées par l'entreprise FILMTEC, elles sont constituées d'une superposition de plusieurs couches de polymères (membranes composites) souvent de polyamide. Les autres matériaux constituant le support n'interviennent pas dans le procédé. La séparation des espèces dissoutes est due principalement aux propriétés chimiques du polymère de surface.

Les membranes de séparation sont insérées dans un dispositif appelé module afin d'obtenir un espace d'échange plus importante. Ces modules sont disposés selon divers arrangements forme une unité ou une vicelle. Dans chaque module spiral, les

membranes sont enroulées autour d'un tube central destiné à collecter le perméat. La solution à filtrer circule parallèlement au tube central dans les espaces ménagés entre les deux faces actives, les tubes de pression sont raccordés entre eux par des connecteurs, dont le taux de conversion est fonction du nombre de modules placés en série.

Ce montage en série est subdivisé en deux, la saumure rejetée du 1<sup>er</sup> étage est utilisée pour l'alimentation du 2<sup>ème</sup> étage. Ce mode de fonctionnement aboutit à un facteur de conversion aux environs de 0,73 [32].



**Figure II.19:** Structure interne d'une membrane.

- 1) Entrée d'eau.
- 2) Sortie de concentrât.
- 3) Sortie de perméat.
- 4) Sens d'écoulement de l'eau.
- 5) Sens d'écoulement du perméat.
- 6) Matériau de protection.
- 7) Joint d'étanchéité entre module et enveloppe.
- 8) Perforations collectant module et enveloppe.
- 9) Espaceur.
- 10) Membrane.
- 11) Collecteur de perméat.

#### 7) Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :

- Taux de conversion :

Le taux de conversion (TC) est, par définition, la fraction du débit du liquide qui traverse la membrane :

$$TC = \frac{Q_p}{Q_0}$$

Où :

$Q_p$ : débit de perméat.

$Q_c$ : débit d'alimentation.

- **Sélectivité (R) :**

La sélectivité d'une membrane est définie par le taux de rejet R (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir :

$$R = \frac{C_0 - C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0}$$

Où  $C_0$  est la concentration de l'espèce à retenir dans la solution et  $C_p$  est la concentration de la même espèce dans le perméat.

- **Flux de perméation (J) :**

La productivité du procédé est définie par le débit de perméation  $Q_p$  divisé par la surface membranaire.

$$J = Q/S$$

J: flux (m/h).

Q : débit de perméat (m<sup>3</sup>/h).

S : surface de la membrane (m<sup>2</sup>).

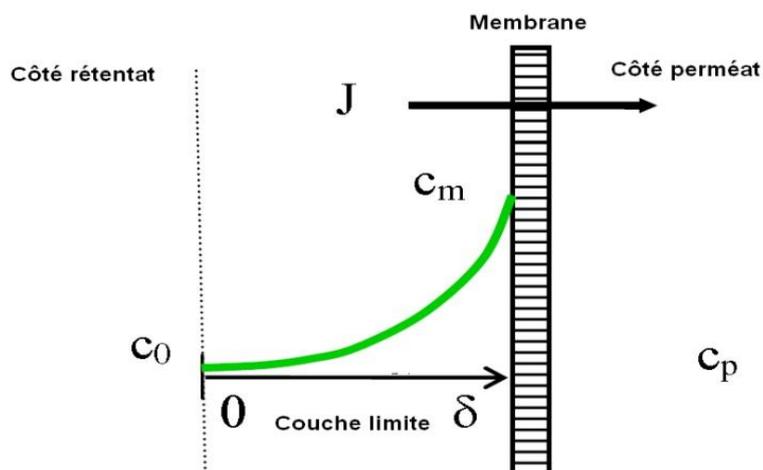
**8) Problème rencontrés en osmose inverse :**

- **Polarisation de concentration :**

La polarisation de concentration résulte de l'accumulation de la matière à l'interface sous forme solubilisée ou dispersée. La matière à l'interface est dans le même état que dans la solution mais à des concentrations bien plus importantes. Ces concentrations importantes peuvent réduire la perméabilité notamment en générant une contre-pression osmotique.

La polarisation est un phénomène réversible qui disparaît par un simple rétro lavage des membranes. Les conséquences du phénomène de polarisation sont :

- La diminution du flux de perméat.
- L'augmentation de la pression osmotique.



- L'encrassement de la membrane.

Figure II.20 : Phénomène de polarisation.

#### - Le colmatage de la membrane :

C'est l'ensemble des mécanismes qui limitent le flux de perméation à travers une membrane, il résulte de l'accumulation de macromolécules à la surface ou à l'intérieur des membranes [33].

On distingue 4 catégories de colmatage :

La précipitation des composés inorganiques sur la membrane (l'entartrage), la formation du dépôt par des particules ou des matières organiques sur la membrane, la formation du biofilm et l'excrétion in situ d'exo-polymères sur la membrane (le bio-colmatage).

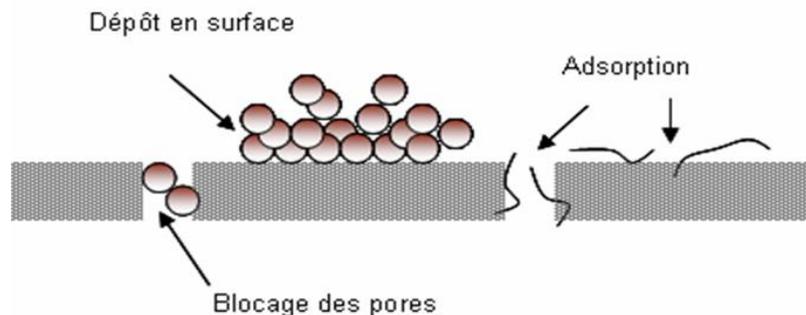


Figure II.21: Schématisation des différents mécanismes de colmatage d'une membrane.

- **Colmatage par entartrage :**

L'entartrage sur une membrane est principalement causé par : Le dépassement de la limite de solubilité des composants inorganiques, c'est-à-dire qu'il y a une sursaturation et l'augmentation rapide de la vitesse de déposition.

Des sels sursaturés vont précipiter sur la surface de la membrane et construire une couche fine qui bloque le transfert de matière à travers la membrane. L'entartrage a toujours lieu à la surface de la membrane car la concentration des sels est importante près de la membrane. Les dépôts de tartre contiennent du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), du sulfate de Calcium ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ ), de l'hydroxyde de magnésium ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) et des dépôts de silice ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{MgSiO}_3$ , ...) [34].

- **Colmatages par dépôt :**

Le colmatage par dépôt peut être de deux natures différentes qui peuvent coexister :

- **Le colmatage colloïdal :**

Des colloïdes peuvent être agglomérés et adhérer à la membrane, les plus courants sont des argiles de silicate d'aluminium ( $0,3-1 \mu\text{m}$ ) et des colloïdes de fer. Les microorganismes déposés font aussi partie de ce colmatage.

- **Le colmatage par la matière organique :**

Les matières organiques dans les eaux sont principalement des substances à des concentrations entre 0,5 à 20 mg. L<sup>-1</sup> pour l'eau saumâtre et jusqu'à 100 mg. L<sup>-1</sup> pour l'eau de mer en surface, la dégradation de la matière organique produit une matrice de macromolécules appelée acide humique [35].

• **Le bio-colmatage :**

Les eaux contiennent des microorganismes tels que des bactéries, des virus, ... Ces microorganismes excrètent des substances polymériques extracellulaires qui adhèrent à la surface de la membrane et provoquent la formation d'un biofilm. La première étape de la formation du biofilm est probablement l'adsorption des molécules organiques sur la surface de la membrane, l'étape suivante est l'adhésion des microorganismes sur la surface de la membrane et par la suite la production de polymère extracellulaire [36].

**9) Principales applications de l'osmose inverse :**

- Traitement des eaux : Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production l'eau ultra pure (industries électronique, pharmaceutique.....).
- Elimination de pesticides et d'herbicides.
- Extraction de protéines du lactosérum dans l'industrie laitière.

**10) L'avantages et l'inconvénients de l'osmose inverse :**

**- Avantages :**

- Opération à température ambiante qui évite la dégradation des molécules fragiles dans le domaine agroalimentaire.
- Pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution [37].
- Consommation énergétique faible.

**- Inconvénients :**

- Baisse de la perméabilité et modification de la sélectivité.
- Sélectivité entre les espèces chimiques « Soluté » toujours inférieure à 100%.
- Durée de vie limitée des membranes : Soit par perte de résistance mécanique, soit suite à une mauvaise tenue aux réactifs utilisé pour le nettoyage [37].

## **11) Procédure de nettoyage des membranes :**

La procédure de nettoyage est mise en place afin d'éliminer les éléments encrassant de la tuyauterie et les agents responsables du colmatage des membranes. Cette procédure est empirique et effectuée lorsqu'un ou plusieurs paramètres opératifs varient de 10 à 15% (comme la pression d'exercice, la conductivité, le débit de perméat). Il existe plusieurs types de lavage des membranes ils sont liés essentiellement au degré d'entassement de ces dernières, ainsi il est lié à la nature des précipitations et des contaminants [38].

### **II.2 Les analyses des eaux :**

L'eau du complexe sidérurgique d'El -HADJAR a une grande importance car dans les usines de production de vapeur l'eau d'alimentation de chaudières doit être suffisante pour être compatible avec tous les matériaux utilisés dans les circuits et les équipements.

Nous nous sommes intéressés à la caractérisation des eaux du complexe par une évaluation des paramètres indicateurs de l'état réel des eaux par rapport à la norme.

Au laboratoire central d'El-HADJAR ont plusieurs types d'analyses sont réalisés. Son rôle est le contrôle de la qualité des eaux sidérurgique.

#### **II.2.1 Détermination de l'alcalinité (Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet) :**

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré, mesurés par la méthode volumétrique appliquée au laboratoire central Arcelor -Mittal (SIDER).

##### **II.2.1.1 Réactifs :**

- Acide sulfurique à 0,02N.
- Phénolphtaléine à 0,5%.
- Méthylorange à 0,5%.

##### **II.2.1.2 Mode opératoire :**

- **Détermination de TA :**

- On prélève 100 ml d'eau à analyser dans un erlenmyer.

- On ajoute 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine.
- Une coloration rose doit alors se développer, dans le cas contraire le TA est nul.
- On verse ensuite lentement l'acide sulfurique dans l'erlenmeyer à l'aide d'une burette graduée, en agitant constamment jusqu'à décoloration complète de la solution. Le pH est alors de l'ordre de 8,3.
- On lit directement sur la burette.

Le TA exprimé en degré français (°f).

- **Détermination de TAC :**

On utilise l'échantillon traité précédemment, ou la prise d'essai primitif s'il n'y a pas eu de coloration.

- On ajoute deux à trois gouttes de solution de méthylorange, on verse ou on continue à verser à l'aide de la burette le même acide, en agitant constamment, jusqu'au virage du jaune au jaune orangé. Le pH est alors de l'ordre de 4,3.
- On note le volume lu à la burette au moment du nouveau virage.

### II.2.1.3 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 et exprime le TAC en °f.

Retrancher ce volume  $V_2$  de 0,5 ml correspond à la quantité d'acide il nécessaire pour le virage de l'indicateur, qui est un peu plus faible que le pH de neutralisation des bicarbonates. Par conséquent  $V_2 = 0,5$  ml exprime le TAC en °f. Pour convertir, ensuite, le TA et le TAC en milligrammes de  $\text{CaCO}_3$  au litre, on a :  $1^\circ\text{f} = 10\text{mg de CaCO}_3 / \text{L}$ .



Figure II.22 : Dosage volumétrique du TA et TAC.

## II.2.1.4 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de titre alcalimétrique TA :

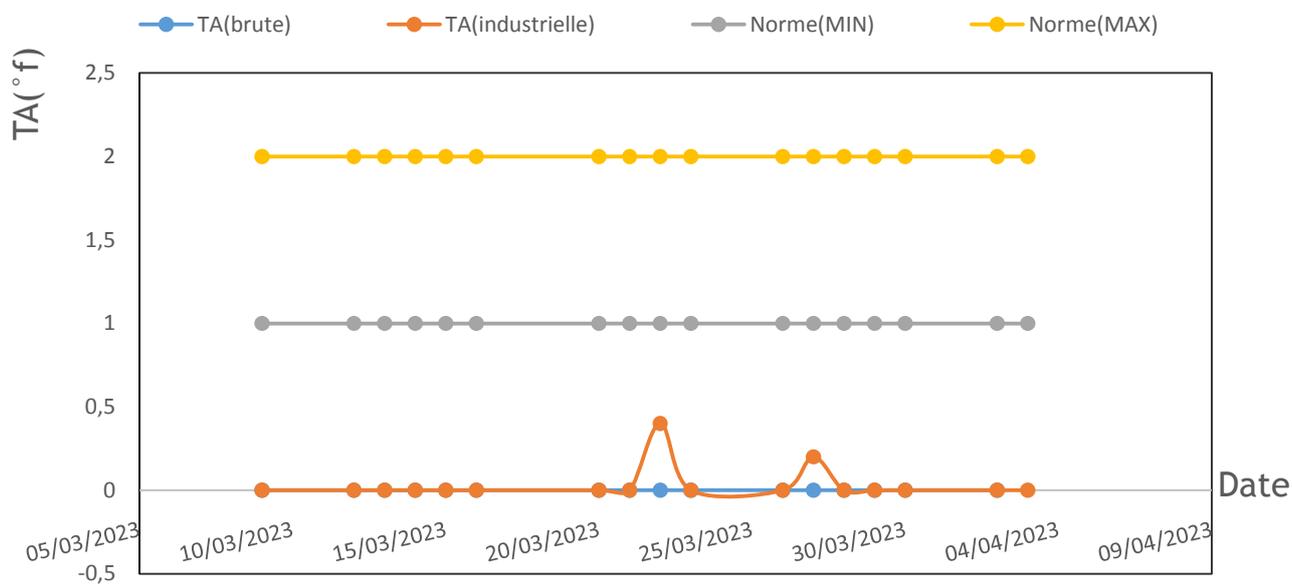
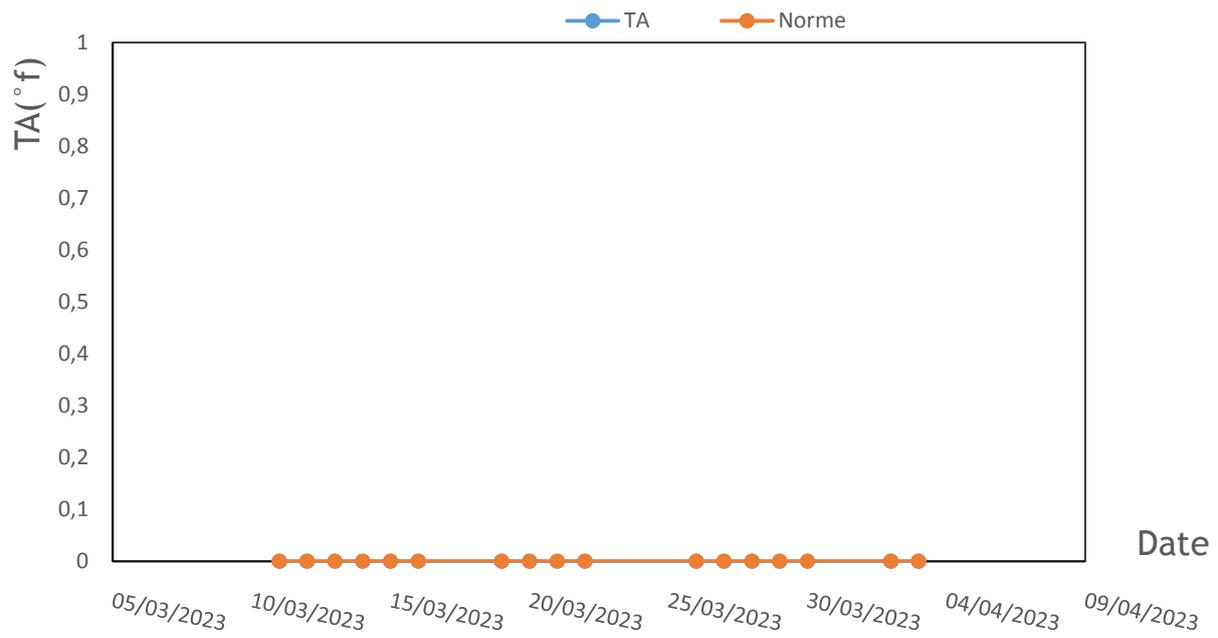


Figure II.23 : Variation de TA des eaux (brute et industrielle).



**Figure II.24:** Variation de TA de l'eau déminéralisée.

- Variation de titre alcalimétrique complet TAC :

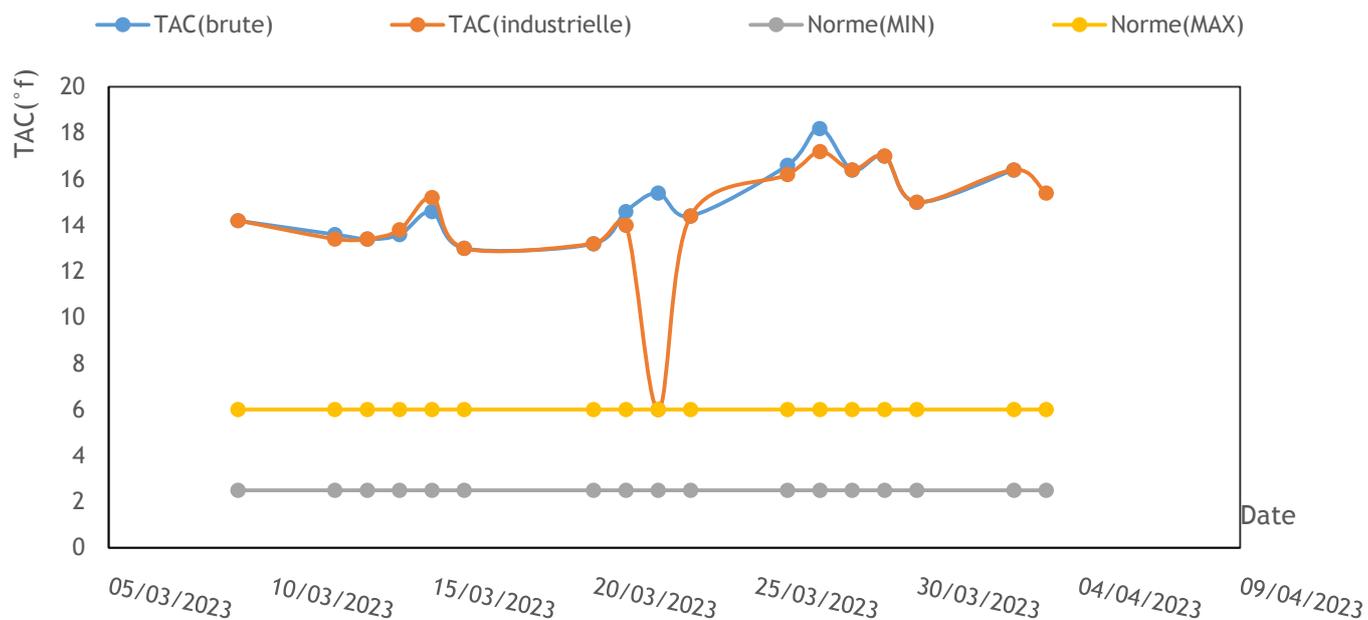


Figure II.25 : Variation de TAC des eaux (brute et industrielle).

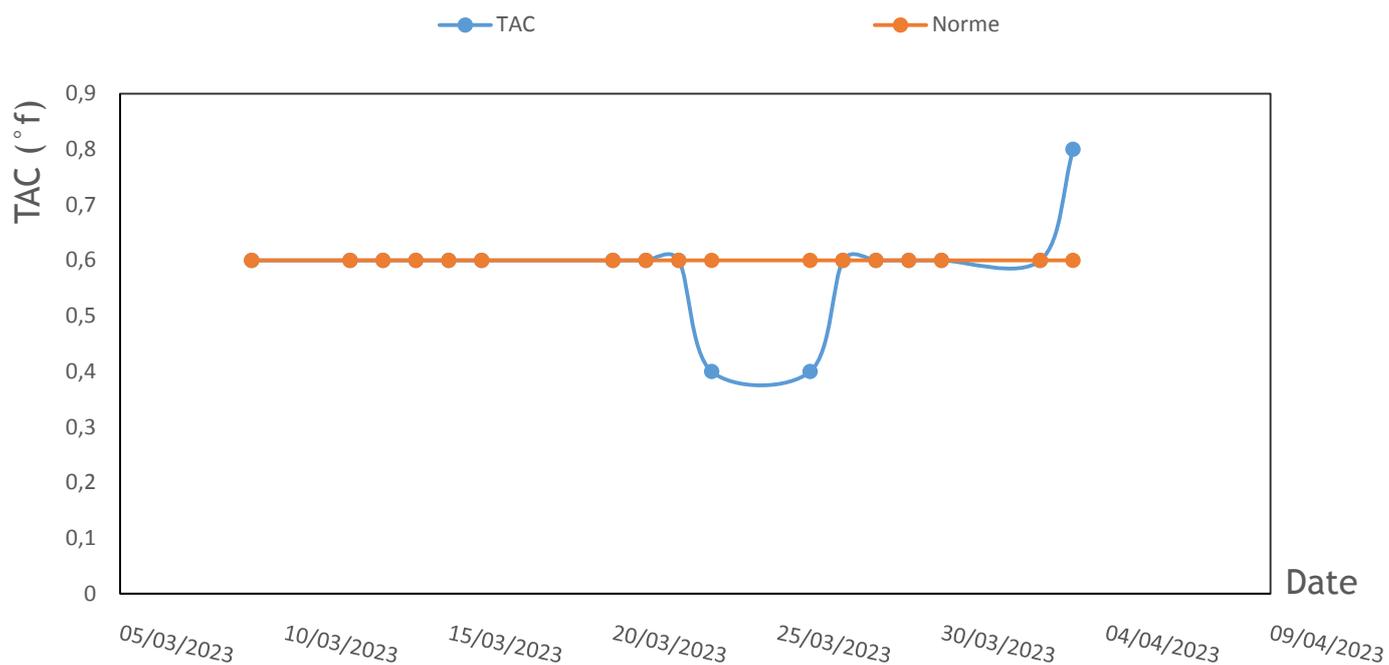


Figure II.26: Variation de TAC de l'eau déminéralisée.

D'après les figures II.23 et II.24, on constate que le TA dans les eaux (brute, industrielle et déminéralisée) est nul, du fait de concentrations non significatives d'hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) et de carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), ce qui signifie que le pH est inférieur à 8,3. Pour l'eau brute et

industrielle, les valeurs ne dépassent pas les normes (1-2°f) et aussi pour l'eau déminéralisée ne dépassent pas la norme (0°f).

Selon la figure II.25, l'augmentation des valeurs TAC des eaux brute et industrielle est due à l'augmentation de la chaux et à la présence d'espèces basiques telles que les ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ), les ions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et les ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). Ces valeurs ne correspondent pas aux normes (2,5-6°f), mais pour la figure II.26 on remarque que les valeurs ne dépassent pas la norme 0,6°f, cela indique que le pH de l'eau déminéralisée est inférieur à 8,3, ce qui signifie que notre eau ne contient pas d'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ), de bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et de carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) qui peuvent provoquer une forme libre de dioxyde de carbone agressif pour les chaudières.

### II.2.2 Détermination du titre hydrotimétrique TH :

Les alcalino-terreux présents dans l'eau ( $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$ ) sont amenés à former un complexe par le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique à pH = 10. La disparition

des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique, le noir ériochrome T. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium. La méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium.

#### II.2.2.1 Réactifs :

- Sel di sodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique : Solution à 0,01N.
- Solution indicateur noir ériochrome T.
- Solution tampon ammoniacale (pH 10).

#### II.2.2.2 Mode opératoire :

- On prélève 100ml d'eau à analyser dans un erlenmyer.
- On verse environ 2ml de la solution tampon.
- On ajoute 4 à 5 gouttes de noir ériochrome T.

- Si la coloration est bleue nous concluons une absence de calcium (Ca) et magnésium (Mg).

- Si la coloration est rose violet, nous déduisons une présence de calcium (Ca) et magnésium (Mg) dans l'échantillon étudié pour ceci, il sera nécessaire de procéder à un titrage avec l'EDTA jusqu'à l'obtention de la coloration bleue.
- On lit directement sur la burette le TH exprimé en degré français ( $^{\circ}f$ ).

### II.2.2.3 Expression des résultats :

V : Volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le TH en  $^{\circ}f$ . Pour convertir le TH en milligrammes de  $\text{CaCO}_3$  au litre, on a :  $1^{\circ}f = 10\text{mg de CaCO}_3 / \text{L}$ .



Figure II.27 : Dosage volumique du TH.

### II.2.2.4 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de titre hydrotimétrique TH :

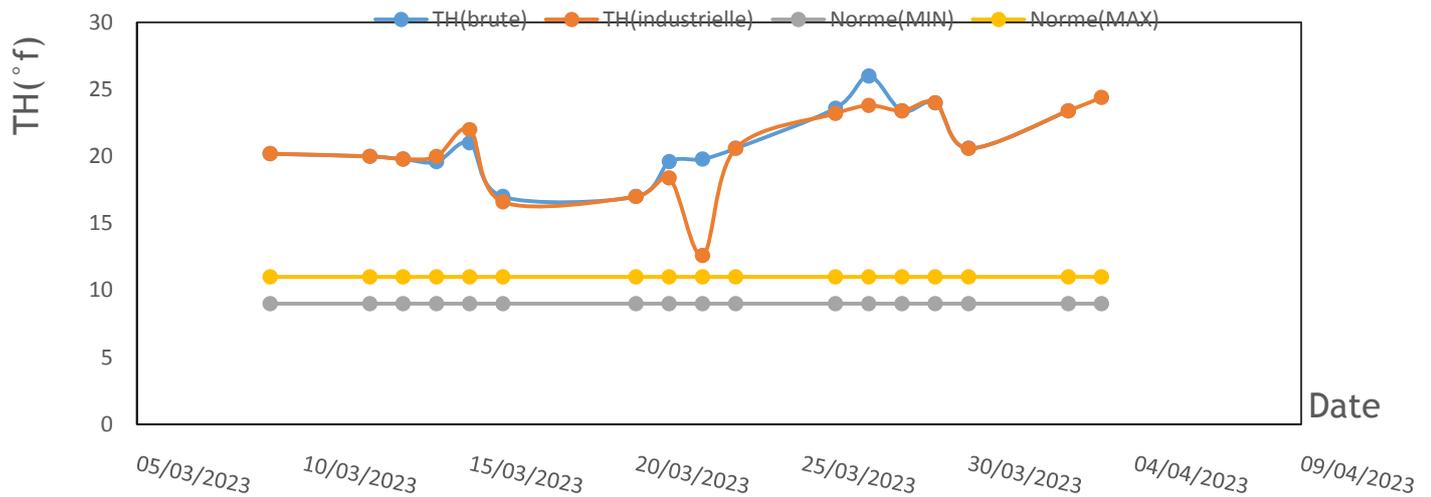


Figure II.28 : Variation de TH des eaux (brute et industrielle).

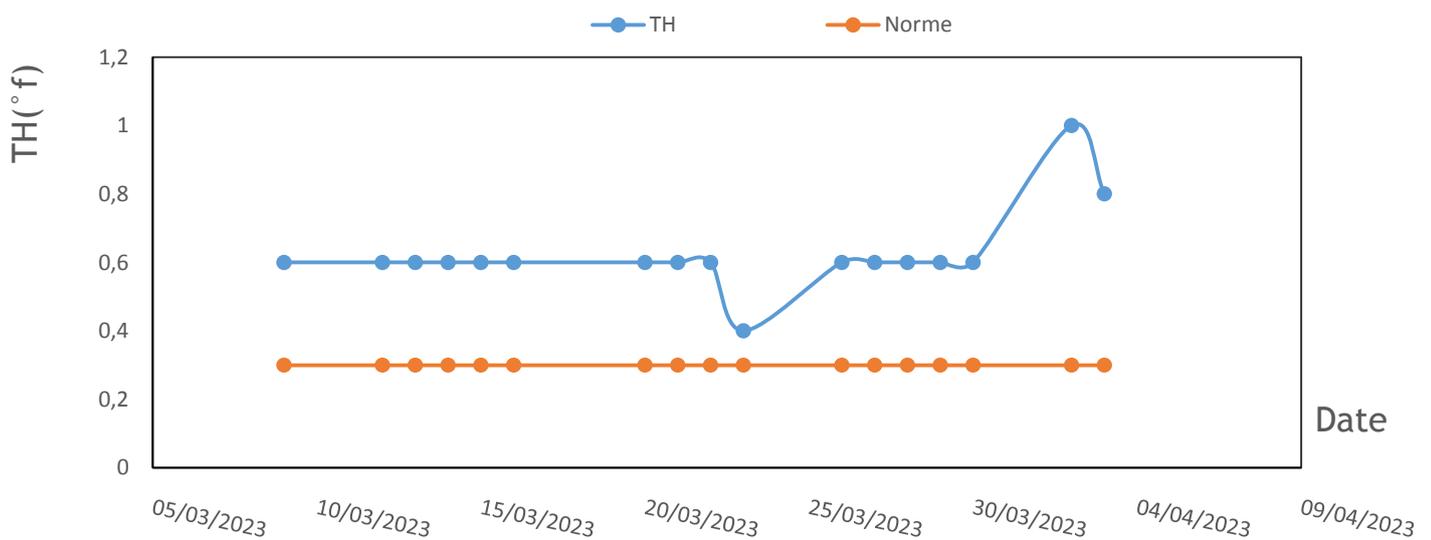


Figure II.29 : Variation de TH de l'eau déminéralisée.

Selon la figure II.28, un excès de dureté TH a été observé dans l'eau brute et industrielle tout au long de la période d'étude, et les valeurs dépassent les normes (9-11 °f), donc les

deux eaux sont dures, et d'après les résultats en figure II.29, on remarque que les valeurs de dureté sont égales à  $0,6^{\circ}f$ , donc l'eau est douce et le TH est supérieur aux normes ( $<0,3^{\circ}f$ ), ceci à cause de :

- Au mauvais fonctionnement des membranes d'ultrafiltration et des osmoseurs.
- La 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 qui conduit évidemment à la formation de tarte au niveau des tubes de la chaudière ainsi que plusieurs problèmes perturbant le fonctionnement de l'installation.

### II.2.3 Détermination du titre hydrotimétrique $T_{Ca^{++}}$ :

La détermination du  $T_{Ca}$  est basée sur la formation de complexes entre les ions calcium et le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) en présence de calconecarboxylique en milieu tamponné.

#### II.2.3.1 Réactifs :

- Hydroxyde de potassium 20% (solution tampon pH 12).
- Sel disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique : Solution à 0,01 N.
- Acide calconecarboxylique (indicateur coloré).

#### II.2.3.2 Mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 2ml de KOH et environ 0,4 g de l'indicateur.
- Si la coloration est bleue nous concluons une absence de calcium (Ca).
- Si la coloration est rose, nous déduisons une présence de calcium (Ca) dans l'échantillon étudié pour ceci, il sera nécessaire de procéder à un titrage avec l'EDTA jusqu'à l'obtention de la coloration violet.
- On lit directement sur la burette le  $T_{Ca^{++}}$  exprimé en degré français ( $^{\circ}f$ ).

#### II.2.3.3 Expression des résultats :

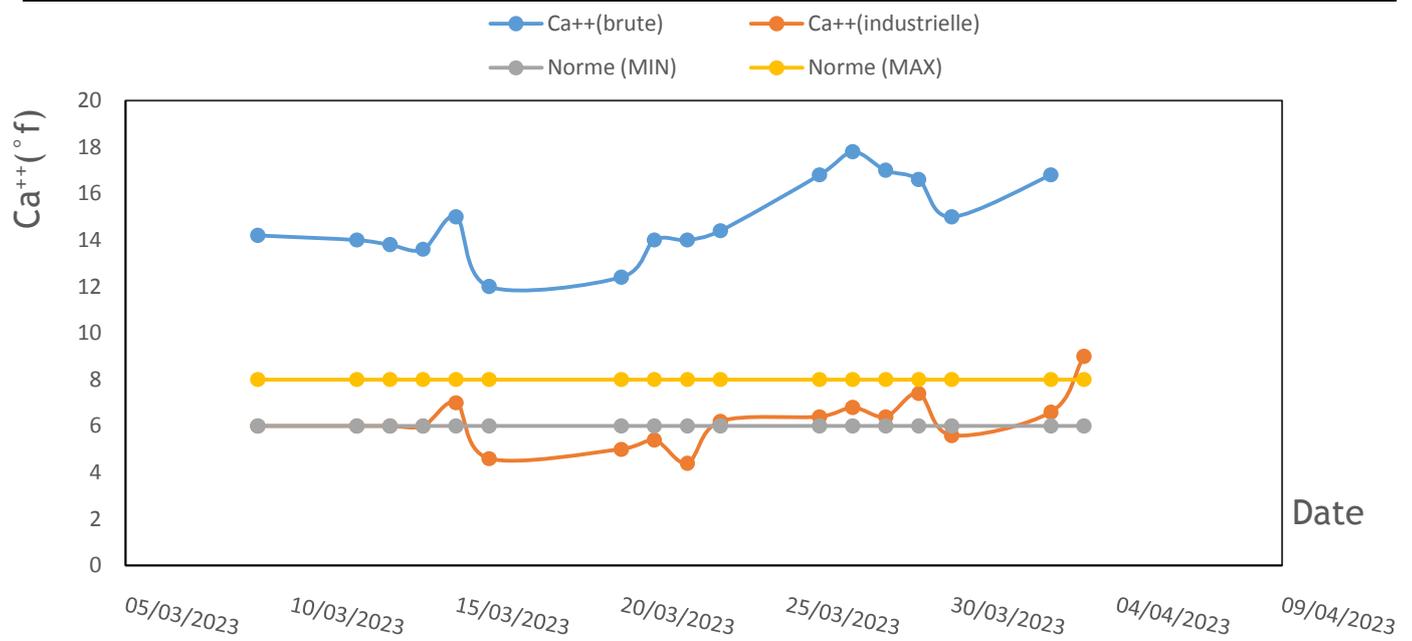
V : volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le  $T_{Ca^{++}}$  en  $^{\circ}f$ . Pour convertir le TH en milligrammes de  $CaCO_3$  au litre, on a :  $1^{\circ}f = 10mg$  de  $CaCO_3$  /L.



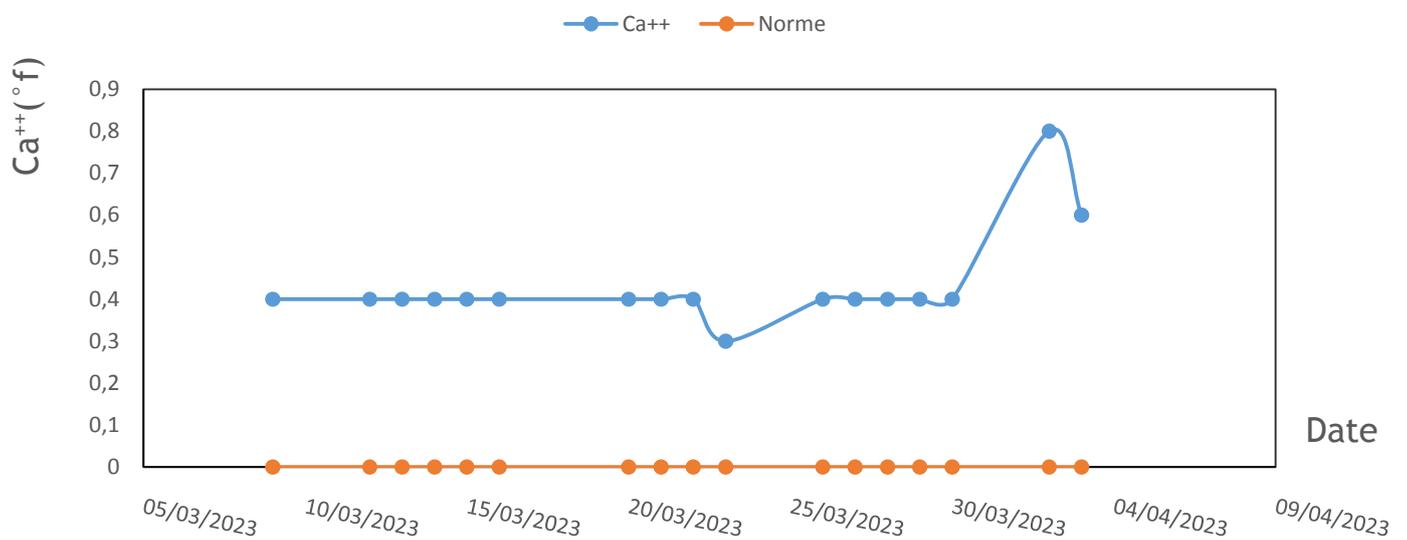
Figure II.30 : Dosage volumétrique du T<sub>Ca<sup>++</sup></sub>.

#### II.2.3.4 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de calcium Ca<sup>++</sup> :



**Figure II.31 :** Variation de calcium Ca<sup>++</sup> des eaux (brute et industrielle).



**Figure II.32 :** Variation de calcium Ca<sup>++</sup> de l'eau déminéralisée.

D'après les résultats représentés sur la figure II.31, on constate que la teneur en calcium dans l'eau brute dépasse les normes (6-8° f), mais l'eau industrielle est dans les normes,

et d'après les résultats de la figure II.32, on note que la teneur en calcium est supérieure à la norme (0 ° f).

#### II.2.4 Détermination du titre hydrotimétrique $T_{Mg^{++}}$ :

Il se détermine par la différence entre la dureté totale et la dureté calcique.

### II.2.4.1 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de de magnésium  $Mg^{++}$  :

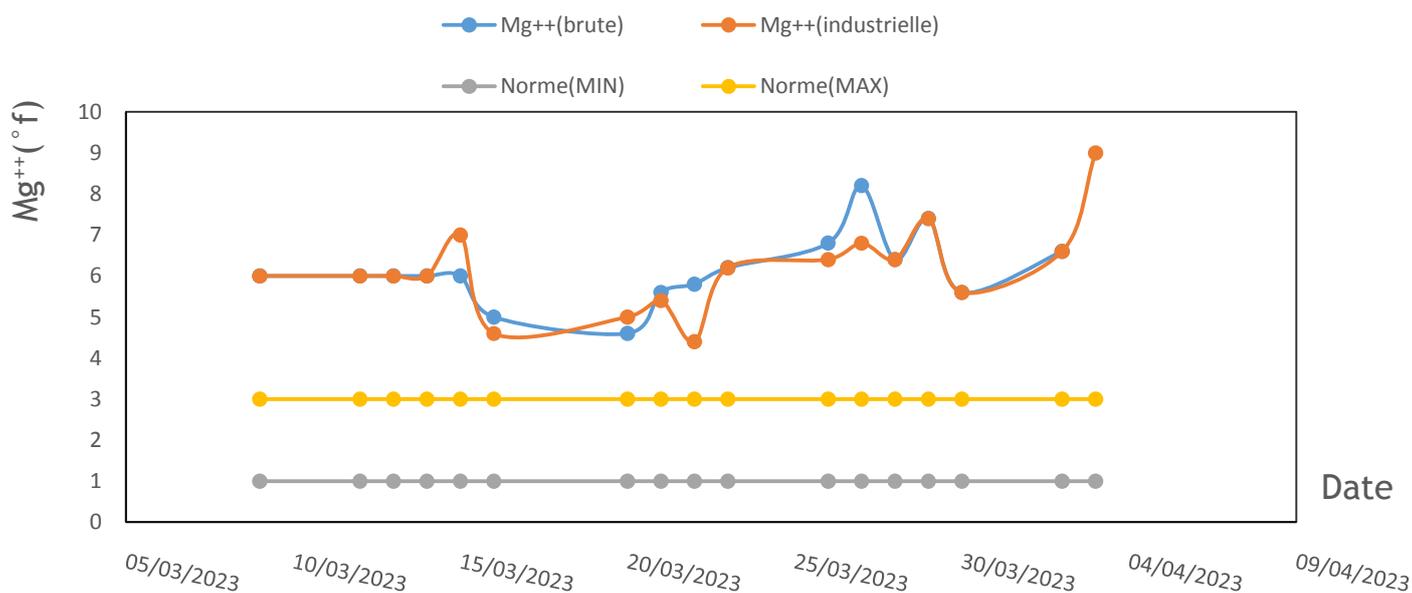


Figure II.33 : Variation de magnésium  $Mg^{++}$  des eaux (brute et industrielle).

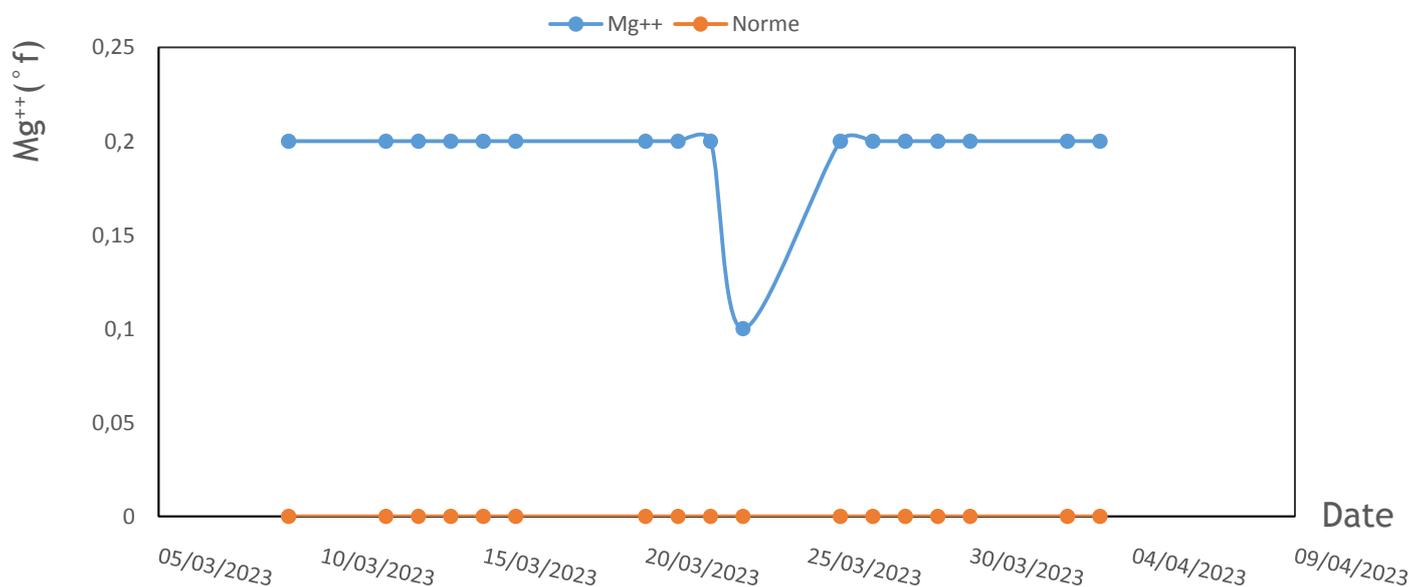


Figure II.34 : Variation de magnésium  $Mg^{++}$  de l'eau déminéralisée.

D'après les résultats présentés aux figures II.33 et II.34, on constate que l'eau brute et industrielle, dont la teneur en magnésium est supérieure aux normes (1-3 °f), ainsi que l'eau déminéralisée dépasse la norme (0 °f).

### II.2.5 Détermination de Chlorure :

Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former des chlorures d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition de petit excès d'ions d'argent et formation de chromate d'argent ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) brun rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage.

#### II.2.5.1 Réactifs :

- Chromate de potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) à 5% (indicateur).
- Nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$  à 0,1 N).

#### II.2.5.2 Mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 1 ml de chromate de potassium.
- Dans le cas où la coloration est rouge brique nous concluons une absence des Chlorures.
- Si la coloration est jaune, nous déduisons une présence des chlorures dans l'échantillon étudié, pour ceci il sera nécessaire de procéder à un titrage avec le nitrate d'argent à 0,1 N jusqu'à l'apparition d'une teinte rouge brique.
- On lit directement sur la burette le volume de nitrate d'argent.

#### II.2.5.3 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 :

$$\text{Cl}^- \text{ (en mg/L)} = V \text{ nitrate d'argent en ml} \times 35,5.$$

Avec :

V : Volume du nitrate d'argent en ml  $\times$  35,5 : Est la masse molaire du chlorure ( $\text{Cl}^-$ ).



**Figure II.35 :** Dosage volumétrique du  $\text{Cl}^-$ .

## II.2.5.4 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de chlorure :

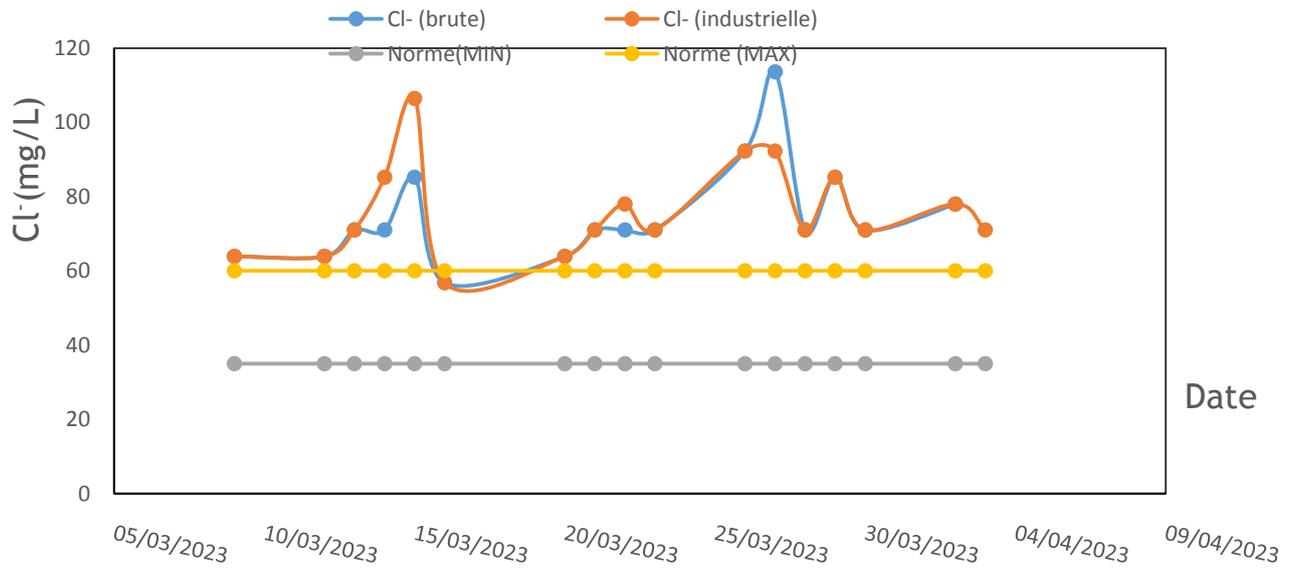


Figure II.36 : Variation de Cl⁻ des eaux (brute et industrielle).

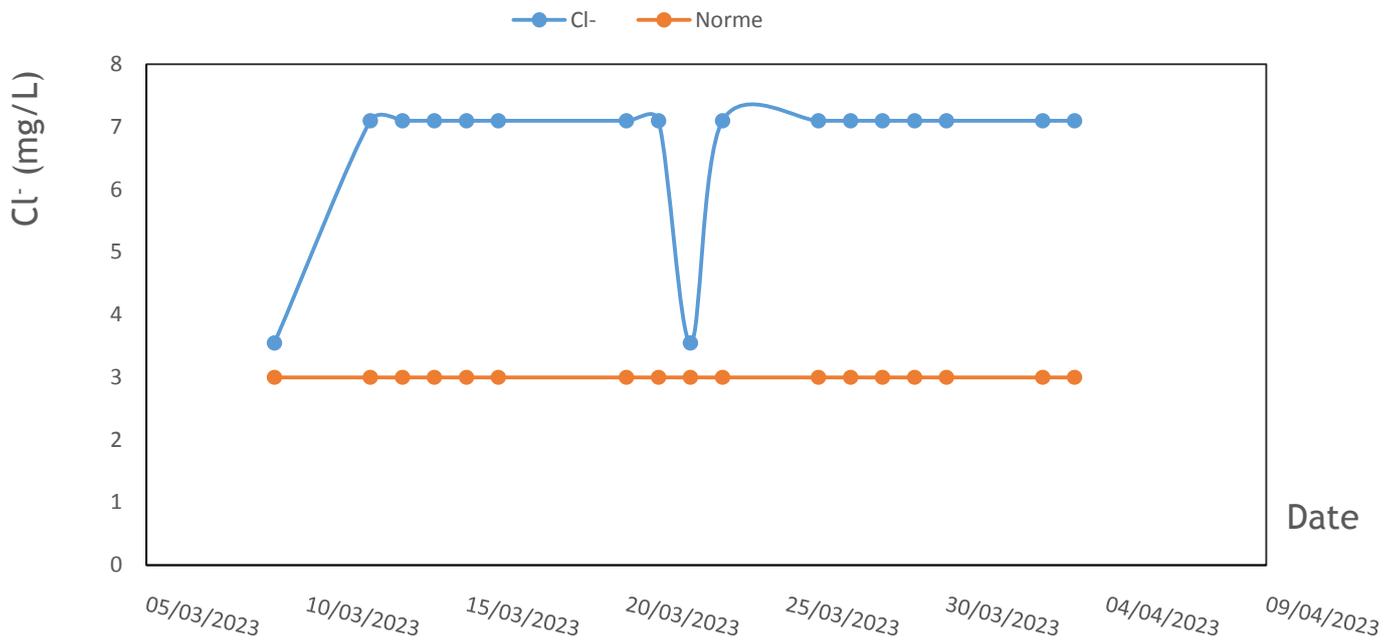


Figure II.37 : Variation de Cl⁻ de l'eau déminéralisée.

D'après les figures II.36 et II.37, on voit que les valeurs de chlorure dans l'eau brute et industrielle sont supérieures aux normes (35-60 mg/L), et l'eau déminéralisée dépasse les normes (<3 mg /L) donc l'eau est susceptible de réagir avec des ions chlorure qui produisent de l'acide chlorhydrique, ce qui conduit à un pH plus bas qui accélère la corrosion du métal.

### II.2.6 Détermination le potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est la mesure de la différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence plongeant dans une même solution. Le potentiel de l'électrode est

lié à l'activité des ions H<sup>+</sup>. Les mesures de pH ont été effectuées à l'aide d'un pH- mètre consort « C832 ».



Figure II.38 : pH- mètre consort « C832 ».

### II.2.6.1 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de potentiel d'hydrogène :

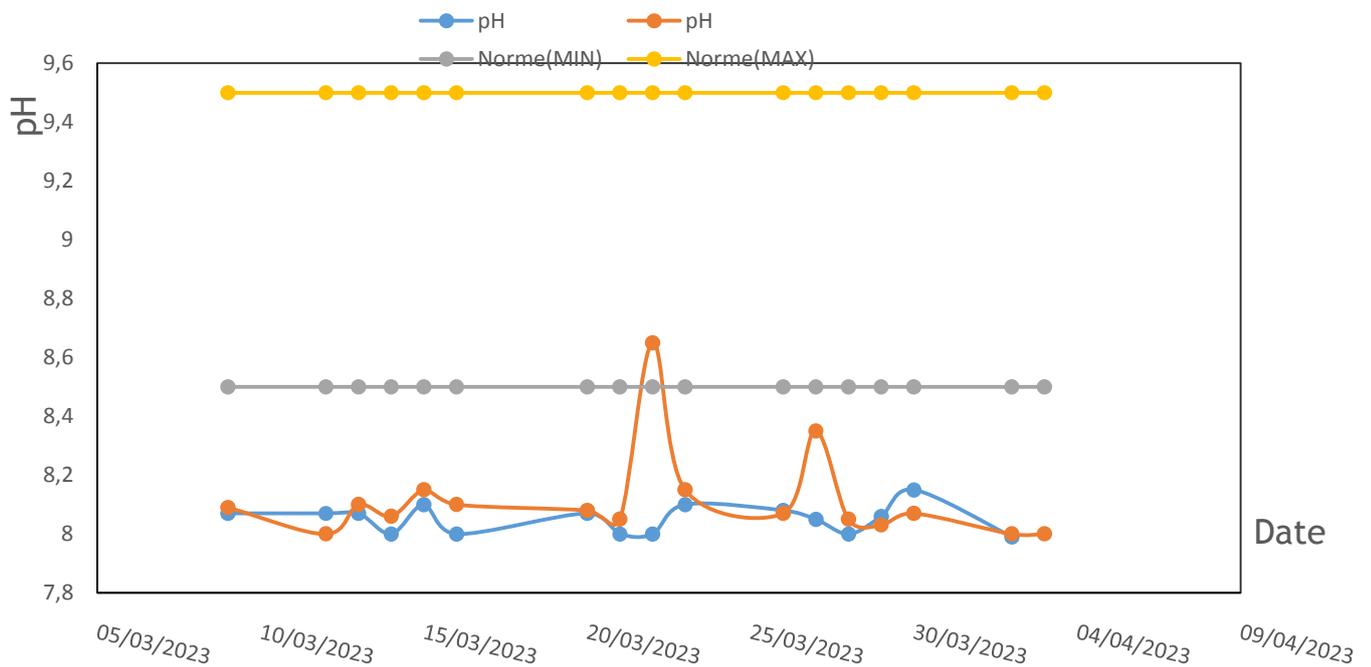


Figure II.39 : Variation de pH des eaux (brute et industrielle).

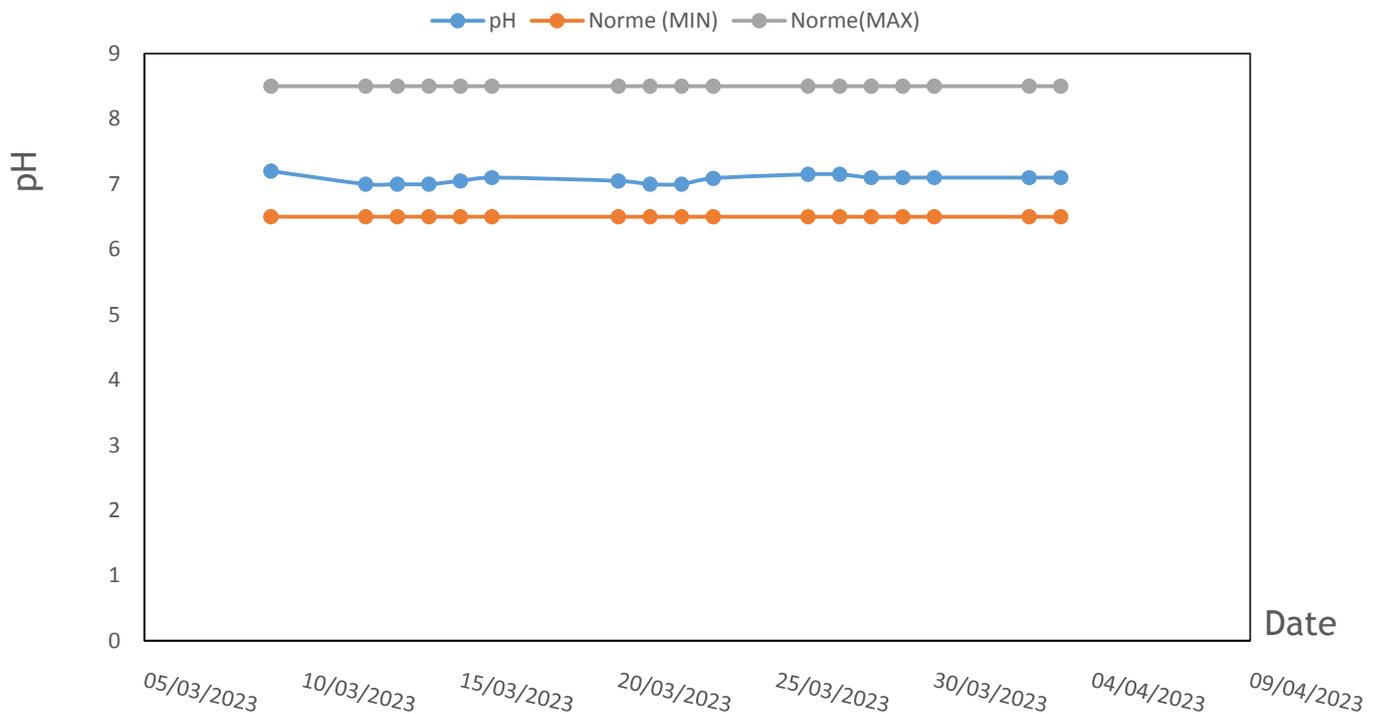


Figure II.40 : Variation de pH de l'eau déminéralisée.

La mesure du pH est primordiale pour déterminer l'action corrosive de l'eau et l'évaluation des pratiques de traitement de l'eau dans les procédés industriels. Effectivement, lorsque l'eau est trop acide, elle attaque les parois de la chaudière ou lorsqu'elle est trop alcaline, il y aura une formation de mousse, On note que l'eau brute et industrielle est alcaline et que les valeurs de pH correspondent aux normes (8,5-9,5), et que l'eau déminéralisée a un caractère légèrement neutre et correspond aux normes (6,5-8,3). Au niveau de l'unité, le pH doit être ajusté en injectant de la soude afin d'obtenir des valeurs de pH dans les normes.

### II.2.7 Détermination la conductivité :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de  $1\text{cm}^2$  de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Les mesures de La conductivité ont été effectuées à l'aide d'un Conductimètre « E587 » muni d'une cellule conductimétrie et qui affiche La conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



Figure II.41 : Conductimètre « E 587 ».

### II.2.7.1 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de la conductivité

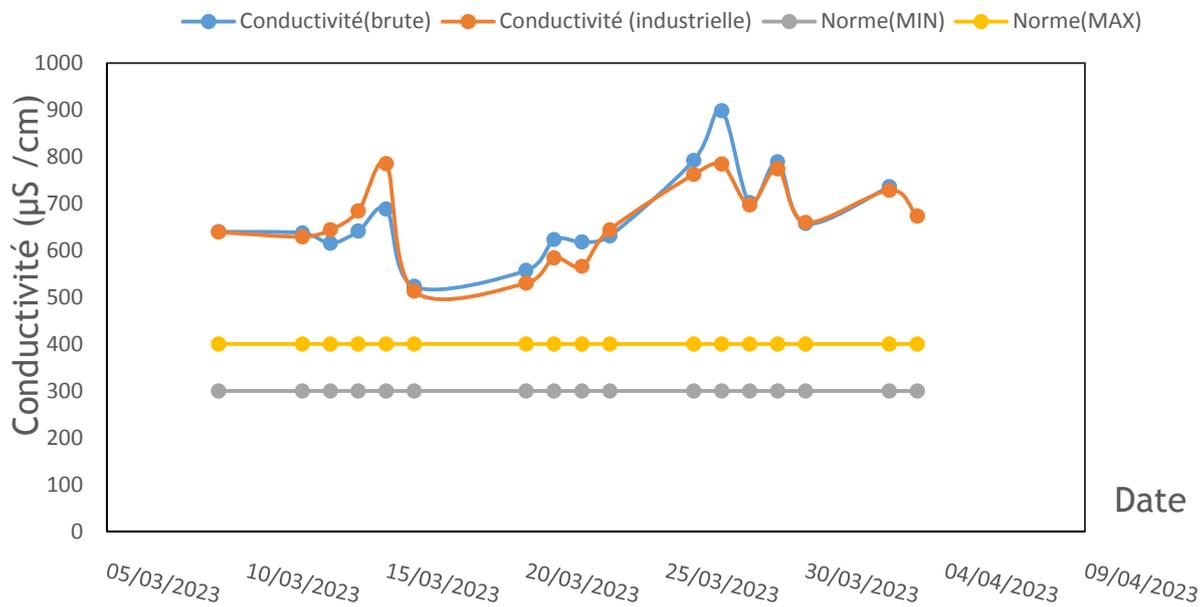


Figure II.42 : Variation de la conductivité des eaux (brute et industrielle).

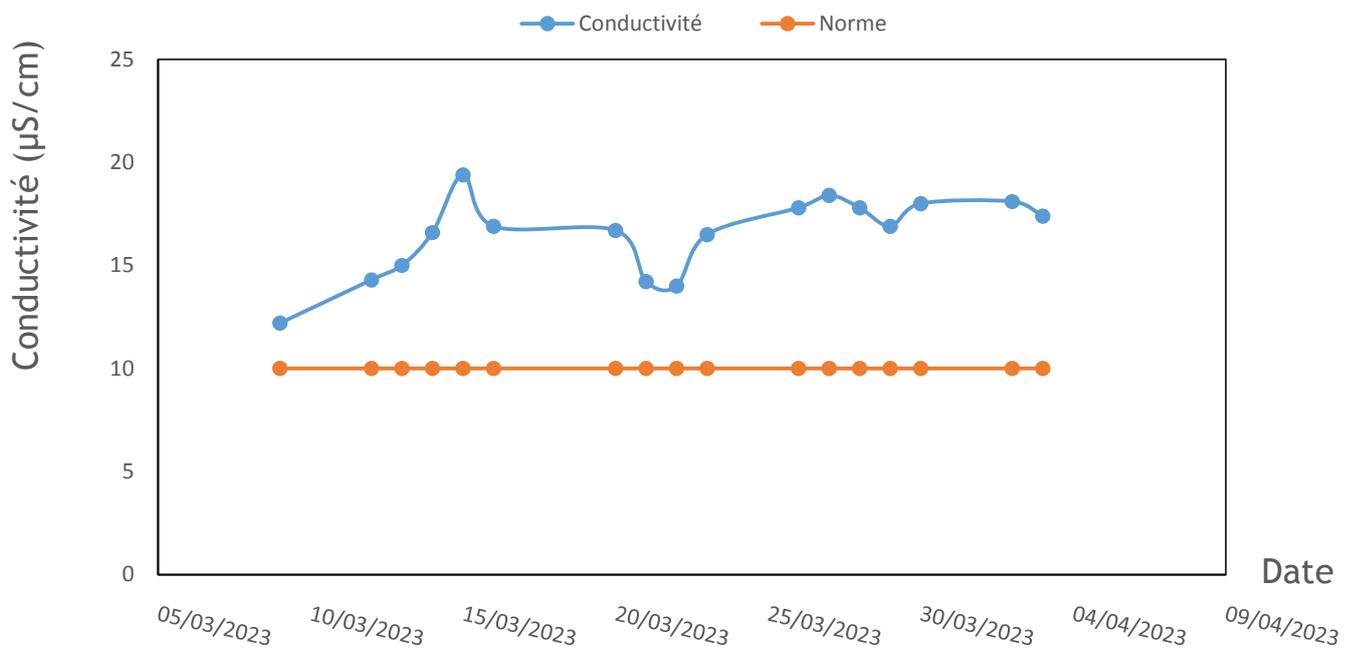


Figure II.43 : Variation de la conductivité de l'eau déminéralisée.

D'après les résultats compilés dans les figures II.42 et II.43, on observe que la conductivité électrique des eaux brute et industrielle est supérieure aux normes (300-400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ce qui conduit à des pH anormaux. De plus, l'eau déminéralisée est supérieure aux normes (<10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) cette augmentation indique que la membrane ne filtre pas convenablement l'eau.

#### **II.2.8 Détermination le taux de salinité :**

Le taux de salinité est calculé à partir de la conductivité à une température T donnée, et d'autre part la conductivité est très influencée par le pH de la solution. Selon la température et la conductivité obtenues de l'eau, on sélectionne le facteur de correction et on obtient le taux de salinité selon la relation suivante :

$$\text{TDS} = \text{conductivité} \times \text{facteur de correction}$$

### II.2.8.1 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation de taux de salinité TDS

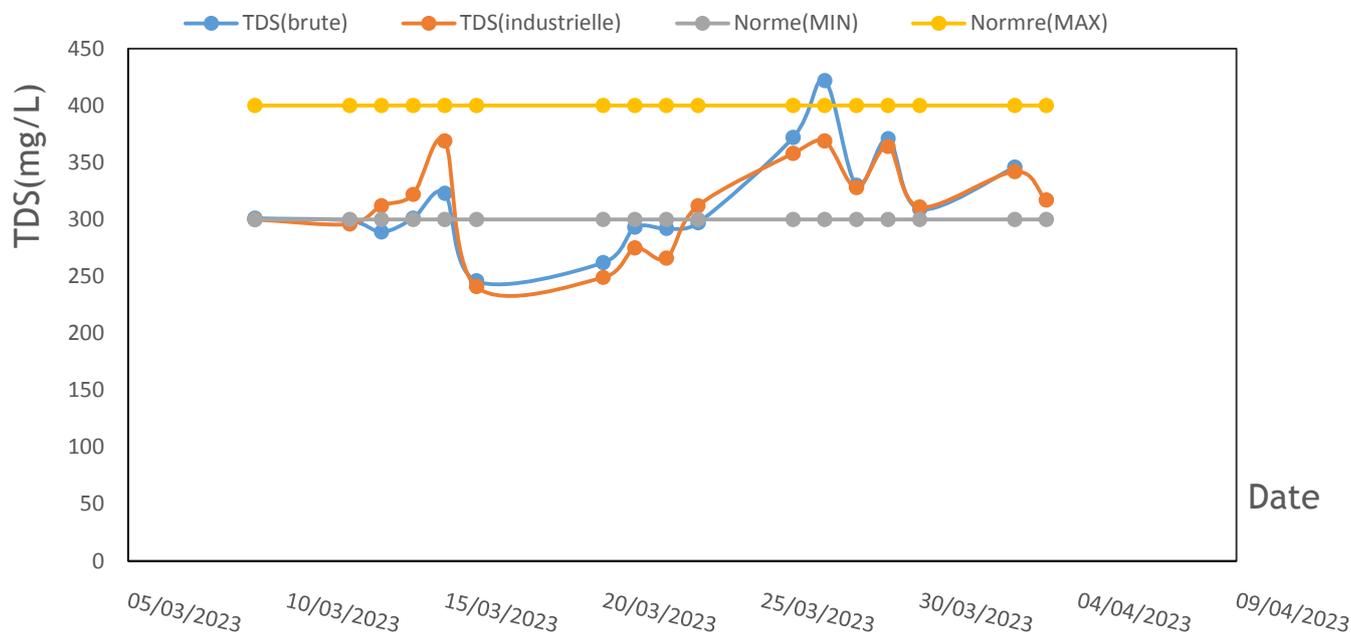


Figure II.44 : Variation de TDS des eaux (brute et industrielle).

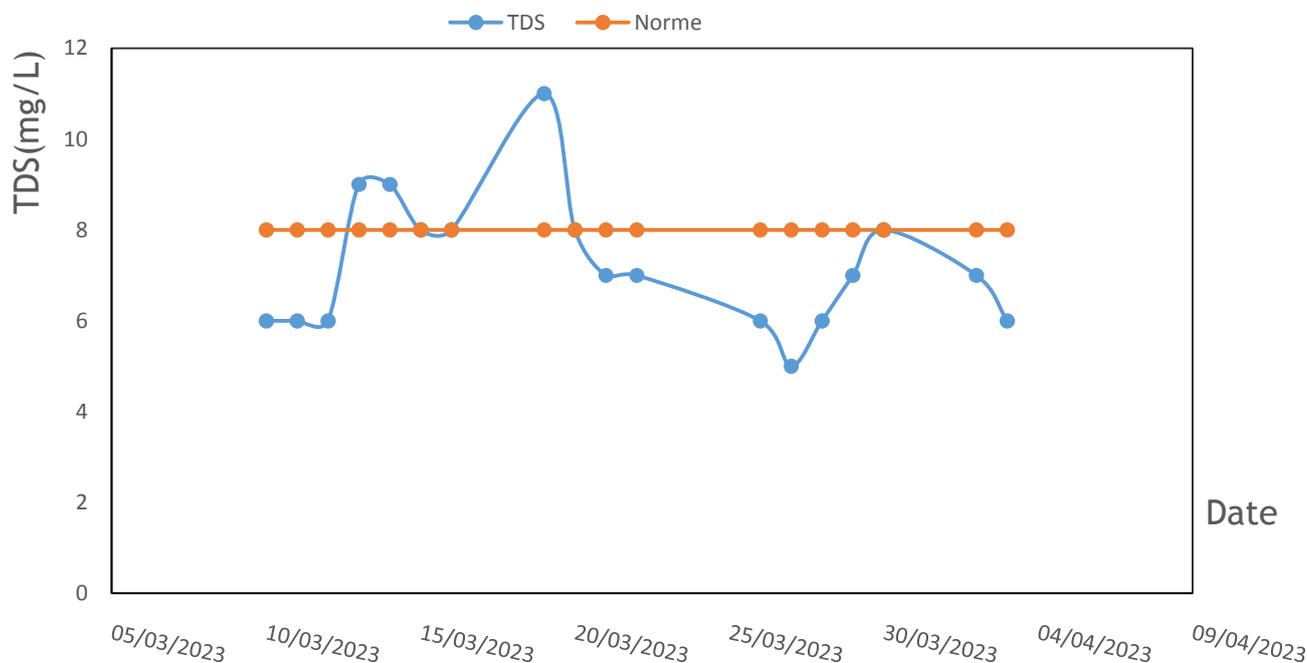


Figure II.45 : Variation de TDS de l'eau déminéralisée.

D'après les résultats compilés dans la figure II.44 montre que les valeurs des sels dissous dans l'eau brute et l'eau industrielle sont inférieures aux normes (300-400 mg/L), et à partir de la figure II.45, on constate que les valeurs de salinité de l'eau déminéralisée sont inférieures aux normes (<8 mg/L), sauf pour les deux pics qui sont supérieurs à la norme (<8 mg/L).

### II.2.9 Détermination des matières en suspension :

Au niveau du laboratoire des eaux, les analyses ont été effectuées à l'aide du spectrophotomètre « H Dr 5000 » (Figure II.46) qui est un appareil très performant, rapide

et compact pour l'analyse et qui n'exige aucune étape de filtration ou pesage. Il permet l'évaluation des tests en cuve ronde ou rectangulaire. Son écran tactile HD et le guidage par menus intuitifs assurent l'exécution aisée et rapide des tâches, et en font le spectrophotomètre idéal pour toutes les analyses d'eau en laboratoire. Les valeurs liées sur l'écran de l'appareil expriment la teneur en MES en mg /L.



Figure II.46 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 ».

### II.2.9.1 Discussion des résultats d'analyse :

- Variation des matières en suspension MES :

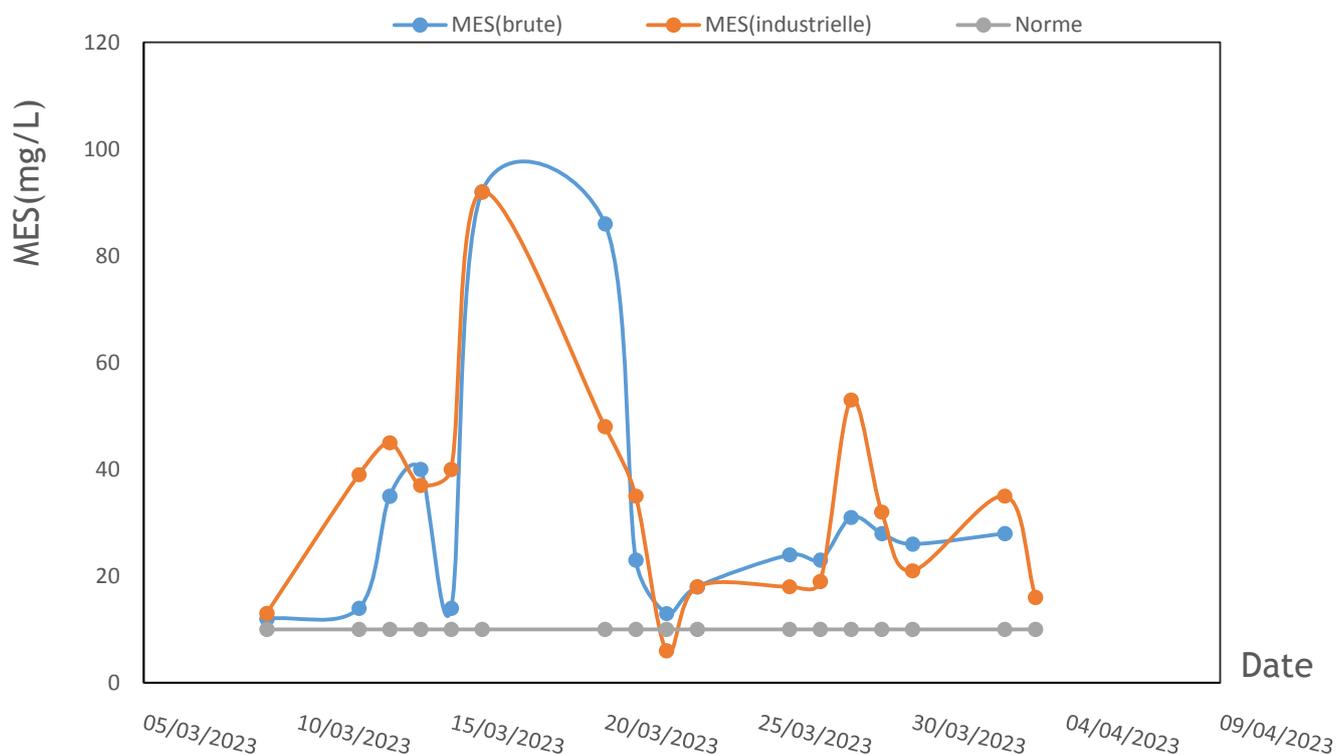


Figure II.47 : Variation des MES des eaux (brute et industrielle).

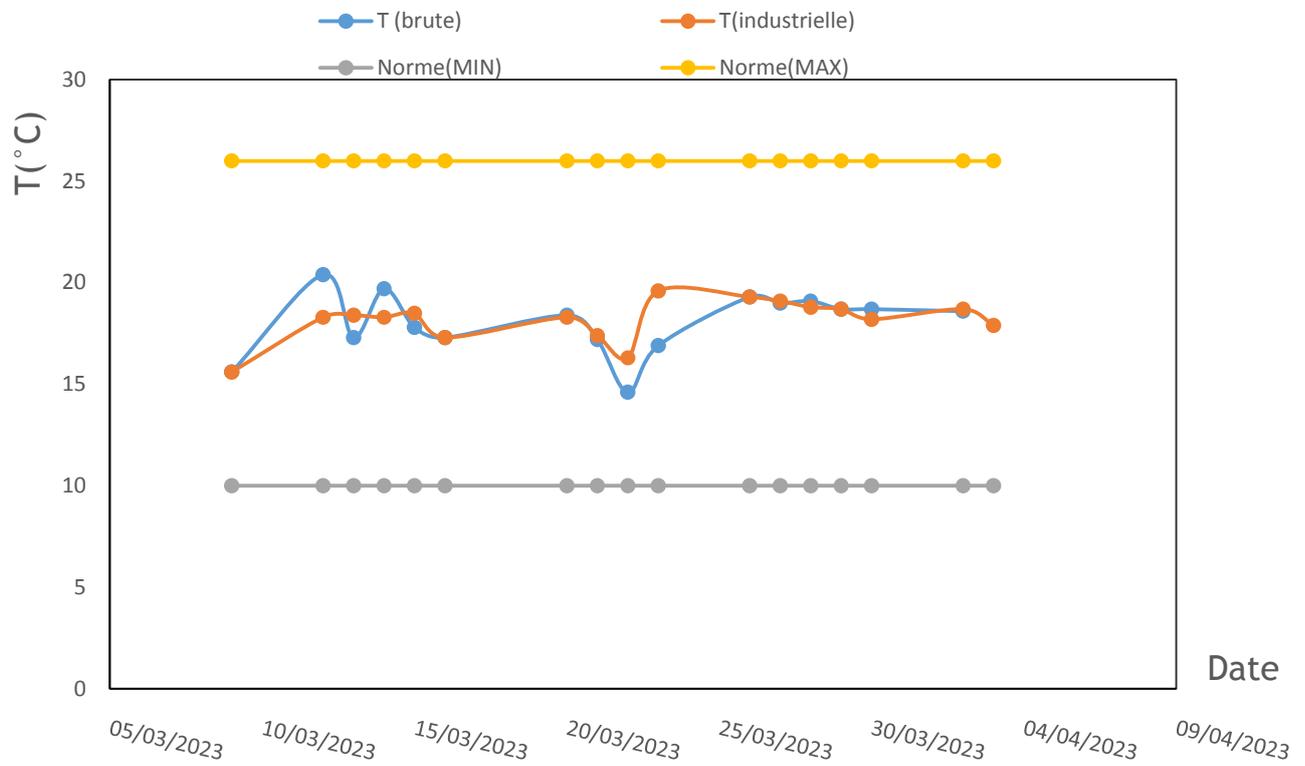
D'après la figure II.47, on constate que la teneur en matières en suspension dans les eaux brute et industrielle dépasse la norme 10 mg/L. Cette augmentation indique un problème dans le traitement.

### II.2.10 Détermination de la température :

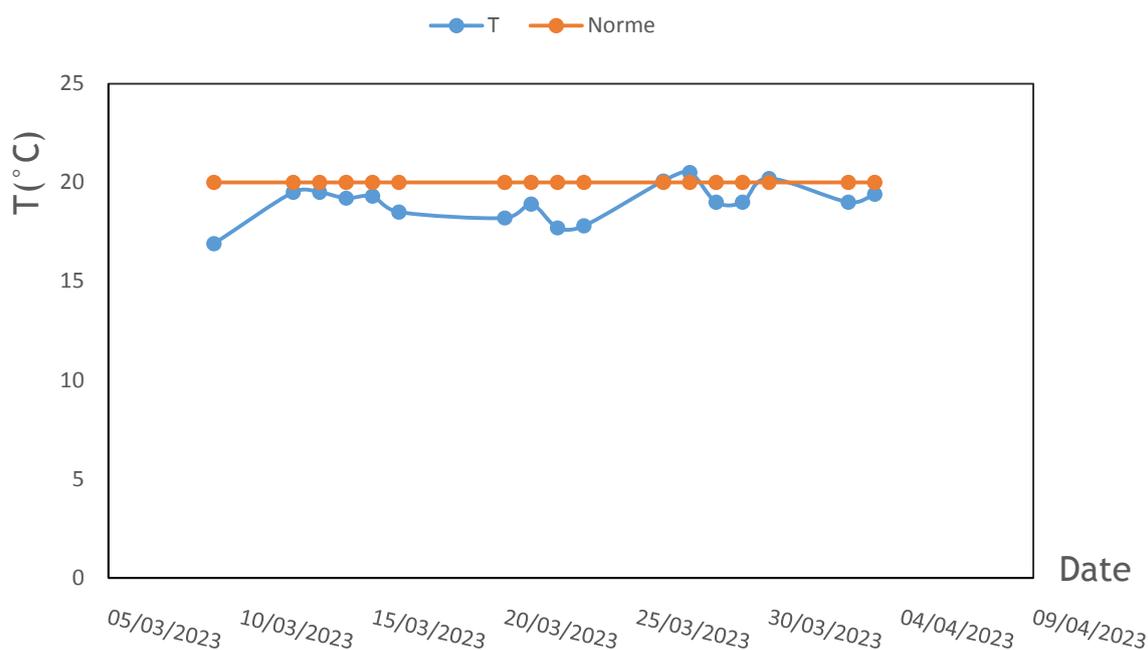
Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, ....

La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivantes dans l'eau.

### II.2.10.1 Discussion des résultats d'analyse :



- Variation de La température :

**Figure II.48** : Variation de la température des eaux (brute et industrielle).**Figure II.49** : Variation de la température de l'eau déminéralisée.

La température est un paramètre très important dans l'analyse de l'eau. En général, la température de l'eau étudiée suit la température de l'air, qui dépend des conditions climatiques saisonnières. Selon les résultats, il a été observé que les températures comprises entre 15 et 20 °C et se situent dans les normes (10-26 °C).

- On va récapituler ces analyses d'eaux dans les tableaux suivants :

**Tableau II.8** : Résultat d'analyse d'eau brute .

Date	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	T °C	Conductivité µS / cm
09/03/2023	00	14,20	20,20	14,20	6,00	63,90	8,07	301,00	12,00	15,60	640,00
12/03/2023	00	13,60	20,00	14,00	6,00	63,90	8,07	299,00	14,00	20,40	637,00
13/03/2023	00	13,40	19,80	13,80	6,00	71,00	8,07	289,00	35,00	17,30	615,00
14/03/2023	00	13,60	19,60	13,60	6,00	71,00	8,00	301,00	40,00	19,70	641,00
15/03/2023	00	14,60	21,00	15,00	6,00	85,20	8,10	323,00	14,00	17,80	688,00
16/03/2023	00	13,00	17,00	12,00	5,00	56,80	8,00	246,00	92,00	17,30	523,00

20/03/2023	00	13,20	17,00	12,40	4,60	63,90	8,07	262,00	86,00	18,40	557,00
21/03/2023	00	14,60	19,60	14,00	5,60	71,00	8,00	293,00	23,00	17,20	623,00
22/03/2023	00	15,40	19,80	14,00	5,80	71,00	8,00	292,00	13,00	14,60	618,00
23/03/2023	00	14,40	20,60	14,40	6,20	71,00	8,10	297,00	18,00	16,90	631,00
26/03/2023	00	16,60	23,60	16,80	6,80	92,30	8,08	372,00	24,00	19,30	792,00
27/03/2023	00	18,20	26,00	17,80	8,20	113,60	8,05	422,00	23,00	19,00	898,00
28/03/2023	00	16,40	23,40	17,00	6,40	71,00	8,00	330,00	31,00	19,10	702,00
29/03/2023	00	17,00	24,00	16,60	7,40	85,20	8,06	371,00	28,00	18,70	789,00
30/03/2023	00	15,00	20,60	15,00	5,60	71,00	8,15	309,00	26,00	18,70	657,00
02/04/2023	00	16,40	23,40	16,80	6,60	78,00	7,99	346,00	28,00	18,60	736,00

**Tableau II.9:** Résultat d'analyse d'eau industrielle.

Date	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	T °C	Conductivité µS /cm
09/03/2023	00	14,20	20,20	14,20	6,00	63,90	8,09	300,00	13,00	15,60	639,00
12/03/2023	00	13,40	20,00	14,00	6,00	63,90	8,00	296,00	39,00	18,30	629,00
13/03/2023	00	13,40	19,80	13,80	6,00	71,00	8,10	312,00	45,00	18,40	644,00
14/03/2023	00	13,80	20,00	14,00	6,00	85,20	8,06	322,00	37,00	18,30	684,00
15/03/2023	00	15,20	22,00	15,00	7,00	106,50	8,15	369,00	40,00	18,50	785,00
16/03/2023	00	13,00	16,60	12,00	4,60	56,80	8,10	241,00	92,00	17,30	513,00
20/03/2023	00	13,20	17,00	12,00	5,00	63,90	8,08	249,00	48,00	18,30	530,00
21/03/2023	00	14,00	18,40	13,00	5,40	71,00	8,05	275,00	35,00	17,40	584,00
22/03/2023	0,40	6,00	12,60	8,20	4,40	78,00	8,65	266,00	6,00	16,30	566,00
23/03/2023	00	14,40	20,60	14,40	6,20	71,00	8,15	312,00	18,00	19,60	644,00
26/03/2023	00	16,20	23,20	16,80	6,40	92,30	8,07	358,00	18,00	19,30	762,00
27/03/2023	0,20	17,20	23,80	17,00	6,80	92,30	8,35	369,00	19,00	19,10	784,00
28/03/2023	00	16,40	23,40	17,00	6,40	71,00	8,05	328,00	53,00	18,80	697,00
29/03/2023	00	17,00	24,00	16,60	7,40	85,20	8,03	364,00	32,00	18,70	774,00
30/03/2023	00	15,00	20,60	15,00	5,60	71,00	8,07	311,00	21,00	18,20	660,00
02/04/2023	00	16,40	23,40	16,80	6,60	78,00	8,00	342,00	35,00	18,70	728,00
03/04/2023	00	15,40	24,40	15,40	9,00	71,00	8,00	317,00	16,00	17,90	673,00
Norme (MIN)	1,00	2,50	9,00	6,00	1,00	35,00	8,50	300,00	/	10,00	300,00
Norme(MAX)	2,00	6,00	11,00	8,00	3,00	60,00	9,50	400,00	10,00	26,00	400,00

Tableau II.10 : Résultat d'analyse d'eau déminéralisée.

Date	TA °f	TAC °f	TH °f	Ca <sup>++</sup> °f	Mg <sup>++</sup> °f	Cl <sup>-</sup> mg/L	pH	TDS mg/L	T °C	Conductivité µS/cm
09/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	3,55	7,20	6,00	16,90	12,20
12/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,00	7,00	19,50	14,30
13/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,00	7,00	19,50	15,00
14/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,00	8,00	19,20	16,60
15/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,05	9,00	19,30	19,40
16/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,10	8,00	18,50	16,90
20/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,05	8,00	18,20	16,70
21/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,00	7,00	18,90	14,30
22/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	3,55	7,00	7,00	17,70	14,00
23/03/2023	00	0,40	0,40	0,30	0,10	7,10	7,09	8,00	17,80	16,50
26/03/2023	00	0,40	0,60	0,40	0,20	7,10	7,15	8,00	20,07	17,80
27/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,15	9,00	20,50	18,40
28/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,10	8,00	19,00	17,80
29/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,10	8,00	19,00	16,90
30/03/2023	00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,10	8,00	20,20	18,00
02/04/2023	00	0,60	1,00	0,80	0,20	7,10	7,10	8,00	19,00	18,10
03/04/2023	00	0,80	0,80	0,60	0,20	7,10	7,10	8,00	19,40	17,40
Norme	00	0,60	<0,30	00	00	<3,00	6,50- 8,30	<8,00	20,00	<10,00

**Conclusion :**

L'analyse physico-chimique des eaux (brute, industrielle et déminéralisée) conçue pour le suivi de la qualité de l'eau dans le complexe sidérurgique d'EL- HADJAR Annaba. Les résultats obtenus pour les eaux brute et industrielle montrent que :

Le chlorure, le TAC, les MES et la conductivité sont des paramètres qui ne conforment pas aux normes, mais le TA et le TDS aux normes. D'après les valeurs de la dureté, on peut dire que les deux eaux sont dures. La température est froide et le pH est alcalin.

L'eau industrielle est traitée par l'ultrafiltration puis par l'osmose inverse. Les résultats des analyses montrent que : Le TA, le TAC et le TDS correspondent aux normes tout au long de la période d'étude, par contre le chlorure et la conductivité dépassent les normes. D'après les valeurs de la dureté, on peut dire que l'eau est douce. La température est froide et le pH est neutre.

## Conclusion Générale :

Au cours de notre stage de fin d'études, qui a fait l'objet de ce mémoire, l'accent a été mis sur les principaux procédés de traitement des eaux.

Ce travail pour l'objectif de suivre et de contrôler la qualité physico-chimique des eaux (brute, industrielle et déminéralisée) du complexe sidérurgique d'El-HADJAR Annaba et aussi de suivre les performances des membranes utilisés pour améliorer la production d'eau déminéralisée.

Les résultats obtenus pour les eaux brute et industrielle montrent que :

Le chlorure, le TAC, les MES et la conductivité sont des paramètres qui ne conforment pas aux normes, mais le TA et le TDS sont aux normes. D'après les valeurs de dureté, on peut dire que les deux eaux sont dures. La température est froide et le pH est alcalin.

L'eau industrielle est traitée par l'ultrafiltration puis par l'osmose inverse. Les résultats des analyses montrent que : Le TA, le TAC et le TDS correspondent aux normes tout au long de la période d'étude, par contre le chlorure et la conductivité dépassent les normes. D'après les valeurs de la dureté, on peut dire que l'eau est douce. La température est froide et le pH est neutre.

Pour avoir un traitement d'eau plus efficace, il faut que la membrane doit être choisie en fonction de l'aptitude à enlever les sels.

Après, il faut réaliser des prétraitements classiques (coagulation, floculation et sédimentation par exemple) pour se débarrasser des entités qui cause le colmatage.

La durée de vie des membranes dépend pratiquement du colmatage. De ce fait, ces membranes nécessitent des lavages fréquents, le plus souvent chimiques (détergents, acides).

Pour mieux contrôler la qualité de l'eau, nous proposons les solutions suivantes :

- Les prétraitements classiques (coagulation, floculation ..... ) doivent être respecter.
- Faire des analyses physico-chimiques sur site pour accélérer les systèmes de correction
- La membrane doit être choisie en fonction de l'aptitude à enlever les sels.
- Pour augmenter les performances des membranes nous recommandons des lavages fréquents et un nettoyage cyclique.

- Le changement de détergent utilisé pour minimiser le colmatage.

## Références bibliographiques :

- [1] Document technique (zone fluide).
- [2] Rodriguez G, (2004), Etude de la congélation comme technique de traitement des eaux applications spécifiques, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.(2004).
- [3] ONEMA, les agences de l'eau, cycle de l'eau, (2012).
- [4] R. Desjardins, Le traitement des eaux. Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, (1997).
- [5][https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/definition/nappe\\_souterraine.php4](https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/definition/nappe_souterraine.php4).
- [6] H. Bair, F. Ghemari, Techniques et méthodes de traitement des eaux Primaires. Mémoire, Université Bejaia , (2018).
- [7] B. Régis, B. Selim, Technique de la gestion et de la distribution de l'eau, Livre édition du Moniteur, paris, (2011).
- [8] R. Benner, B. Biddanda, B. Blac, et M. McCarthy, Abundance size distribution and stable carbon and nitrogen isotopic compositions of marine organic matter isolated by tangential flow ultrafiltration, Thèse Doctorat, Marine Chemistry 57, (1997).
- [9] M. Trdat-Henry, chimie des eaux. 1ère édition griffon argyle INC, Canada, (1984). [9] Dégrèvement, Mémento technique de l'eau, tomes 1, livre, 10<sup>ème</sup> Edition, paris, (2005).
- [10] M. dore, Chimie des oxydants et traitement des eaux, édition technique et documentation, Lavoisier, (1995).
- [11] K. Sardi, Contrôle de la qualité de l'eau de la station de L'EHU 1<sup>er</sup> Novembre, Mémoire de Master, Faculté de chimie Département de chimie physique, Université de sciences et de technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, (2014).
- [12] J. Villers, M. Squilbin, C. Yourassowsky, Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface, Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, (2005).
- [13] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/> .
- [14] M. Bessedik , Traitement et épuration de l'eau , université de Tlemcen, (2015).
- [15] C. Bassompierre, Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, (2007).

- [16] Degrément ,R. Malmaison, Mémento technique de l'eau, tome 1, Paris, DégrémentLyonnaise des eaux, (1989).
- [17] Dégrément, Mémento technique de l'eau, Lavoisier technique de l'eau tome 1, paris,2005.
- [18] C. Gregorio, M-B. Pierre, N-M.Crini,G.Torri. Traitement etépuration des eaux industrielles polluées, édition presses universitaires de Franche-Comté, (2007).
- [19] chaufer et M. Rabiller-Baudry , Rétention of ions in nanofiltration atvariousion icstrength, (1996).
- [20] Z.BOUZELIFA et S.MEDJANI. « Analyse et contrôle de la qualité de l'eau adoucie de refroidissement de l'ACO1 (MITTAL STEEL) ». Mémoire de fin d'études. Département génie des procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2005.
- [21] L. Khezami, Production du charbon actif et son application en traitement des eaux, Production et caractérisation des charbons actifs à partir du bois et autres application en traitement des eaux, Livre, Édition universitaire européennes, ( 2018) .
- [22] S. Ouali ,Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux, édition office des publications universitaires, Alger, 1ereédition, (2001).
- [23] : Greenlee et al, 2009 Dow Water & Process Solutions, FILMTECTM Reverse Osmosis Membr. Tech. Man, 2009.
- [24] Saliha B. (2008). Etude de la rétention des solutés neutres et ioniques par des membranes de nanofiltration. Thèse doctorat. Franche-Comté. Université de Franche-Comté, Ecole doctorale luis pasteur.156 pages.
- [25] R. W. Baker. (2004). Membrane technology and applications. Jhon Wiley and Sons, Chichester.
- [26] El khabbaz H.(2008).Traitement des solutions modèles du lait par des membranes de Nanofiltration et d'osmose Inverse . Thèse de doctorat. Rebat : Université Mohamed V-AGDAL.151pages.
- [27] : R. Ferrarini, A. Versari, S. Galassi. (2001). A preliminary comparison between nanofiltration and Reverse osmosis membranes for grape juice treatment, Journal of Food Engineering. 50 113-116.
- [28] S. Ouali, Cours de procédés unitaires biologique et traitement des eaux, édition office des publications Universitaire, Alger,1ére édition, (2001).

- [29] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, édition office des publications Universitaire, Alger ,2 éme édition, (2006).
- [30] <http://www.actu-environnement.com>.
- [31] T. Cakaew, Procédés Hybrides à membranes pour le traitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Thèse doctorat. Université de Toulouse, (2009). C. Bouchard, P.Kouadio, D.Ellis, M.Rahni, R.E Lebrun. Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable, Vecteur Environnement, (2000).
- [32] Berland J-M et Juery C. (2002). Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Edition Office international de l'eau, France. 71 pages.
- [33] Remize P.J., Laroche J.F., Leparc J. et Schrotter J.-C. (2009). A pilot-scale comparison of granular media filtration and low-pressure membrane filtration for seawater pretreatment, Desalination and Water Treatment, 5 6-11.
- [34] Luo M. et Wang Z. (2001). Complex fouling and cleaning-in-place of a reverse osmosis desalination system, Desalination 141 15-22.
- [35]: Fritzmann C, Löwenberg J., Wintgens T. et Melin T. (2007). State-of-art of reverse osmosis desalination, Desalination 216 1-76.
- [36] Bacchin P. (1994). Formation et résistance au transfert d'un dépôt de colloïdes sur une membrane d'ultrafiltration, Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse.
- [37] SAGNE, Camille. « Etude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse. Application au recyclage des condensats issus de la concentration des vinasses de distilleries », Thèse de doctorat en Génie des Procédés, Université de Montpellier. Montpellier (2008).
- [38] Daufin G., Rene. Aimar P. (1998) .Les séparations par membranes dans les procédés de l'industrie alimentaire Édition Lavoisier TEC and DOC ,Paris ,chap 7.