

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées
Département de génie des procédés



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine Sciences et Techniques

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Présentée par : Guidoume Slimane

Thème

**Traitement en amont et en aval de l'eau destinée au
processus de production d'hypochlorite de sodium,
soude caustique et acide chlorhydrique**

Soutenu publiquement

Le : 26/06/2018

Devant le jury :

Président : Chaouki Mourad
Examinatrice : Chaouch Noura
Promoteur : Ihaddadene Belaid

M.C.A
M.C.A
M.C.B

Année Universitaire : 2017/2018



Citation

L'imagination est plus Importante que la connaissance.

La connaissance est limitée alors que l'imagination englobe le monde entier, stimule le progrès, suscite l'évolution.

Albert Einstein



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

L'âme de mes grands parents

L'âme de mon père

Ma mère

Mes frères et sœur.

Ma femme

Mes chers enfants : Markounda , Ratiba , Abdelhamid

Toute ma famille à et tous ceux qui me sont chers



Remerciements

Il est toujours difficile d'inclure toutes les personnes qui, ont contribué, dans une mesure majeure ou mineure, à faire partie de ce travail.

*Je vais commencer par mon encadreur et mon cher ami, **Dr. IHADDADENE BELAID**, qui m'a fourni une aide inestimable et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, J'espère qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude la plus distinguée.*

*Je voudrais aussi témoigner ma gratitude au chef du département de génie des procédés, **M.TABCHOUC AHMED** pour son aide et ses encouragements qui m'ont motivé pour réaliser ce mémoire.*

Tous mes hommages vont aussi à l'ensemble des professeurs qui ont contribué à ma formation à l'Université de Ouargla.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de la faculté des sciences appliquées de l'université Kasdi Merbah-Ouargla.

*J'aimerais bien aussi remercier vivement **M.OTMANI Salah** de m'avoir aimablement autorisé d'accomplir la partie expérimentale de cette étude au niveau du complexe industriel FCI.*

*Si ce travail a pu se mener à bien, c'est aussi grâce aux explications détaillées et aux manuels de l'usine qui m'ont été fournis par les techniciens et ingénieurs du process particulièrement : **M.SAMAALI Saber**, **M.KIRAANI.Imed**, **M.ZEGRAR Bilel**, **M.DEROUCHE K.Eddine**, je leur présente ici mes vifs remerciements.*

Résumés

Résumé

La présence des impuretés dans une eau captée de l'aquifère de la nappe des calcaires, utilisée dans le processus d'une usine pour la production de la soude caustique et produits chlorés, peut engendrer des conséquences néfastes sur le fonctionnement des équipements et la qualité des produits finis. Ce mémoire s'intéresse à l'étude du traitement effectué en amont pour éliminer ces impuretés et en aval dans une tentative de réutiliser les eaux de rejet et à défaut d'assurer leur déversement dans les meilleures conditions de respect de l'environnement. Les résultats obtenus confirment l'efficacité du traitement effectué en amont et justifient notre choix du traitement physico chimique réalisé en aval du processus.

Mots clés : Eau, impuretés, nappe des calcaires, soude caustique, produits chlorés, traitement, environnement

Abstract

The presence of impurities in water collected from the aquifer of the limestone aquifer, used in the process of a factory for production of caustic soda and chlorinated products, may have adverse consequences on the operation of the equipment and the quality finished products. This thesis focuses on the study of upstream treatment to remove these impurities and downstream in an attempt to reuse the waste water and failing to ensure their spill in the best conditions of respect for the environment. The results obtained confirm the effectiveness of the treatment carried out upstream and justify our choice of physico-chemical treatment carried out downstream of the process.

Key words: Water, impurities, limestone nappe, caustic soda, chlorinated products, treatment, environment

ملخص

إن وجود شوائب في المياه التي يتم استخراجها من طبقة المياه الجوفية في الحوض الجيري ، المستخدمة في عملية إنتاج الصودا الكاوية والمنتجات التي تعتمد على الكلور ، يكون له عواقب سلبية على تشغيل المعدات والمنتجات المصنعة النهائية. تركز هذه الرسالة على دراسة المعالجة الأولية لإزالة هذه الشوائب وأيضا المعالجة النهائية لعمليات التصريف في محاولة لاسترجاعها من اجل إعادة استخدامها أو لضمان صرفها في ظروف تستوفي معايير احترام البيئة. النتائج المتحصل عليها تؤكد فعالية المعالجة الأولية و تبرر اختيارنا للطريقة الفيزيائية الكيميائية التي اعتمدنا عليها لتنفيذ المعالجة النهائية.



Sommaire

Sommaire

Page de garde		2	
Citation			
Dédicaces			
Remerciements			
Résumés			
Sommaire			
Liste des abréviations			
Liste des illustrations graphiques			
Les mots clés			
Introduction		2	
Première partie Chapitre	I	I. L'eau et le sel (NaCl) Généralités, ressources locales et usage industriel	6
		I.1. Définitions, propriétés, caractéristiques et qualité	6
		I.2. Ressources hydriques locales	24
		I.3. L'eau et l'industrie	26
		I.4. Le sel (NaCl)	28
		II. Industrie du chlore, soude caustique et acide chlorhydrique	36
		II.1. Production du chlore	36
		II.2. Production de la soude caustique.	38
		II.3. Production de l'hypochlorite de sodium.	39
		II.4. Production de l'acide chlorhydrique.	42
		III. Traitement en amont	46
		III.1. Traitement en amont	46
		III.2. Traitement en aval	51
		III.3. Normes Algériennes de diversement des eaux usées industrielles	53
Deuxième partie Chapitre	I	I. Présentation de l'entreprise Sarl Flash Chemicals Industry (FCI)	56
		I.1. Données générales du site industriel	56
		I.2. Description des opérations unitaires du processus.	64
		I.3. Unités de production	77
		II Matériels et méthodes	80
		II.1. Introduction	80
		II.2. Plan général descriptif des circuits d'eau d'alimentation et des rejets liquides	81
		II.3. Analyse des matières premières de la chaîne de production	82
		II.4. Paramètres contrôlés au niveau du saturateur	82
		II.5. Paramètres contrôlés au niveau de réservoir de décantation	84
		II.6. Paramètres contrôlés au niveau des filtres à sable	85
		II.7. Paramètres contrôlés au niveau des filtres à résine	86
		II.8. Paramètres contrôlés au niveau de l'unité d'osmose inverse	87
		II.9. Paramètres contrôlés de l'eau de rejet totale avant épuration	88
		III. Résultats et interprétations	90
		III.1. Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des matières premières	90
		III.2. Concentration du sel au niveau du saturateur	94
		III.3. Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure au niveau du saturateur	95
		III.4. Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure décantée	97
	III.5. Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à sable	97	
	III.6. Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à résine	98	
	III.7. Récapitulation et représentations graphiques	99	
	III.8. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux osmosées	111	
	III.9. Analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau finale de rejet	112	
	III.10. Approche technique du traitement des eaux des rejets du processus	114	
Conclusion		117	
Références bibliographiques		119	
Table de matières		123	



Liste des abréviations

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
°chl	Degré de chlorométrie
°f	Degré français
A	Section du conducteur
C	Concentration
c.a	Chlore actif
C _{MES}	Concentration des MES en mg/l
DBO5	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
G	Conductance
I	Intensité du courant électrique
K	Constante de cellule
k	Facteur de biodégradabilité
L	Longueur du conducteur ;
M ₀	Masse de la membrane GFC avant filtration
M ₁	Masse de la membrane GFC après filtration
MES	Matières en suspension
MOHS	Echelle de dureté pour les minéraux (Varie de 1 à 10)
N _j	Nombre de moles de soluté
OI	osmose inverse
P	Pression
P ₀	Pression osmotique
PVC	polychlorure de vinyle (Matière plastique)
R	Résistance électrique
T	Température absolue
U	Tension électrique
V	Volume de l'échantillon filtré
γ	Conductivité électrique (spécifique)



Liste des illustrations graphiques



1. Liste des tableaux

Tableau 1.	Principales constantes physiques de l'eau pure, dans ses trois états
Tableau 2.	Plages d'estimation de DBO ₅ et facteurs fournis par le fabricant du dispositif manométrique
Tableau 3.	Poids équivalents (gr) des constituants responsables de la dureté de l'eau
Tableau 4.	Classification des eaux en fonction du degré de dureté
Tableau 5.	Conversion des unités de conductivité électrique
Tableau 6.	Analyse physico-chimique de la nappe (Eocène-Sénonien) Région d'Ouargla
Tableau 7.	Répartition de la consommation annuelle d'eau en Algérie
Tableau 8.	Principales caractéristiques du chlorure de sodium
Tableau 9.	Principaux gisements de sel en Algérie
Tableau 10.	Densité de saumure à 25°C pour différentes concentration de NaCl
Tableau 11.	Densité du chlore gazeux en fonction de la température
Tableau 12.	Propriétés physique de la soude caustique liquide
Tableau 13.	Correspondance entre le % chlore actif, % NaClO, densité et degré chlorométrique
Tableau 14.	Propriétés de l'acide chlorhydriques
Tableau 15.	Composition typique du chlorure de sodium utilisé en électrolyse
Tableau 16.	Valeurs limites de rejet selon la norme Algérienne
Tableau 17.	Répartition des surfaces exploitées
Tableau 18.	Répartition des effectifs par catégories socioprofessionnelles
Tableau 19.	Matière première
Tableau 20.	Capacité de production
Tableau 21.	Capacité de stockage
Tableau 22.	Parts du marché
Tableau 23.	Résultats de l'analyse physico chimique de l'eau de forage
Tableau 24.	Résultats d'analyse du sel employé dans le processus de l'usine
Tableau 25.	Résultats d'analyse de la saumure (d = 1,19)
Tableau 26.	Résultats d'analyse de la saumure après décantation
Tableau 27.	Résultats d'analyse de la saumure après filtration à sable
Tableau 28.	Résultats d'analyse de la saumure après filtration à résine
Tableau 29.	Tableau récapitulatif des résultats d'analyses effectuées sur la saumure
Tableau 30.	Mesures des paramètres indicateurs de pollution de l'eau de rejet de l'usine

2. Liste des figures

Figure 1.	Décomposition chimique de l'eau
Figure 2.	Géométrie de la molécule d'eau
Figure 3.	Schéma du principe de la mesure la turbidité
Figure 4.	Schéma du principe de la mesure de DBO ₅
Figure 5.	Décomposition du sel (NaCl) en ions Na ⁺ et Cl ⁻
Figure 6.	Schéma du principe conductif de mesure la conductivité
Figure 7.	Capteur conductif
Figure 8.	Schéma du principe conductif de mesure la conductivité
Figure 9.	Capteur inductif
Figure 10.	Zone aquifère du Sahara septentrional
Figure 11.	Cristal de NaCl
Figure 12.	Système de cristallisation de NaCl
Figure 13.	Dissolution du sel (NaCl) dans l'eau
Figure 14.	Electrolyse d'une solution de sel NaCl.
Figure 15.	Schéma de principe d'électrolyse d'une solution de NaCl
Figure 16.	Migration des ions Na ⁺ et Cl ⁻ au cours d'une électrolyse
Figure 17.	Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse à membrane.
Figure 18.	Schéma du processus chlore-alcali à grande échelle
Figure 19.	Schéma simplifié du principe d'unité de production d'acide chlorhydrique
Figure 20.	Schéma du principe d'osmose directe
Figure 21.	Schéma du principe d'osmose inverse
Figure 22.	Module à membrane spirale
Figure 23.	Localisation de l'entreprise FCI
Figure 24.	Assiette occupée par l'entreprise FCI
Figure 25.	Zone de compétence
Figure 26.	Organigramme de l'entreprise
Figure 27.	Producteurs de produits chimiques Algériens
Figure 28.	Schéma de l'ouvrage de prélèvement d'eau d'alimentation
Figure 29.	Photos du sel brut utilisé dans le processus de production (Chott d'El Hamraia)
Figure 30.	Diagramme général relatif au processus de traitement et de production adapté
Figure 31.	Photo du saturateur de saumure
Figure 32.	Dissolution de sel au niveau du saturateur
Figure 33.	Réservoir de décantation de la saumure
Figure 34.	Filtres à sable
Figure 35.	Filtres à résine
Figure 36.	Unité de traitement d'eau par osmose inverse
Figure 37.	Schéma du procédé de traitement d'eau par osmose inverse
Figure 38.	Osmoseur PENTAIRE AquaLine
Figure 39.	Disposition des cellules d'électrolyse
Figure 40.	Membrane échangeuse de cations
Figure 41.	Tuyauterie d'alimentation en saumure
Figure 42.	Réactions chimiques dans les compartiments d'une cellule à membrane.
Figure 43.	Equipements de production d'hypochlorite de sodium
Figure 44.	Unité d'acide chlorhydrique (MERSEN)



Figure 45.	Unité d'évaporation de la soude caustique liquide (BERTRAMS)
Figure 46.	Plan général descriptif des circuits d'eau d'alimentation et des rejets liquides
Figure 47.	Matériel utilisé pour le contrôle de la densité de saumure
Figure 48.	pH-mètre
Figure 49.	Turbidimétrie optique WTW Turbo 430 IR
Figure 50.	Spectrophotomètre HACH DR 3900
Figure 51.	Conductimètre HACH EC7
Figure 52.	Histogrammes comparatifs entre les paramètres physico-chimiques de l'eau de forage et celle de la nappe des calcaires
Figure 53.	Eléments constituant du sel employé dans la préparation de saumure du processus
Figure 54.	Variation de la concentration de NaCl en fonction de la densité
Figure 55. :	Histogrammes comparatif des paramètres physico-chimiques entre l'eau de forage et la saumure (densité $d = 1,19$)
Figure 56.	Représentation graphique des variations du pH
Figure 57.	Représentation graphique des variations de la conductivité
Figure 58.	Représentation graphique des variations de la turbidité
Figure 59.	Représentation graphique des variations de la dureté
Figure 60.	Représentation graphique des variations de la teneur en Ca^{2+}
Figure 61.	Représentation graphique des variations de la teneur en Mg^{2+}
Figure 62.	Représentation graphique des variations de la teneur en Na^+
Figure 63.	Représentation graphique des variations de la teneur en Cl^-
Figure 64.	Représentation graphique des variations de la teneur en SO_4^{2-}
Figure 65.	Représentation graphique des variations de la teneur en MES
Figure 66.	Histogrammes de variation des paramètres physico-chimiques de l'eau de forage après traitement par osmose inverse
Figure 67.	Station d'épuration des eaux des rejets proposée dans le cadre de ce projet



Introduction

Introduction :

Introduction

L'eau n'est pas seulement un fluide qui soutient la vie, mais elle est aussi une ressource stratégique pour la plupart des industries et représente également une source de valeur ajoutée. Sa gestion et ses applications diverses sont un enjeu économique et environnemental très complexe et propre à chaque activité. En général, les entreprises qui l'utilisent dans leurs procédés industriels surtout comme matière première de base dans la fabrication de leurs produits finis, déterminent leur choix de l'endroit d'implantation de leurs usines en fonction de la disponibilité des ressources en eau abondantes. En plus de la disponibilité de la quantité adéquate, l'eau doit également respecter certaines exigences afin de mieux répondre aux différents besoins industriels. Que la ressource soit superficielle ou souterraine, l'eau brute qu'elle fournit se trouve dans le cas le plus général contaminée par des impuretés qui modifient ses propriétés physico chimiques et les exigences de qualité de l'eau sont souvent interprétées en fonction de ces impuretés. Aujourd'hui, ces entreprises sont constamment confrontées à de nouveaux défis visant à concevoir une eau adaptée à la mesure de leurs industries afin d'augmenter leurs productivités, optimiser leurs consommations en cette matière par la mise en place des installations de production sûres et fiables conjointement à l'application des techniques de son recyclage, améliorer la protection de cette ressource vitale en restituant leurs eaux usées au milieu naturel dans les meilleures conditions compatibles avec la protection et préservation de l'environnement.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le thème de ce mémoire qui se penche sur cette problématique à travers une étude qui a été menée auprès d'une entreprise algérienne privée, en l'occurrence FLASH CHEMECAL INDUSTRY, qui exploite au niveau de son complexe industriel, une eau souterraine profonde captée de la nappe aquifère calcaire de la cuvette d'Ouargla. Cette eau est utilisée par l'entreprise dans toutes les phases du processus de production et plus particulièrement, dans la préparation d'une saumure très concentrée en chlorure de sodium destinée à alimenter l'unité d'électrolyse à membrane pour produire le gaz chlore et la soude caustique qui serviront par la suite à la fabrication des autres produits finis tels que l'hypochlorite de sodium et l'acide chlorhydrique.

L'objectif visé par ce travail consiste, plus précisément, à étudier l'impact du traitement en amont sur l'élimination des impuretés de cette eau au cours de l'enchaînement du processus de production et cela à travers l'examen de :

- ✓ La variation des paramètres physico chimiques de la saumure préparée dans un saturateur par mixage de l'eau brute du forage avec un sel en provenance de la région d'El Hamraia

Introduction :

(W.El Oued) , cette saumure est destinée à alimenter le compartiment anodique de l'unité d'électrolyse à membrane pour la production du chlore.

- ✓ La variation des paramètres physico chimiques de l'eau brute après sa filtration par osmose inverse, cette eau est destinée à alimenter le compartiment cathodique de l'électrolyseur pour la production de la soude caustique et l'unité d'acide pour la production de l'acide chlorhydrique.

Et voir en fin, dans quelle mesure le traitement en aval sera-t-il efficace pour la réutilisation de l'eau de rejet totale, composée des eaux résiduaires générées au cours des différentes phases du processus, ou à la limite d'assurer son rejet en respectant les normes environnementales en vigueur.

Pour atteindre l'objectif de cette étude, ce mémoire est développé en deux parties :

La première partie est un cadre purement théorique, constitué par une synthèse bibliographique présentée en trois chapitres. Le premier est consacré à des généralités sur les éléments eau et sel qui sont les deux matières premières de base à transformer par l'entreprise en produits finis. Le second chapitre traite l'industrie du chlore et de la soude caustique ainsi que l'acide chlorhydrique. Le troisième chapitre de la partie théorique donne un aperçu général sur le traitement en amont et en aval des eaux utilisées dans cette dernière.

La deuxième partie de ce mémoire est l'étude pratique réalisée au niveau de l'entreprise FCI, elle propose trois chapitres. Le premier consiste à donner une présentation générale du site avec une description des opérations unitaires du processus de production .Le deuxième est consacré aux matériel et méthodes employés au cours de cette étude .Le troisième regroupe les principaux résultats obtenus, leurs analyses, discussions et interprétations ainsi qu'une approche technique qui expose la solution préconisée qui répond à une meilleure gestion de l'eau par l'entreprise.



Première partie
Etude Théorique &
Synthèse Bibliographique



CHAPITRE 1

Généralités

I. L'eau

I.1. Définitions, propriétés, caractéristiques et qualité

I.1.1. Qu'entend-on par « eau » ?

Le nom de l'eau vient du latin aqua, C'est l'un des composés les plus abondants et essentiels. C'est le seul liquide inorganique naturellement présent sur terre et aussi l'unique composé chimique qui a la particularité de se produire naturellement dans les trois états : solide, liquide et vapeur. L'eau pure ou oxyde dihydrogène (H₂O) est définie comme étant un liquide sans couleur, inodore, et insipide. Elle se compose d'hydrogène et d'oxygène (Figure 1).

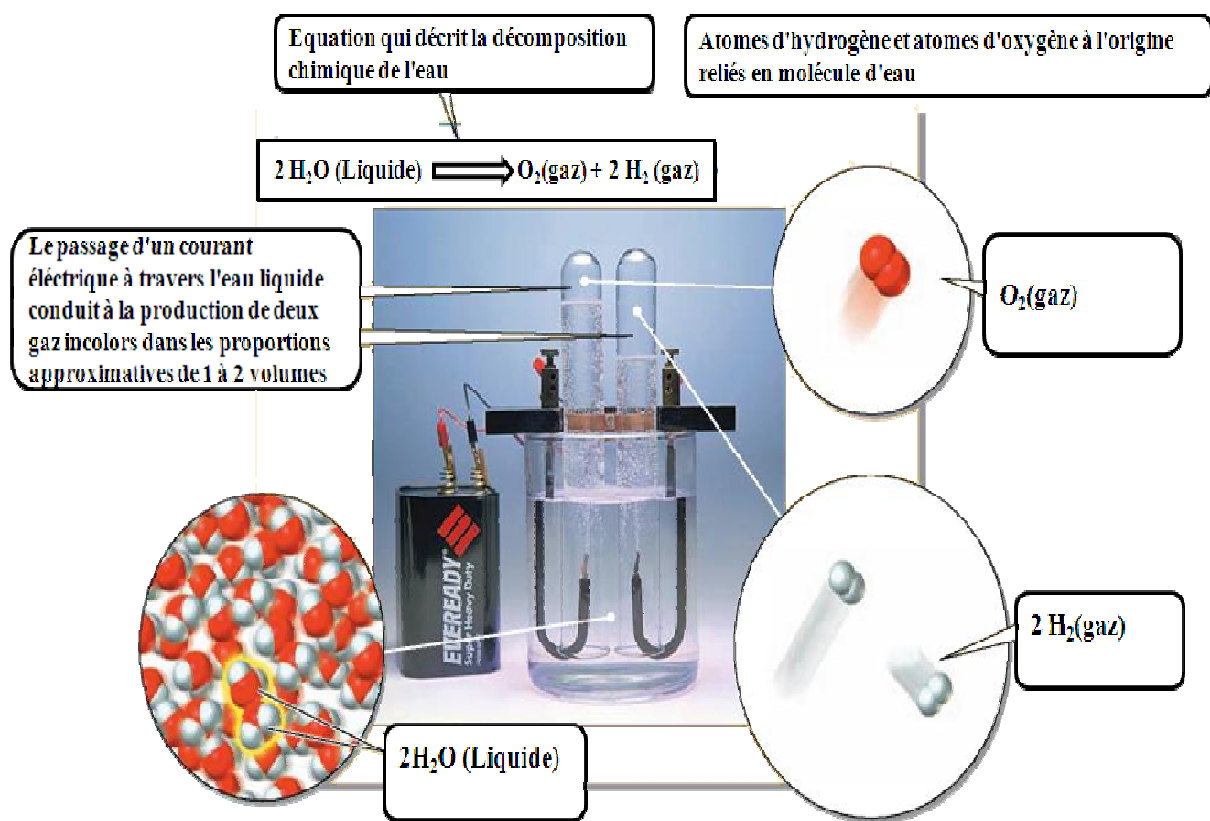


Figure 1. : Décomposition chimique de l'eau

Puisque l'eau devient polluée par les substances avec lesquelles elle entre en contact, elle ne se trouve jamais disponible pour l'usage dans son état pur. À un certain degré, l'eau peut dissoudre beaucoup d'autres substances naturelles sur la terre. En raison de cette propriété, l'eau est qualifiée de « dissolvant universel » [01].

Dans la pratique, le terme « eau » s'applique à différents milieux, qu'il convient de préciser dans chaque cas. Il faut en effet distinguer :

I.1.1.1. Les eaux naturelles

Contenant des substances en solution (minérales : sels & gaz ; matières organiques) et en suspension (colloïdes minéraux et organiques, bactéries, virus) ; elles sont classées comme suit :

A. Leur origine

- ✚ Eaux de pluie ;
- ✚ Eaux douces continentales superficielles, courantes (fleuves, rivières, torrents, ruisseaux, canaux...) ou stagnantes (lacs naturels ou artificiels, étangs, marais, lagunes...) ;
- ✚ Eaux souterraines (nappes phréatiques, alluviales, libres, profondes, eau interstitielle du sol) ;
- ✚ Eaux salées des mers et des océans ;
- ✚ Eaux saumâtres souterraines ou de surface, dont la salinité est intermédiaire entre celle des eaux douces et celle des eaux de mer, ou parfois supérieure à celle des eaux de mer.

B. Leur utilisation

- ✚ Eaux brutes (avant traitement) ;
- ✚ Eaux traitées ;
- ✚ Eaux potables (ou de consommation, ou du robinet) ;
- ✚ Eaux industrielles (de procédé, de chaudières, de refroidissement...) ;
- ✚ Eaux recyclées ;
- ✚ Eaux embouteillées (minérales, de source ou de table, plates ou gazeuses) ;
- ✚ Eaux thermales ;
- ✚ Eaux de piscines ;
- ✚ Eaux géothermiques [02].

I.1.1.2. Les eaux usées (ou résiduaires), urbaines ou industrielles

Les eaux usées sont perçues comme une combinaison d'un ou de plusieurs éléments suivants : les effluents domestiques constitués d'eaux-vannes (excréments, urine, boues fécales) et d'eaux grises (eaux usagées provenant du lavage, de la lessive et du bain) ; les eaux provenant des commerces et institutions, y compris les hôpitaux ; les effluents industriels, les eaux pluviales et autres eaux de ruissellement urbain ; les eaux de ruissellement agricole, horticole et aquacole [03].

Les activités industrielles génèrent selon le ou (les) types de fabrication des rejets polluants continus ou discontinus d'une extrême diversité. Ces rejets par opposition aux eaux usées domestiques présentent des caractéristiques physico-chimiques très variables qui peuvent fluctuer notablement en cours de journée, d'une semaine à l'autre, voire de façon saisonnière pour certaines fabrications. On a affaire à des mélanges de composition hétérogène, qui renferment des matières organiques et minérales à l'état insoluble ou en dissolution, dont certaines peuvent avoir un caractère toxique plus ou moins marqué [04].

I.1.2. Propriétés physiques

Les valeurs des principales constantes physiques de l'eau, dans ses trois états, sont rassemblées dans le (Tableau1.)

Tableau1. : Principales constantes physiques de l'eau pure, dans ses trois états [05].

Eau liquide	
Propriétés	Valeurs
Température d'ébullition sous 760 mm Hg (101 325,02 Pa)	100 °C
Capacité thermique massique à 15 °C	4,186 8 J · g ⁻¹
Enthalpie de vaporisation à 100 °C	2 252,5 J · g ⁻¹
Conductivité thermique à 20 °C	5,98 mW · cm ⁻¹ · K ⁻¹
Résistivité à 20 °C	23,8 MΩ · cm
Constante diélectrique à 20 °C	80
Indice de réfraction pour la raie D à 10 °C	1,33300
Masse volumique à 4 °C	1 g · cm ⁻³ (Par définition)
Eau solide	
Propriétés	Valeurs
Température de fusion	0 °C (Par définition)
Capacité thermique massique	2,093 4 J · g ⁻¹
Enthalpie de fusion sous 760 mm Hg (101 325,02 Pa)	333,27 J · g ⁻¹
Tension de vapeur à 0 °C	877,128 Pa
Constante diélectrique	3,26
Indice de réfraction pour la raie D	1,30907
Densité (par rapport à l'eau à 4 °C)	0,916 49 ± 0,000 7
Eau vapeur	
Propriétés	Valeurs
Conductivité thermique à 100 °C	0,231 mW · cm ⁻¹ · K ⁻¹
Densité par rapport à l'air	0,623 37
Indice de réfraction pour la raie D à 100 °C	1,00259

I.1.3. Propriétés chimiques

L'unité de base de l'eau pure est une molécule composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. Elle correspond à la formule de Lewis, elle est représentée par une forme triangulaire dont la géométrie est indiquée dans (Figure 2).



Figure.2 : Géométrie de la molécule d'eau

La très forte polarisation de la liaison O-H (apparition d'une polarité négative sur l'oxygène ayant tendance à plus attirer les électrons de liaison que l'hydrogène moins électronégatif que lui) jointe à la valeur de l'angle de liaison permet de créer au sein de la molécule un dipôle électrique

permanent, ce qui explique qu'elle soit un bon solvant pour les électrolytes solides, liquides ou gazeux. En effet, l'eau peut dissoudre tous les solides ioniques cristallins, conduisant à des solutions comportant des ions solvatés [06].

I.1.3.1. Pouvoir solvatant

La solvation (c'est l'action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi de nouvelles structures : il se produit une véritable réaction chimique. L'eau s'organise autour des substances en trois couches :

- ✚ Eau liée se fixe solidement sur le soluté
- ✚ Eau structurée engendrée par la précédente s'organise en seconde couche : c'est l'image énergétique du soluté
- ✚ Eau libre à l'extérieur des deux couches précédentes.

I.1.3.2. Ionisation et caractère amphiprotique

La molécule d'eau dans sa forme la plus simple présente un équilibre entre toutes les grandes fonctions chimiques de la nature : acide-base, oxydation-réduction. [07]

L'eau liquide pure est très faiblement dissociée en H_3O^+ et OH^- par l'auto ionisation ; par conséquent tout les composés qui augmentent la concentration des ions positifs H_3O^+ sont acides et les composés qui augmentent la concentration des ions négatifs OH^- sont basiques [08] de ce fait l'eau porte en elle-même la fameuse notion du pH représentée par la relation :

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 7 \quad \text{I}$$

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] = 7 \quad \text{II}$$

Qui est équivalente à la relation suivante [05] :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \quad \text{III}$$

$$[\text{OH}^-] = 10^{-\text{pOH}} \quad \text{IV}$$

L'un des aspects particulier de l'eau est son caractère amphiprotique. Elle doit être considérée non seulement comme une base c'est-à-dire comme un composé producteur d'ions OH^- mais aussi comme un acide, c'est-à-dire comme un producteur d'ions H^+ . La déshydratation de l'ion hydronium H_3O^+ qui est un acide conduit à considérer l'eau comme sa base conjuguée tandis que

la dissociation de l'eau montre que l'ion OH^- peut être considéré comme la base conjuguée de l'eau, alors vue comme un acide. Les deux relations suivantes illustrent cette propriété [09] :



I.1.4. Qualité de l'eau

I.1.4.1. Introduction

La qualité de l'eau est un sujet complexe et de très grande importance dans de nombreux domaines de la vie. C'est une question clé dans l'approvisionnement en eau, le traitement des eaux usées, l'industrie, l'agriculture, l'aquaculture, l'écologie aquatique, la santé humaine et animale...etc. Les gens de différentes professions ont besoin d'information sur la qualité de l'eau. Bien que les principes de la qualité de l'eau soient couverts par des classes spécialisées.

En ce qui concerne les sciences de l'environnement et l'ingénierie, beaucoup de ceux qui ont besoin d'une compréhension générale de la qualité de l'eau ne sont pas exposés aux principes de base de la qualité de l'eau de façon formelle.

Il est impossible de fournir une discussion significative de la qualité de l'eau sans utilisation considérable de la chimie et de la physique afin de mettre l'accent sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques qui contrôlent et évaluent la qualité de l'eau [10].

Remarque

Les paramètres physiques et chimiques d'évaluation de la qualité de l'eau qui sont considérés dans ce mémoire sont seulement ceux qui ont été pris en compte dans notre étude

I.1.4.2. Paramètres physico-chimiques

A. Température

La température de l'eau est la mesure de sa teneur en énergie thermique interne. C'est une propriété qui peut être détectée et mesurée directement avec un thermomètre. Le contenu calorifique est une propriété de capacité qui doit être calculée. La teneur en chaleur est généralement considérée comme la quantité d'énergie supérieure à celle contenue dans l'eau à 0°C . La température de l'eau influe sur beaucoup d'autres paramètres, c'est en premier lieu le cas de l'oxygène dissous. A noter aussi que la température de l'eau est liée au rayonnement solaire et à la température de l'air, il est donc nécessaire de contrôler ce paramètre pour avoir la qualité de l'eau envisagée [11].

B. pH

Le pH est un terme utilisé universellement pour exprimer l'intensité de l'état acide ou alcalin d'une solution. C'est une mesure de la concentration en ions hydrogène, ou plus précisément de l'activité des ions hydrogène. Le pH est défini comme le «logarithme» (base 10) dite logarithme décimal, de la réciproque de la concentration de l'ion hydrogène. Le pH est un facteur important dans la chimie de l'eau puisqu'il entre dans le calcul de l'acidité et de l'alcalinité et des processus tels que : coagulation, désinfection, ramollissement et contrôle de la corrosion. La connaissance du pH est essentielle dans la sélection des coagulants pour la purification de l'eau. Par exemple, le sulfate d'aluminium est plus efficace à un pH de 6,7, alors que le sulfate ferreux coagule bien à un pH plus élevé. Les valeurs de pH théoriques sont les paramètres largement utilisés pour évaluer le caractère d'une eau, soit corrosive ou ayant tendance à former des dépôts. Maintenir le bon pH de l'eau est très essentiel dans les opérations industrielles [11].

Théoriquement le pH est déterminé par la méthode suivante :

$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$	et	$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$
Le produit ionique de l'eau donne :		$[\text{OH}^-][\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-14}$
Alors :		$\log [\text{OH}^-][\text{H}_3\text{O}^+] = -14$
		$\log [\text{OH}^-] + \log [\text{H}_3\text{O}^+] = -14$
		$-\log [\text{OH}^-] - \log [\text{H}_3\text{O}^+] = 14$
D'où :		$\text{pOH} - \text{pH} = 14$

Milieux acides	Milieux neutres	Milieux basiques
$\text{pH} < 7$	$\text{pH} = 7$	$\text{pH} > 7$
$\text{pOH} > 7$	$\text{pOH} = 7$	$\text{pOH} < 7$

C. Matière en suspension

Les matières en suspension (MES) représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont de formes hétérogènes et d'origines variées, dans les eaux de surface elles dépendent de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, du régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc. Dans les eaux de forage, elles sont généralement formées de sable fin, fer oxydé et quelques algues filamenteuses [12].

Les MES s'obtiennent soit par filtration des effluents peu chargés soit par centrifugation des solutions, séchage jusqu'à obtenir un résidu sec. Compte tenu de l'origine domestique des effluents. La mesure des MES par filtration repose sur le principe de la double pesée : un volume

d'eau est filtré sur une membrane (préalablement pesée à vide) de 1,5 microns et les résidus sur cette dernière sont pesés. Le rapport de la différence de masse sur le volume d'eau filtré donne la concentration des MES en milligramme/litre. La concentration des matières en suspension est déterminée au laboratoire en suivant la démarche suivante :

- ✚ Prendre une membrane GFC et la marquer avec précaution pour ne pas l'abîmer ;
- ✚ Peser la membrane et noter sa masse à vide M_0 ;
- ✚ Placer la membrane sur la rampe de filtration ;
- ✚ Bien agiter l'échantillon ;
- ✚ Prélever un volume de l'échantillon et le transvider sur la membrane ;
- ✚ Procéder à la filtration : le volume filtré ne doit pas dépasser 1 litre et la filtration ne doit pas durer plus d'une demi-heure ;
- ✚ Récupérer la membrane après la filtration, puis la placer dans une étuve à 105°C pendant 1h30 mn pour enlever l'excès d'eau ;
- ✚ Peser de nouveau la membrane, après séchage, puis noter sa masse M_1 ;

Le rapport entre la différence des masses et le volume filtré donne la concentration de matières en suspension dans l'échantillon. On applique la formule suivante [13] :

$$C_{MES} = (M_1 - M_0) / V$$

Où

C_{MES} = Concentration des MES en mg/l ; M_0 = Masse de la membrane GFC avant filtration

M_1 = Masse de la membrane après filtration ; V = Volume de l'échantillon filtré

D. Turbidité

La turbidité est l'un des principaux paramètres de détermination de la qualité de l'eau. En effet, la clarté et la transparence de l'eau sont l'image d'une haute qualité de l'eau pour la plupart des personnes [14]. C'est une expression de la propriété optique d'un échantillon (eau ou eaux usées) contenant des substances insolubles qui font que la lumière est diffusée plutôt que transmise en ligne droite. Dans la plupart des eaux, la turbidité est due à des dispersions colloïdales et extrêmement fines. Les matières en suspension telles que l'argile, le limon, les matières organiques et inorganiques finement divisées, le plancton et d'autres organismes microscopiques contribuent également à la turbidité. Les composés de fer et de manganèse sont des contributeurs importants à la turbidité. La turbidité est une caractéristique de la plupart des eaux de surface. Les eaux souterraines ne sont généralement pas troubles.

La turbidité est un facteur important dans l'approvisionnement public en eau pour les raisons suivantes :

- ✚ Esthétiquement la turbidité est vulnérable ;
- ✚ La filtration de l'eau est rendue difficile lorsque la turbidité augmente. Comme la turbidité raccourcit le fonctionnement du filtre, le fonctionnement satisfaisant des lits filtrants devient impossible ;
- ✚ Il y a des chances que les organismes pathogènes soient enfermés dans les particules responsables de la turbidité et ils ne peuvent pas être exposés au désinfectant.

La plupart des procédés industriels ont besoin d'eau pratiquement exempte de turbidité [11].

Le principe de mesure de la turbidité est basé sur la méthode suivante : Une source lumineuse traverse l'échantillon d'eau (Figure 3). Les particules réfléchissent une partie de la lumière. La turbidimétrie consiste à mesurer l'intensité de la lumière réfléchie à 90° par un liquide. Cette réflexion dépend de la densité et des propriétés des particules (taille, forme, couleur).

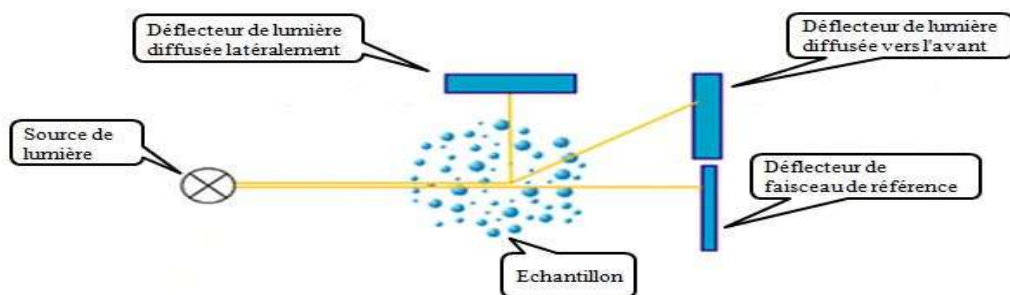


Figure3. : Schéma du principe de la mesure la turbidité

$$\text{Turbidité} = \frac{\text{Intensité de lumière diffusée à } 90^\circ}{\text{Intensité du faisceau de référence}}$$

VI

En pratique, l'instrument utilisé pour mesurer l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90° par rapport au trajet de la lumière incidente est le turbidimètre néphélométrique.

L'unité de turbidité utilisée est le : NTU (Nephelometric Turbidity Unit) qui correspond à la mesure de la lumière diffusée par une suspension étalon de formazine.

Les classes de turbidité usuelles

Turbidité < 5	Eau claire
5 < Turbidité < 30	Eau légèrement trouble
Turbidité > 50	Eau trouble

E. Le Calcium

Le calcium est un élément alcalinoterreux, Il résulte de la dissolution des carbonates en présence du gaz carbonique dans l'eau. Selon le processus suivant :

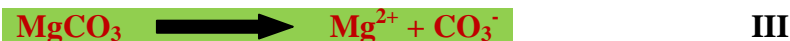


Le calcium est parmi les substances les plus couramment rencontrées dans l'eau. Sa présence est principalement due au passage de l'eau à travers ou sur les dépôts de calcaire, dolomite, gypse et autres matériaux gypsifères. C'est un élément essentiel et le corps humain a besoin d'environ 0,7 à 2,0 g de calcium par jour en tant qu'élément alimentaire. Cependant, les eaux à forte teneur en calcium ne sont pas souhaitables dans beaucoup d'industries surtout celles utilisant des circuits de chauffage ou de refroidissement [11, 15].

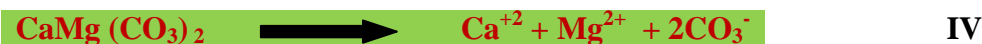
F. Le Magnésium

Le magnésium est un élément qui accompagne souvent le calcium. La mise en solution de cet ion dans l'eau prend beaucoup de temps, il provient de la dissolution des roches magnésiennes, dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens, il provient aussi des formations métamorphiques tels que les micaschistes. Le processus de dissolution se fait selon les formules suivantes :

Magnésite



Dolomite



Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, sa teneur dépend de terrain traversé, il dépasse rarement 15 mg/l dans les eaux naturelles, par contre dans les eaux minérales, il peut largement dépasser cette valeur [11,15].

G. Les Chlorures

Les chlorures sont les anions communs trouvés dans l'eau et les eaux usées. Leur concentration dans les eaux naturelles varie de quelques milligrammes à plusieurs milliers de milligrammes par litre. Une concentration plus élevée de chlorure peut être due à la contamination par l'eau de mer, les saumures, les eaux usées ou les effluents industriels. Par conséquent, toute augmentation de la concentration des chlorures par rapport à la normale indique une pollution. Les chlorures à des concentrations inférieures à 50 mg/l n'ont pas d'effets néfastes sur la plupart des utilisations industrielles. Cependant, des concentrations élevées exercent un effet néfaste sur les tuyaux et les

structures métalliques car elles favorisent la corrosion des surfaces métalliques. Par conséquent, la concentration des chlorures doit être soigneusement contrôlée dans les systèmes où ces matériaux sont utilisés [11, 15].

H. Les Sulfates

Les ions sulfates proviennent de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (CaSO_4) et par l'oxydation des sulfures en sulfates dans les déchets miniers. Ils sont relativement abondants dans les eaux naturelles. La teneur en sulfate des sources d'eau municipales et industrielles est généralement augmentée pendant la clarification, car le (sulfate d'aluminium) est généralement ajouté comme coagulant. Les sulfates dans les eaux industrielles provoquent des problèmes d'entartrage potentiels au niveau des chaudières et des échangeurs de chaleur [11, 15].

I. Le Sodium

Le sodium est présent dans la plupart des eaux naturelles à des concentrations négligeables voir jusqu'à appréciables. Sa teneur dans l'eau varie dans une large gamme de moins de 5 mg/l dans l'eau douce à plusieurs milliers de milligrammes par litre dans les saumures. Le sodium présent en concentration normale n'interfère pas dans les processus industriels. En raison de l'extrême solubilité des sels de sodium, ils ne forment pas de dépôt. Cependant, le sodium devient important lorsque la salinité ou les solides dissous totaux sont pris en compte dans l'utilisation de l'eau. La concentration de sodium devient un facteur important dans les eaux de chaudière où la proportion de sodium est élevée par rapport aux autres cations présents. Il est également rapporté que si la concentration de sodium dans l'eau de chaudière dépasse 50 mg/l, des problèmes de moussage peuvent survenir. Le chlorure de sodium et d'autres sels de sodium dans l'eau contribuent fortement au taux de corrosion du fer et de l'acier [11].

J. Le Fer

Bien que le fer se trouve à proximité de l'aluminium dans l'abondance des métaux dans la croûte terrestre, les eaux naturelles ne contiennent que des quantités mineures de fer. Cependant, la teneur en fer de certains puits profonds et des cours d'eau contaminés par l'industrie peut être très élevée. Le Fer se présente généralement dans l'eau sous forme ferreuse ou de bicarbonate ferreuse incolore et soluble qui lors de l'exposition à l'air s'oxyde et rend l'eau trouble suite à la formation d'un précipité brun jaunâtre à brun rougeâtre de l'hydroxyde ferrique. Tous les procédés industriels nécessitent de l'eau pratiquement exempte de fer afin d'éviter l'encrassement qui se produit en raison du dépôt d'oxyde de fer ou par la réaction du fer avec des produits

chimiques de traitement. Le fer est parmi les éléments les plus gênants dans l'eau car il est un agent responsable d'un encrassement important des résines échangeuses d'ions pendant l'adoucissement de l'eau. Les précipités de fer causent des problèmes de colmatage et recouvrent la surface de la résine, ce qui entraînerait une perte importante de la capacité d'échange. Les traces de fer dans l'eau conduisent aussi à l'accumulation des dépôts dans les conduites de distribution et sont très gênants. Dans de telles conditions, des croissances de bactéries de fer se développent souvent dans le réseau de distribution, provoquant des difficultés telles que le blocage des canalisations et des conduites, réduisant ainsi leur capacité de transport. Les précipités de fer sont fréquemment remis en suspension par des débits accrus conférant une haute turbidité à l'eau [11].

K. Les Nitrites

Dans l'eau, les nitrites sont généralement formés par l'action des bactéries sur l'ammoniac et l'azote organique. Les bactéries formant des nitrites convertissent l'ammoniac en nitrite dans des conditions aérobies. Parfois, les nitrites sont également produits par la réduction des nitrates dans des conditions anaérobies. Par conséquent, la présence de nitrite dans l'eau indique une pollution organique c'est-à-dire plus précisément, indique que la matière organique azotée subit une oxydation ou une nitrification et que le processus n'est pas complet. En raison du fait que les nitrites sont facilement oxydés en nitrates, ils sont rarement présents en concentrations significatives dans les eaux de surface ou autres eaux naturelles. Les composés de nitrite sont ajoutés comme inhibiteurs de corrosion aux eaux de refroidissement et aux eaux de traitement industrielles [11].

L. Les Nitrates

Les nitrates sont les produits finaux du cycle de l'azote organique et se produisent généralement à l'état de traces dans les eaux de surface, mais peuvent atteindre des niveaux élevés dans certaines eaux souterraines. D'autre part, les nitrates sont utilisés dans la protection contre la corrosion (comme inhibiteurs) [11].

M. La Demande biologique en oxygène (DBO_5)

La DBO_5 est la mesure de la consommation d'oxygène d'un effluent après cinq jours d'incubation à 20°C. La consommation d'oxygène de l'échantillon provient de la dégradation des molécules organiques et de l'oxydation des molécules inorganiques comme les sulfures, les ions ferreux et les différentes formes de composés azotés. Sa détermination est exigée dans les

règlements sur les attestations d'assainissement en milieu industriel. La DBO₅ est, en fait, une mesure de la quantité d'oxygène consommée par les bactéries hétérotrophes pour l'oxydation de la matière organique. Elle est exprimée en mg O₂/l ; plus la quantité de matière organique dans l'eau est élevée, plus la valeur de la DBO₅ est élevée. Bien qu'il existe différentes méthodes de mesure de la DBO₅, le principe est le même pour toutes.

Un volume d'échantillon d'eau est placé dans un récipient (Figure 4) où les variations de la teneur en oxygène sont mesurées avant et après l'incubation à 20°C pendant un certain temps. Le manomètre mesure la baisse de pression à l'intérieur du récipient causée par la consommation d'oxygène.

L'hydroxyde de sodium (NaOH) est ajouté pour absorber le dioxyde de carbone produit dans le processus, ce qui pourrait interférer dans la mesure de la pression. La masse d'oxygène consommée est calculée théoriquement en utilisant la loi des gaz parfaits.

$$\text{Masse d'O}_2 \text{ (mg/l)} = V \times (P_{\text{initiale}} - P_{\text{finale}}) / R \times T \quad \text{VII}$$

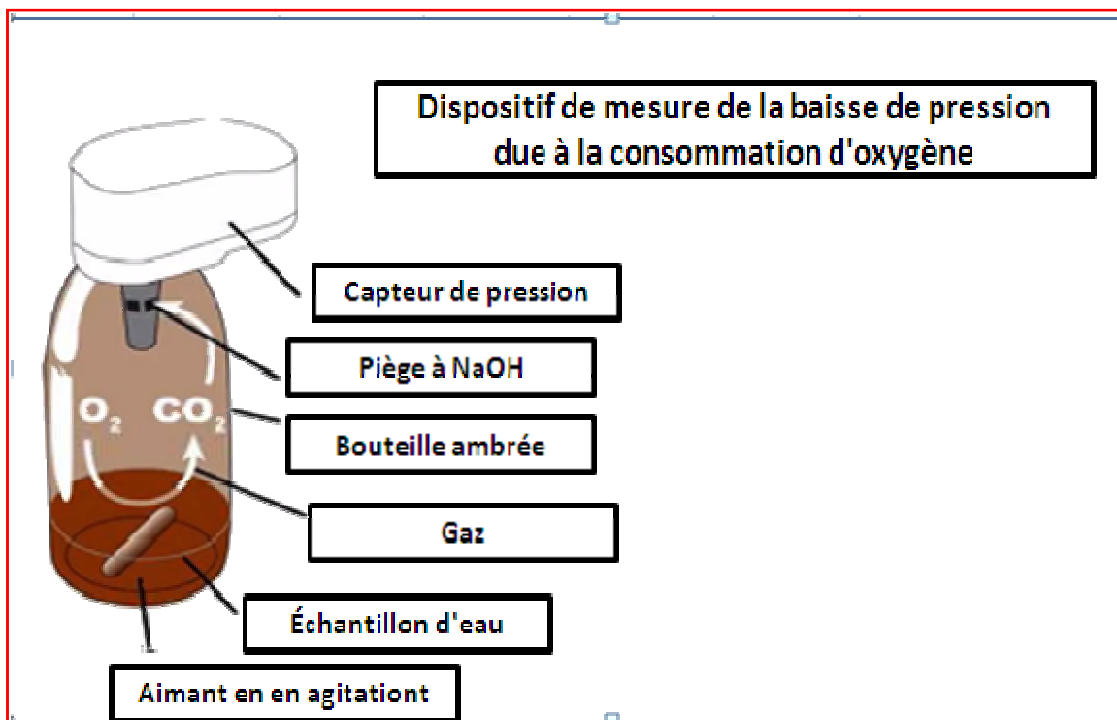


Figure4. : Schéma du principe de la mesure de DBO₅

A l'échelle de laboratoire, cette valeur est déterminée par l'usage de la table fournie par le fabricant (Tableau2.) de l'appareil, qui établit le volume spécifique de l'échantillon à considérer pour chaque plage de DBO₅.

Pour garantir que nous serons toujours dans une plage valide, il est recommandé d'utiliser trois volumes différents pour chaque échantillon. Une fois que les valeurs des limites manométriques ont été notées, une étape supplémentaire est nécessaire pour obtenir la valeur finale de la DBO₅.

Tableau2. : Plages d'estimation de DBO₅ et facteurs fournis par le fabricant du dispositif manométrique

Volume de l'échantillon (ml)	Facteur	Plages d'estimation de la DBO ₅ (mg O ₂ /l)
22,7	100	0-4000
43,5	50	0-2000
97	20	0-800
164	10	0-400
250	5	0-200
365	2	0-80
432	1	0-40

A cet effet nous utiliserons la formule suivante [13]:

$$\text{DBO}_5 \text{ (mgO}_2\text{/l)} = \text{Facteur} \times \text{Pression indiquée par le manomètre} \quad \text{VIII}$$

N. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique et inorganique oxydable contenue dans un échantillon. Ce paramètre donne une estimation de la quantité de polluants présents dans un effluent industriel ou une eau usée. Les eaux d'un effluent industriel dont la DCO est élevée peuvent provoquer des problèmes de diminution de la concentration d'oxygène dans des cours d'eau. La valeur de la DCO peut également servir d'indicateur pour les dilutions nécessaires lors de la mesure de la demande biochimique en oxygène. La matière oxydable contenue dans un échantillon est oxydée par chauffage à reflux en milieu fortement acide avec une quantité connue de bichromate de potassium dans une éprouvette fermée. La matière oxydable dans l'échantillon qui réagit avec le bichromate de potassium provoque un changement de couleur dont l'absorbance est proportionnelle à la quantité de bichromate de potassium réduit et se mesure en équivalent d'oxygène. La DCO peut être réalisée plus rapidement que la DBO₅ (oxydation « forcée ») et donne une image de la matière organique présente, même quand le développement de micro-organismes est impossible (présence d'un toxique par exemple). Le résultat s'exprime en mg/l d'O₂. La DCO est donc un paramètre important car elle donne une vision immédiate du fonctionnement de la station de traitement des eaux par la différence entre la DCO d'entrée et de sortie de la station, elle permet en outre à l'administration d'établir les redevances et de définir la valeur limite du rejet [16].

O. Dureté (Titre hydrotimétrique)

La dureté de l'eau est conditionnée par sa teneur en sels des métaux alcalino-terreux. Les plus communs de ces ions causant la dureté sont le calcium et le magnésium ; d'autres incluent le fer,

le strontium et le baryum. Les deux principaux constituants de l'eau qui déterminent la dureté sont le calcium et le magnésium. Si la concentration de ces éléments dans l'eau est connue, la dureté totale de l'eau peut être calculée. Pour faire ce calcul, il faut connaître les poids équivalents de calcium, de magnésium et de carbonate de calcium ; Leurs valeurs sont données le (Tableau 3.).

Tableau3 : Poids équivalents (gr) des constituants responsables de la dureté de l'eau

Calcium (Ca)	20.04
Magnésium (Mg)	12.15
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	50.045

1. Calcul de la dureté Calcique en CaCO₃

La dureté (en mg / l de CaCO₃) pour un ion métallique donné est calculée en utilisant l'équation :

$$\frac{\text{Dureté Calcique (mg/l) en CaCO}_3}{\text{Poids équivalent de CaCO}_3} = \frac{\text{Calcium (mg/l)}}{\text{Poids équivalent de Calcium}} \text{ IX}$$

2. Calcul de la dureté Magnésienne en CaCO₃

$$\frac{\text{Dureté Magnésienne (mg/l) en CaCO}_3}{\text{Poids équivalent de CaCO}_3} = \frac{\text{Magnésium (mg/l)}}{\text{Poids équivalent de Magnésium}} \text{ X}$$

3. Calcul de la dureté Totale en (mg/l)

Pour trouver la dureté totale, on ajoute simplement les concentrations en ions calcium et magnésium, exprimées en carbonate de calcium CaCO₃[17].

$$\text{Dureté totale en CaCO}_3 = \text{dureté calcique en CaCO}_3 + \text{dureté magnésienne en CaCO}_3 \text{ XI}$$

Précisons que [18]. :

$$1 \text{ mg CaCO}_3/\text{l} = 2.497 \times [\text{Ca}(\text{mg/l})] + 4,118 \times [\text{Mg}(\text{mg/l})] \text{ XII}$$

Il existe plusieurs unités de mesure de la dureté de l'eau, la plus utilisée est le degré français symbolisé par (°f)

$$1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg CaCO}_3/\text{l} \text{ XIII}$$

Les eaux sont classées en différents types en fonction du degré de dureté (Tableau 4.).

Tableau4 : Classification des eaux en fonction du degré de dureté

Dureté en °f	Dureté en mg/l de CaCO ₃	Qualification de l'eau
0 - 3	0 – 30	Très douce
3 - 6	31 – 60	Douce

6 - 12	61 – 120	Moyennement douce
12 - 18	121 – 180	Dure
> 18	> 180	Très dure

P. Conductivité

La conductivité (γ) exprime la propriété d'un matériau de conduire le courant électrique. Dans les cas des métaux, c'est le mouvement des électrons qui assure le passage du courant. La conductivité électrique dans les liquides est due à la dissociation des sels, des acides et des bases, qui engendrent la formation de cations chargés positivement et d'anions chargés négativement (Figure 5)

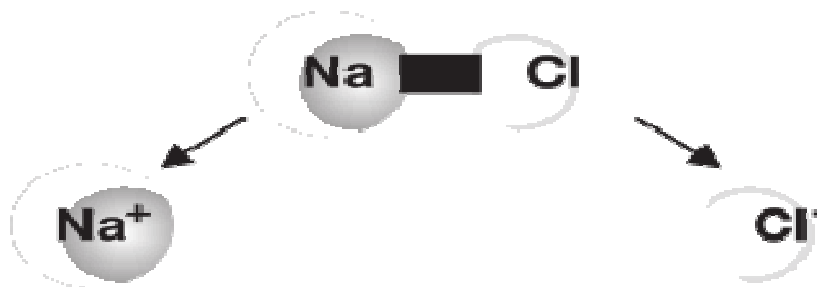


Figure 5. : Décomposition du sel (NaCl) en ions Na⁺ et Cl⁻

Ces ions contribuent au transfert des charges dans le champ électrique et donc à la circulation du courant, comme les électrons dans un métal. Plus que le liquide contient d'ions, mieux il conduit le courant. Cette relation entre la concentration en ions et la capacité de conduire le courant électrique fait de la conductivité une grandeur intéressante à mesurer dans l'analyse de l'eau. Elle convient très bien pour déterminer la concentration en sels dissous. La mesure de conductivité s'exprime en siemens par mètre (S/m). En pratique, les unités usuelles sont les sous-multiples μ S/cm et mS/cm (Tableau5.).

Tableau 5. : Conversion des unités de conductivité électrique

Unité	S/m	S/cm	mS/cm	μ S/cm
S/m	1	0.01	10	10000
S/cm	100	1	1000	1000000
mS/cm	0.1	0.001	1	1000
μ S/cm	0.0001	0.000001	0.001	1

Le principe de base de la mesure de conductivité est le même dans toutes les méthodes : l'appareil de mesure applique une tension électrique à la solution à mesurer. Un courant électrique circule en fonction de la conductivité. Suivant la méthode ou l'application, l'appareil de mesure impose une tension constante et enregistre la variation du courant électrique ou bien l'appareil de mesure impose un courant constant et évalue la variation de tension. Les deux cas s'appuient sur la loi d'Ohm.

$$R = U / I = 1 / G \quad \text{XIV}$$

Où :

R = Résistance électrique ;

I = Intensité du courant électrique ;

U = Tension électrique ;

G = Conductance

$$\gamma = k \times I / U \quad \text{XV}$$

Où :

γ = Conductivité électrique (spécifique) ;

I = Intensité du courant électrique ;

U = Tension électrique ;

K = Constante de cellule

Pour déterminer la valeur de la conductivité on utilise des principes de mesure dits conductifs et inductifs :

1. Principe de mesure, conductif

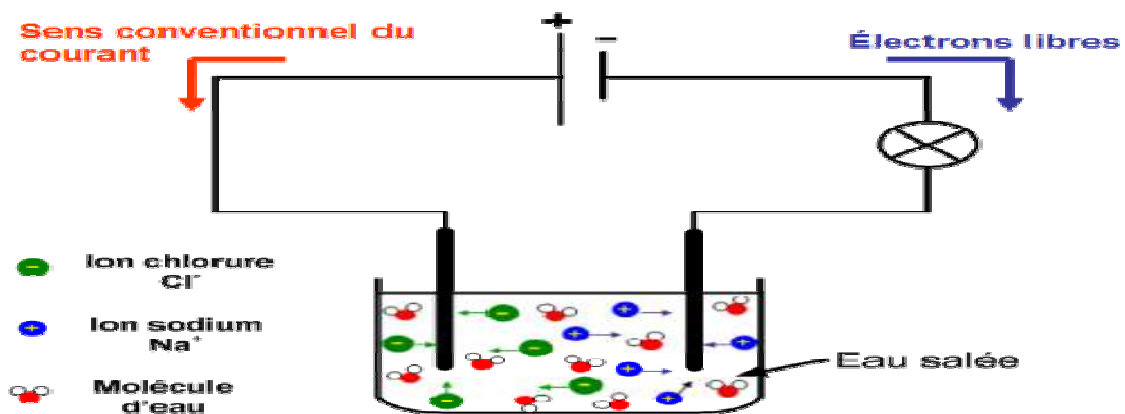


Figure6. : Schéma du principe conductif de mesure la conductivité

Deux électrodes sont placées l'une en face de l'autre (Figure 6) , un courant alternatif est appliqué aux électrodes, ce qui génère un courant dans le milieu, les cations se déplacent vers l'électrode chargée négativement et les anions vers l'électrode chargée positivement, plus que le liquide contient des ions plus que la conductivité électrique et le courant sont élevés, toutefois si la concentration en ions devient trop élevée, la force de coulomb augmente, cette force électrostatique engendre la répulsion mutuelle des ions et donc une diminution du courant, cet effet est appelé polarisation, il se produit dans des milieux à forte concentration. La résistance électrique ou sa valeur inverse, la conductivité, est calculée à partir du courant mesuré selon la loi d'Ohm. Pour déterminer la conductivité électrique à partir de la conductivité, il convient de calculer ce que l'on appelle la constante de cellule k , elle dépend de la géométrie des électrodes et de leurs surfaces et varie en fonction de la gamme de mesure.

$$k = L / A \quad \text{XVI}$$

Où :

k = Constante de cellule ;

L = Longueur du conducteur ;

A = Section du conducteur

La conductivité dépend aussi de la température du milieu ainsi la température est mesurée en parallèle, le transmetteur compense la conductivité par rapport à une température de référence de 25°C. Les capteurs conductifs (Figure 7) ont une conception simple et sont très sensibles, ce qui les rend compatibles avec un grand nombre d'applications, de l'eau ultra pure à l'eau potable et bien d'autres.



Figure7. : Capteur conductif

2. Le principe de mesure, inductif

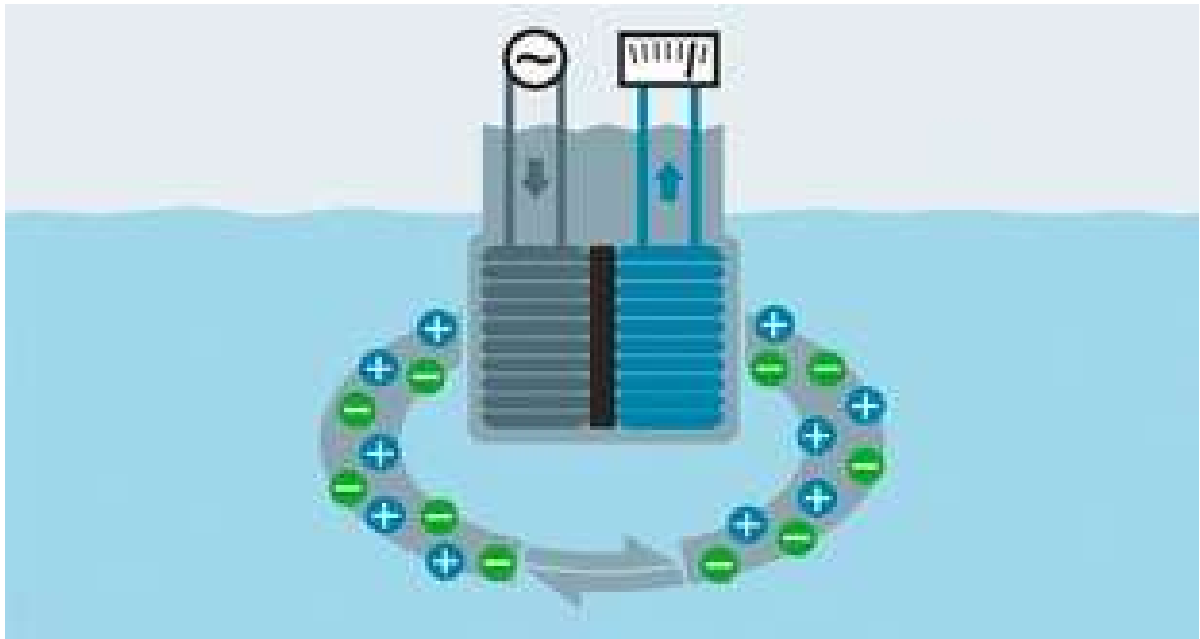


Figure8. : Schéma du principe inductif de mesure la conductivité

Ce principe (Figure 8), utilise le capteur de conductivité par induction, il renferme une bobine de transmission et de réception électromagnétique dans un corps de protection en plastique (Figure 9).



Figure9. : Capteur inductif

Un champ magnétique alternatif est généré dans la bobine de transmission qui induit une tension électrique dans le liquide, cela provoque le déplacement des ions positifs et négatifs et génère un courant alternatif, ce courant induit à son tour un champ magnétique alternatif et donc le passage du courant dans la bobine de réception. L'intensité du courant dépend du nombre d'ions libres dans le milieu, elle est mesurée par le capteur et permet le calcul de la conductivité électrique.

L'avantage de la mesure inductive de la conductivité est l'isolation galvanique par rapport au milieu, elle empêche les effets de polarisation et insensible à la salissure [19].

I.2. Ressources hydriques locales

I.2.1. Système aquifère du Sahara septentrional

Le système aquifère du Sahara septentrional, Sahara du nord africain (Figure 10), renferme des réserves d'eau considérables qui sont cependant peu renouvelables et ne sont pas exploitables en totalité [20].



Figure10. : Zone aquifère du Sahara septentrional

La cuvette d'Ouargla fait partie de ce système, elle correspond à une grande dépression, qui s'étend sur une superficie d'environ 990 Km² [21].

La reconnaissance lithologique et géométrique des formations aquifères relatives à cette cuvette s'avère d'une importance majeure pour comprendre les mécanismes par lesquels les eaux souterraines acquièrent leur composition et propriétés physicochimiques. La litho-stratigraphie des aquifères est connue grâce aux forages profonds d'exploitations hydraulique et pétrolière. Elle révèle quatre niveaux de formations aquifères, à savoir :

- ✚ Les grès et les argiles sableuses de la nappe de l'Albien du Continental Intercalaire (CI), d'une épaisseur de 600 m environ, située à 1000 m de profondeur ;
- ✚ Les calcaires, avec la nappe du Sénono-Eocène carbonatés, d'épaisseur de 300 m, sise à une profondeur de 200 m ;
- ✚ L'ensemble détritique (sables, argiles, et évaporites) des formations continentales, avec la nappe du Mio-Pliocènes, située entre 20 et 100 m de profondeur et d'épaisseur de 100 m environ ;
- ✚ Les sables du Quaternaire avec la nappe superficielle, située à une profondeur de 2 m en moyenne.

La cuvette de Ouargla renferme dans son sous sol trois grandes nappes d'eau appartenant aux systèmes aquifères dits, complexe terminal et complexe intercalaire, on distingue :

I.2.1.1. La nappe Phréatique

S'écoule du Sud vers le Nord suivant la pente de la vallée. Elle est alimentée par les eaux souterraines, les eaux de drainage, les eaux usées urbaines, les précipitations et les rares apports des Oueds. Cette nappe n'est pas exploitée pour la consommation humaine en raison de sa salinité élevée variant entre 7 et 25 g/l.

I.2.1.2. La nappe du complexe terminal

Cet aquifère couvre une superficie de 350.000 Km². Il est subdivisé en deux nappes :

A. La nappe du Miopliocène « nappe des sables »

Cette nappe s'écoule du Sud-ouest vers le Nord Est. Son épaisseur moyenne utile varie de quelques dizaines de mètres à 300 m, soit une moyenne de 100 m à travers la région. La profondeur moyenne d'un forage non jaillissant utilisé pour capter cette nappe est de 100 à 250 m. Les débits exploités sont de l'ordre de 30 l/s. Les eaux de cette nappe sont de faciès chloruré sodique ou sulfaté sodique. Elles sont caractérisées par une température variant de 23°C à 25°C et une salinité allant de 1,8 à 4,6 g/l

B. La nappe Eocène-Sénonien « nappe des calcaires »

Possède une épaisseur moyenne utile variant de 150 à 250 m. La profondeur moyenne d'un forage non jaillissant utilisé pour capter cette nappe varie de 180 à 350 m. Les débits exploités sont de l'ordre de 54 l/s. Ces eaux sont caractérisées par une température de l'ordre de 30°C et une salinité variant de 1,8 à 4,4 g/l

I.2.1.3. La nappe du continentale intercalaire

Cette nappe dite Albienne s'écoule suivant deux axes principaux Nord-Ouest/Sud-est et Nord-Ouest/Sud sur une superficie de 800.000 Km². Les débits exploités sont de l'ordre de 200 l/s. Les eaux de cet aquifère qui sont du faciès sulfaté sodique présentent une salinité variant de 1,5 à 2 g/l et une température variant de 51°C à 66°C [22].

I.2.2. Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines locales

Afin de donner un aperçu sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Sahara septentrionale Algérien, une étude a été réalisée au niveau du laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface de l'université de Biskra (LARHYSS) sur un nombre

d'échantillons suffisamment représentatif, 118 prélèvements ont été effectués au niveau des aquifères exploités dans les régions d'Ouargla, Touggourt, El Oued, Biskra.

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés de la nappe des calcaires (Sénonien) dans la région d'Ouargla sont regroupés dans le (Tableau 6.).

Le tableau présente les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'Ouargla. Nous précisons que les résultats retenus sont seulement ceux qui ont été pris en considération dans notre étude à savoir les valeurs physico-chimiques correspondant à la nappe du calcaire (Eocène-Sénonien).

Tableau 6. : Analyse physico-chimique de la nappe (Eocène-Sénonien) Région d'Ouargla

[23]

pH	Conductivité μS/cm	TH (°F)	Ca ²⁺ (g/l)	Mg ²⁺ (g/l)	Na ⁺ (g/l)	K ⁺ (g/l)	HCO ³⁻ (g/l)	Cl ⁻ (g/l)	SO ₄ ²⁻ (g/l)	F ⁻ (g/l)
7.58	1900	102	0.25	0.10	0.23	0.014	0.12	0.36	0.62	0.00

I.3. L'eau et l'industrie

I.3.1. Introduction

La gamme d'utilisation de l'eau dans l'industrie est extrêmement variables, tant en quantité qu'en qualité. La présence d'une ressource en eau abondante et de bonne qualité est souvent un facteur déterminant pour les entreprises dans le choix de leurs sites d'implantation. En 2014, la consommation industrielle d'eau représentait environ 20 % de la consommation mondiale, soit un volume d'eau prélevée dans le monde de 800 km³. D'après l'étude Mc Kinsey « *Charting our water future* » parue en novembre 2009, ce chiffre devrait passer à 1 500 km³ en 2030.

Cette consommation d'eau varie selon les pays et les secteurs d'activité. Toute l'eau utilisée par l'industrie n'est pas forcément consommée, elle peut parfois être rejetée dans le milieu après avoir servi. Les industries de transformation sont les plus gourmandes en eau. La qualité requise pour l'eau Industrielle dépend de la nature d'activité.

En Algérie, les potentialités en eau sont estimées à 18 milliards de m³ / an, la répartition de consommation annuelle est indiquée dans le (Tableau7.).

Tableau7. : Répartition de la consommation annuelle d'eau en Algérie [24].

Secteur d'activité	Taux de consommation
Secteur Agricole (Irrigation)	62 %
Alimentation en eau potable	35 %
Industrie	03 %

Par ailleurs, les exigences croissantes en matière de protection des ressources et de l'environnement (normes de rejet, taxes...) se conjuguent pour imposer aux industriels une gestion toujours plus rigoureuse de leur eau qui implique de plus en plus souvent des utilisations en cascade et/ou des systèmes de recyclage ou de réutilisation, soit internes à un atelier, soit au niveau de tout un site industriel. Ceci explique les très grandes variations des prélèvements d'eau notés d'un site à l'autre.

I.3.2. Utilisation de l'eau et ses fonctions en industrie

Les trois grandes classes d'utilisations de l'eau en industrie peuvent être résumées dans ce qui suit :

I.3.2.1. L'eau est une utilité

Elle participe de façon indirecte à la production en tant que fluide thermique (production de vapeur, eau chaude, eau de refroidissement...). Pour cet usage, l'eau véhicule et échange la chaleur et le froid au sein d'un site industriel. Les contraintes de qualité de l'eau dans ce type d'applications ne sont pas dépendantes de la nature de l'industrie, mais sont liées aux caractéristiques intrinsèques de la chaudière, du circuit de refroidissement.

I.3.2.2. L'eau intervient en amont du processus de fabrication

Ce sont les opérations de lavage et de transport des matières premières.

I.3.2.3. L'eau intervient dans le processus de fabrication

L'eau est utilisée au sein même des procédés industriels comme solvant, matière première, agent de fabrication ou fluide de nettoyage des équipements ou du produit fabriqué. Dans ces applications, les critères de qualité de l'eau dépendent directement du procédé industriel et sont spécifiques aux industries concernées. Des spécifications qualitatives sont alors émises soit par les centres techniques du métier, soit par les services ingénierie des grands groupes industriels, soit également par la réglementation [25].

I.4. Le sel (NaCl)

I.4.1. Définition, propriétés générales, ressources et usage industriel

I.4.1.1. Définition et propriétés générales

Le sel de cuisine est le nom commun du chlorure de sodium, un composé chimique naturel quasi inépuisable, c'est une substance composée de 40 % de sodium et de 60 % de chlore. En solution aqueuse, ces deux éléments évoluent librement sous forme des ions. A l'état solide, ils constituent, un cristal de couleur blanche (Figure 11.).

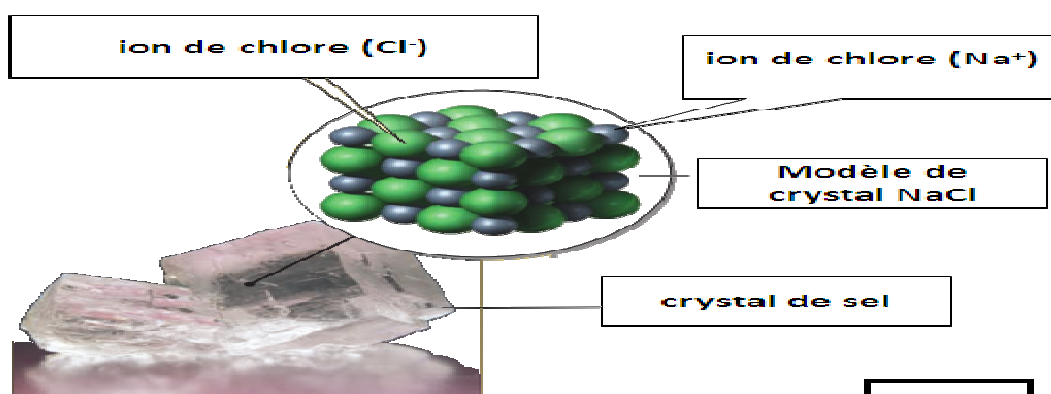


Figure 11. : Cristal de NaCl

1 gramme de sel (NaCl) = 400 mg de sodium (Na) + 600 mg de chlore (Cl)

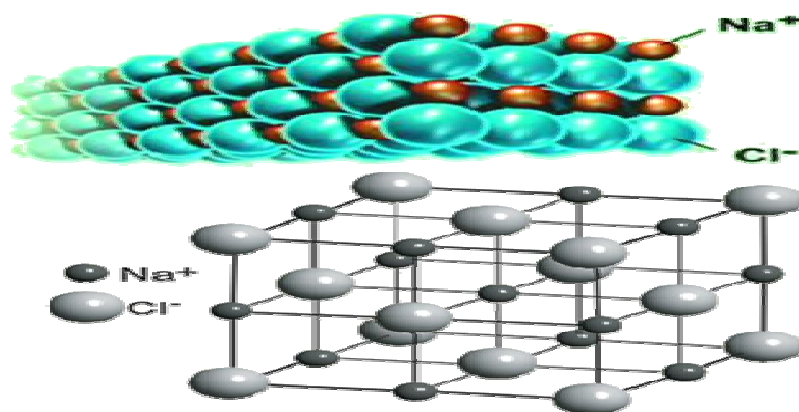


Figure 12. : Système de cristallisation de NaCl

Le sel est rarement pur ; il renferme ordinairement des matières organiques, de l'eau, de l'acide sulfurique, de la magnésie, de la chaux, de la potasse et des substances insolubles dans l'eau. Le chlorure de sodium cristallise dans le système cubique. Son monocristal est un cube de 5,63 angströms de côté, de densité 2,165 (Figure 12.).

Les principales caractéristiques du chlorure de sodium à pression atmosphérique sont résumées dans le (Tableau8.).



Tableau 8. : Principales caractéristiques du chlorure de sodium [26].

Nom minéralogique	Halite
Cristallisation	Cubique
Formule chimique	NaCl
Indice de réfraction	1,544
Masse moléculaire	58,45
Densité du monocristal	2,165
Densité du liquide à 801 °C	1,549
Dureté (indice MOHS)	2 à 2.5
Chaleur spécifique	0,22kcal/kg/°C
Solubilité dans l'eau froide (0 °C)	357 g/1000 g d'eau
Solubilité dans l'eau chaude (100 °C)	391 g/1000 g d'eau
Température d'ébullition de la saumure saturée	108,8 °C
Température de fusion	801 °C
Température d'ébullition du sel fondu	1 449 °C
Chaleur latente de dissolution (à saturation)	7,8 kcal/kg
Chaleur latente de fusion	97 kcal/kg
Chaleur latente d'ébullition	698 kcal/kg

I.4.1.2. Ressources locales de sel (NaCl)

L'Algérie possède des potentialités importantes en sel, grâce notamment à la richesse de son sous-sol en sel rocheux et aux conditions climatologiques très favorables pour la production de sel solaire dans les chotts ou lacs intra montagneux du Nord, chotts ou lacs des hauts plateaux et des hautes plaines et les chotts ou vastes dépression de la plateforme saharienne.

Le potentiel des réserves de sel en Algérie est considérable et se compose de :

-  Sel gemme avec des réserves évaluées à un Milliard de tonnes
-  Sel lagunaire avec des réserves évaluées à 1,5 Milliards de tonnes en apports annuels renouvelables dans les chotts du Sud-est Algérien.

On distingue deux catégories de gisements de sel :

A. Le sel rocheux

Le sel gemme sous forme de roche, est disponible au Nord du pays et il forme de nombreux gisements visibles ou cachés. Les résultats de la recherche minière menée par l'Entreprise Nationale de Recherche et d'Evaluation Minière (EREM), durant la période 1984-1987, ont permis d'évaluer et de confirmer un potentiel de près de un milliard de tonnes.

B. Le sel lagunaire

Le sel solaire est produit dans des dépressions (chotts ou lacs), parfaitement isolées de la mer, au-dessous de son niveau et alimentées en sel par lessivage des terrains salifères antérieurs. La fabrication du sel dans ces dépressions est le résultat de phénomènes naturels qu'on peut résumer par des apports en eaux salées souterraines et superficielles qui font l'objet d'une évaporation naturelle (généralement d'avril à septembre) à l'aide des vents favorables.

Les principaux gisements connus sont présentés dans le (Tableau9.).

Tableau 9. : Principaux gisements de sel en Algérie [27].

Lieu	Type de gisement	Réserves (millions de tonnes/an)
Béthioua (W. Oran)	Lac	7,2
Sidi Bouziane (W. Relizane)	Lac	6,4
Ouled Zouai (W.O.E.Bouaghi)	Lac	Apport annuel non évalué
El Hodna (W. Constantine)	Chott	Apport annuel non évalué
Zahrez Chergui et Gherbi (W.Djelfa)	Chotts	35 à 45
Mérouane (El Oued)	Chott	0,8
Melghir (W. El-Oued)	Chott	0,9

Parmi tous ces gisements de sel solaire, seuls les lacs salés de Béthioua, Sidi Bouziane, Ouled Zouai et le grand chott Mérouane, font l'objet actuellement d'exploitation.

I.4.1.3. Usage industriel

Nul produit n'est peut-être d'un usage plus courant que le sel ou chlorure de sodium. L'industrie chimique consomme la majeure partie du sel. En plus de sa large utilisation en industries agro-alimentaires en tant qu'agent conservateur et aussi comme additif en industrie halieutique et aussi incorporé dans les produits carnés et les produits dérivés de l'industrie laitière. Le sel est également à l'origine de nombreux produits utiles à notre vie quotidienne (papier, encre, objets en plastique...), notre santé (poche pour perfusion, fil pour suture...) et notre hygiène (savon, lessive, eau de Javel...).

Le sel ou chlorure de sodium (NaCl) est constitué de deux ions : l'ion chlorure (Cl⁻) et l'ion sodium (Na⁺). Pour les séparer, l'industrie utilise le procédé d'électrolyse qui consiste à faire passer un courant électrique dans une solution d'eau salée pour obtenir du chlore, sous forme gazeuse, de la soude caustique et de l'hydrogène.

I.4.1.4. Solubilité du sel (NaCl) dans l'eau

A. Définition de la solubilité

La solubilité est la propriété d'une substance chimique solide, liquide ou gazeuse appelée soluté à se dissoudre dans un solvant. La solubilité d'une substance dépend fondamentalement des propriétés physiques et chimiques du soluté et du solvant ainsi que de la température, de la pression et du pH de la solution. L'étendue de la solubilité d'une substance dans un solvant spécifique est mesurée comme la concentration de saturation, où l'addition de plus de soluté n'augmente pas la concentration de la solution et commence à précipiter la quantité de soluté en excès.

Remarque

Dans notre étude, nous n'aborderons que le cas suivant :

(Solvant : Eau, Soluté : NaCl)

B. Mécanisme de dissolution du sel dans l'eau

La dissolution du solide (cristal) ionique NaCl dans l'eau comporte trois étapes :

a. Dissociation

Elle est due au fait que la force électrostatique qui s'exerce entre le solvant (eau) et la surface du soluté (sel) est supérieure à la force attractive interne au cristal, les ions Na^+ et Cl^- se détachent alors du cristal.

b. Solvatation (Hydratation)

Une fois détachés du solide, les ions vont se retrouver entourés de molécules d'eau grâce aux interactions de Van der Waals, les ions peuvent être entourés de 2 à 10 molécules d'eau, l'orientation des molécules d'eau dépend du type d'ion, les ions négatifs seront entourés par les molécules d'eau du côté hydrogène et inversement pour les cations.

c. Dispersion

Les ions s'éloignent petit à petit du cristal sous l'effet de l'agitation thermique [28].

La (Figure 13.) illustre les 3 étapes de dissolution du sel (NaCl) dans l'eau.

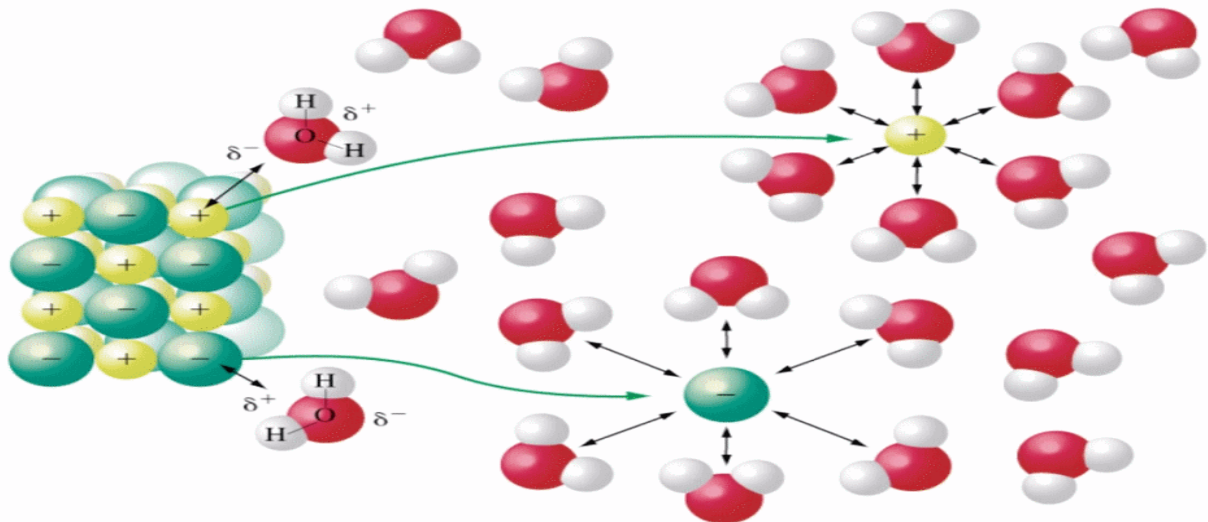


Figure13. : Dissolution du sel (NaCl) dans l'eau

Lorsque la limite de solubilité est atteinte, on dit que la solution est saturée. Si on augmente la température de l'eau en la chauffant, il est possible d'y dissoudre une plus grande masse de sel : la capacité de dissolution de l'eau augmente avec la température. La solution à forte concentration de sel est appelée saumure. Dans différents contextes, la saumure peut se référer à des solutions salines allant d'environ 3,5 % à environ 31%.

La saumure possède une densité plus grande que celle de l'eau pure et qui va en croissant à mesure que la quantité de sel dissous augmente. Le (Tableau 10.) donne les valeurs de cette densité à une température de 25°C, pour des différentes concentrations de NaCl.

Tableau10. : Densité de saumure à 25°C pour différentes concentration de NaCl [29].

[NaCl] g/l	Densité	[NaCl] g/l	Densité
1,00	0,9989	154,10	1,1008
10,10	1,0053	166,30	1,1085
20,20	1,0125	178,60	1,1162
30,60	1,0196	191,10	1,1240
41,10	1,0268	203,70	1,1319
51,70	1,0340	216,60	1,1398
62,50	1,0413	229,60	1,1478
73,40	1,0486	242,70	1,1556
84,50	1,0559	256,10	1,1640
95,70	1,0633	269,10	1,1721
107,10	1,0707	283,30	1,1804
118,60	1,0781	297,20	1,1887
130,30	1,0857	311,30	1,1972
142,10	1,0932		

I.4.1.5. Electrolyse d'une solution de sel NaCl (saumure)

A. Description de l'électrolyse

Lorsque le sel (NaCl) se dissout dans l'eau, ses molécules libèrent des ions de charges électriques opposées, la solution qui en résulte est conductrice d'électricité ; en introduisant une paire d'électrodes connectées à un générateur, on établit un champ électrique dans lequel les ions positifs Na^+ (cations) sont attirés par l'électrode négative (cathode), ils y récupèrent l'électron qui leur manque et se transforment en atomes neutres de sodium (Na) qui se déposent sur la cathode comme sodium sous forme métallique. De leur côté, les ions négatifs Cl^- (anions) sont attirés par l'électrode positive (anode) où ils cèdent leur électron supplémentaire et se transforment en atomes de chlore (Cl) et produisent des bulles de chlore gazeux (Figure 14.).

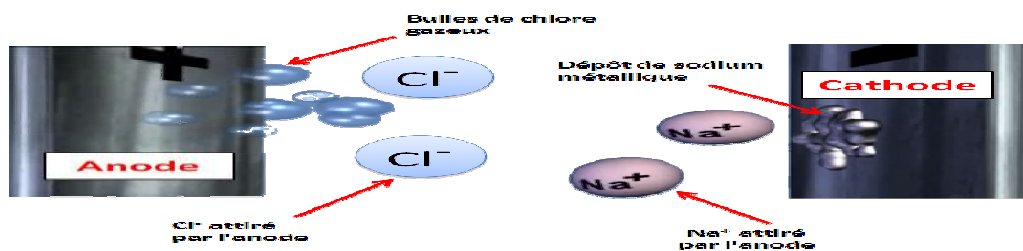


Figure14. : Electrolyse d'une solution de sel NaCl.

Ce phénomène par lequel une substance, comme le sel, subit une transformation chimique sous l'effet d'un courant électrique est appelé électrolyse [30].

L'électrolyse est appliquée industriellement dans la production du sodium et du chlore, la préparation de métaux purs, le revêtement des objets métalliques par une autre couche d'un autre métal.

B. Le principe de fonctionnement de l'électrolyse

Un générateur impose un courant électrique d'intensité (i) dans le circuit comprenant les conducteurs et la cellule, dans les conducteurs métalliques, électrodes comprises, le passage du courant est assuré par les électrons circulant librement (Figure 15.)

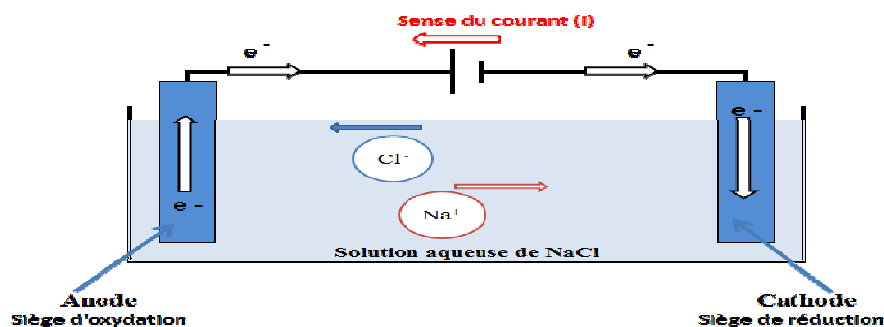


Figure15. : Schéma de principe d'électrolyse d'une solution de NaCl

Au niveau de chacune des électrodes, à l'interface métal-solution, le passage des électrons entre le métal et la solution est assuré par une réaction électrochimique.

Il y a deux interfaces et donc deux réactions électrochimiques :

a. A l'anode

L'oxydation d'un réducteur selon l'équation :



b. A la cathode

La réduction d'un oxydant selon l'équation :



Dans la solution entre l'anode et la cathode le passage du courant est assuré par le déplacement des ions portant des charges (+) et (-)

L'anode est en effet le siège d'oxydation qui entraîne le transfert d'électrons de la solution à l'anode, il y a donc un déficit d'électrons autour de l'anode, ce déficit va donc être compensé, soit par l'arrivée d'espèces chargées négativement (anions) soit par le départ d'espèces chargées positivement (cations).

A la cathode, l'arrivée d'électrons provoque l'apparition d'un excès de charges négatives qui tend cette fois ci à être compensé par l'arrivée de cations ou le départ d'anions.

Il en résulte, en considérant tout les ions, un mouvement d'ensemble des anions de la cathode vers l'anode et des cations de l'anode vers la cathode, ce mouvement qui assure le passage du courant au sein de la solution c'est le phénomène appelé migration des ions(Figure 16.).

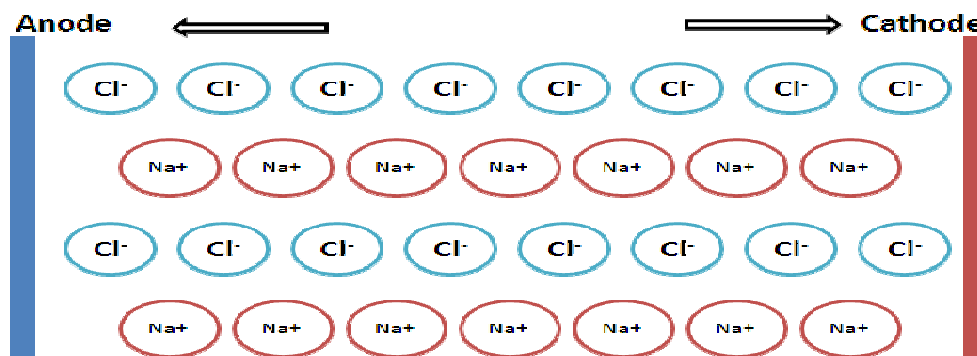


Figure.16 : Migration des ions Na^+ et Cl^- au cours d'une électrolyse



CHAPITRE 2

Industrie du chlore

I. Industrie du chlore, soude caustique et acide chlorhydrique

I.1. Production du chlore

I.1.1. Généralités

L'élément chlore, de symbole chimique (Cl) est l'un des 92 éléments naturels présents sur notre planète. Il appartient au groupe des halogènes et dont la masse atomique est de 35,457g/mol. Dans la nature, on le trouve combiné avec d'autres éléments principalement le sodium sous la forme de sel (NaCl).

Le chlore à l'état moléculaire (Cl₂) n'est pas d'origine naturelle ; il peut être produit industriellement soit par électrolyse du chlorure de sodium dissous dans l'eau, soit par l'oxydation du chlorure d'hydrogène. Une fois produit, il est extrait, purifié, comprimé et refroidi ; il est ensuite entreposé et expédié sous forme de gaz comprimé liquéfié. Le Cl₂ se solidifie à -101,5 °C et bout à -34,0 °C, à la pression atmosphérique normale.

La densité du chlore gazeux à 101,3 kPa est fonction de la température (Tableau11.) :

Tableau11. : Densité du chlore gazeux en fonction de la température

T °C	0	50	100	150
ρ, kg/m ³	3.213	2.700	2.330	2.051

Le chlore est l'un des produits de base les plus importants de l'industrie chimique, car un grand nombre de produits chimiques ont besoin de chlore pour leur production. En effet le chlore est un élément très réactif qui intervient dans la synthèse et la composition de très nombreux produits. On pourra citer notamment l'acide chlorhydrique, les matières plastiques (PVC par exemple), les produits de désinfection (eau de Javel).

Le chlore a également des applications majeures dans le traitement de l'eau et en tant que désinfectant et est fortement utilisé dans la fabrication des plastiques, les produits pharmaceutiques et la protection des cultures. Cependant, la conception publique du chlore repose en grande partie sur sa réputation de «gaz toxique» et ses qualités ne sont pas appréciées dans une large mesure, sauf dans l'industrie même et par les chimistes [31].

I.1.2. Procédés et techniques de production du chlore

Le chlore est obtenu par l'électrolyse en courant continu de solutions aqueuses de chlorure de sodium. La réaction chimique globale est la suivante :



VII

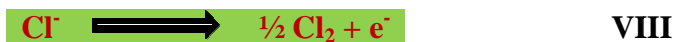
Il y a trois procédés différents types d'électrolyse actuellement exploités :

- ✚ Le premier avec une cathode en mercure, dit procédé « mercure » ;
- ✚ Le deuxième avec un diaphragme percolant comme séparateur des chambres anodique et cathodique, dit procédé « diaphragme » ;
- ✚ Le troisième avec une membrane échangeuse d'ions comme séparateur des chambres anodique et cathodique, dit procédé « membrane ».

La technique de l'électrolyse à membrane présente des avantages écologiques intrinsèques par rapport aux deux autres procédés plus anciens, puisqu'elle n'utilise ni mercure ni amiante et qu'il a le meilleur rendement énergétique. Aujourd'hui, c'est la technique la plus prometteuse et qui se développe le plus rapidement pour la production de chlore-alcali et il ne fait aucun doute que, à terme, elle remplacera les deux autres techniques. En effet, depuis 1987, la quasi totalité des nouvelles installations de chlore-alcali dans le monde utilisent ce procédé des cellules à membrane [32].

Le procédé de membrane met en jeu les réactions électrochimiques suivantes :

- ✚ **Dégagement du chlore gazeux à l'anode selon l'équation chimique :**



- ✚ **Dégagement de l'hydrogène gaz et production d'ions hydroxydes à la cathode selon l'équation chimique :**



La cellule utilisée dans ce procédé est composée de deux compartiments séparés par une membrane échangeuses de cations (Figure 17.)

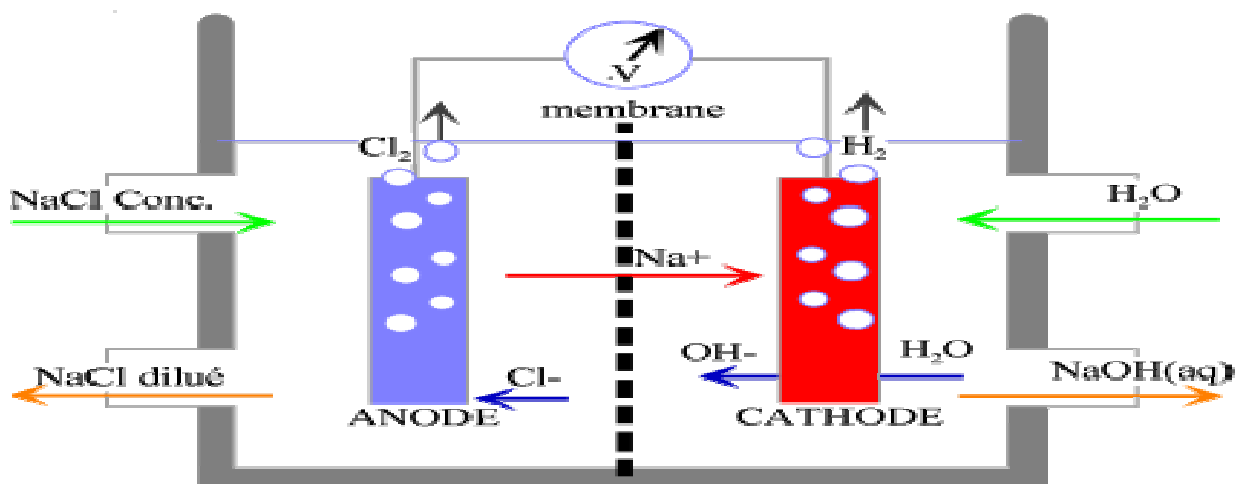


Figure 17. : Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse à membrane.

Le rôle de la membrane est de séparer les deux compartiments, et notamment les deux gaz, le mélange chlore et hydrogène étant explosif. La membrane est conçue d'un matériau polymère comportant des groupes SO_3^- dont la charge négative tend à exclure les ions Cl^- et à laisser passer les cations Na^+ .

Une solution saturée en NaCl est introduite dans le compartiment de gauche, où les ions chlorures sont oxydés en Cl_2 à l'anode. Les ions Na^+ , qui se trouvent alors en excès, migrent, à travers la membrane vers la cathode, où se produit la réduction de l'eau en $\text{H}_2(\text{g})$ et OH^- [33].

Les matériaux utilisés pour les électrodes des cellules à membrane sont, des alliages à base de titane pour l'anode et des alliages à base de nickel pour la cathode, ces matériaux permettent la réalisation de l'opération d'électrolyse sous l'effet d'une tension stable et relativement faible avec moins de consommation d'énergie et une efficacité élevée du courant, ils permettent d'autre part d'éviter la pollution et une forte résistance à la corrosion et d'obtenir une meilleure qualité de produits.

I.2. Production de la soude caustique

La solution de soude caustique (NaOH) est un liquide incolore, visqueux et corrosif avec une odeur neutre. Il est complètement soluble dans l'eau et ayant les principales propriétés physiques indiquées dans le (Tableau12.).

Tableau12. : Propriétés physique de la soude caustique liquide

Poids moléculaire	40,1 g / mol
Point d'ébullition	12 ° C
Pression de vapeur	2 hPa à 20 ° C
Densité liquide	1,52 kg / m ³ à 20 ° C

La soude caustique est obtenue principalement par l'électrolyse d'une solution de chlorure de sodium (NaCl). Dans le procédé à membrane, Le champ électrique provoque la migration des ions sodium hydratés à travers la membrane. Dans le compartiment cathodique, l'hydrogène se dégage à la cathode, laissant des ions hydroxyle, qui forment avec les ions sodium la lessive de soude caustique, ce qui se traduit chimiquement par l'équation suivante :



Du côté de la cathode, la membrane est en contact avec une solution de NaOH concentrée, le côté de l'anode à un pH d'environ 2 à 4. Cela conduit à un gradient de pH à travers la section transversale de la membrane. La solubilité des impuretés, qui sont toujours présentes dans la saumure pure, dépend du pH. Par conséquent, en fonction du type d'impuretés et du pH, la précipitation à l'intérieur de la membrane peut avoir lieu. Cela conduit à une destruction mécanique de la membrane, qui a un effet

irréversible sur l'efficacité du courant. En outre, la tension de la cellule augmente en raison des cristaux formés à l'intérieur de la membrane [31].

Par évaporation, la concentration finale est augmentée et passe de 32% à 50%.

La performance d'une cellule à membrane dépend des conditions de fonctionnement suivantes :

- ✚ Concentration dans les compartiments anodiques et cathodiques ;
- ✚ Densité du courant ;
- ✚ Température ;
- ✚ Impuretés de saumure.

I.3. Production de l'hypochlorite de sodium

L'hypochlorite de sodium est un liquide aqueux incolore ou légèrement jaune, c'est le constituant principal de l'eau de javel, c'est un oxydant puissant qui est utilisé largement dans une variété d'applications industrielles, municipales et domestiques.

L'hypochlorite de sodium est un composé chimique de formule NaClO de [Masse molaire NaClO = 74,442 g / mol].

Il est composé d'un cation sodium (Na^+) et d'un anion hypochlorite (ClO^-) ; il peut également être considéré comme le sel de sodium de l'acide hypochloreux.

La méthode commune pour faire l'hypochlorite de sodium consiste à faire réagir le chlore avec une solution de soude caustique. La concentration finale de la solution d'hypochlorite de sodium dépend de la concentration initiale de la solution de soude caustique de départ. L'équation suivante donne la réaction chimique impliquée, indépendamment de la concentration [34] :



Le produit est généralement vendu dans des solutions aqueuses contenant 5 à 15% d'hypochlorite de sodium, avec 0,25 à 0,35% d'alcali libre (habituellement NaOH) et 0,5 à 1,5% de NaCl. Les solutions d'hypochlorite de sodium peuvent libérer des gaz dangereux tels que le chlore et les chloramines si elles sont mélangées avec des acides ou de l'ammoniac respectivement.

I.3.1. Teneur en chlore actif

La mesure de la teneur en chlore actif est très importante pour un fabricant, un préparateur ou un conditionneur d'eau ou de concentré de Javel, puisque la législation le rend responsable de la concentration des produits qu'il met sur le marché.

En effet, ces produits sont s'ils sont mal conservés ou s'ils sont exposés au soleil ou à la chaleur, risquent de perdre une partie de leur pouvoir actif.

On entend par chlore actif (c.a) la somme des ions ClO^- et des gaz HOCl et Cl_2 dissous dans l'eau (solution assez concentrée et alcaline).

Le pourcentage de chlore actif (poids/poids) dans un litre de solution d'eau de javel est défini comme l'unité de mesure servant à exprimer la concentration des eaux de javel, conformément à la réglementation.

La concentration en hypochlorite de sodium (NaClO) présent dans la solution peut être déterminée à partir du pourcentage en chlore actif (exprimé en Cl_2) :

- ✚ Poids moléculaire du chlore (Cl_2)= 71 g/mol ;
- ✚ Poids moléculaire d'hypochlorite de sodium (NaClO)= 74.5 g/mol.

Le nombre de mole de chlore actif contenu dans une mole d'hypochlorite de sodium est donc donné par le rapport $74,5/71 = 1,05$ [35].

D'où :

$$\% \text{ NaClO} = \% \text{ Chlore actif} \times 1,05 \quad \text{XVII}$$

L'industrie chlorigère met à la disposition des industriels deux qualités d'hypochlorite de sodium, dont la densité varie dans des proportions relativement importantes :

- ✚ Hypochlorite de sodium à environ 13% de chlore actif
- ✚ Hypochlorite de sodium à environ 24% de chlore actif.

On obtient ainsi après addition d'eau, des concentrés de javel à différents pourcentages de chlore actif. La correspondance entre le pourcentage de chlore actif, densité moyenne, quantité de chlore actif ainsi que le degré chlorométrique, est donnée dans le (Tableau13.). Ce tableau prend en considération uniquement la solution d'hypochlorite de sodium à 13% de chlore actif.

I.3.2. Degré de chlorométrique

Le degré chlorométrique est le nombre de litres de chlore sec, à 0 °C et sous une pression de 1 bar qu'un litre de solution d'hypochlorite de sodium à 20 °C est susceptible de dégager en présence d'un acide [36].

Tableau13. : Correspondance entre le % chlore actif, % NaClO, densité et degré chlorométrique

% Chlore Actif	% NaClO	Densité moyenne	Quantité de Chlore Actif (g/l)	Degré de Chlorométrique (°chl)
0,32	0,33	1,00	3,17	1
0,63	0,66	1,01	6,34	2
0,94	0,99	1,01	9,51	3
1,25	1,31	1,02	12,70	4
1,55	1,63	1,02	15,90	5
1,85	1,94	1,03	19,00	6
2,15	2,26	1,03	22,20	7
2,45	2,57	1,04	25,40	8
2,74	2,88	1,04	28,50	9
3,03	3,18	1,05	31,70	10
3,32	3,49	1,05	34,90	11
3,61	3,79	1,05	38,00	12
3,90	4,10	1,05	41,20	13
4,17	4,38	1,06	44,40	14
4,46	4,68	1,07	47,60	15
4,73	4,97	1,07	50,70	16
5,01	5,26	1,08	53,90	17
5,28	5,54	1,08	57,10	18
5,55	5,83	1,09	60,20	19
5,82	6,11	1,09	63,40	20
6,09	6,39	1,09	66,60	21
6,35	6,67	1,10	69,70	22
6,61	6,94	1,10	72,90	23
6,87	7,21	1,11	76,10	24
7,13	7,49	1,11	79,30	25
7,38	7,75	1,12	82,40	26
7,64	8,02	1,12	85,60	27
7,88	8,27	1,13	88,80	28
8,14	8,55	1,13	91,90	29
8,38	8,80	1,14	95,10	30
8,63	9,06	1,14	98,30	31
8,87	9,31	1,14	101,40	32
9,11	9,57	1,15	104,60	33
9,35	9,82	1,15	107,80	34
9,59	10,07	1,16	111,00	35
9,82	10,31	1,16	114,10	36
10,06	10,56	1,17	117,30	37
10,29	10,80	1,17	120,50	38
10,52	11,05	1,18	123,60	39
10,75	11,29	1,18	126,80	40
10,98	11,53	1,18	130,00	41
11,20	11,76	1,19	133,10	42
11,43	12,00	1,19	136,30	43
11,64	12,22	1,20	139,50	44
11,87	12,46	1,20	142,70	45
12,08	12,68	1,21	145,80	46
12,30	12,92	1,21	149,00	47
12,51	13,14	1,22	152,20	48
12,73	13,37	1,22	155,30	49
12,94	13,59	1,23	158,50	50
13,15	13,81	1,23	161,70	51
13,36	14,03	1,23	164,80	52
13,57	14,25	1,24	168,00	53

I.4. Production de l'acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique, également connu sous le nom d'acide muriatique, est une solution de chlorure d'hydrogène dans l'eau. Il existe à l'état solide, liquide et gazeux et est soluble dans l'eau dans toutes les proportions. C'est un acide très fort, réactif agressif et corrosif, ces principales propriétés sont indiquées dans le (Tableau14.) [37].

Tableau14. : Propriétés de l'acide chlorhydriques

Formule chimique	HCl
Masse Molaire	36,5 g/mol
Composition	H (2,8%) ; Cl (97,2%)
Point de fusion	-59°C (20%) ; -30°C (36%)
Point d'ébullition	108°C (20%) ; 61°C (36%)
Densité	1,10 g/cm ³ (20%) ; 1,18 g/cm ³ (36%)

Son application se trouve dans de nombreux domaines, à titre d'exemple :

- ✚ Opérations de nettoyage des métaux
- ✚ Fabrication de produits chimiques
- ✚ Activation des puits de pétrole
- ✚ Production de nourriture
- ✚ Production de caoutchouc synthétique.

La production à grande échelle d'acide chlorhydrique, en tant que produit fini primaire désiré, est presque toujours intégrée dans une installation de chlore-alcali à grande échelle (Figure 18.). Dans l'industrie du chlore-alcali, la solution saline est électrolysée en produisant du chlore (Cl₂), de l'hydroxyde de sodium et de l'hydrogène (H₂). Le chlore gazeux pur peut être recombinaé avec le gaz hydrogène, formant du gaz chlorhydrique.



XII

La réaction a lieu dans ce que l'on appelle communément un brûleur à acide. Le gaz chlorhydrique résultant est absorbé dans l'eau déminéralisée, ce qui donne de l'acide chlorhydrique. Le produit résultant de ce processus est souvent appelé HCl de qualité brûleur.

L'installation est constituée d'une chambre de combustion en carbone structural ou revêtue de briques de silice pourvues d'un dispositif de refroidissement pouvant consister même en une circulation d'eau froide dans la coque. Pour s'assurer que tout le chlore réagit avec l'hydrogène, un excès de 10% d'hydrogène par rapport au chlore est chargé depuis le bas de la chambre de combustion. En outre, il faut veiller à ce que la chambre de combustion et la longueur de la conduite qui conduit le gaz à l'absorbeur soient suffisamment spacieuses, sinon l'acide chlorhydrique contiendra du chlore libre. La combustion de l'hydrogène est démarrée en allumant le brûleur avec une torche à air-hydrogène

externe. Le chlore sec est passé dans la chambre de combustion, où l'hydrogène brûle dans une atmosphère de chlore pour produire du HCl. La nature exothermique de la combinaison directe des deux gaz (H_2 et Cl_2) est telle qu'elle élève la température des réactifs et les produits de réaction jusqu'à un point où ils sont incandescents. La réaction est réalisée à une température de $2400^{\circ}C$. La chambre de combustion est ensuite refroidie à l'extérieur par de l'eau et un couvercle étanche au gaz est monté au sommet du réacteur qui s'ouvre brusquement pour permettre aux gaz de s'échapper en cas d'urgence. Le gaz d'acide chlorhydrique est refroidi dans de l'eau ou dans une solution de HCl diluée en passant à travers le refroidisseur et l'absorbeur à travers le tuyau de raccordement. La force de l'acide produit est généralement de 32 à 33%. La chaleur d'absorption de HCl dans l'eau est éliminée par pulvérisation d'eau froide à l'extérieur de l'absorbeur. La solution de HCl s'écoule dans un réservoir de stockage (Figure 19.).

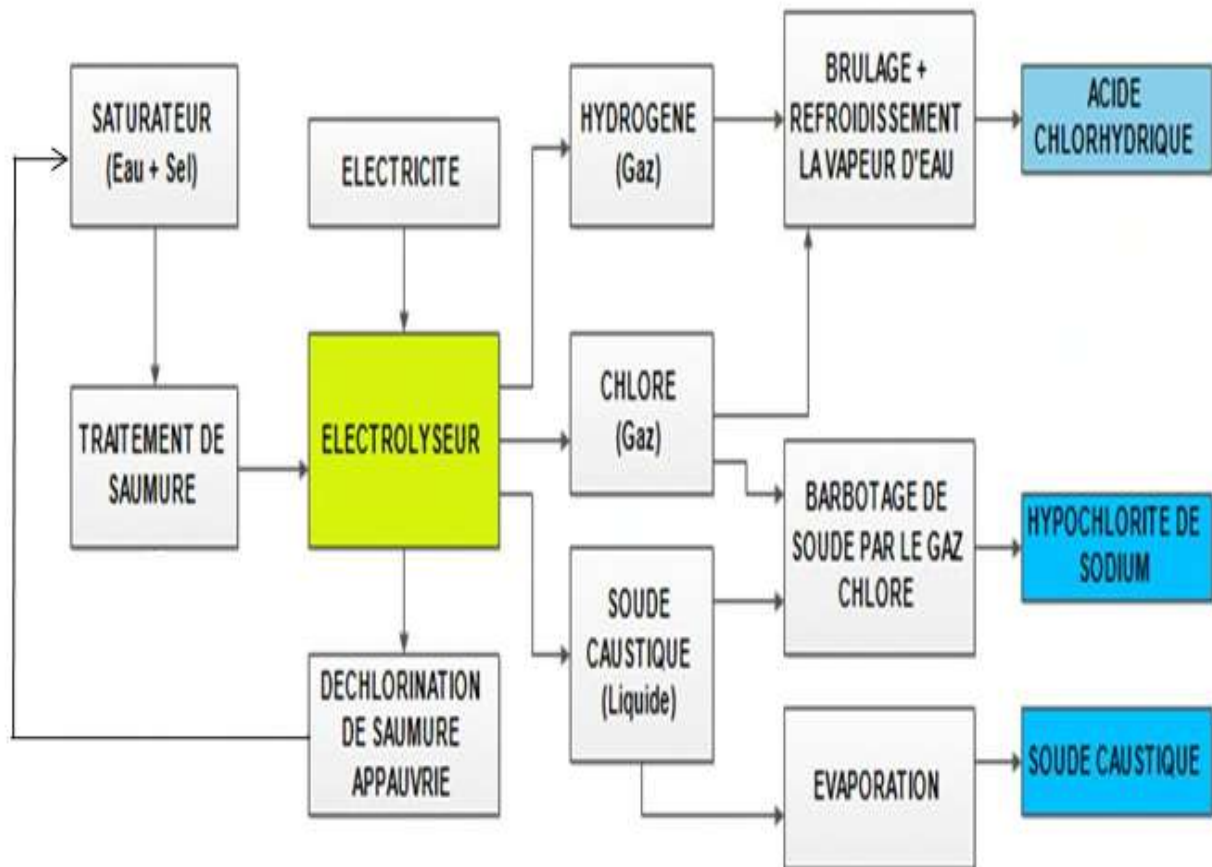


Figure18. : Schéma du processus chlore-alcali à grande échelle

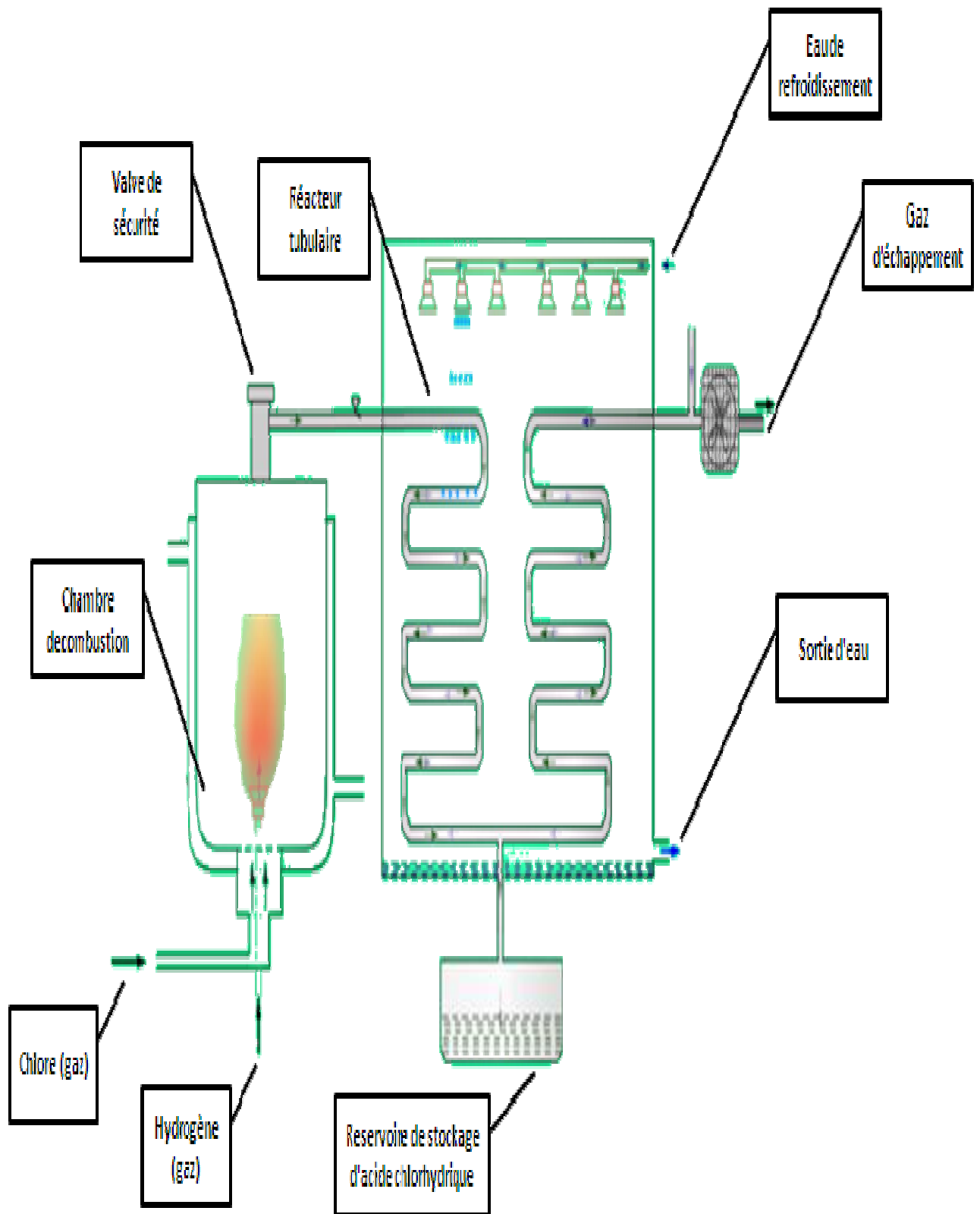


Figure 19. : Schéma simplifié du principe d'unité de production d'acide chlorhydrique



CHAPITRE 3

Traitement des eaux

III. Traitement en amont

III.1. Traitement en amant

III.1.1. Introduction

Il n'existe pas de qualité intrinsèque d'une eau, mais des qualités d'eau qui permettent de satisfaire tel ou tel usage. Ainsi dans la plupart des cas, l'eau utilisée en industrie n'est pas de qualité d'eau potable. Les spécifications caractérisant l'eau d'usage industriel varient d'une utilisation à l'autre (tour de refroidissement, chaudière, processus de fabrication...) et en fonction des équipements et des processus de production propres à chaque industrie. Il faut toutefois considérer qu'il n'est pas forcément nécessaire de faire de sur-qualité. Au sein d'un site industriel, on trouvera une combinaison de plusieurs usages de l'eau et donc, dans de nombreux cas, différentes qualités d'eau qu'il faudra produire directement sur le site à partir de ressources qui peuvent elles-mêmes être d'origines diverses : eau de surface (rivière, barrage, lac), eau de forage, eau de ville. Le traitement, en amont, de l'eau d'un processus industriel doit donc être adapté à la qualité de la ressource et à la destination de l'eau traitée. L'industriel aura donc à gérer différentes ressources en eau, différents traitements d'eau en fonction des usages, différents stockages d'eau et également différents réseaux de distribution [25].

Dans l'industrie de fabrication du chlore et de la soude, l'eau étant utilisée pour dissoudre du sel provenant de différentes sources naturelles afin d'obtenir une saumure qui, pour répondre aux exigences de la nouvelle technologie (électrolyse à membrane échangeuse d'ions), doit avoir une meilleure qualité qui nécessite l'emploi de différents équipements et techniques pour atteindre un haut niveau de pureté.

III.1.2. Composition typique du chlorure de sodium utilisé pour préparation de la saumure

Les compositions provenant de différentes sources varient largement, mais les principales impuretés à considérer dans presque tous les sels sont le calcium, le magnésium et les ions sulfates. La saumure purifiée devrait idéalement contenir :

- ✚ $\text{Ca}^{2+} < 2 \text{ mg/l}$
- ✚ $\text{Mg}^{2+} < 1 \text{ mg/l}$
- ✚ $\text{SO}_4^{2-} < 5 \text{ mg/l}$

Le (Tableau15.) donne la composition typique du chlorure de sodium utilisé pour la préparation de saumure avant qu'elle ne pénètre dans les cellules d'électrolyse [38].

Tableau 15. : Composition typique du chlorure de sodium utilisé en électrolyse

NaCl	93 - 99%
SO_4^{2-}	0,2 - 1%
Ca^{2+}	0,05 - 0,4%
Mg^{2+}	0,01 - 0,1%

III.1.3. Purification primaire de la saumure

III.1.3.1. Coagulation-Floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination des matières en suspension (MES) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tout ou partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires inertes ou vivantes, les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales [39].

La phase initiale de purification utilise du carbonate de sodium (Na_2CO_3) et de l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour précipiter les ions calcium et magnésium sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'hydroxyde de magnésium selon la réaction ci dessous [29].



Remarque

(NaCl) pure en solution

III.1.3.2. Décantation

Après l'étape de coagulation floculation, si la densité de ces floccs est supérieure à celle de l'eau, il y'a décantation. Toute particule présente dans l'eau est soumise à deux forces : la force de pesanteur qui est l'élément moteur, permet la chute de cette particule et les forces de frottement dues à la traînée du fluide s'opposent à ce mouvement [40].

Au cours de la décantation, les précipités accumulés (principalement Mg(OH)_2 et CaCO_3) sont accumulés en bas du décanteur sous forme de boues à rejeter. La phase liquide de la saumure ou la partie supérieure du décanteur est écoulé par gravité vers une citerne intermédiaire, puis envoyé vers le filtre à sable grâce à une pompe [29].

III.1.3.3. Filtration par filtre à sable

L'étape de filtration à sable est nécessaire pour l'élimination des impuretés précipitées ainsi que les cristaux de saumure en excès. Elle a pour objectif essentiel la réduction de la turbidité par piégeage des matières en suspensions par le biais de changement de la granulométrie du sable rempli [29].

III.1.4. Purification secondaire de la saumure

III.1.4.1. Filtration par filtre à résine

Pour maintenir la haute performance de l'électrolyseur à membrane échangeuse d'ions, la saumure d'alimentation doit être purifiée dans une plus grande mesure. Les étapes précédentes de purifications de la saumure (coagulation-floculation, décantation et filtration à sable) ne sont pas suffisantes pour réduire les niveaux de calcium et de magnésium, et un adoucissement supplémentaire est donc requis. La purification de la saumure secondaire consiste généralement en une filtration de polissage dans une unité d'échange d'ions. Le traitement par résine a pour but de réduire la somme des concentrations de magnésium et de calcium à $<20 \mu\text{g/l}$. La résine est périodiquement régénérée avec de l'acide chlorhydrique de haute pureté. Généralement, une colonne d'échange de résine est en fonctionnement tandis qu'une autre colonne d'échange de résine est régénérée [38].

III.1.5. Traitement de l'eau par osmose inverse

III.1.5.1. Introduction

Dans l'industrie du chlore par électrolyse à membrane échangeuse d'ion, l'eau est employée à plusieurs niveaux, elle est d'une part, utilisée comme fluide de processus, et d'autre part comme matière première de base dans la production d'Hypochlorite de sodium, de soude caustique, d'Hydrogène, d'Acide chlorhydrique ...).

Dans la plupart des cas, la qualité initiale de l'eau est insuffisante et a un impacte sur l'efficacité des équipements et sur la qualité des produits finaux.

Le traitement de l'eau par un osmoseur est l'une des techniques nouvelles qui permet d'obtenir une eau pure à plus de 99%. Le principe de cette technique repose sur le transfert de l'eau à traiter à travers une membrane imperméable aux impuretés sous l'effet d'un gradient de pression.

III.1.5.2. Osmose directe

Lorsque l'on place dans deux compartiments séparés par une membrane semi perméable, la même quantité d'une solution d'eau pure (B) et d'une solution aqueuse contenant des sels (A), on constate le transfert de l'eau pure de (B) vers (A) jusqu'à ce que la pression due au liquide contenu en (A) empêche le transfert. La différence de niveau entre les deux compartiments est la pression osmotique, notée P_0 (Figure20.).

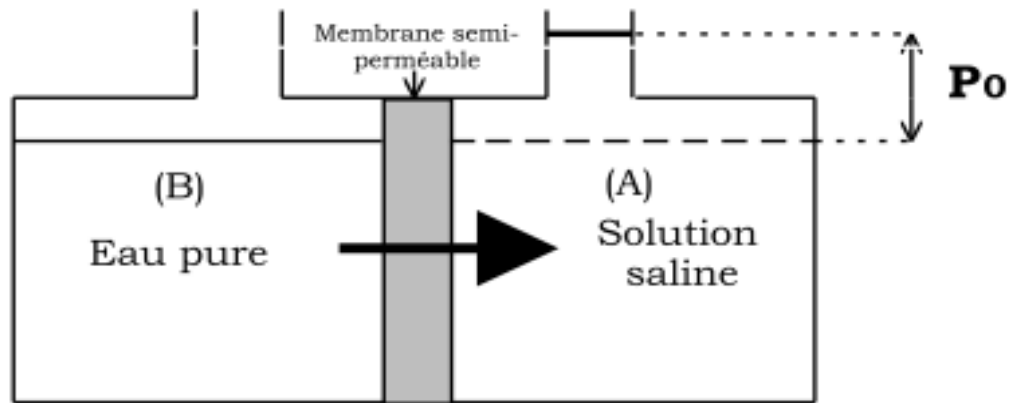


Figure 20. : Schéma du principe d'osmose directe

En première approximation, la pression osmotique d'une solution peut être calculée avec la loi de Van't Hoff. Elle exprime que la pression osmotique P_0 exercée par le soluté est égale à la pression que le corps aurait exercé à l'état gazeux parfait dans le même volume et à la même température.

$$P_0 \times V = N_j \times R \times T \quad \text{XVIII}$$

N_j : Nombre de moles de soluté j
 R : Constante des gaz parfaits
 T : Température absolue

III.1.5.3. Osmose inverse

L'osmose inverse (OI) est née de la réversibilité de l'osmose naturelle.

Si l'on applique à la solution (A) une pression $P > P_0$, l'eau pure s'écoule en sens inverse de (A) vers (B) à travers la membrane semi-perméable (permet seulement le passage de l'eau) c'est l'osmose inverse (Figure21.).

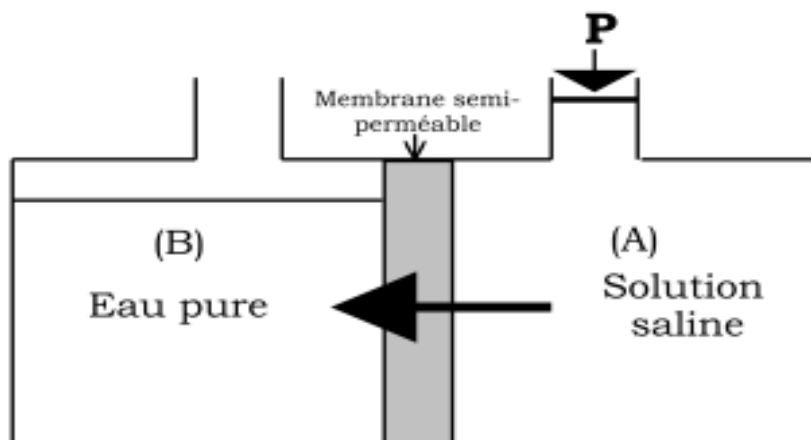


Figure21. : Schéma du principe d'osmose inverse

L'eau (ou le liquide) est ainsi débarrassée des contaminants type bactéries, colloïdes fins, molécules de petite taille et les ions qui sont bloqués par la structure membranaire. Les membranes couramment employées sont asymétriques, constituées de feuilles plates en acétate de cellulose, de fibres creuses en polyamide aromatique ou d'un film mince composite où une couche extrêmement fine de polymère très hydrophobe est placée sur un support microporeux usuellement fait en poly-sulfone. Les performances d'un module d'osmose inverse sont non seulement déterminées par la structure de la membrane mais aussi par la nature et la concentration des solutés à séparer qui déterminent, en fonction de la pression osmotique, la pression à appliquer. De plus, il faut veiller à la température et au pH. Le rendement est déterminé par la quantité de fluide traversant la membrane par rapport à la quantité pompée en direction du système. La plus commune des utilisations pour l'osmose inverse est le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Le but est de supprimer les sels dissous et les matières organiques de l'eau. A cause de la forte pression osmotique de ces solutions, les unités d'osmose inverse doivent fréquemment opérer à forte pression (jusqu'à 70 bars) et les composants annexes doivent être beaucoup plus robustes que pour d'autres techniques membranaires [41].

Dans la technique d'osmose inverse l'espace entre les enchevêtrements des matériaux qui composent les membranes est voisin de « 1 » Angström (1/10 du nanomètre ou 1/10000 du micromètre) ; soit de l'ordre de la taille d'une molécule d'eau. A cette échelle, on ne parle plus de membrane poreuse, mais plutôt de membrane dense. Seule l'eau est diffusée à travers la membrane et la quasi-totalité des sels et autres constituants sont retenus [42].

Dans la majorité des cas, l'osmose inverse est mise en œuvre avec des modules à membranes spiralées dans lesquels la filtration est réalisée en mode tangentiel. Dans un module spiralé l'eau à dessaler rentre sur le côté d'un module par les espaceurs et passe à travers la membrane en parcourant la longueur du module. L'eau filtrée est récoltée par un espace appelé collecteur de perméat qui amène vers un tube positionné au centre du module. Un module spiralé est schématisé sur la (Figure22.).

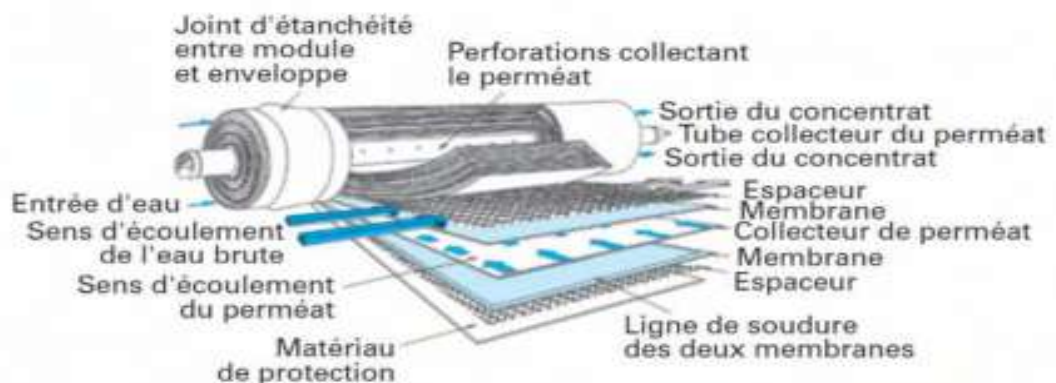


Figure22. : Module à membrane spirale

Dans cette configuration, on définit le perméat comme l'eau dessalée et le concentrât comme l'eau salée qui n'est pas passée à travers la membrane et qui est recueillie à la sortie du module [43].

Cette technique présente les avantages suivants :

- ✚ Opération à température ambiante ce qui évite la dégradation de molécules fragiles dans le domaine agro-alimentaire ;
- ✚ Pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution ;
- ✚ Consommation énergétique faible vis à vis de la distillation pour le dessalement de l'eau.

III.2. Traitement en aval

III.2.1. Introduction

L'eau qui était autrefois disponible presque gratuitement pour les gens et pour l'industrie, les temps ont changé, et aujourd'hui son coût a augmenté à un niveau qu'il est maintenant considéré comme le même que pour toute autre matière première utilisée dans l'industrie. L'eau est une partie essentielle des processus, elle remplit plusieurs rôles et fonctions dans tous les types d'industries. Toutefois, des volumes importants d'eau utilisés finissent comme eaux usées industrielles. L'industrie du chlore et de la soude caustique est parmi les industries très gourmandes en matière d'eau, qui intervient dans toutes les phases de fabrication. Elle se trouve dans les rejets, essentiellement polluée par les acides usés et les précipitants chimiques utilisés pour éliminer les impuretés de la saumure de départ et tous les sous-produits ainsi que les pertes de matières premières utilisés. Les demandes croissantes d'eau pour cette industrie rendent nécessaire de trouver des moyens pour prolonger la durée de vie des ressources en eau et de les gérer de manière durable. Généralement la solution consiste à implanter une station d'épuration adaptée à la nature des rejets à traiter afin de les rendre réutilisables ou, du moins, être plus sûres de les rejeter dans les conditions exigées pour préserver le milieu naturel[44].

III.2.2. Station d'épuration des eaux usées industrielles

III.2.2.1. Définition

C'est un système d'ouvrage généralement constitué par plusieurs bassins étanches en série destinés à la collecte et au traitement des eaux usées urbaines ou industrielles par un processus physique, chimique et biologique pour éliminer les contaminants et produire des eaux réutilisables ou à la limite de réduire leur nocivité afin d'assurer leur rejet dans l'environnement sans danger.

III.2.2.2. Caractéristiques des stations d'épuration des eaux industrielles

La conception d'une station d'épuration des eaux usées industrielles est fortement spécifique au site.

Les considérations générales majeures sont :

- ✚ Les caractéristiques du site
- ✚ Les caractéristiques des eaux usées entrant dans le réseau de collecte
- ✚ Les normes pour les effluents rejetés par la station d'épuration.

III.2.3. Processus de traitement unitaire

Le traitement des eaux usées peut être divisé en quatre grandes étapes ou catégories :

A. Le traitement préliminaire

Peut impliquer un certain nombre de processus unitaires pour éliminer les éléments indésirables des eaux usées reçues du système de collecte. Les procédés comprennent l'utilisation d'écrans et de grilles pour éliminer les grosses particules, broyeurs pour le broyage de solides grossiers, pré-désagrégation pour le contrôle des odeurs et élimination de la graisse.

B. Le traitement primaire,

Egalement appelé clarification primaire, implique l'élimination des solides facilement décantables avant le traitement biologique. Les bassins de décantation ou les chambres de sédimentation sont l'unité principale impliquée, mais divers processus auxiliaires, tels que la flottation, la floculation et le criblage fin, peuvent également être utilisés.

C. Le traitement secondaire

Implique la purification des eaux usées principalement par décomposition de la matière organique en suspension et dissoute par action microbienne. De nombreux procédés de traitement biologique sont disponibles, mais la plupart peuvent être classés comme traitement des sols, étang / lagune, boues activées ou méthodes de filtration biologique, comme les filtres biologiques rotatifs à disque.

D. Le traitement tertiaire

Comprend un grand nombre de procédés chimiques qui peuvent être utilisés avant ou après un traitement biologique secondaire pour répondre à des objectifs de traitement spécifiques. Le terme clarification secondaire ou traitement tertiaire peut être appliqué aux procédés unitaires de traitement

[45].

III.3. Normes Algériennes de diversement des eaux usées industrielles

Selon le décret exécutif N°09-209 du 11/06/2009 fixant les modalités d'octroi de l'autorisation de diversement des eaux usées autres que domestiques dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration, les valeurs limites maximales de la teneur en substance nocives des eaux usées au moment de leur déversement sont indiquées dans le (Tableau16.).

Remarque

Seuls les paramètres considérés dans notre étude sont pris en considération dans ce tableau

Tableau16. : Valeurs limites de rejet selon la norme Algérienne

Paramètres	Unité	Valeurs limites
pH		5,5 – 8,5
Matières en suspension	mg/l	600
Phosphates	mg/l	50
DCO	mg/l	1000
DBO ₅	mg/l	500
Nitrates	mg/l	/
Nitrites	mg/l	0.1



Deuxième partie

Etude Expérimentale & Description du Site



CHAPITRE 1

Description du site

I Présentation de l'entreprise Sarl Flash Chemicals Industry (FCI)

I.1 Données générales du site industriel

I.1.1 Missions, objectifs et domaines d'activité

L'industrie du chlore joue un rôle prépondérant dans le développement industriel et économique mondial. Aujourd'hui, plus de 50 % du chiffre d'affaires, plus de 30 % des investissements et environ 25 % des emplois de l'industrie chimique mondiale reposent sur les activités de production du chlore, soude et dérivés [46].

En Algérie, l'industrie chimique hors hydrocarbure est considérée parmi les grands axes de la stratégie d'industrialisation qui vise à créer de nouvelles opportunités d'affaires et mettre en œuvre de nouveaux investissements pour soutenir la politique de développement économique national tout en faisant appel à la valorisation des ressources naturelles, densification du tissu industriel et promotion de nouvelles industries.

De ce point de vue, l'entreprise dénommée Flash Chemicals Industry, est l'une des concrétisations réelles de cette politique industrielle de l'Algérie contemporaine. C'est également le fruit d'un projet d'investissement industriel privé appartenant aux frères Othmani et dont le complexe de production est implanté au niveau de la zone industrielle de la commune de Sidi Khouiled, à 13 Km de la wilaya de Ouargla. L'usine est entrée en activité depuis le début de l'année 2016 en s'articulant dans sa chaîne de production de chlore et des composés chlorés, sur une série d'opérations unitaires composées d'équipements de haute performance et répondant aux normes et standards internationaux et particulièrement sur la technologie du procédé d'électrolyse à membrane qui permet une plus grande efficacité énergétique et surtout plus respectueux de l'environnement.

I.1.2 Implantation et localisation

I.1.2.1 Situation géographique

Le complexe industriel de production de la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI) est implanté dans la commune «Sidi Khouiled» wilaya d'Ouargla. Le site occupe une superficie totale de 55 525 m² dont 3 777 m² bâtie. Une extension de 40 000 m² est programmée (Figure 23.). Le complexe étant limité par :

- ✚ Au Nord par la route communale qui mène au centre de la ville Sidi Khouiled ;
- ✚ A l'Est par un terrain vague ;
- ✚ A l'Ouest par la Société Nationale des Travaux Publics et la propriété GHERIASSA
- ✚ Au Sud par un terrain vague



Figure 23. : Localisation de l'entreprise FCI

A. Superficies exploitées

Superficie globale de l'assiette occupée sur laquelle est établi la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI) est de 15 525,00 m² (figure 24.).

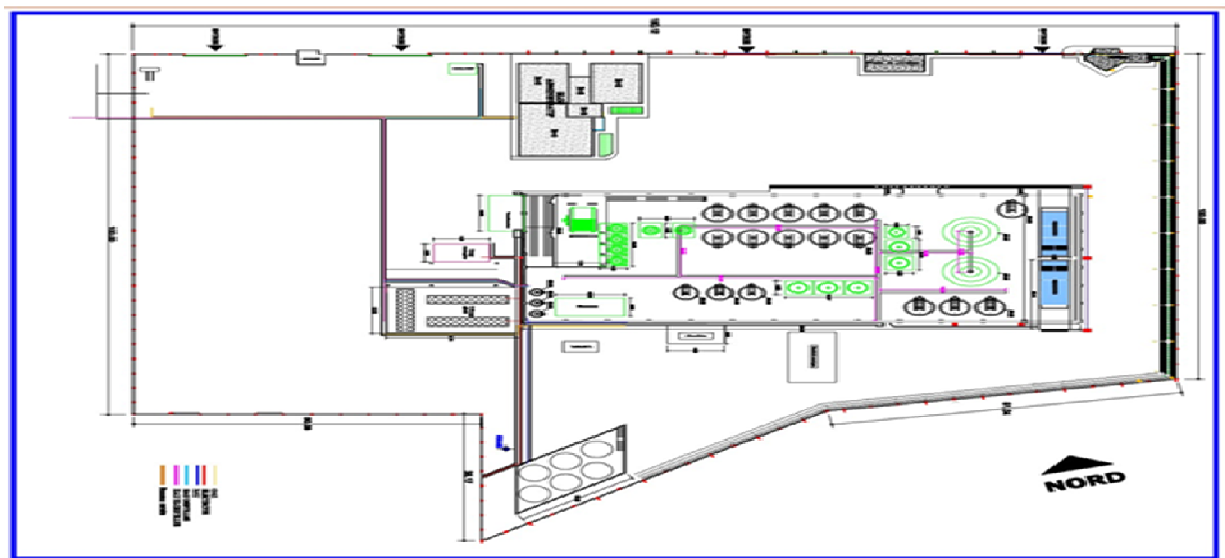


Figure 24. : Assiette occupée par l'entreprise FCI

B. Repartitions de surface exploitée

La superficie exploitée par la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI) est de 15 525,00 m², celle-ci est répartie comme suit (Tableau 17.) :

Tableau17. : Répartition des surfaces exploitées

Désignation	Surface en m ²	
	Couverte	Non couverte
Poste de garde principal	32,50	
Poste de garde secondaire	15,00	
Bloc administratif et de service	363,50	
Poste électrique Sonal gaz	41,00	
Poste gaz Sonal gaz		4,50
Ensemble bureaux		37,00
Magasin produits alimentaire		18,50
Magasin produits d'entretien		30,00
Magasin service maintenance		30,00
Atelier de production	2800,00	
Citerne eau potable		12,00
Unité de soude liquide		120,00
Chaudière	40,00	
Unité d'acide chlorhydrique		40,00
Groupe de froid		184,00
Générateur d'électricité		53,00
Groupe électrogène		40,00
Aire de stockage matière première		300,00
Aire de livraison		420,00
Parking de stationnement		300,00
Allez de circulation		5843,00
Espace vert		620,00
Bac de stockage de HCl		213,00
Aire réservé à l'aération n et espace vert		3968,00
Surface Total	3292 m²	12233 m²
	15525 m²	

C. La superficie non exploitée

La superficie non encore exploitée par la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI) en attendant l'engagement de l'extension prévu du projet est de 40 000,00 m².

I.1.2.2 Coordonnes de géo-localisation par satellite

- ✚ Latitude : 31°57'57.05"N
- ✚ Longitude : 5°25'29.56"E
- ✚ Altitude : 151m

I.1.2.3 Principales proximités du site industriel

- ✚ Chef lieu de la wilaya d'Ouargla : 13 Km
- ✚ Centre ville d'Ain Beida : 05 Km
- ✚ Centre ville de Sidi Khouiled : 02 km
- ✚ Aéroport d'Ouargla : 04 km
- ✚ Gare routière centrale : 15 km

I.1.2.4 Données Climatiques

Le complexe de production est situé dans la wilaya d'Ouargla qui est caractérisée par son climat désertique. En cours d'année, où les précipitations sont rares.

- ✚ Température moyenne maximale peut dépasser 45 °C.
- ✚ Température moyenne minimale 10.7 °C.
- ✚ Température moyenne annuelle 22.3 °C.
- ✚ Précipitations moyennes annuelles sont de 45 mm.
- ✚ Vents dominants à Ouargla sont ceux de Nord- Est à Sud - Ouest avec une vitesse qui peut dépasser parfois les 20 m/s.

I.1.3 Infrastructure, moyens et activités

I.1.3.1 Ouvrage

Il est composé de :

- ✚ Poste de garde principal
- ✚ Poste de garde secondaire
- ✚ Bloc administratif et de service
- ✚ Bloc de production
- ✚ Poste de livraison des produits finis
- ✚ Poste de transformateur
- ✚ Poste de détente de gaz
- ✚ Abri utilitaires et équipements de servitudes
- ✚ Quatre (04) Chalets.

I.1.3.2 Utilités et équipements de servitudes

A. Gaz naturel

Le site est alimenté en gaz naturel provenant du réseau public «SONELGAZ» et destiné à l'alimentation de la chaudière à gaz. Un poste de détente de gaz est situé à l'entrée du site ainsi que deux vannes d'arrêt de gaz sont misent en place dont une (01) est située à l'entrée de bloc de production et l'autre au niveau de la chaudière.

B. Alimentation en eau industrielle

Le complexe est alimenté en eau industrielle par un forage situé au sud du site. Il dispose de deux (02) bâches à eau de 180 m³ chacune destinées à l'alimentation du réseau anti incendie, du processus de production et pour les besoins des employés (sanitaires). L'unité dispose d'une station de pompage mitoyenne à la station de refroidissement. Elle est composée de deux (02) pompes électriques de capacité de 60 m³/h. L'unité prévoit d'implanter une pompe jockey et une pompe diesel.

C. Energie électrique

Le complexe est alimenté par deux lignes d'énergie électrique provenant du réseau public « Sonel gaz » à savoir :

- ✚ Une ligne de moyenne de tension 220/380 V
- ✚ Une ligne de haute tension de 30 KV.

Cette tension est distribuée au transformateur à l'aide de deux postes de livraison.

- ✚ Le premier poste de livraison de la moyenne tension est suspendu sur un poteau d'électricité
- ✚ Le deuxième poste de livraison de la haute tension est installé dans un local technique bien sécurisé (verrouillé) et situé entre deux accès au site. Il est équipé par deux climatiseurs en plus de l'aération naturelle.

Aussi au sien du site industriel, il existe trois (03) autres transformateurs d'électricité :

- ✚ Deux (02) de petits model situés à l'intérieur de la sous station électrique
- ✚ Un (01) de grand model situé a l'extérieur mitoyen au bloc de production.

D. Redresseur

L'alimentation de l'électrolyseur en courant continu est assurée par un Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. Ainsi le redresseur permet la conversion du courant alternatif en courant continu.

Le redresseur est installé au niveau du bloc de production dans un local technique bien sécurisé (verrouillé) et climatisé.

E. Onduleurs

Un onduleur est un dispositif électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente. Il permet ainsi la fonction inverse d'un redresseur. Le site est doté d'un onduleur EMERSON de 100 KVA pour assurer la protection de l'électrolyseur.

Les onduleurs sont installés au niveau du bloc de production dans un local technique bien sécurisé (verrouillé) et climatisé.

F. Polarisateur

Le site industriel de la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI), est doté polarisateur installé en parallèle avec le redresseur pour qu'ils puissent fonctionner en intermittence, son rôle est de sécuriser l'électrolyseur lors de son démarrage et de sa mise à l'arrêt.

Toutefois, il y a lieu de préciser l'utilité du polarisateur. La polarisation d'un diélectrique apparaît dans les milieux qui comprennent des charges électriques dite libres.

Dans un diélectrique parfait, il n'existe pas de charges électriques libres ; il ne présente donc aucune polarisation. En particulier, un champ électrique appliqué ne provoque pas de courant électrique. Mais les charges électrique localisées ou libres sont susceptibles de se déplacer sur de petites distances ou de vibrer sous l'influence d'un champ électrique : il y a alors apparition d'une polarisation.

Ce polarisateur est installé au niveau du bloc de production dans un local technique bien sécurisé (verrouillé) et climatisé.

G. Armoires électriques

Les armoires électriques sont les lieux où sont regroupés différents systèmes participant à la distribution d'une installation électrique. Elles constituent le local électrique, pour des installations industrielles.

Les armoires électriques constituent le point central de la distribution électrique. Elles constituent le lien entre l'arrivée du courant électrique et la distribution de celui-ci, c'est donc le Tableau Général Basse Tension (TGBT). Les TGBT servent aussi bien à protéger les lignes de la distribution électrique, assurer la protection des personnes.

Les armoires électriques sont installées au niveau du bloc de production dans un local technique bien sécurisé (verrouillé) et climatisé.

H. Groupe électrogène

Le complexe est équipé d'un groupe électrogène de 500 KVA, installé à l'air libre mitoyen du bloc de production et protégé par un abri de toiture en panneaux sandwich entouré d'un grillage. Ce groupe électrogène fonctionnant au gas-oil afin d'alimenter les équipements stratégique en cas de coupure d'électricité, notamment :

- ✚ La chaudière
- ✚ L'osmoseur
- ✚ L'onduleur 100 KVA
- ✚ Les lampes d'éclairage
- ✚ La sereine
- ✚ Le bloc administratif
- ✚ La cantine
- ✚ Les compresseurs
- ✚ Les pompes de forage
- ✚ Les pompes alimentant le réseau anti incendie

I. Compresseur d'air comprimé

Le site est équipé de deux (02) compresseurs d'air de marque Atlas Copco de type ZT30 ayant la puissance de 30 KW pour une pression de 7 bars avec la fréquence 50 Hz, associée à un réservoir de capacité de stockage de 10 bars d'air comprimé destiné à l'alimentation du système des pompes (à commande pneumatique). Ils sont situés près du groupe électrogène.

J. Osmoseurs

Le site industriel dispose d'une station de traitement d'eau installée dans le bloc de production afin d'alimenter les différentes installations par de l'eau traitée, notamment :

- ✚ L'électrolyseur ;
- ✚ La chaudière à gaz, etc.

L'eau est traitée par deux procédés successifs à savoir :

- ✚ **L'adoucissement** : l'eau passe par un adoucisseur afin de minimiser la dureté en réduisant le taux de calcaire (calcium et magnésium) ;
- ✚ **L'osmose inverse** : l'eau passe par une installation d'osmose inverse à deux membranes où elle sera purifiée en ne laissant passer que les molécules d'eau.

Cette station de traitement des eaux est dotée de deux osmoseurs

- ✚ Le premier de 30 $\mu\text{cm/cm}$ lié directement au forage
- ✚ Le deuxième de 5 $\mu\text{cm/cm}$ est raccordé au premier.

Ces deux osmoseurs ont pour rôle de produire de l'eau traitée selon le principe de l'osmose inverse. Ils vont ainsi débarrasser l'eau de la majeure partie de ses solutés tels que

- ✚ Les boues, le sable, la poussière, impuretés...
- ✚ Le chlore, les sulfates, les phosphates....

L'eau traitée est stockée dans deux réservoirs de capacité de 120 m³ chacun situés à l'intérieur du bloc de production.

K. Groupe froid

La production d'hypochlorite de sodium NaClO est une réaction fortement exothermique qui nécessite une maîtrise de la température. La chaleur dégagée dans le réacteur est évacuée via un système de refroidissement en utilisant un (01) échangeur de chaleur de haute capacité alimenté par deux (02) groupes froid qui fonctionnent en intermittence sous principe du maître et d'esclave. Ces groupes froids sont situés à proximité des compresseurs d'air.

L. Chaudière

Le complexe dispose d'une chaudière (01) à gaz de marque Italienne Mingazzini, model PB5QEU portant le numéro de série 9803, ayant la puissance de 3875 KW pour une pression 12 bars, celle-ci est installée dans un local technique mitoyen du bloc de production. Les vapeurs de l'eau chaude sont destinées à augmenter la température à travers deux échangeurs l'un pour la saumure purifiée (pur brine) et l'autre pour la soude (NaOH). La grande quantité des vapeurs produites est utilisée par l'unité d'évaporation de soude caustique liquide pour l'augmentation de la concentration jusqu'à 45 %.

M. Générateur d'azote

Le site est doté d'une unité de production d'azote destinée à l'alimentation de l'électrolyseur pour réduire la teneur de l'oxygène (inertage) et de torcher l'hydrogène (soit dans l'atmosphère, soit dans l'unité d'acide) et le chlore (dans le réacteur) sauf que ce dernier peut être torché en utilisant de l'air comprimé à faible pression afin d'éviter le risque d'incendie ou d'explosion.

I.1.3.3 Activités de la Sarl Flash Chemicals Industry (FCI)

L'entreprise Sarl Flash Chemicals Industry, est spécialisée dans la fabrication des produits suivants :

A. Hypochlorite de sodium « NaClO » (48 ± 2)

L'hypochlorite est utilisé dans un grand nombre d'industries. En agriculture, dans l'industrie chimique, dans les industries de la peinture et de la chaux, dans l'industrie alimentaire, dans celles du verre, du papier, dans l'industrie pharmaceutique et dans les industries de synthèse et de dépôt des déchets. Dans l'industrie du textile, l'hypochlorite de sodium est utilisé pour blanchir le textile. L'hypochlorite peut être utilisé pour prévenir la croissance des algues et des organismes dans les tours de refroidissement. Dans le traitement de l'eau, l'hypochlorite est utilisé pour la purification et la désinfection d'eau. Dans les taches domestiques, l'hypochlorite est utilisé pour la purification et la désinfection en milieu hospitalier. Comme adjuvant chloré pour piscine. Il est par ailleurs le principal agent déboucheurs de canalisations.

B. Acide chlorhydrique « HCl » (32 à 33%)

L'acide chlorhydrique est utilisé dans un grand nombre de procédés industriels. Dans le décapage et le détartrage des métaux, le traitement des minerais, la fabrication d'engrais, des colorants, de produits pharmaceutiques, la fabrication des composés organiques et inorganiques, les produits alimentaires, l'industrie des matières plastiques, l'industrie des colles et des gélatines, la préparation des chlorures et des sels métalliques divers, les réactifs analytiques, régénération d'échangeurs d'ions, pour neutralisation et contrôle du pH. Utilisé aussi dans le traitement du cuir, nettoyant domestique. Dans la production pétrolière. Utilisé dans les systèmes de refroidissement des centrales nucléaires.

C. Soude caustique liquide (hydroxyde de sodium « NaOH ») (45 à 50%)

L'hydroxyde de sodium est utilisé en grandes quantités par plusieurs industries. Utilisé dans l'industrie chimique, pour contrôler un milieu. Il sert également à la fabrication des pâtes à papier, des produits de nettoyage, au traitement des eaux, au lavage des gaz, dans l'industrie pétrolière, dans l'industrie de

l'aluminium, dans l'industrie textile, et dans l'industrie des colorants. Utilisé dans l'agroalimentaire, pour nettoyer les installations, modifier l'amidon, épluchage chimique, additif alimentaire et régulateur d'acidité. Utilisé dans l'énergétique pour stocker de l'énergie solaire sous forme chimique.

I.1.3.4 Matières premières, capacité de production et de stockage

Les matières premières utilisées, les capacités de production journalières ainsi que les capacités de stockages des produits finis fabriqués sont indiquées en détails dans (Tableau 19. à 21.) suivants :

A. Matières premières

Tableau 19. : Matière première

Matières premier	Provenance	Sources d'approvisionnement		
		Locale	Importation	Total
Electricité	Sonal-gaz	100 %	0 %	100 %
Sel	Sarl Melh el Djanoub et Melahat Hamraya	98 %	0 %	100 %
Carbonate de soude « Na ₂ CO ₃ »	Entreprise HCPRO, Alger	0 %	2 %	
Sulfite de soude « Na ₂ SO ₃ »	Entreprise HCPRO, Alger			
Méta bisulfite de sodium « Na ₂ S ₂ O ₅ »	Entreprise HCPRO, Alger			
Floculant / coagulant	Entreprise HCPRO, Alger			

B. Capacité de production

Tableau 20. : Capacité de production

Produits	Capacité de production	
	Capacité installée	Capacité réelle
Hypochlorite de sodium « NaClO »	120 m ³ / jour	30 m ³ / jour
Acide chlorhydrique « HCl »	75 m ³ / jour	50 m ³ / jour
Soude caustique liquide « NaOH »	50 m ³ / jour	50 m ³ / jour

C. Capacité de stockage

Tableau 21. : Capacité de stockage

Produits	Capacité	
	Stockage	Moyen
Hypochlorite de sodium « NaClO »	360 m ³	Citernes de stockage appropriées de 120 m ³ situés à l'intérieur du bloc de production
Acide chlorhydrique « HCl »	480 m ³	
Soude caustique liquide « NaCl »	240 m ³	

I.2 Description des opérations unitaires du processus.

I.2.1 Processus de production

Le processus de production est mis en place en faveur de Flash Chemicals Industry (FCI) par l'entreprise, Engineering Chemicals Industries (ECI), cette compagnie d'origine tunisienne, composée d'une équipe d'ingénieurs, de techniciens supérieurs et d'un bureau d'études techniques, travaille dans le secteur de l'industrie chimique à base d'électrolyse membranaire depuis septembre 2003. Sa principale activité est l'ingénierie des processus industriels, elle est spécialisée dans la production :

- + Du Chlore, l'hypochlorite de sodium 48 à 50°C hL,
- + De la Soude Caustique 33%
- + De l'hypochlorite de calcium.

I.2.2 Matières premières principales.

I.2.2.1 L'eau de forage

L'eau utilisée dans le processus de production est captée d'un forage situé au sud du complexe industriel. Selon les données fournies par l'agence du bassin hydraulique saharien de la wilaya d'Ouargla (ABHS), l'ouvrage de prélèvement est localisé par les coordonnées géographiques suivantes :

- + X=5.424409 deg.m
- + Y=31.965334 deg.m
- + Z=193 m

L'épaisseur de la nappe exploitée est de 40 m et se trouve à une profondeur de 240 m. Cette nappe est issue d'une formation géologique connue sous le nom d'éocène-sénonien, elle est constituée principalement par une couche de calcaire sur une épaisseur qui peut aller de 150 m jusqu'à 250 m. L'eau de cette nappe est aspirée grâce à une pompe à travers une conduite PEHD de diamètre trois (3") pouces, elle est ensuite acheminée vers le stockage dans deux (02) grands réservoirs implantés près du forage, ayant une capacité chacun de 120 m³ (Figure 28.)

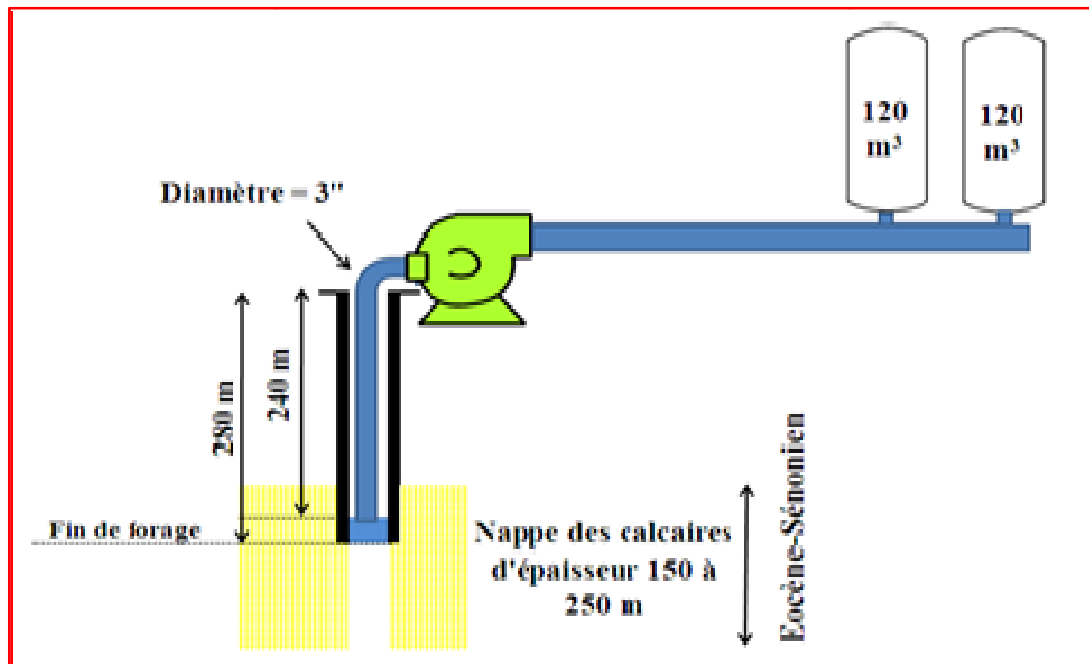


Figure 28. : Schéma de l'ouvrage de prélèvement d'eau d'alimentation

I.2.2.2 Le sel brut (Chlorure de sodium « NaCl »)

L'approvisionnement en matière de sel industriel brute ,utilisé pour préparer la saumure destinée à alimenter l'unité d'électrolyse à membrane, est assuré par deux entreprises « AL MALLAHAT » et « MALH AL DJANOUB ».C'est un sel de type lagunaire (solaire) , formé généralement suite aux vents favorables durant la période (avril à septembre) provoquant l'évaporation naturelle des lacs salés d'El Hamraia faisant partie du grand chott Mérouane près de la région de la wilaya d'El Oued.(Figure 29.)



**Figure 29. : Photos du sel brut utilisé dans le processus de production
(Chott d'El Hamraia - W.El Oued)**

I.2.2.3 Electricité

Pour assurer la fabrication des produits finis, en plus du sel (NaCl) et de l'eau, l'entreprise utilise aussi de l'énergie électrique. Sans cette énergie il ne peut y avoir de production des produits finis. Ainsi l'électricité est considérée dans ce type de processus comme étant la matière première la plus importante pour la production et aussi la plus coûteuse. Toute coupure de celle-ci encourt le fonctionnement du processus de fabrication et peut engendrer des dégâts matériels et surtout un manque à gagner très considérable.

I.2.3 Schéma général du processus de traitement et de production adopté par FCI

Les principales opérations unitaires effectuées au niveau du complexe industriel FCI lors de l'enchaînement du processus comprenant les étapes de traitement de la saumure et de la production d'hypochlorite de sodium, acide chlorhydrique et soude caustique par la technique membranaire sont représentées par le diagramme général suivant (Figure 30.).

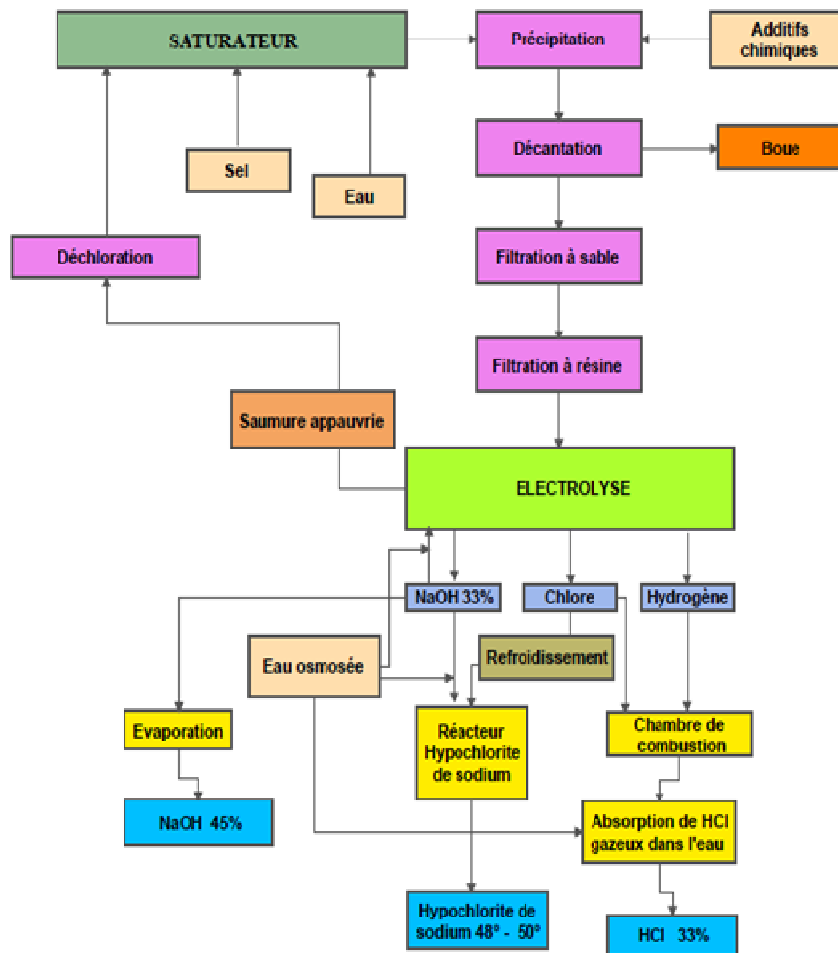


Figure 30. : Diagramme général relatif au processus de traitement et de production adapté par l'entreprise FCI

L'unité d'électrolyse à membrane se trouve au cœur de ce processus, son bon fonctionnement ainsi que sa performance, nécessitent en premier lieu l'utilisation d'une saumure de meilleure qualité et une eau parfaitement traitée. Leur obtention est assurée par une série de traitements ayant pour objectif l'élimination de toutes les impuretés liées principalement à l'origine et à la qualité des matières premières principales utilisées (Eau et sel).

I.2.3.1 Préparation et traitement de la saumure

A. Dissolution du sel au niveau du saturateur

La préparation de la saumure s'effectue par le mélange des deux matières premières principales (Eau et sel) dans leur état brut, la dissolution s'effectue au niveau d'un bassin saturateur (Figure 31.), ayant un volume total de 160 m^3 , il est doté, à son fond, d'un système de tuyauteries disposées en parallèle et munies de petits trous qui permettent à l'eau de s'écouler en jet d'une manière uniformément répartie (Figure 32.). La vitesse d'écoulement du liquide à travers ces jets est suffisamment favorable pour assurer une bonne pénétration du liquide entre les interstices du sel solide, et permet ainsi de vaincre les forces attractives (cohésion) internes aux cristaux, ce qui favorise le détachement et la dissociation des particules tout en améliorant leur hydratation et dispersion pour obtenir une saumure parfaitement homogène.



Figure 31. : Photo du saturateur de saumure

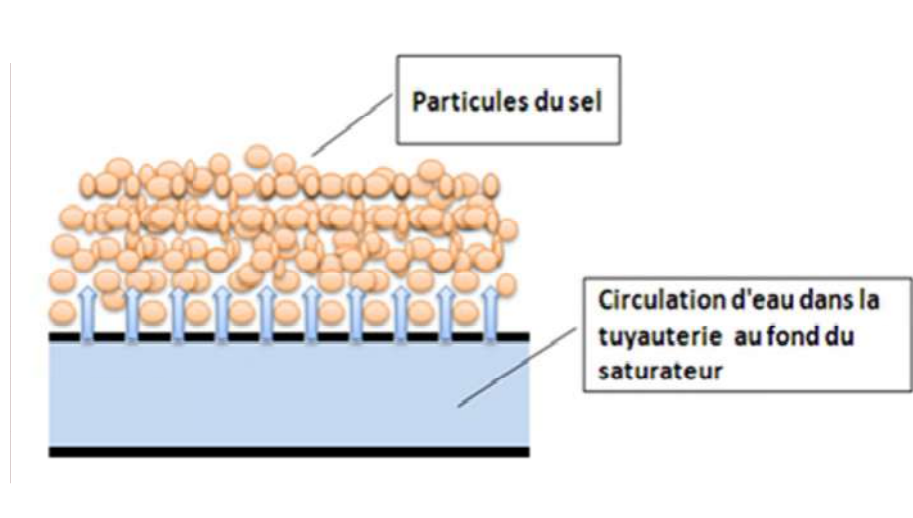


Figure 32. : Dissolution de sel au niveau du saturateur

B. Précipitation des éléments indésirables

L'étape initiale de la purification utilise du carbonate de sodium (Na_2CO_3) et de l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour précipiter les ions calcium sous forme de carbonate (CaCO_3) et le magnésium sous forme d'hydroxyde ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). L'élément fer qui est aussi présent en traces dans le sel précipite pendant cette opération sous forme d'hydroxydes.

C. Décantation des éléments indésirables

L'opération de décantation est un traitement physique qui s'effectue dans deux (02) réservoirs qui travaillent en intermittences, ayant chacun une capacité totale de 60 m^3 , conçus en acier en forme cylindrique à base conique (Figure 33.).

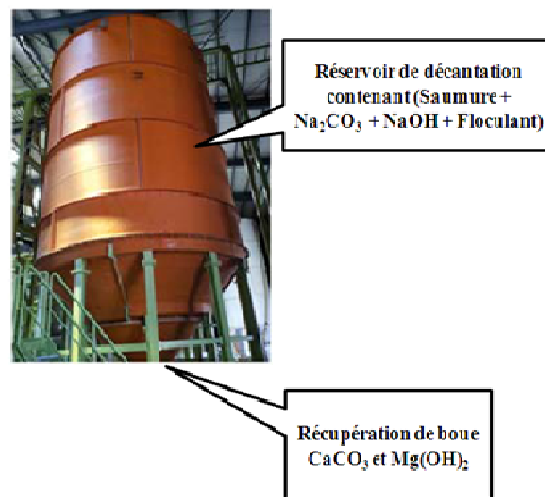


Figure 33. : Réservoir de décantation de la saumure

La décantation a pour objectif de séparer la saumure de ses impuretés résultant suite à la précipitation des ions calcium, magnésium et de l'élément fer. L'ajout d'un flocculant chimique à base de polymère est souvent nécessaire dans cette opération afin de favoriser l'agglomération des matières en suspension et des colloïdes sous forme de floccs récupérés au fond sous forme de boue à rejeter.

La phase liquide se trouvant dans la partie supérieure du décanteur est écoulee par effet de gravité vers une citerne qui sert pour un stockage temporaire intermédiaire de la saumure décantée avant d'être envoyée par l'intermédiaire d'une pompe vers le filtre à sable.

D. Filtration sur support à sable

Les impuretés de la saumure que la décantation n'a pas réussi à les éliminées en totalité à cause de la petite taille de leurs particules font l'objet d'une opération de filtration par un système composé de deux colonnes verticales (Figure 34) remplies de sable quartzéux dont la granulométrie est spécialement calibrée pour piéger les matières en suspension restantes. La circulation de la saumure se fait dans le sens du haut vers le bas ou elle est récupérée par des crépines qui empêchent l'écoulement du sable avec la saumure filtrée. A ce niveau de filtration, la clarification de la saumure est contrôlée en mesurant sa turbidité. La présence de turbidité ayant une valeur au-delà de 10 NTU entraine immédiatement le changement de circulation de la saumure vers le second filtre afin d'effectuer un lavage à contre courant pour récupérer l'efficacité du filtre à sable qui a été épuisé.

L'entreprise dispose d'une unité automatisée pour le nettoyage des filtres à sable. Elle est composée de deux réservoirs ayant une capacité de 20 m³ chacun, remplis pas une saumure saturée et d'une pompe reliées à des vannes pneumatiques.



Figure 34. : Filtres à sable

E. Filtration sur support à résine

L'étape finale dans le processus de traitement de la saumure, consiste à faire faire passer la saumure semi purifiée issue de la filtration à sable par un lit de résine synthétique échangeuse de cations, de type « Perlite S930Plus » remplie dans trois (03) colonnes disposées verticalement (Figure 35.). Cette filtration a pour objectif principal de capter les ions responsables de la dureté en l'occurrence, calcium et magnésium. La filtration par résine est une opération destinée à réduire la teneur des ions, Ca^+ et Mg^+ jusqu'à $20 \mu g/l$. Elle se déroule dans deux colonnes tandis que la troisième est mise en régénération de sa résine par une solution de NaCl saturée qui est récupérée à la fin et réutilisée pour la dissolution du sel dans le saturateur.



Figure 35. : Filtres à résine

I.2.3.2 Traitement de l'eau de forage au niveau de l'osmoseur

L'eau est la matière première de toute la gamme des produits finis envisagés par le processus mis en place au niveau du complexe industriel de FCI. Sa qualité a donc un impact direct sur leurs propriétés physiques et chimiques. En fait, elle est un paramètre capital à prendre en compte pour mettre en œuvre des produits répondant aux normes de la bonne qualité. Par conséquent, l'eau de forage doit faire l'objet d'un traitement qui vise à obtenir la pureté exigée et qui confère aux produits finis les caractéristiques répondant aux normes internationales. Pour ce faire, l'entreprise FCI dispose d'une unité d'osmose inverse (Figure 36.) qui fonctionne selon le schéma indiqué dans la (Figure 37.)

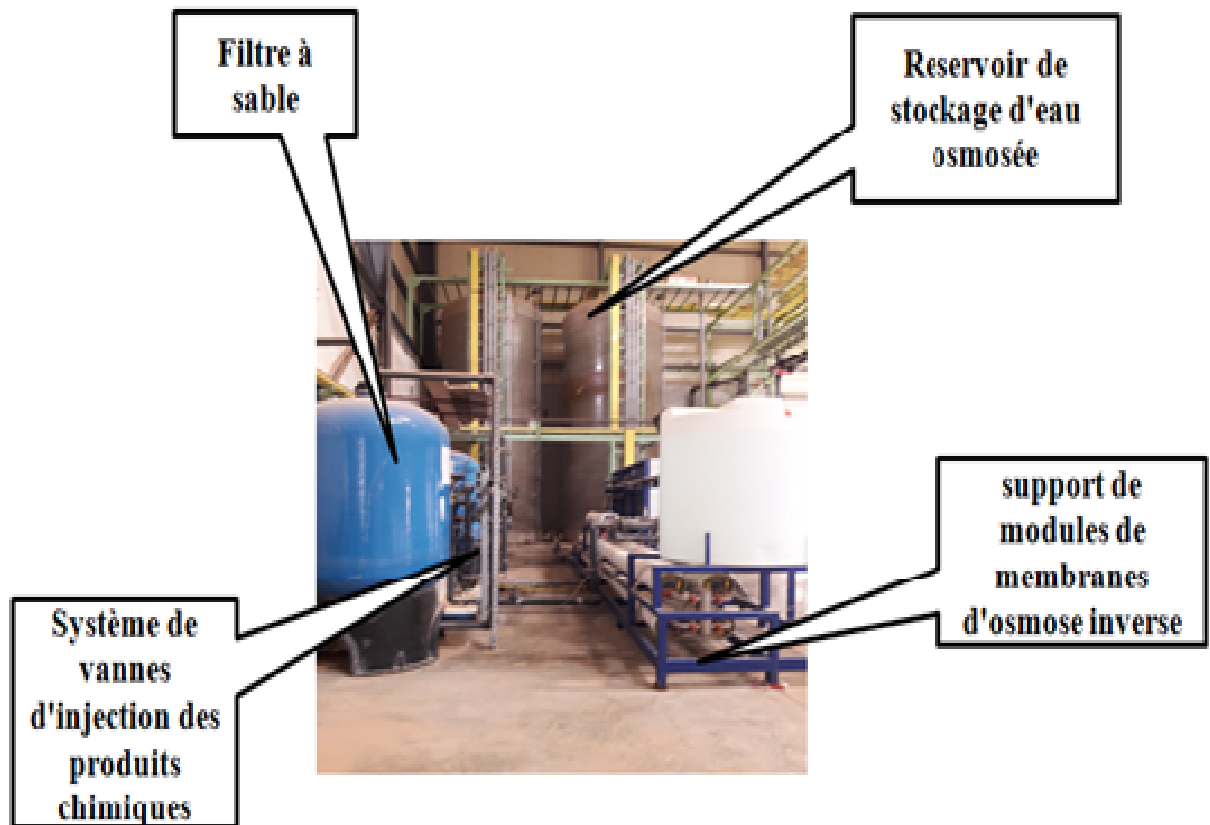


Figure 36. : Unité de traitement d'eau par osmose inverse

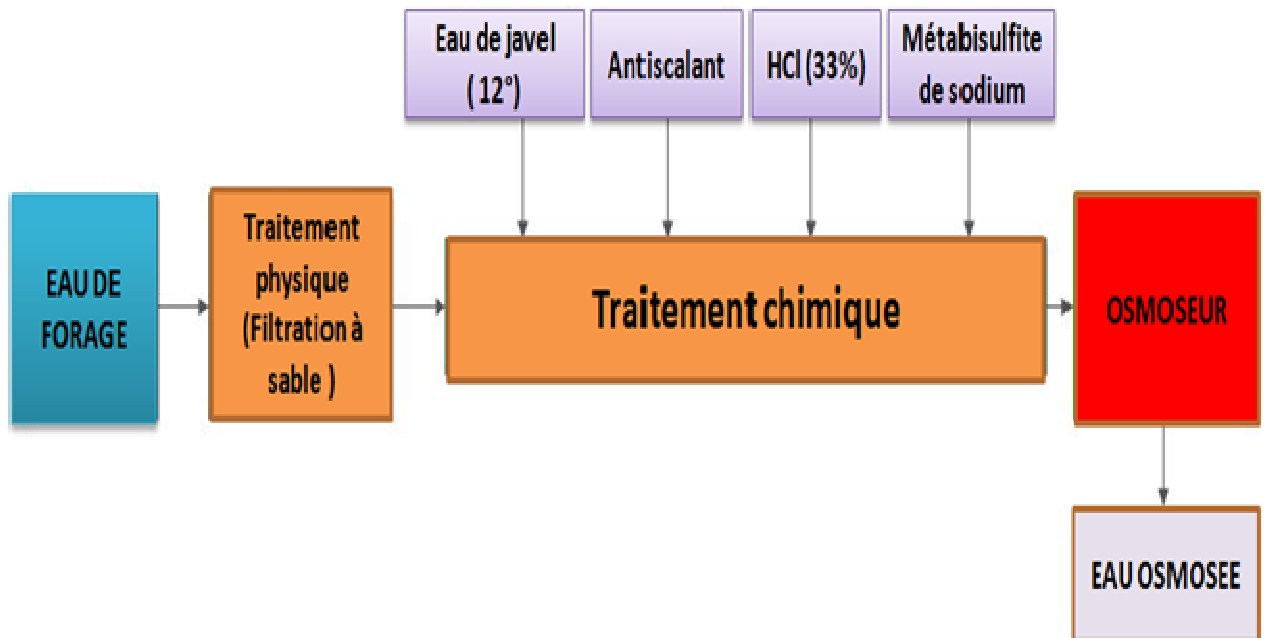


Figure 37. : Schéma du procédé de traitement d'eau par osmose inverse

Effectuer un prétraitement de l'eau de forage avant son admission dans l'osmoseur est plus que nécessaire pour éviter l'encrassement de la membrane, car il peut facilement perturber le procédé de purification. L'eau subit tout d'abord un traitement physique en passant par un filtre à sable qui permet d'éliminer les matières en suspension, puis elle est traitée chimiquement en lui injectant successivement les produits suivants :

- + **Eau de javel (12°)** pour la désinfection ;
- + **Anti scalant** qui a pour rôle de créer une couche mince sur la membrane de l'osmoseur pour la protéger contre la corrosion (la solution d'injection est préparée par dilution de 4,5 litres d'anti-scalant dans 50 litres d'eau déminéralisée) ;
- + **Acide chlorhydrique (HCl 33%)** pour ajustement de pH et élimination du calcaire
- + **Méta-bisulfite de sodium** ayant pour rôle la dé-chloration (dissolution de 2,5Kg de méta-bisulfite dans 50 litres d'eau déminéralisée).

Le méta-bisulfite de sodium (SMBS) réagit initialement avec l'eau pour former du bisulfite de sodium (SBS) :



Ensuite, le SBS réagit avec l'acide hypochloreux pour former des sous-produits exempts de chlore libre :



Ces sous-produits sont tous facilement éliminés par le système d'osmose inverse. L'osmoseur utilisé a cet effet étant de marque « PENTAIRE Codeline AquaLine PROMINENT » (Figure 38.).



Figure 38. : Osmoseur PENTAIRE AquaLine

Les type de membranes utilisées par cet osmoseur produisent une eau traitée avec un débit de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ et d'une conductivité électrique variant de $5 \mu\text{s}/\text{cm}$ à $30 \mu\text{s}/\text{cm}$.

L'eau osmosée ainsi obtenue est envoyée par l'intermédiaire de pompes vers deux réservoirs :

- ✚ Le premier pour alimenter l'unité d'électrolyse
- ✚ Le second est destiné au stockage de l'eau
 - ❖ Qui sert à la dilution de la soude caustique utilisée dans la production de l'hypochlorite de sodium,
 - ❖ Qui sert à alimenter l'unité d'acide chlorhydrique de l'eau de refroidissement, de production et dilution de HCl.

I.2.3.3 Principe de fonctionnement de l'électrolyse à membrane

Toutes les étapes ayant été effectuées jusqu'ici avaient comme objectif la préparation d'une saumure ainsi qu'une eau de très haut niveau de pureté. Une fois cela a été réalisé, l'opération d'électrolyse peut alors prendre sa place dans le processus, elle se déroule dans un électrolyseur issu de la technologie la plus moderne et répandue actuellement dans le monde, il est composé d'un nombre de 42 éléments (cellules), assemblées en parallèle et insérées dans un support métallique (Figure 39).

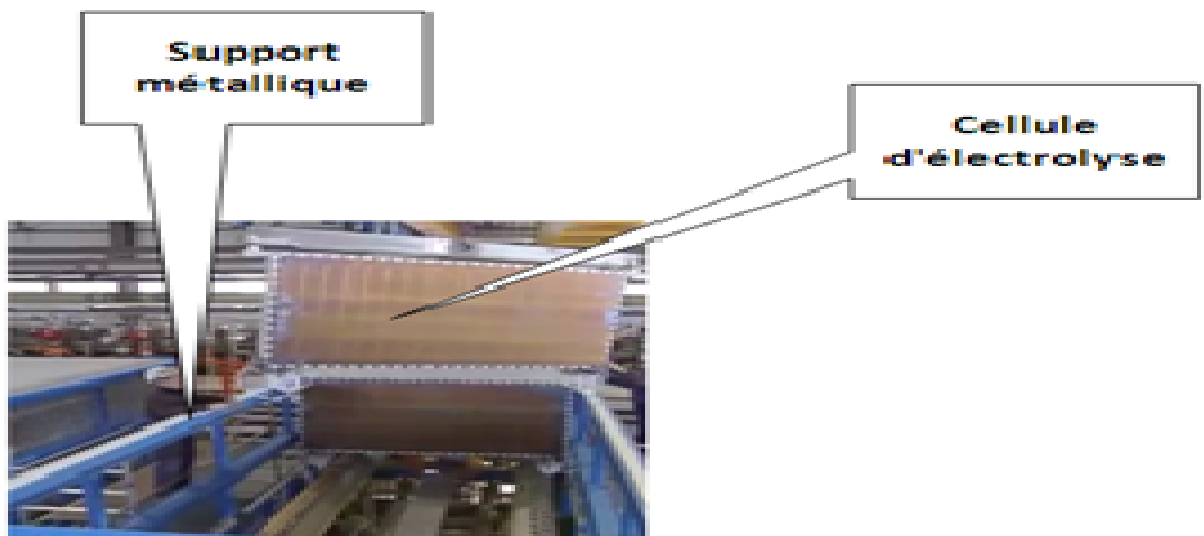


Figure 39. : Disposition des cellules d'électrolyse

Chacune des cellules est constituée de deux électrodes plates, l'anode en titane et la cathode en nickel, elle est divisée en deux compartiments séparés par une membrane poreuse d'environ $0,15 \text{ mm}$ d'épaisseur, fabriquée par un polymère per-fluoré des deux cotés (Figure 40.) qui permet la migration sous du champs électrique appliqué, des cations Na^+ solvatés pour former un alcali caustique dans le compartiment cathodique, tandis que la production de chlore gazeux est générée dans le compartiment Anodique.



Figure 40. : Membrane échangeuse de cations

L'alimentation des cellules en saumure se fait par l'intermédiaire de longs tuyaux minces conçus en matière plastique et reliés aux cellules grâce à des brides de serrage, (Figure 41.).

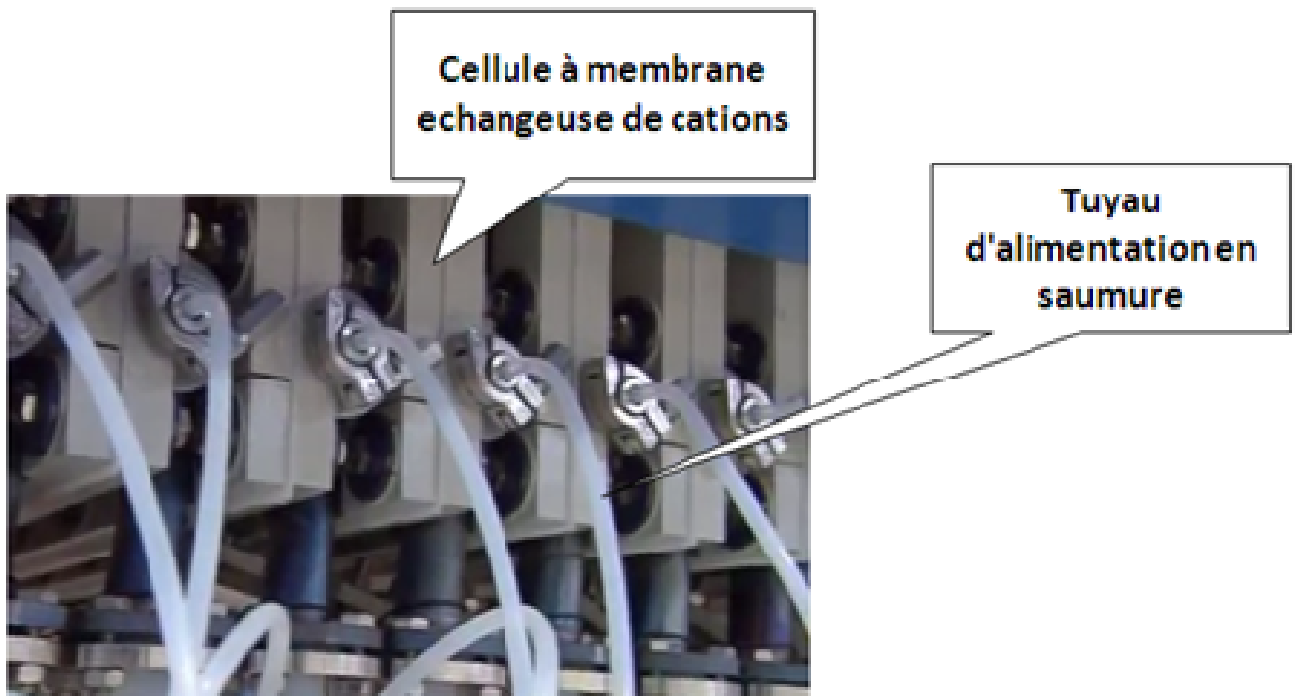


Figure 41. : Tuyauterie d'alimentation en saumure

Les réactions chimiques qui se produisent au niveau des compartiments de chaque cellule sont indiquées dans la (Figure 42.).

Au niveau du compartiment anodique, les ions chlorure sont oxydés en chlore gazeux selon réaction :



La saumure épuisée (Appauvrie) est déchargée du compartiment anodique pour subir une dé-chloration avant d'être renvoyée de nouveau au saturateur pour une réutilisation dans le processus de production.

Les ions Na^+ qui migrent à travers la membrane vers le compartiment cathodique vont se combiner avec les ions hydroxydes OH^- pour produire de la soude caustique de 32% à 33% selon la réaction :

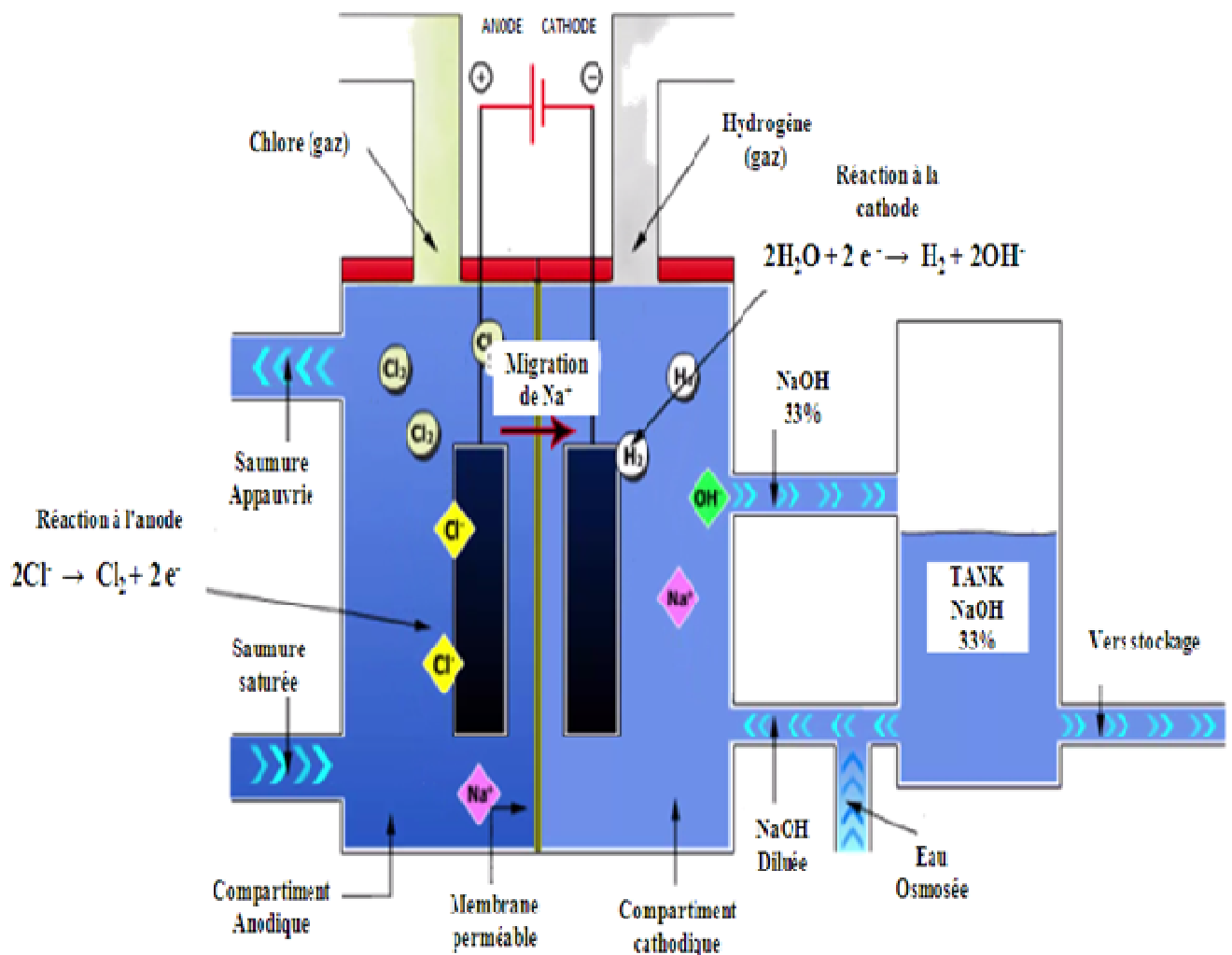


Figure 42. : Réactions chimiques dans les compartiments d'une cellule à membrane.

I.3 Unités de production

I.3.1 Unité de production d'hypochlorite de sodium (NaClO)

Le chlore à l'état gazeux dégagé dans les compartiments anodiques des cellules de l'électrolyseur est refroidi à travers un échangeur à plaques en titane jusqu'à une température de l'ordre de 25°C à 30°C, il est ensuite aspiré vers un réacteur (Figure 43.) pour réagir avec une solution de soude diluée à 16 % et circulant à contre courant. La réaction ayant lieu suite à ce contact donne lieu à la formation d'hypochlorite de sodium NaClO, dont la capacité de production étant 30 à 120 m³/j appelé communément eau de javel, suivant l'équation chimique suivante :

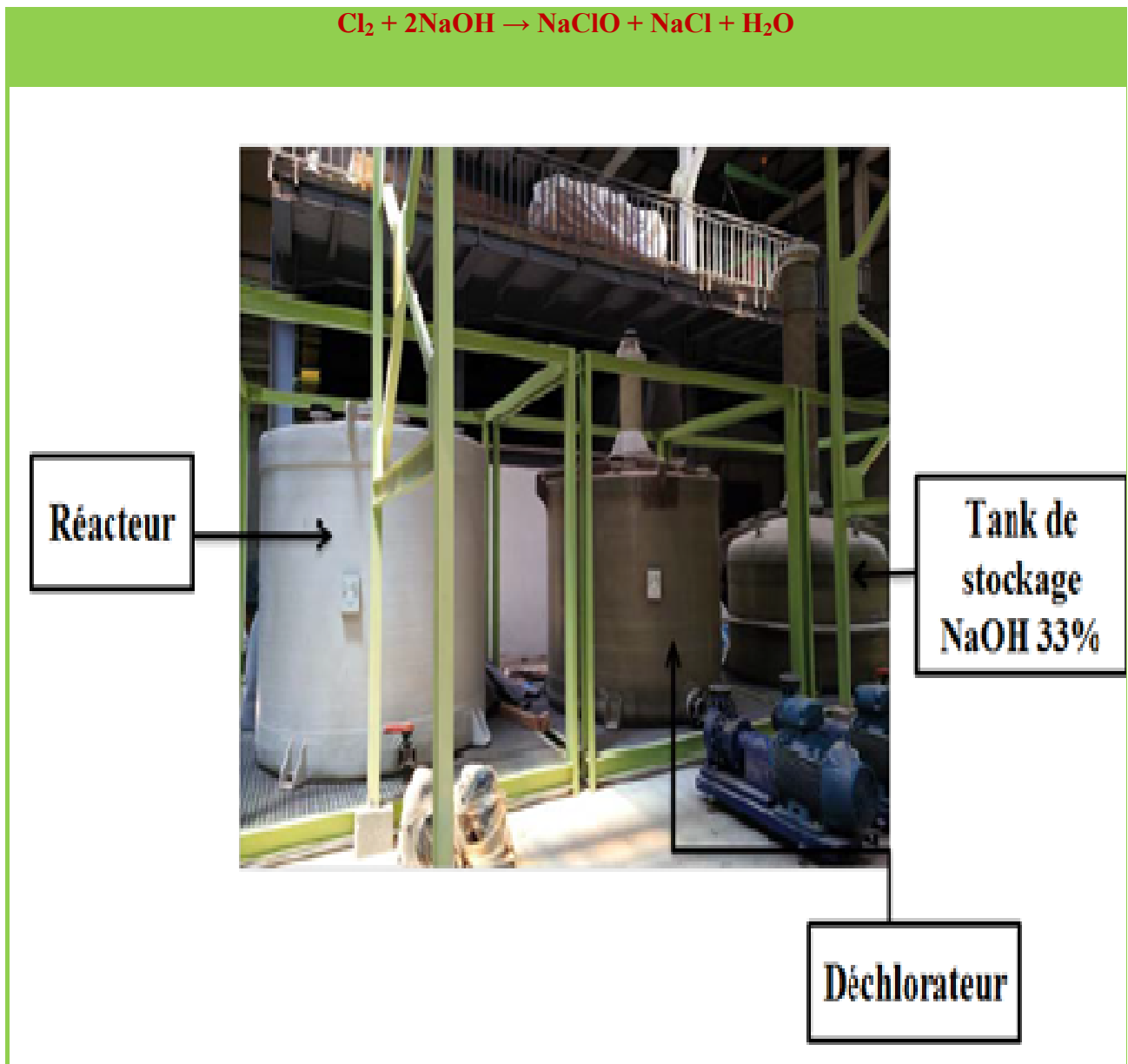


Figure 43. : Equipements de production d'hypochlorite de sodium

I.3.2 Unité de synthèse d'acide chlorhydrique (Chlorure d'hydrogéné « HCl »)

La synthèse de l'acide chlorhydrique se fait au niveau d'une installation de type MERSEN, indiquée ci-dessous (Figure 44.). Le chlore, l'hydrogène et l'acide chlorhydrique sont des produits potentiellement dangereux, ils doivent être manipulés avec soin pour éviter tout risque d'accident. C'est pourquoi MERSEN a opté pour un équipement compact où la synthèse, l'absorption et les phases de refroidissement sont intégrées dans une seule unité, conçue en graphite imprégné qui offre une résistance exceptionnelle aux contraintes thermiques et mécaniques les plus extrêmes. L'unité de synthèse est constituée de quatre éléments principaux :

- ✚ Le brûleur en quartz,
- ✚ Le four,
- ✚ L'absorbeur
- ✚ Le séparateur équipé d'un disque de rupture.

Cette installation a pour but la production d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique avec une concentration massique de 33% en chlorure d'hydrogène (HCl). La réaction de production de HCl par combustion du chlore avec l'hydrogène est une réaction exothermique dégageant 604 kcal par kilogramme de HCl gazeux produit. La température lors de la production de HCl gazeux atteint plus de 2400°C. La capacité de production en HCl au brûleur est de 50 à 75 m³/j de chlorure d'hydrogène. La réaction mise en jeu est une réduction du chlore (Cl₂) par de l'hydrogène (H₂). La solution liquide est obtenue par absorption dans l'eau de l'HCl gazeux, issu de la réaction de combustion.

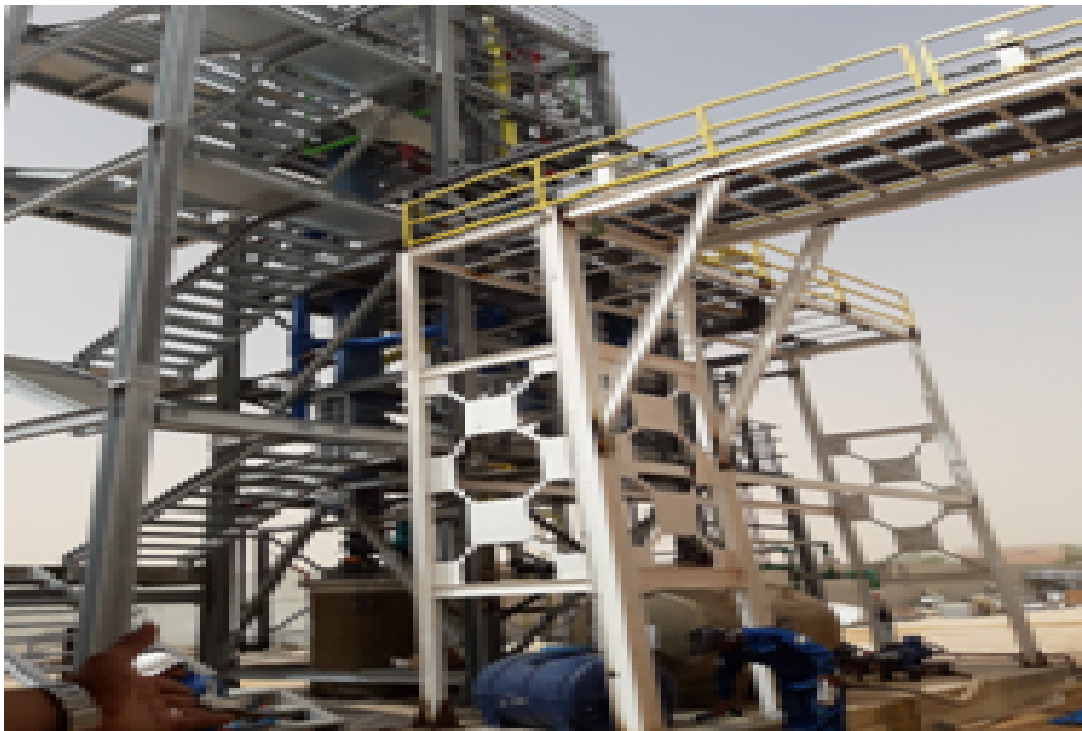


Figure 44. : Unité d'acide chlorhydrique (MERSEN)



CHAPITRE 2

Matériel et méthodes

II Matériels et méthodes

II.1 Introduction

Après avoir décrit les grandes lignes du fonctionnement et de l'enchaînement de toutes les opérations unitaires impliquées lors de déroulement du processus mis en place au niveau du complexe industriel de FCI, pour le traitement et la transformation des matières premières, eau et sel, issues des ressources locales, en produits finis, à savoir :

- ✚ L'hypochlorite de sodium « NaClO » (de $48^{\circ} \pm 2^{\circ}$)
- ✚ La soude caustique liquide « NaOH » (de 32% à 45%)
- ✚ L'acide chlorhydrique « HCl » (de 32% à 33%).

Il est aussi très important de mettre l'accent sur les différentes méthodes expérimentales adoptées pour la surveillance et le contrôle systématique de la performance et l'efficacité du processus de l'usine.

Les mesures des différents paramètres d'évaluation de la qualité de saumure destinée à l'électrolyse, ont été effectuées au moyen des équipements et d'instruments de haute précision qui sont disponibles au niveau du laboratoire du site.

Les analyses des échantillons d'eau, prélevés à chaque étape de traitement ainsi que celle du sel brut, ont été réalisées auprès des laboratoires accrédités.

Le plan final et l'approche technique de conception de la station d'épuration et de traitement des eaux de rejet ont été réalisés avec le conseil et l'assistance du bureau d'études « ATC –W.Setif »

II.2 Plan général descriptif des circuits d'eau d'alimentation et des rejets liquides

Afin de donner une vue d'ensemble sur les points essentiels du traitement en amont et en aval de l'eau destinée à l'alimentation du processus de l'usine de FCI, nous avons fait appel à un plan général (Figure 46.) qui prend en considération tous les circuits parcourus par l'eau, à partir de sa source de captage et tout au long de son acheminement à travers les équipements implantés dans la zone du processus.

Le plan illustre d'une manière implicite les principaux traitements réalisés, ainsi que les endroits concernés par le prélèvement des échantillons représentatifs choisis pour effectuer les différents contrôles et analyses des paramètres physico-chimiques.

Ce plan indique d'autre part, les flux de rejets liquides résultant à la suite de chaque opération et ce dans le but de mettre en évidence la composition finale de l'eau résiduaire qui fera l'objet d'un traitement spécial en aval visant à sa réutilisation, sinon, à la diminution maximale de sa charge polluante permettant d'effectuer son diversement dans le réseau d'assainissement public dans les meilleures conditions possibles toutes en préservant l'environnement en répondant aux normes et exigences légales dédiées aux rejets industriels.

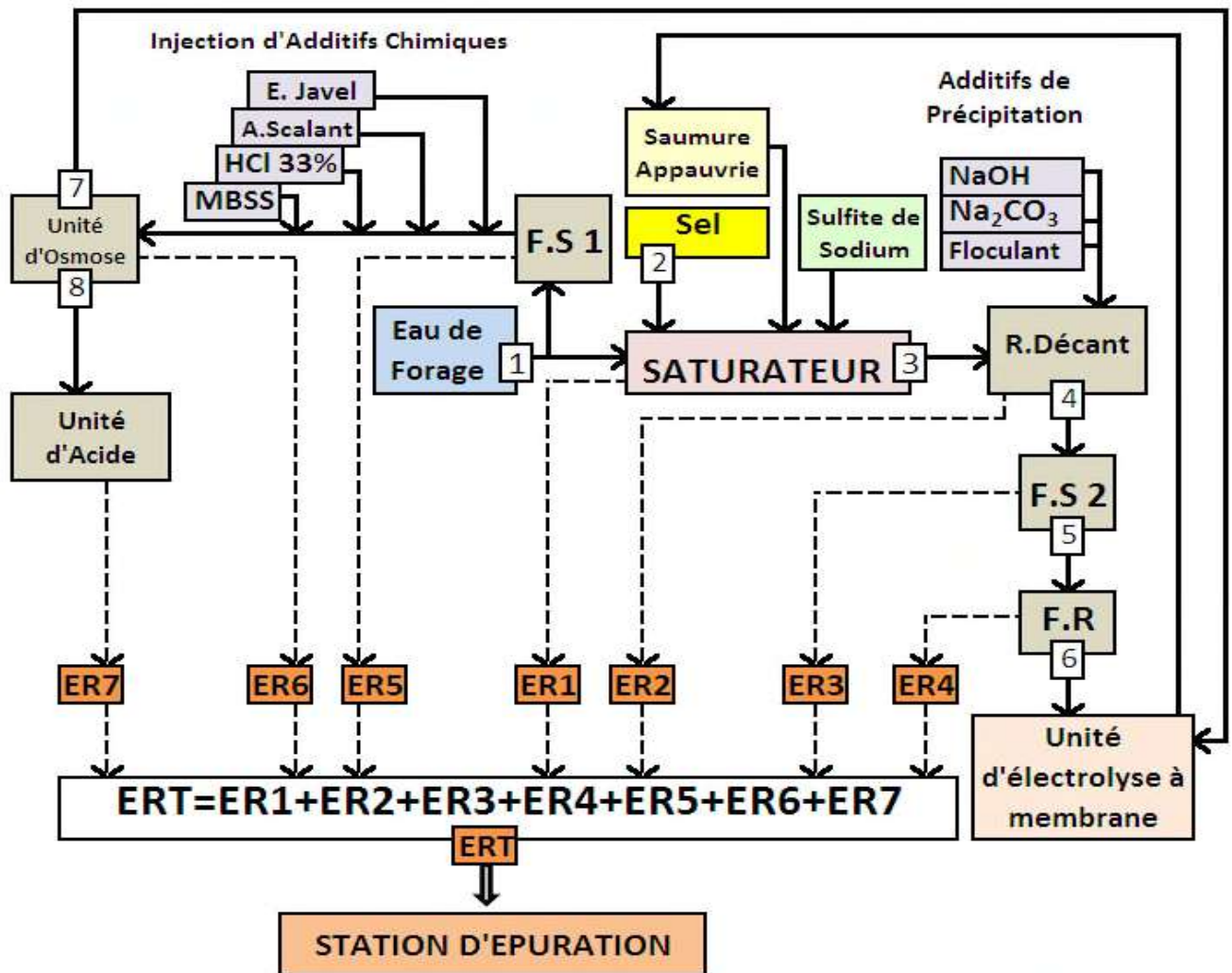


Figure 46. : Plan général descriptif des circuits d'eau d'alimentation et des rejets liquides

Légende du plan :

- ✚ **Trait continu en gras** : Circuits d'eau de processus
- ✚ **Trait interrompu** : Circuits des eaux de rejets issues des opérations unitaires
- ✚ **F.S1** : Filtres à sable de l'unité d'osmose inverse
- ✚ **F.S2** : Filtres à sable du circuit primaire de purification de la saumure
- ✚ **MBSS** : Méta-bisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)
- ✚ **R.Décant** : Réservoirs de décantation
- ✚ **F.R** : Filtres à résine
- ✚ **Floculant** : Type Poly électrolyte cationique
- ✚ **A. Scalant** : Additif anticorrosion
- ✚ **ER** : Eau de rejet issue d'une opération unitaire
- ✚ **ERT** : Eau de rejet totale collectée et destinée au traitement au niveau de la station d'épuration du site
- ✚ **1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8** : Représentent les endroits de prélèvement d'échantillons de contrôle et analyse.

II.3 Analyse des matières premières de la chaîne de production

Pour l'eau, le prélèvement d'échantillon a été effectué manuellement au niveau de la vanne principale de la conduite du puits par le remplissage d'un flacon en plastique ayant une capacité de 1000 cm³, bien rincé à l'eau distillée afin d'éviter toute contamination de l'eau de forage destinée à l'analyse.

Pour le sel, le prélèvement a été effectué aussi manuellement et d'une manière aléatoire par le remplissage d'un sachet en papier d'un poids de masse de 500 gr de sel brut pris des amas de sel stockés sur site à l'air libre.

La détermination des paramètres physico-chimiques de l'échantillon d'eau de forage (pH, conductivité électrique, Dureté, turbidité, Chlorures (Cl⁻), Sulfates (SO₄⁻), Fer dissous (Fe), Matière en suspension) ainsi que la composition du sel brut ont été mesurés auprès des laboratoires spécialisés, respectivement, le laboratoire d'analyses et d'essai physico-chimiques et microbiologiques « CATALYSE – Wilaya de Constantine » et le laboratoire d'analyse et de contrôle de la qualité et de la conformité « FATILAB – Wilaya d'El Oued ».

II.4 Paramètres contrôlés au niveau du saturateur

II.4.1 Contrôle de la densité de saumure

La saumure à introduire dans le compartiment anodique de l'unité d'électrolyse doit avoir une densité située dans l'intervalle (1,18 à 1,19) ce qui correspond à une concentration de NaCl dans le saturateur comprise entre (280 g/l et 300 g/l).

Le contrôle de la densité s'effectue à l'aide du matériel (Figure 47.).



Aréomètres (densimètres)
normalisés de
1100 à 1200 Kg/ m³.



Eprouvette de 250 ml.



Thermomètre.

Figure 47 : Matériel utilisé pour le contrôle de la densité de saumure

II.4.2 Mode opératoire

- ✚ Nettoyer et sécher tout l'appareillage avant utilisation
- ✚ Verser l'échantillon dans l'éprouvette tenue inclinée afin d'éviter la formation de bulles d'air
- ✚ Amener l'échantillon à une température de 20 °C à 25°C
- ✚ Placer l'éprouvette verticale, plonger doucement le densimètre en le maintenant dans l'axe de l'éprouvette et en le retenant dans sa descente. Lorsqu'il a pris une position d'équilibre, l'enfoncer légèrement, puis le laisser reprendre une position d'équilibre, sans qu'il touche l'éprouvette
- ✚ Noter la lecture sur l'échelle correspondant au plan d'intersection de la surface liquide horizontale avec la tige.

Pour faire la lecture, regarder l'échelle à travers le liquide, en ajustant la ligne de visée pour être dans le plan de la surface du liquide.

La valeur de la densité lue sur le densimètre est corrélée avec les valeurs de concentration de NaCl données dans la table de densité de saumure (Tableau 10.)

II.4.3 Contrôle et ajustement du pH de la saumure

Le contrôle précis du pH est d'une extrême importance tout au long du procédé de purification de la saumure. La précipitation des impuretés comme les sulfates, les carbonates et les hydroxydes de calcium, le magnésium est rendue beaucoup plus efficace lorsque la saumure se trouve dans un milieu basique, les valeurs du pH prescrites pour le cas de la saumure utilisée dans l'opération d'électrolyse membranaire doivent se situer dans une plage comprise entre 7 et 12.

Le contrôle systématique de la basicité de saumure s'effectue généralement par la méthode simple qui consiste à l'ajout de quelques gouttes de l'indicateur coloré (phénolphtaléine) à un échantillon prélevé au niveau du saturateur.

La mesure du pH se fait sur site à l'aide d'un pH mètre à deux électrodes (Figure 48)



Figure 48 : pH-mètre

II.4.4 Mode opératoire

- ✚ Allumer le pH-mètre et laisser se stabiliser pendant ou moins 30 min avant toute opération
- ✚ Etalonner l'appareil et introduisant les trois solutions étalons (pH=4, pH=9 pour l'étalonnage et pH=7 pour la vérification)
- ✚ Rincer l'électrode de verre avec l'eau osmosée de 5µs/cm, puis on l'immerge dans un volume suffisant d'échantillon à analyser placée dans un bécher
- ✚ Laisser le pH-mètre se stabiliser pendant quelques minutes et noter la valeur indiquée du pH.

Remarque

L'appareil doit être régulièrement étalonné pour que ses mesures soient justes

II.4.5 Contrôle de la présence du chlore dans la saumure

Le chlore dissous dans la saumure appauvrie, recyclée dans le processus à la sortie de l'électrolyseur, peut engendrer un effet néfaste au niveau des filtres à résine en dégradant sa capacité et son efficacité de retenir les ions Ca^+ et Mg^+ , ce chlore doit être donc totalement neutralisé.

II.4.6 Mode opératoire

La présence du chlore dans la saumure au niveau du saturateur est détectée en suivant les étapes ci après :

- ✚ Prélever un échantillon de saumure
- ✚ Ajout de quelques gouttes de phénophtaléine pour s'assurer de la basicité du milieu
- ✚ Acidifier le milieu par l'ajout d'environ 5 ml d'acide chlorhydrique dilué
- ✚ Ajouter un volume d'environ 5ml d'une solution d'iodure de potassium KI fraîchement préparée
- ✚ L'apparition d'une couleur jaune après l'ajout de KI indiquera la présence du chlore.

La neutralisation de chlore s'effectuera alors par dissolution d'une solution aqueuse de sulfite de sodium.

II.5 Paramètres contrôlés au niveau de réservoir de décantation

Le contrôle après décantation de la saumure se fait sur site par la détermination des titres alcalimétriques simple (TA) et totale (TAC) [29].

II.5.1 Titre alcalimétrique simple (TA)

Le TA est le volume d'acide exprimé en ml à 1 M en présence de phénophtaléine

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

XIX

II.5.2 Titre alcalimétrique totale (TAC)

Le TAC est le volume d'acide exprimé en ml à 1 M en présence de méthyle orange.

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

Ces titres sont mesurés pour un échantillon prélevé de la phase supérieure de la saumure décantée par ajout d'une solution titrée acide en présence d'indicateurs colorés dont le changement de couleur indique leur neutralisation.

II.5.3 Mode opératoire

- ✚ Prélever dans un Erlenmeyer 100 ml d'un échantillon de la saumure ;
- ✚ Ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine et doser avec une solution d'acide chlorhydrique (1M) jusqu'à la disparition de la coloration rose, noter le volume V_1 ;
- ✚ Ajouter quelques gouttes de méthylorange dans le même Erlenmeyer en complétant le dosage jusqu'à la disparition de la coloration orange, noter V_2 .

Où :

V_1 : Le volume nécessaire pour neutraliser l'alcalinité libre.

V_2 : Le volume nécessaire pour neutraliser la totalité des ions carbonates.

Notons :

$$\begin{aligned} \text{TA} &= 10 \times V_1 \\ \text{TAC} &= 10 \times V_2 \\ [\text{NaOH}] &= 40 \times (2 \times \text{TA} - \text{TAC}) \text{ en mg/l} \\ [\text{Na}_2\text{CO}_3] &= 106 \times (\text{TAC} - \text{TA}) \text{ en mg/l} \end{aligned}$$

Les valeurs admises sont:

$$\begin{aligned} 80 \text{mg/l} < [\text{NaOH}] < 160 \text{mg/l.} \\ 106 \text{mg/l} < [\text{Na}_2\text{CO}_3] < 318 \text{mg/l.} \end{aligned}$$

II.6 Paramètres contrôlés au niveau des filtres à sable

Les contrôles de routine effectués pour la saumure à sa sortie des filtres à sable consistent généralement en premier lieu à confirmer la basicité et l'absence de chlore par les méthodes citées auparavant.

L'autre paramètre important à vérifier à ce niveau est la clarification (limpidité) de la saumure ce qui revient à déterminer la turbidité.

II.6.1 Mode opératoire

La mesure de la turbidité s'effectue directement au moyen d'un turbidimètre optique et d'une cellule de mesure en verre (Figure 49.).



Figure 49 : Turbidimétrie optique WTW Turbo 430 IR

II.6.2 Les étapes de mesure sont :

- ✚ Etalonnage de l'appareil
- ✚ Agitation du flacon contenant l'échantillon
- ✚ Nettoyage de la cellule de mesure
- ✚ Remplissage avec l'échantillon et mettre dans le compartiment pour la mesure
- ✚ La valeur qui sera affichée, est exprimée en NTU.

II.7 Paramètres contrôlés au niveau des filtres à résine

Le paramètre le plus significatif à contrôler à la suite de filtration de la saumure par la résine est la dureté ou titre hydrotimétrique, exprimé par unité mg/l en CaCO_3 , les prescriptions exigent que sa valeur doive être réduite au dessous de 0.02 mg/l. La dureté est déterminée sur site à l'aide d'un spectrophotomètre de type « HACH DR 3900 » (Figure 50.).



Figure 50 : Spectrophotomètre HACH DR 3900

II.7.1 Réactifs utilisés

- ✚ Solution alcaline pour le test de Magnésium et de Calcium (1)
- ✚ Solution indicatrice de Magnésium et de Calcium (2)
- ✚ Solution d'EDTA [Éthylène Diamine Tétra-Acétique] 1M.

II.7.2 Matériel utilisé

- ✚ Cellules carrées de 10 ml
- ✚ Une fiole jaugée de 50 ml
- ✚ Eprouvette de 250 ml
- ✚ Appareil spectrophotomètre.

II.7.3 Mode opératoire :

- ✚ Prélever dans une éprouvette un échantillon de Saumure (Pur Brine)
- ✚ Introduire dans une fiole jaugée un volume de 50 ml de cet échantillon
- ✚ Ajouter 0,5 ml de réactif (1) et 0,5 ml de réactif (2) et bien agiter la solution
- ✚ Remplir les deux cellules du spectrophotomètre
- ✚ Ajouter dans la cellule N°1 quelques gouttes d'EDTA
- ✚ Cliquer sur la touche « programme favoris »
- ✚ Installer la cellule N°1 et cliquer sur démarrer puis cliquer sur " zéro"
- ✚ Retirer la cellule N°1 et installer la cellule N°2 puis cliquer sur « démarrer »
- ✚ Lire la concentration totale de Mg^{2+} et Ca^{2-} .

II.8 Paramètres contrôlés au niveau de l'unité d'osmose inverse

L'unité d'osmose inverse a pour rôle de produire deux types d'eau, la première doit avoir une concentration des impuretés de l'ordre de $5\mu s/cm$, elle est spécialement destinée à l'unité d'électrolyse. La seconde est destinée pour l'unité d'acide, elle doit avoir une concentration des impuretés de l'ordre de $30\mu s/cm$. Ces eaux sont contrôlées par des prélèvements d'échantillons à la sortie de l'unité d'osmose et envoyées au laboratoire du site afin d'effectuer la mesure de leur conductivité électrique (Figure 51.).



Figure 51 : Conductimètre HACH EC7

II.8.1 Matériel utilisé

- ✚ Becher
- ✚ Flacons pour l'étalonnage avec aimant agitateur (agitateur magnétique)
- ✚ Conductimètre de type HACH EC7 » (Figure 51).

II.8.2 Mode opératoire

- ✚ Régler manuellement la température de l'appareil à celle des conditions opératoires
- ✚ Rincer la sonde à l'eau distillée
- ✚ Etalonner l'appareil par une solution de référence (Chlorure de potassium)
- ✚ Tremper la sonde dans le bécher contenant l'échantillon d'eau
- ✚ Agiter la sonde pendant qu'elle est immergée afin d'éliminer les bulles d'air
- ✚ Attendre jusqu'à ce que l'échantillon et la sonde atteignent l'équilibre thermique (idéalement, pendant 15 minutes)
- ✚ Noter la valeur de la conductivité électrique affichée sur l'écran de l'appareil.

II.9 Paramètres contrôlés de l'eau de rejet totale avant épuration

L'eau de rejet totale désignée sur le plan de la (Figure46.), par (ERT) est définie comme étant l'eau composée des majeures parties des eaux résiduaires collectées dans le réseau d'assainissement du site industriel de FCI notamment :

- ✚ ER1 : Eau de nettoyage du saturateur
- ✚ ER2 : Eau de la phase inférieure des décanteurs (Sous forme de Boue)
- ✚ ER3 : Eau de lavage des filtres à sable du circuit de purification de la saumure
- ✚ ER4 : Eau de rinçage et de régénération des filtres à résine
- ✚ ER5 : Eau de lavage du filtre à sable du circuit de production de l'eau osmosée
- ✚ ER6 : Eau de rejet issue de l'unité d'osmose
- ✚ ER7 : Eau de lavage des gaz non absorbés au niveau de l'unité d'acide chlorhydrique.

Les paramètres physico-chimiques à déterminer pour l'eau de rejet totale sont :

- ✚ pH
- ✚ MES (Matières en suspension)
- ✚ Phosphates
- ✚ Nitrates
- ✚ Nitrites
- ✚ DCO (Demande chimique en oxygène)
- ✚ DBO₅ (Demande biologique en oxygène)

Ces paramètres doivent être en conformité avec les valeurs limites maximales de la teneur en substances nocives des eaux usées autres que domestiques au moment de leur versement dans le réseau public d'assainissement.

L'analyse de l'échantillon prélevé de cette eau a été confiée à un laboratoire d'analyse agréé et cela dans l'objectif d'obtenir l'autorisation de versement.



CHAPITRE 3

Résultats et interprétations

III Résultats et interprétations

III.1 Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des matières premières

III.1.1 Eau de forage

Les résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de forage alimentant l'usine FCI sont regroupés dans le (Tableau 23.) :

Tableau 23. : Résultats de l'analyse physico chimique de l'eau de forage

Paramètres physico-chimiques	Unité	Valeurs mesurées (1)	Valeurs mesurées (2)
pH		7,27	7,58
Conductivité	μS/cm	2730,00	1900,00
Turbidité	NTU	0,26	0,28
Dureté	(°F)	150,00	102,00
Ca ²⁺	(mg/l)	337,62	245,00
Mg ²⁺	(mg/l)	159,54	99,00
Na ⁺	(mg/l)	410,00	233,00
Cl ⁻	(mg/l)	656,75	360,00
CaCO ₃	(mg/l)	1500,00	1020,00
HCO ₃ ⁻	(mg/l)	176,47	124,00
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	1364,50	620,00
K ⁺	(mg/l)	19,32	14,00
F ⁻	(mg/l)	2,11	1,68
MES	(mg/l)	5,40	3,80

Dans le tableau ci dessus, la colonne désignée par (valeurs mesurées (1)) correspond aux valeurs des paramètres physico-chimiques obtenues lors de l'analyse au laboratoire de l'échantillon prélevé de l'eau captée du puits de forage réalisé dans l'enceinte du site industriel de FCI. La colonne désignée par (valeurs mesurée (2)) indique les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques caractérisant les eaux souterraines issues de la nappe des calcaires (Eocène-Sénonien) selon des études antérieures menées sur les aquifères de la cuvette de la région d'Ouargla.

Les valeurs des paramètres de qualité, mesurées pour l'échantillon d'eau du puits de forage, utilisée dans le processus de l'usine de FCI, et celles mesurées pour des échantillons prélevés des eaux souterraines localisées dans la même couche aquifère qui est considérée dans le cas de notre étude, sont représentées dans la (Figure 52.) par des histogrammes comparatifs.

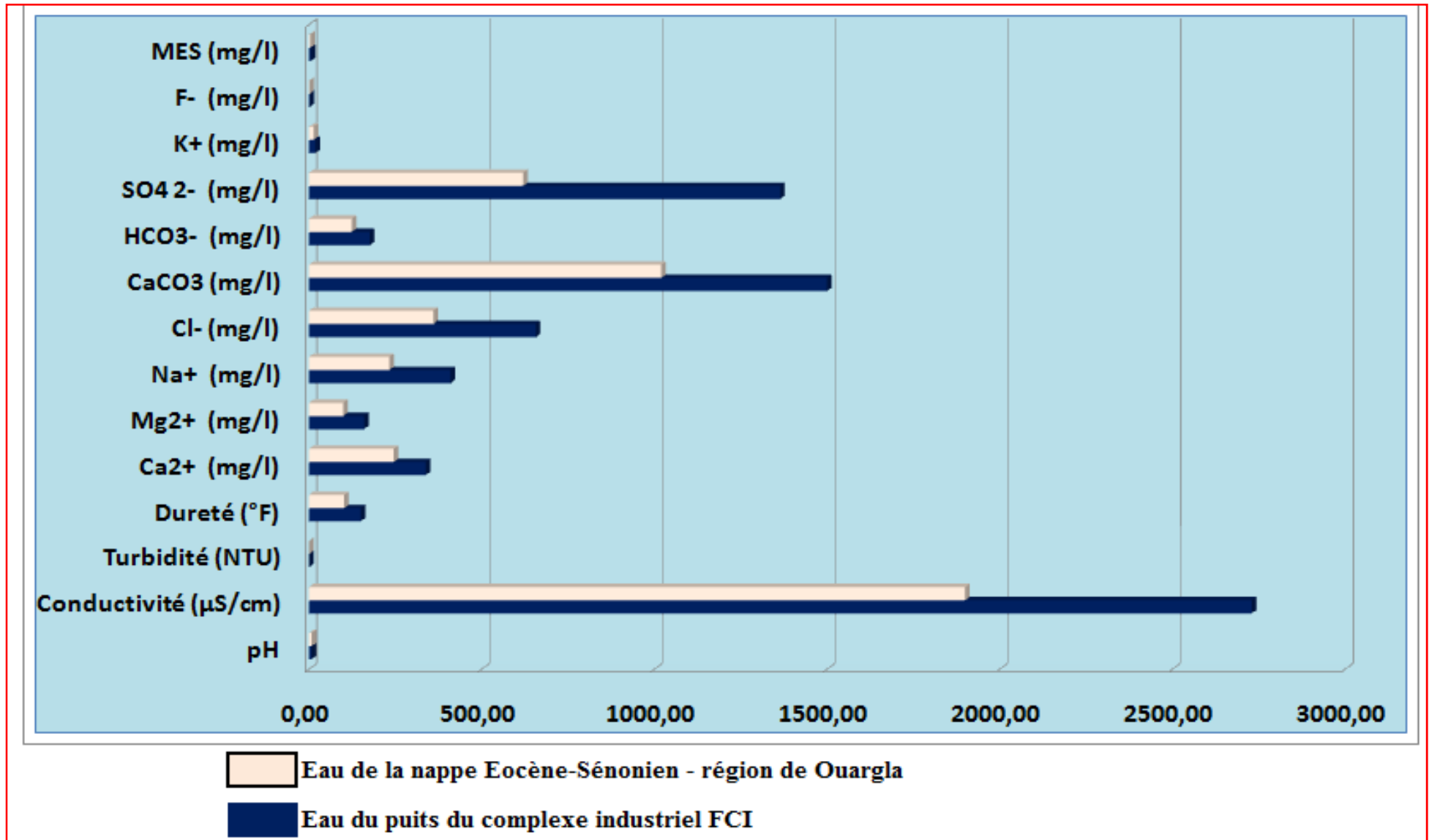


Figure 52. : Histogrammes comparatifs entre les paramètres physico-chimiques de l'eau de forage et celle de la nappe des calcaires

Les histogrammes ci-dessus révèlent qu'un certain nombre de paramètres physico-chimiques de l'eau captée au niveau du puits de l'usine, tels que (pH, K⁺, F⁻, MES, turbidité), présentent des valeurs très proches de celles qui caractérisent les propriétés de l'eau originaire de l'aquifère de la nappe éocène-sénonien, se trouvant dans les profondeurs de la zone d'implantation du site industriel de FCI.

Nous constatons que, la valeur du pH reste très voisine de la neutralité avec un caractère légèrement alcalin ; l'eau du puits est également caractérisée par une faible teneur en potassium (K⁺), fluor (F⁻) et en matières en suspension (MES), il faut signaler aussi sa petite valeur de turbidité qui lui confère une clarté très appréciable.

En ce qui concerne les autres paramètres, la comparaison montre généralement que, les valeurs mesurées pour l'eau du puits sont plus élevées, et en particulier pour la conductivité, teneur en CaCO₃, ions sulfates (SO₄²⁻) et chlorures (Cl⁻), indiquant respectivement une eau fortement minéralisée et très dure, entartrante et présente un caractère très corrosif.

III.1.2 Sel (chlorure de sodium « NaCl ») provenant de la région Hamraia

Les résultats d'analyse de la composition chimique de l'échantillon du sel à dissoudre dans l'eau de forage afin de produire de la saumure très concentrée servant à alimenter l'unité d'électrolyse de l'usine de FCI, sont donnés dans le (Tableau 24.) et représenté graphiquement par les histogrammes dans la (Figure 53.)

Tableau 24. : Résultats d'analyse du sel employé dans le processus de l'usine FCI

Constituants	Teneur (%)
Na ⁺	39,069
Cl ⁻	59,741
Mg ⁺⁺	0,146
Ca ⁺⁺	0,128
SO ₄ ⁻	0,688
Eau	0,047
Matières Insolubles	0,181

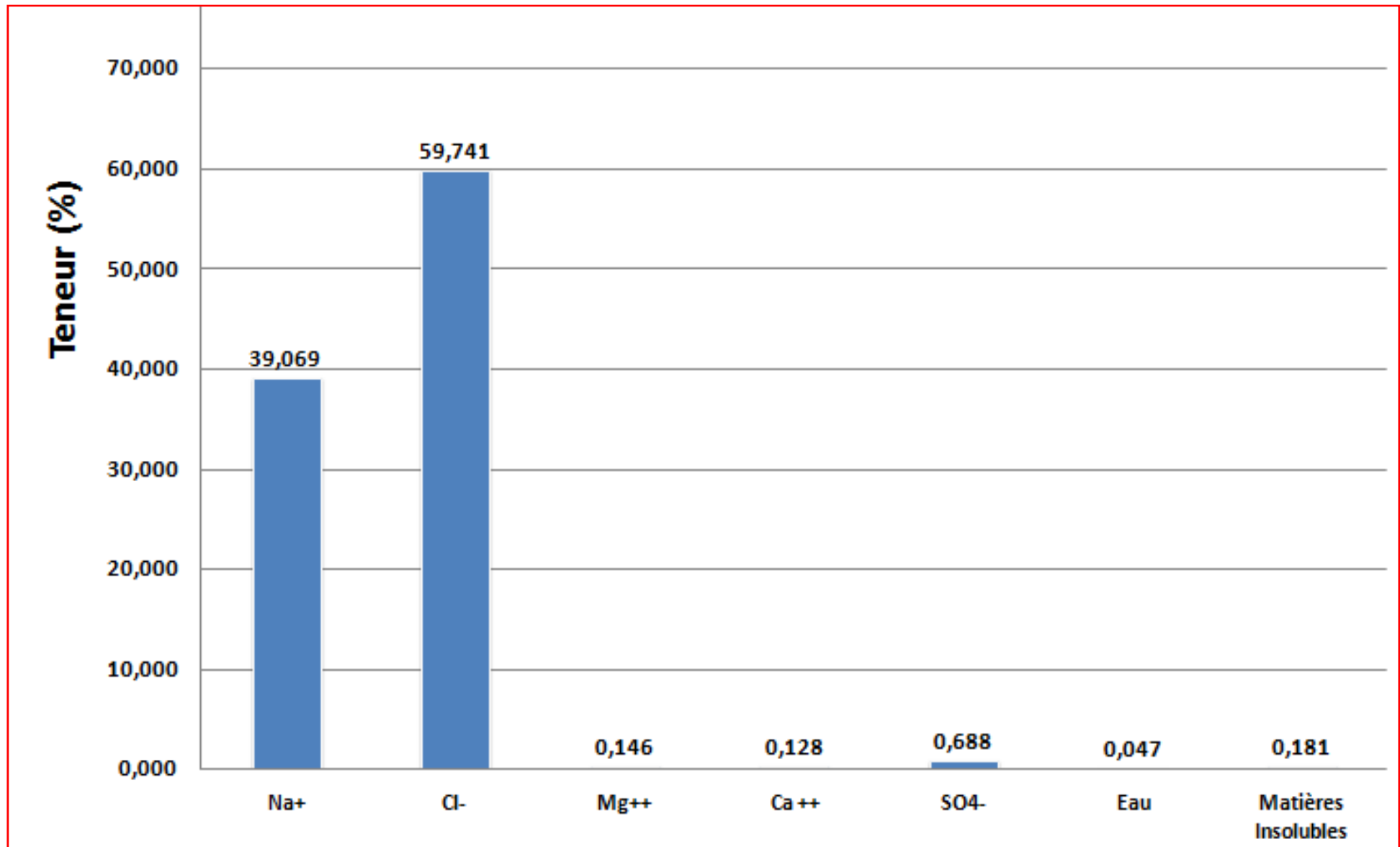


Figure 53. : Eléments constituant du sel employé dans la préparation de saumure du processus de production FCI

Nous constatons que le sel utilisé et dont la qualité joue un rôle très déterminant dans l'enchaînement du processus de l'usine, est composé de 98,81% de chlorure de sodium et de 1,14 % d'éléments (Magnésium, Calcium, Sulfates, Matières insolubles) considérés comme impuretés. Cette composition classe le sel utilisé dans la catégorie des sels ayant les caractéristiques typiques envisagées dans l'industrie de production du chlore et de soude caustique par la technique d'électrolyse à membrane.

III.2 Concentration du sel au niveau du saturateur

Dans l'objectif de déterminer la quantité nécessaire du sel à faire dissoudre dans l'eau pour obtenir la saumure ayant une densité comprise entre les valeurs de consigne (1,18 à 1,20) nous avons procédé à l'ajustement linéaire des valeurs de la densité, déterminées à une température de 25°C, en faisant varier la concentration du sel (Figure 54.)

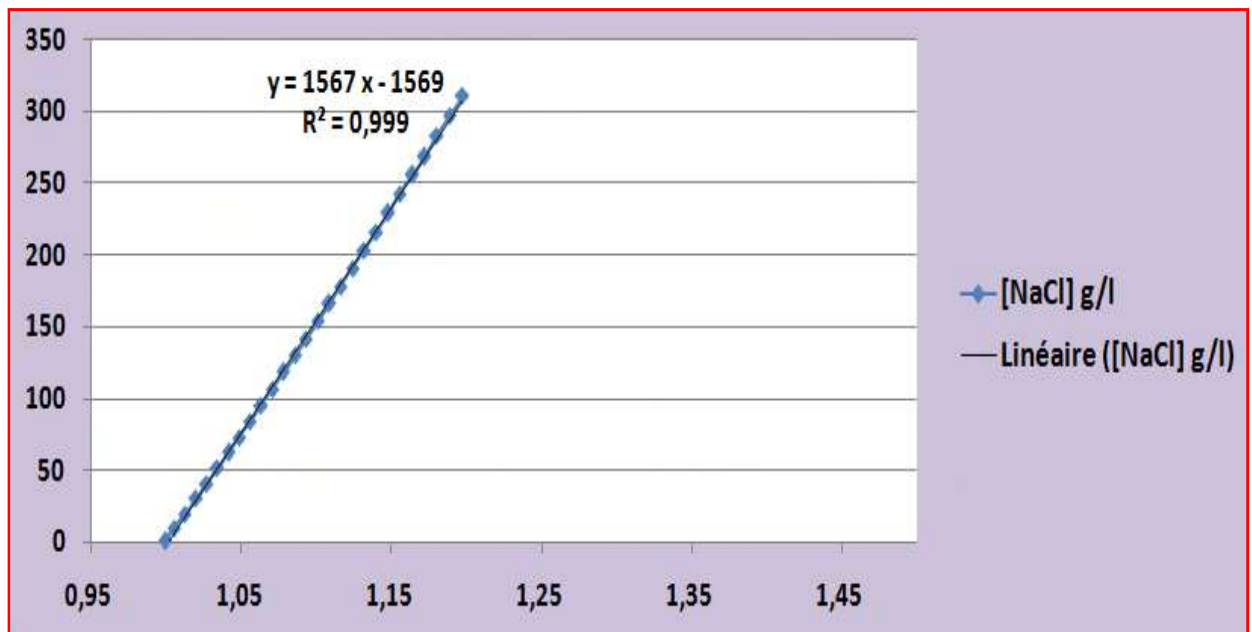


Figure 54. : Variation de la concentration de NaCl en fonction de la densité.

Cet ajustement montre que la concentration et la densité de la saumure sont fortement corrélées ($R^2 = 0.999$) et cela nous a permis donc d'exprimer la concentration de NaCl en fonction de la densité de saumure par l'équation linéaire suivante :

$$y = 1567x - 1569$$

XXI

Ce qui peut se traduire aussi par l'expression :

$$[\text{NaCl}] = 1567 * \text{Densité} - 1569$$

Pour une densité $d=1,18$ on a :

$$[\text{NaCl}] = 1567 \times 1,18 - 1569 = 280,06 \text{ g/l}$$

Pour une densité $d=1,20$ on a

$$[\text{NaCl}] = 1567 \times 1,20 - 1569 = 311,40 \text{ g/l}$$

La concentration du sel qui permet de respecter la valeur de consigne de la densité doit être donc comprise dans l'intervalle (280,06 à 311,40 g/l)

III.3 Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure au niveau du saturateur

Les principaux paramètres déterminés pour un échantillon de saumure de concentration 295 g/l et d'une densité approximativement égale 1,19 sont donnés dans le (Tableau25.).

Tableau25. : Résultats d'analyse de la saumure ($d=1,19$)

Paramètres physico-chimiques	Unité	Valeurs mesurées
pH		7,66
Conductivité	$\mu\text{S/cm}$	94500,00
Turbidité	NTU	2,94
Dureté	(°F)	163,26
Ca^{2+}	(mg/l)	723,49
Mg^{2+}	(mg/l)	599,86
Na^+	(mg/l)	115014,75
Cl^-	(mg/l)	178287,66
SO_4^{2-}	(mg/l)	3441,48
MES	(mg/l)	473,58

Nous constatons, d'après les résultats indiqués dans le tableau ci-dessus, que la valeur du pH de la saumure préparée à une concentration de 295 g/l, n'a pas subi de variation significative par rapport à celle de l'eau de forage, le milieu étant resté toujours légèrement alcalin, cependant nous enregistrons une légère augmentation pour les valeurs des paramètres de turbidité et matières en suspension (MES), due aux impuretés contenues dans le sel dissout. La valeur de la dureté a connu aussi un accroissement causé par l'augmentation de la teneur des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) dans la saumure.

Notons également l'élévation de la concentration des sulfates (SO_4^{2-}) résultant de la présence de ces ions parmi les constituants du sel. L'élévation la plus importante est constatée au niveau des concentrations des chlorures (Cl^-) et sodium (Na^+) qui sont les constituants majeurs du sel utilisé, nous signalons également l'effet de l'additif sulfite de sodium, utilisé pour la décoloration de la saumure appauvrie retournée au saturateur après électrolyse, dans l'augmentation de la concentration des ions sodium et des sulfates. Nous rappelons que les chlorures et sodium sont les particules qui contribuent au caractère électrolytique de la solution, ce qui est justifié par la très grande valeur mesurée pour le paramètre de la conductivité électrique.

Dans la (Figure 55.), nous avons illustré par des histogrammes, les variations observées entre les paramètres physico-chimiques mesurés séparément, dans l'eau de forage, avant et après la dissolution du sel.

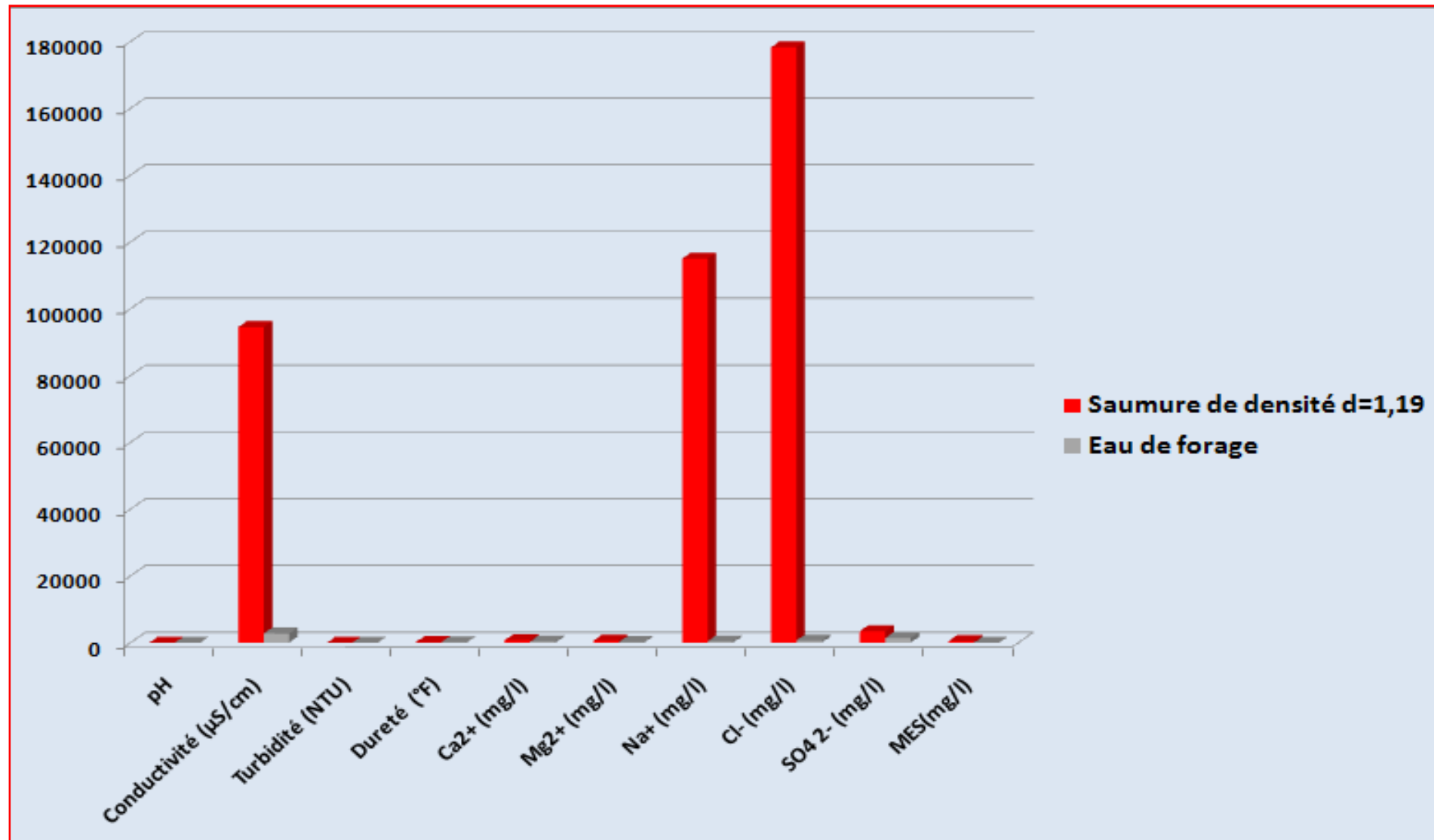


Figure 55. : Histogrammes comparatif des paramètres physico-chimiques entre l'eau de forage et la saumure (densité d=1.19)

III.4 Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après décantation

Cette analyse concerne l'échantillon prélevé après l'opération de décantation et cela en laissant écouler les précipités accumulés au fond du réservoir sous forme de boue. Il correspond alors à un échantillon de la saumure décantée qui se trouve dans la phase liquide supérieure. Les paramètres ainsi déterminés sont regroupés dans le (Tableau26.).

Tableau 26 : Résultats d'analyse de la saumure après décantation

Paramètres physico-chimiques	Unité	Valeurs mesurées
pH		11,22
Conductivité	μS/cm	94685
Turbidité	NTU	1,89
Dureté	(°F)	123,74
Ca ²⁺	(mg/l)	746,81
Mg ²⁺	(mg/l)	97,88
Na ⁺	(mg/l)	116949,56
Cl ⁻	(mg/l)	176858,44
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	1787,33
MES	(mg/l)	374,12

A partir des résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous pouvons constater que l'effet de cette étape de purification de la saumure a servi surtout à la diminution en teneur des ions magnésium (Mg²⁺), sulfates (SO₄²⁻) et des matières en suspension (MES) , en effet, une bonne partie de ces éléments a été évacuée avec la boue qui s'est formée au fond du réservoir de décantation.

La réduction de la dureté est l'une de conséquences de l'élimination de la majorité des ions magnésium. Les d'additifs chimiques (NaOH, Na₂CO₃, flocculant) qui ont été utilisés au début de l'opération pour améliorer la précipitation et la coagulation des impuretés de la saumure ont également une influence remarquable, notamment, l'ajout de NaOH a fait que le milieu de saumure est devenu fortement alcalin, d'une autre part l'ajout de Na₂CO₃ a légèrement contribué à l'augmentation de la concentration des ions sodium. En fin, l'augmentation de la valeur la conductivité peut être expliquée par l'addition du flocculant du type électrolytique.

III.5 Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à sable

Les résultats obtenus suite à l'analyse d'un échantillon prélevé à la fin du traitement de la saumure après passage à travers une double filtration lente à sable, sont regroupés dans le (Tableau27.).

Tableau 27 : Résultats d'analyse de la saumure après filtration à sable

Paramètres physico-chimiques	Unité	Valeurs mesurées
pH		11,72
Conductivité	μS/cm	95300,00
Turbidité	NTU	0,00
Dureté	(°F)	44,00
Ca ²⁺	(mg/l)	245,53
Mg ²⁺	(mg/l)	31,80
Na ⁺	(mg/l)	113784,59
Cl ⁻	(mg/l)	174258,14
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	1038,30
MES	(mg/l)	154,00

Nous constatons que la filtration à sable de la saumure après décantation a éliminé environ 60 % des matières en suspension (MES), elle a permis également de réduire considérablement la concentration des ions sulfates, ainsi de même pour les ions calcium et magnésium et par conséquent une diminution importante de la valeur de dureté de la saumure.

Par ailleurs, nous remarquons que cette filtration n'a aucun effet significatif sur la valeur du pH mais, elle a totalement réussi à éliminer la turbidité.

III.6 Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à résine

Les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés sur l'échantillon prélevé après la filtration à résine, qui est la dernière étape de purification de la saumure avant qu'elle soit introduite dans l'électrolyseur à membrane, sont indiquées dans le (Tableau28.).

Tableau28. : Résultats d'analyse de la saumure après filtration à résine.

Paramètres physico-chimiques	Unité	Valeurs mesurées
pH		11,45
Conductivité	μS/cm	95374,00
Turbidité	NTU	0,00
Dureté	(°F)	5,17
Ca ²⁺	(mg/l)	0,01
Mg ²⁺	(mg/l)	0,00
Na ⁺	(mg/l)	115207,78
Cl ⁻	(mg/l)	174777,53
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	452,25
MES	(mg/l)	111,67

Les valeurs des paramètres ainsi obtenues suite à cette dernière étape de purification confirment bien l'efficacité de l'opération réalisée ayant pour but l'obtention d'une saumure pure et parfaitement douce.

En effet, les ions de calcium, magnésium, ont été totalement fixés lors du passage de la saumure à travers les lits de résine échangeuse de cations de type "Purolite S930Plus".

La faible teneur en sulfate qui n'a pas été éliminée est causée par le sulfite de sodium utilisé antérieurement pour la neutralisation du chlore.

III.7 Récapitulation et représentations graphiques

L'ensemble des résultats obtenus pour les différents paramètres physico-chimiques mesurés sur les échantillons prélevés à la fin de chaque étape de purification de la saumure, exposés et commentés ci dessus, sont regroupés dans le (Tableau29.). Les variations des valeurs relatives aux différents paramètres considérés aux cours de l'acheminement du processus du traitement de la saumure sont représentées par les graphes des (Figures 56 à 65)

Tableau 29 : Tableau récapitulatif des résultats d'analyses effectuées sur la saumure

Paramètres physico chimiques										
Echantillons Analysés	pH	Conductivité (μS/cm)	Turbidité (NTU)	Dureté (°F)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	MES (mg/l)
Saumure de densité d=1,199	7,66	94500,00	2,94	163,26	723,49	599,86	115014,75	178287,66	3441,48	473,58
Saumure après décantation	11,22	94685,00	1,89	123,74	746,81	97,88	116949,56	176858,44	1787,33	374,12
Saumure après filtration à sable	11,72	95300,00	0,00	44,00	245,53	31,80	113784,59	174258,14	1038,30	154,00
Saumure après filtration à résine	11,45	95374,00	0,00	5,17	0,01	0,00	115207,78	174777,53	452,25	111,67

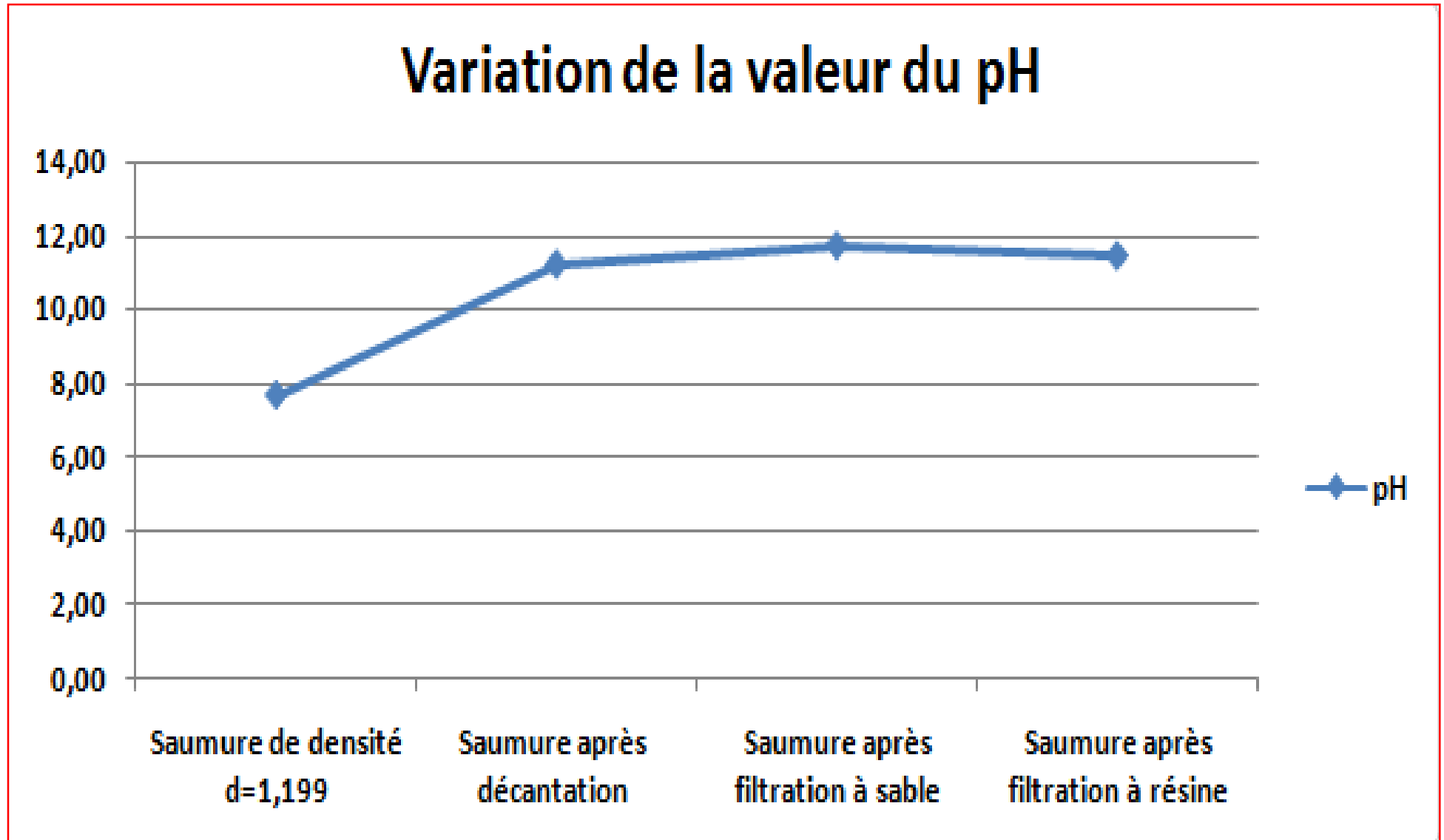


Figure 56. : Représentation graphiques des variations du pH.

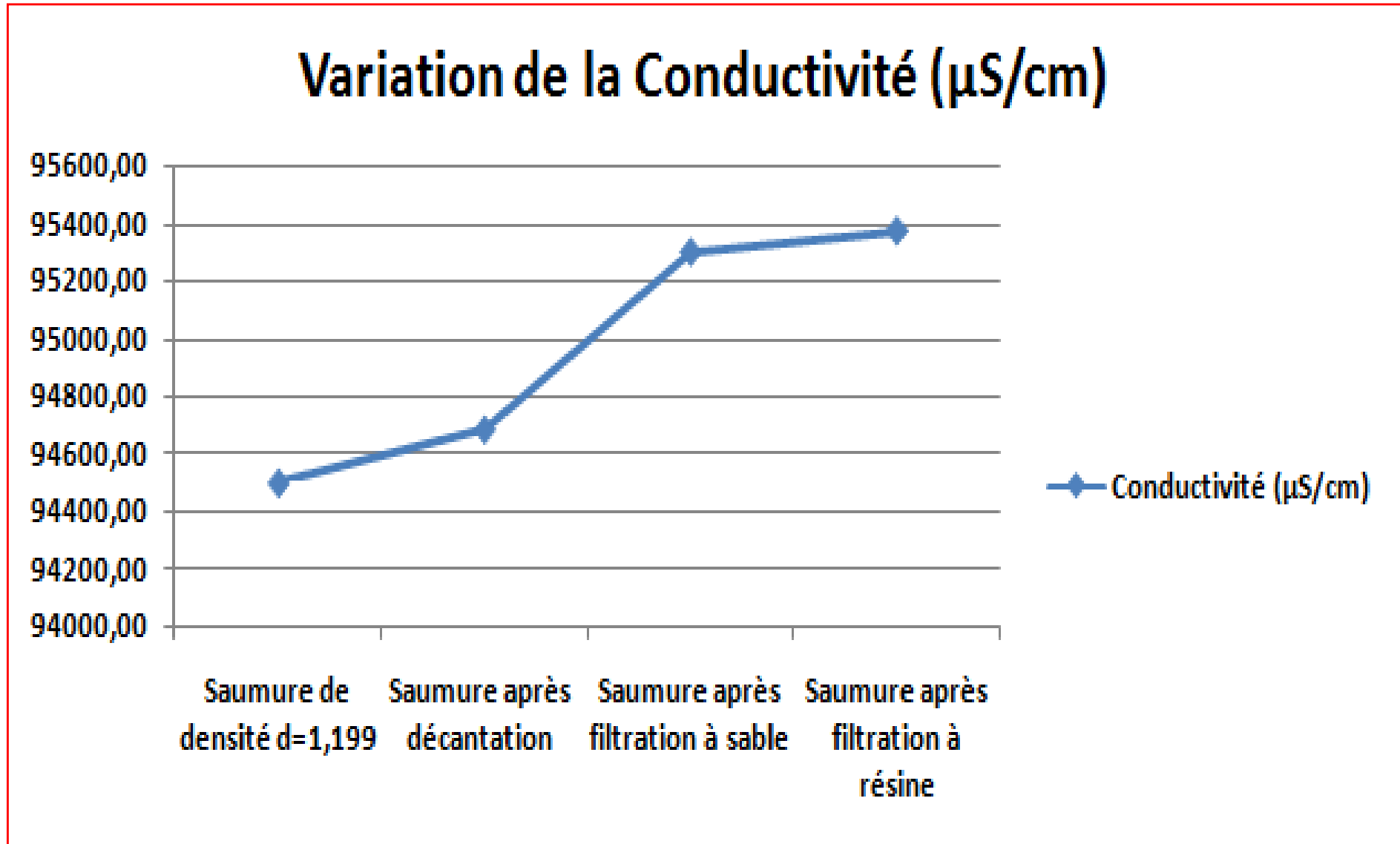


Figure 57 : Représentation graphique des variations de la conductivité.

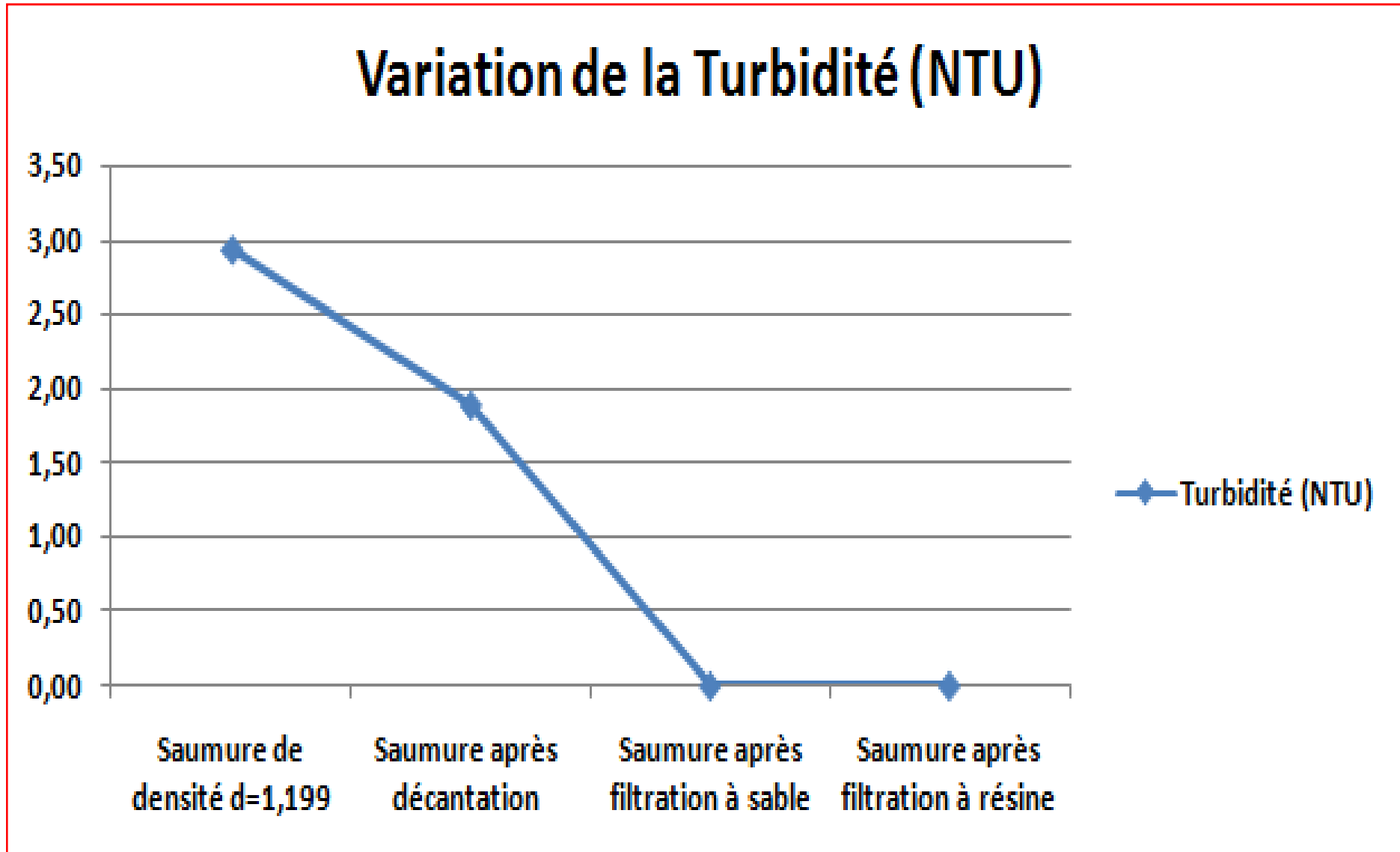


Figure 58. : Représentation graphiques des variations de la turbidité.

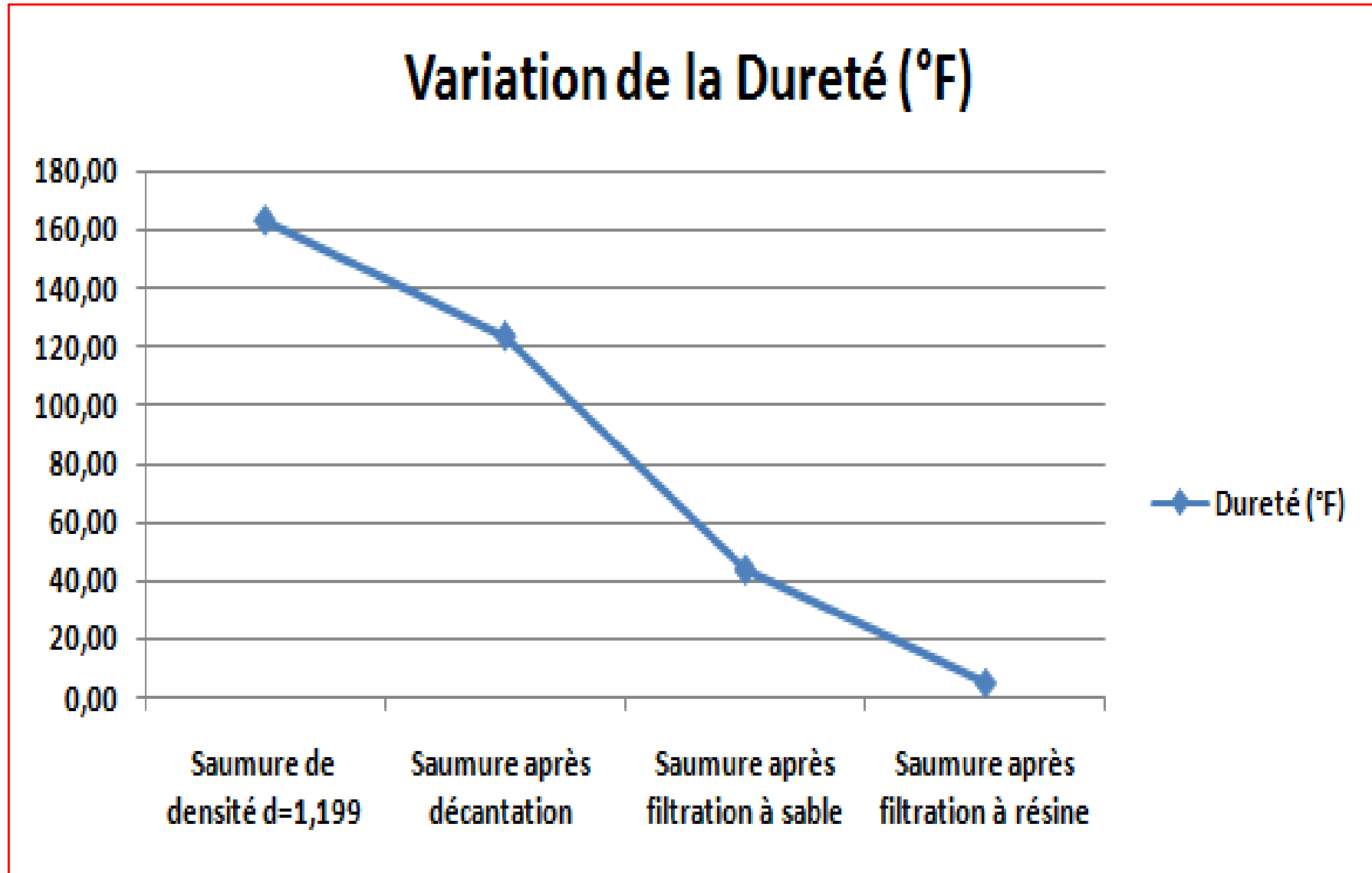


Figure 59 : Représentation graphiques des variations de la dureté.

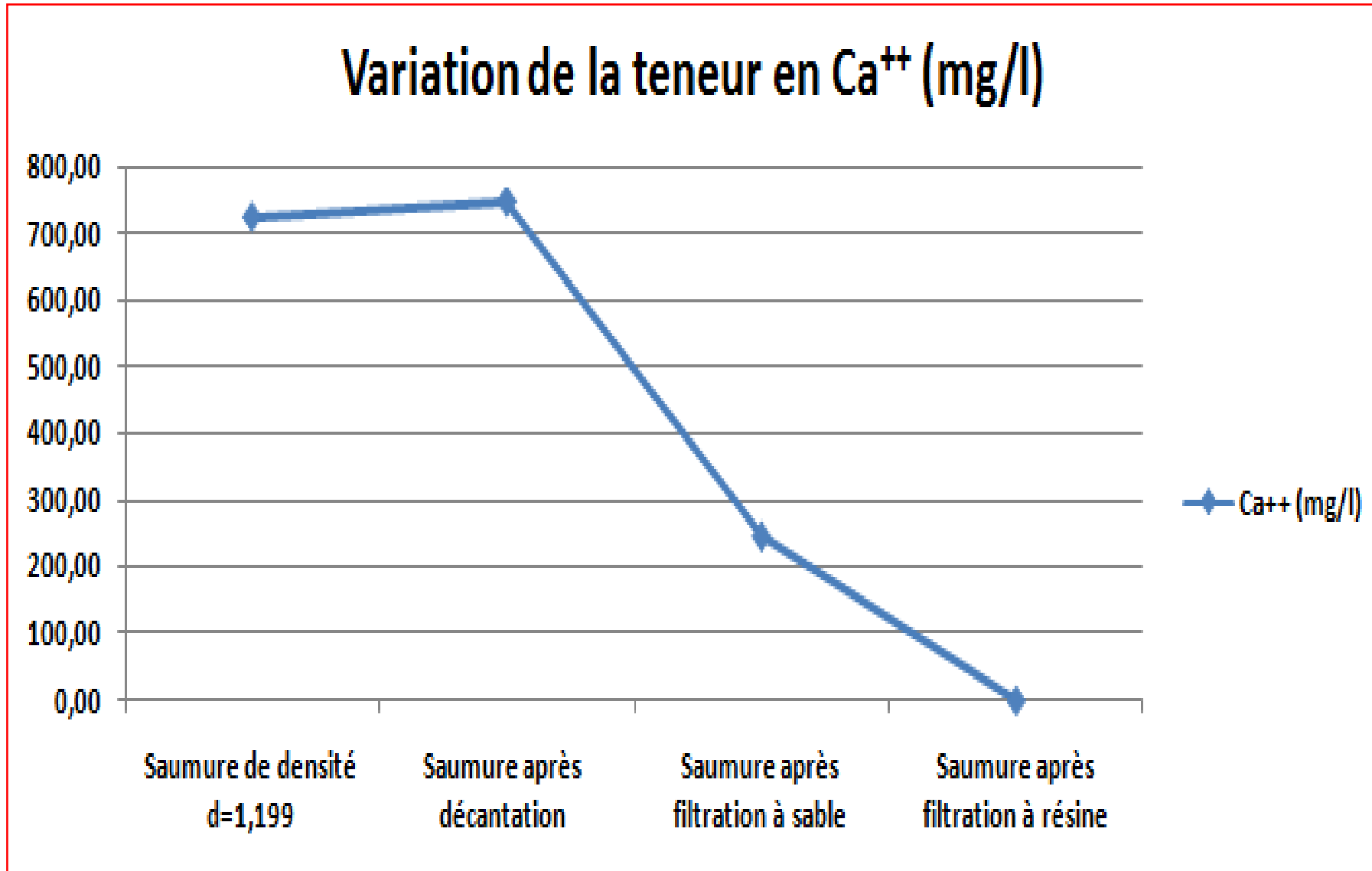


Figure 60 : Représentation graphiques des variations de la teneur en Ca^{2+} .

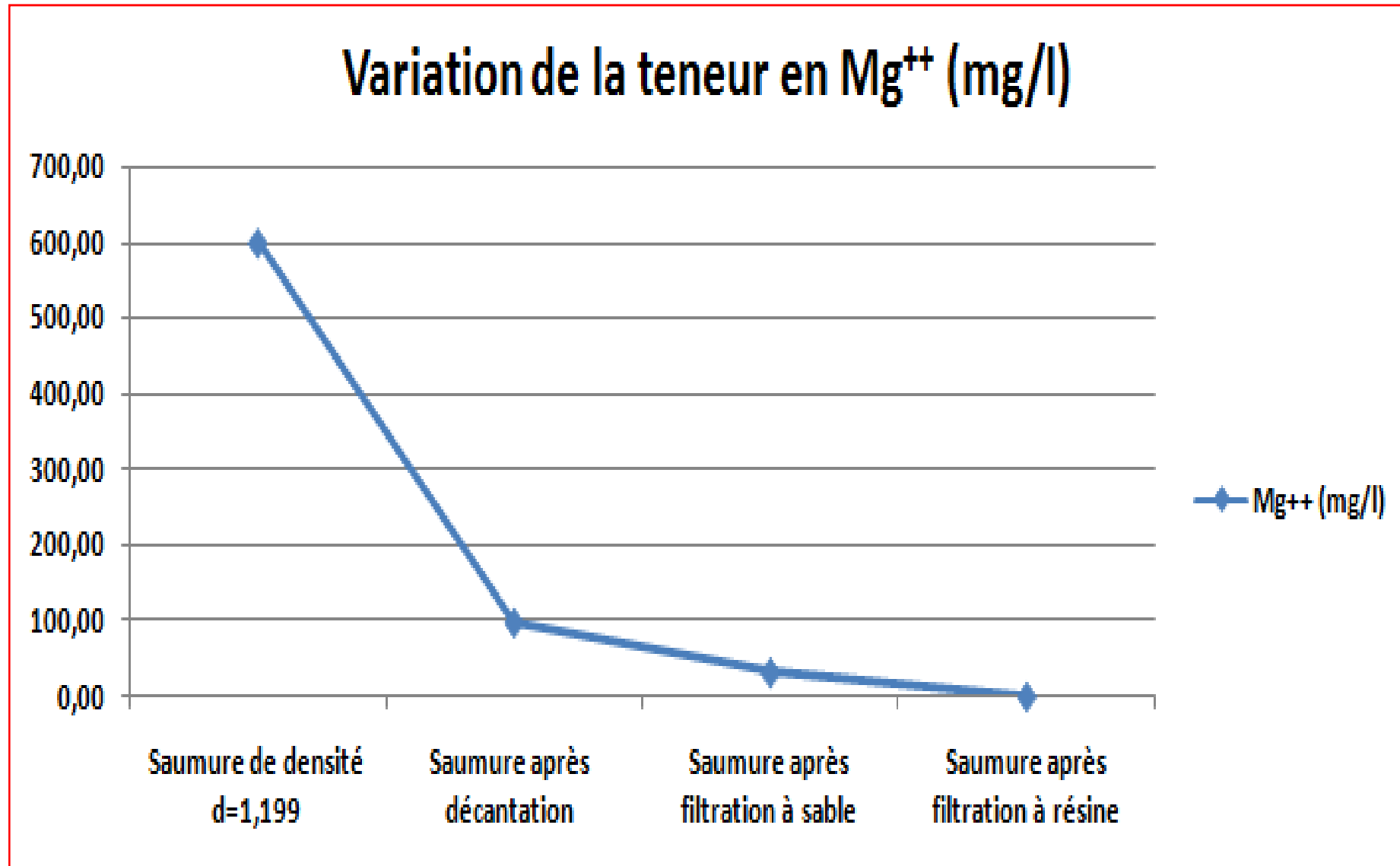


Figure 61 : Représentation graphiques des variations de la teneur en Mg^{2+} .

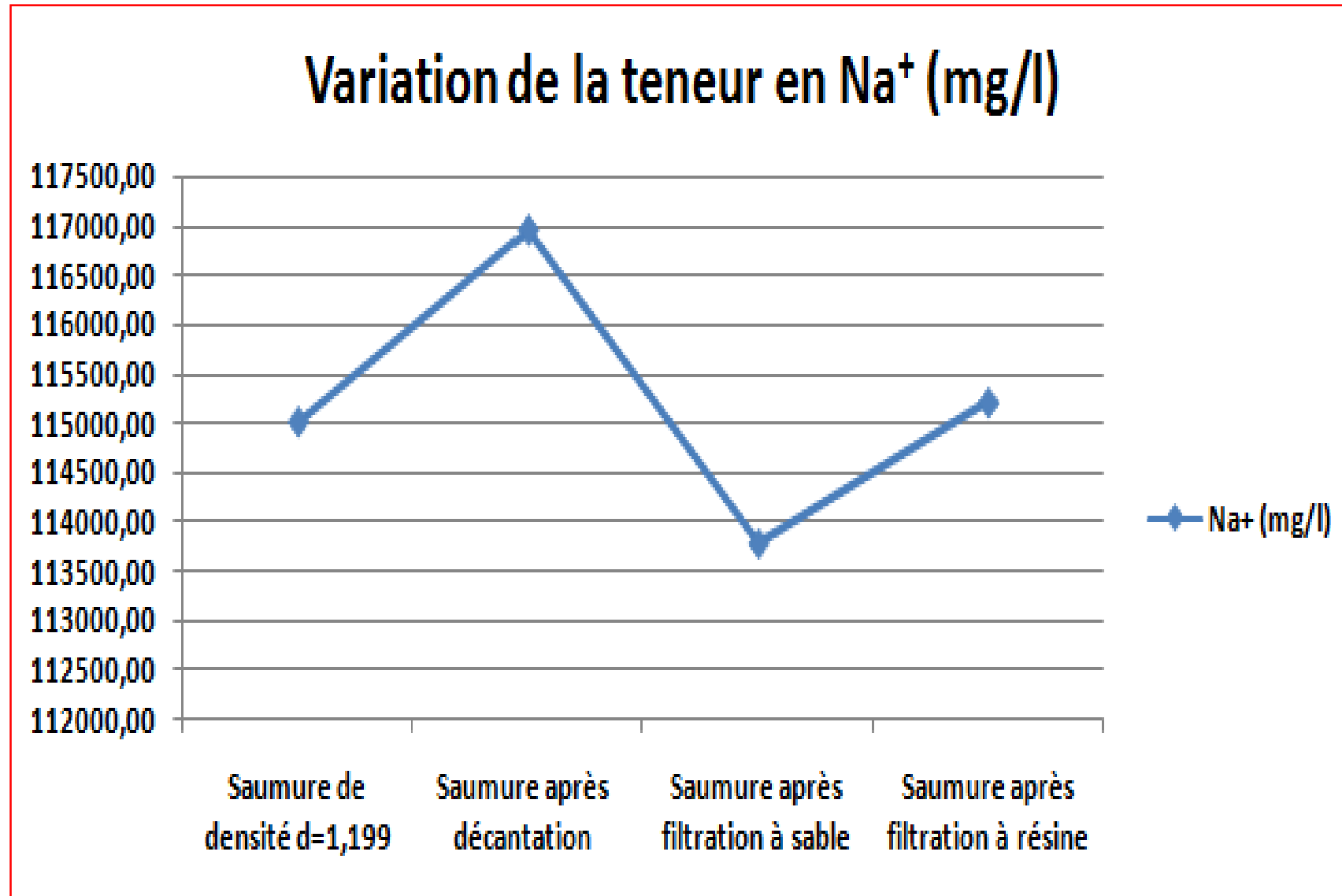


Figure 62 : Représentation graphiques des variations de la teneur en Na⁺.

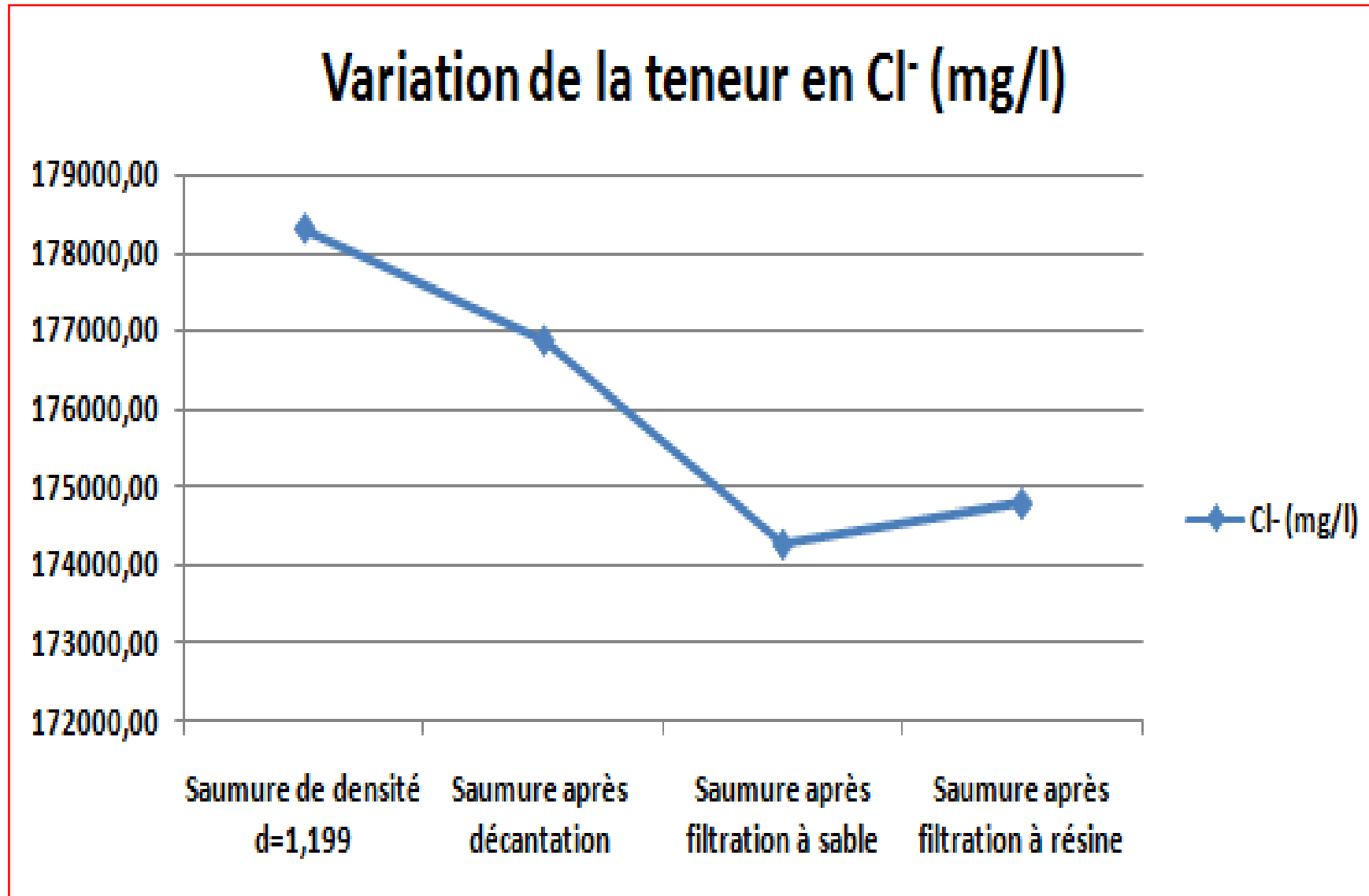


Figure 63 : Représentation graphiques des variations de la teneur en Cl⁻.

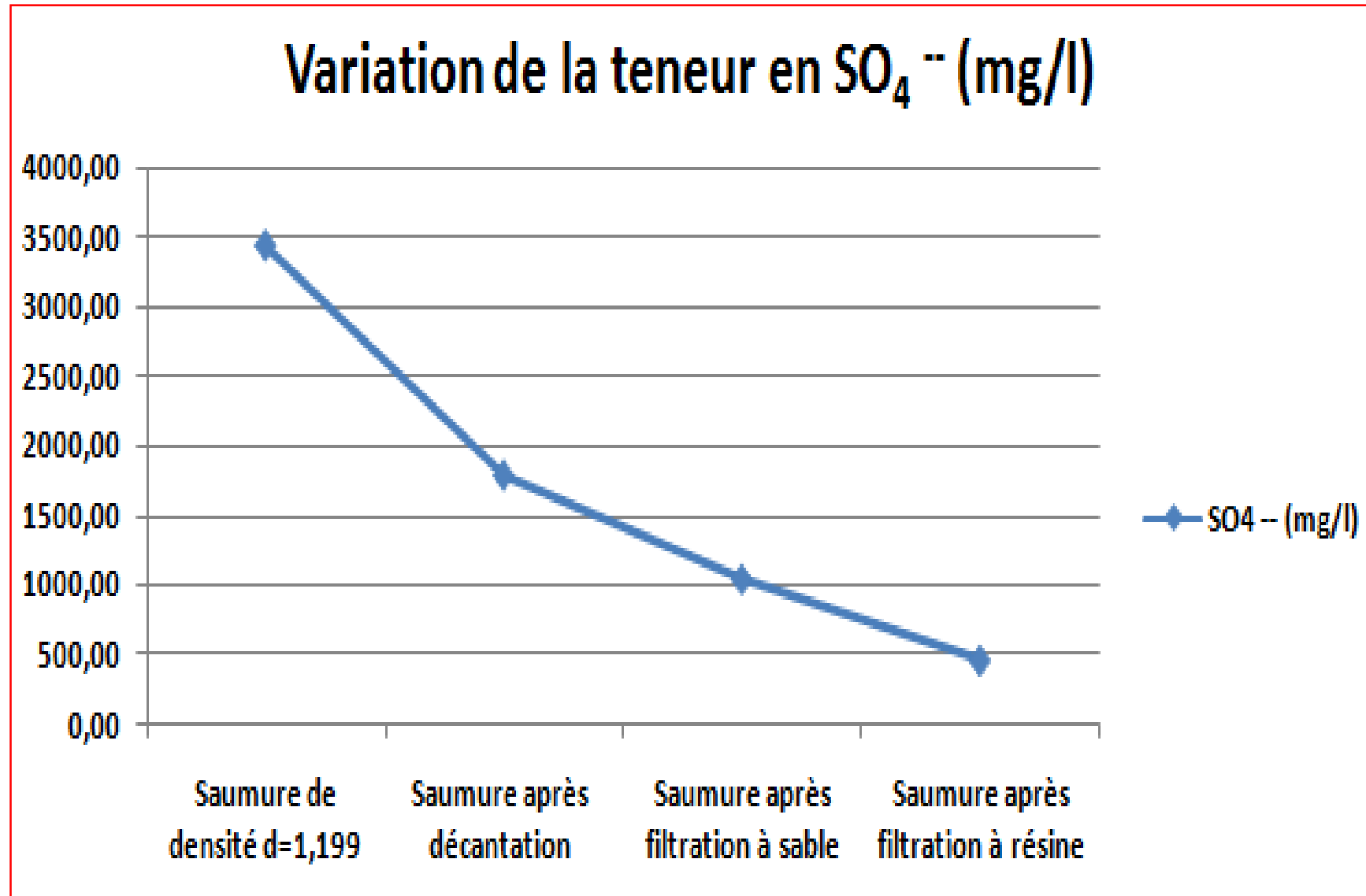


Figure 64 : Représentation graphiques des variations de la teneur en SO_4^{2-} .

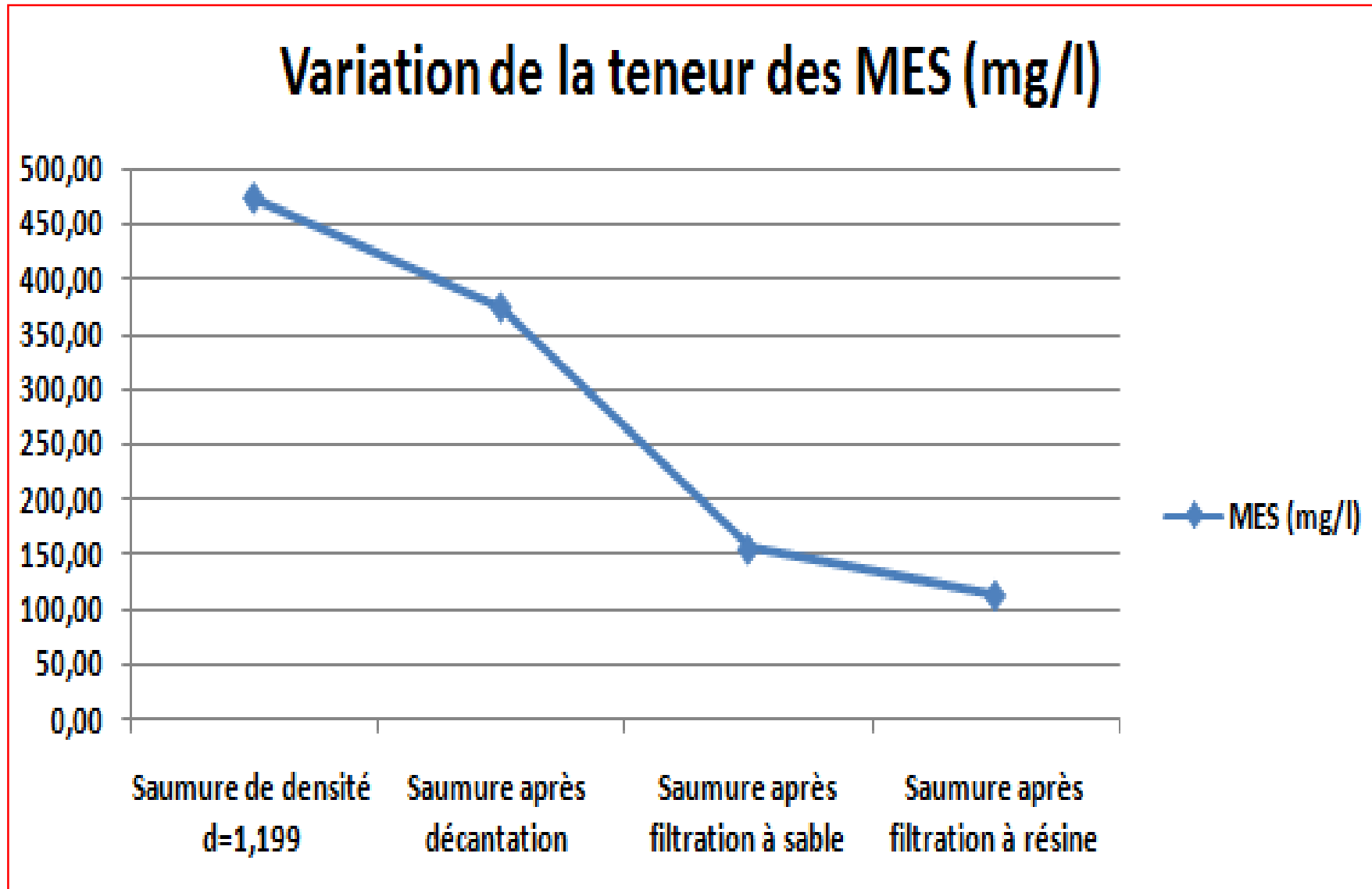


Figure 65 : Représentation graphiques des variations de la teneur en MES.

Analyse des paramètres physico-chimiques des eau osmosées

L'unité d'osmose inverse produit, à partir de la filtration de l'eau de forage, deux types d'eau, la première est destinée à l'unité d'électrolyse pour production et dilution de la soude caustique, la seconde eau osmosée sert dans l'unité d'acide à l'absorption de l'HCl gazeux, issu de la réaction de combustion pour la production de l'acide chlorhydrique.

Les résultats des analyses effectuées sur des échantillons prélevés après chacune des opérations d'osmose inverse, sont représentées d'une manière illustrant les variations enregistrées sur les paramètres physico chimiques de l'eau de forage, à partir de son état naturelle jusqu'à sa purification finale. Voir (Figure 66.).

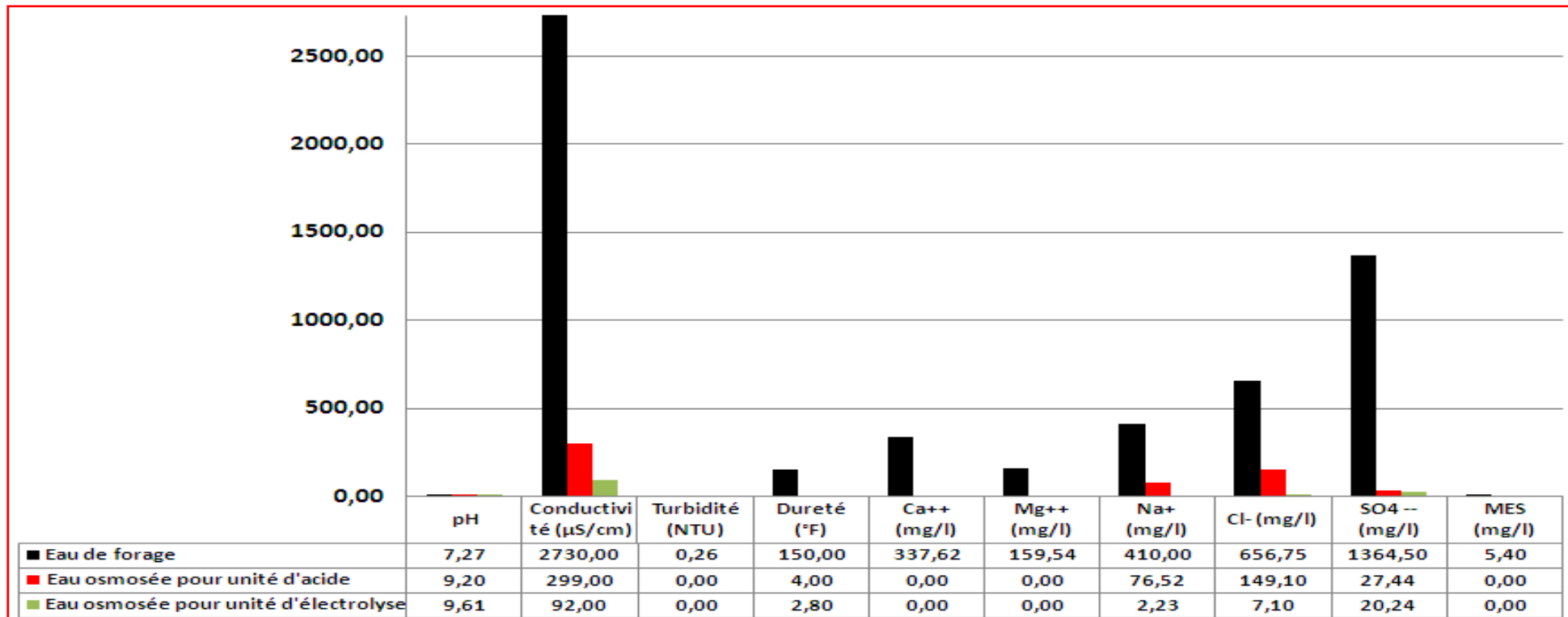


Figure66. : Histogrammes de variation des paramètres physico-chimiques de l'eau de forage après traitement par osmose inverse

Nous constatons d'après les histogrammes tracés que, comparativement à l'eau de forage, la valeur du pH a subi une augmentation qui peut être expliquée par le fait d'injection simultanée de l'eau de javel à 12° (basique), utilisée comme désinfectant, puis de l'acide HCl à 33% pour élimination du calcaire ainsi que le méta-bisulfite de sodium (Na_2SO_3) utilisé pour la décoloration et qui réagit selon la réaction :



Ce qui a conduit dans ce cas, à une neutralisation partielle du milieu basique résultant de l'addition de l'eau de javel et qui donne en fin un pH qui se stabilise dans la fourche (9,20 à 9,61).

Par ailleurs, nous constatons que l'osmose inverse a pratiquement éliminé toutes les matières en suspension et a ramené l'eau brute initiale à une eau très claire et très douce.

Pour le paramètre de conductivité électrique, nous remarquons que la valeur initiale a considérablement chuté du fait de la déminéralisation presque totale.

La quantité négligeable de sulfate restante provient de l'ajout initial du méta-bisulfite de sodium utilisé comme agent pour la décoloration de l'eau brute.

III.8 Analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau finale de rejet

En se référant au schéma des circuits d'eau d'alimentation de l'usine et des rejets liquides à chaque phase de traitement, représenté initialement par le plan général de la (Figure 41.).

Après avoir effectué toutes les analyses concernant les échantillons prélevés aux endroits indiqués par les numéros 1 à 8, nous nous intéressons dans ce qui suit à l'analyse de l'eau de rejet totale (ERT) destinée à la station d'épuration, cette eau peut être assimilée à un liquide très hétérogène qui est composé de toutes les eaux résiduaires rejetées à la fin de chaque opérations.

L'échantillon prélevé au niveau de l'extrémité de la conduite principale de collecte des eaux usées, raccordée à l'égout de l'usine, est analysé auprès d'un laboratoire certifié pour mesurer tous les paramètres Physico-chimiques indicateurs de pollution en vue de l'obtention de l'autorisation de versement dans le milieu naturel.

Les principaux résultats obtenus sont donnés dans le (Tableau29.).

Tableau29. : Mesures des paramètres indicateurs de pollution de l'eau de rejet de l'usine FCI

Paramètres physico-chimiques	Eau de rejet	Valeurs limites de rejet
Température (°C)	20.60	30
pH	9,39	5,50 - 8,5
MES (mg/l)	19515,25	600,00
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1554,35	400,00
Mg ⁺⁺ (mg/l)	174,88	300,00
DCO (mg/l)	95,00	1000,00
DBO ₅ (mg/l)	2,00	500,00

Il ya lieu de signaler que la valeur de la température indiquée dans ce tableau est le seul paramètre qui a été mesuré sur site, elle ne peut être considérée comme une valeur qui détermine la température réelle de l'échantillon prélevée, car elle dépend généralement des conditions climatiques ainsi que du rayonnement solaire.

Nous remarquons à travers ces résultats que la valeur du pH est un peu supérieure à la valeur tolérée, sa valeur doit donc subir un réajustement avant de procéder au rejet.

Pour les teneurs en magnésium, demande chimique en oxygène (DCO) et demande biochimique en oxygène (DBO₅), les valeurs obtenues sont relativement faibles et ne causent aucun souci au moment de versement dans le réseau d'assainissement public.

Nous attachons dans ce tableau une attention particulière aux valeurs obtenues pour les deux paramètres, notamment, la teneur en sulfates (SO₄²⁻) et matières en suspension (MES) qui présentent des valeurs très élevés par rapport aux valeurs autorisées.

Ces deux derniers paramètres ont un impact très nocif sur l'environnement, des concentrations élevées en sulfates provoquent des problèmes d'entartrage potentiel au niveau des conduites et peuvent aussi être réduits en sulfures (H₂S) qui sont parmi les gaz responsables des mauvaises odeurs dégagées nécessitant la mise en place au niveau des stations d'épuration des précautions d'usage spéciaux pour le personnel d'intervention.

De leur part les matières en suspension contribuent fortement à l'augmentation de la turbidité, l'appauvrissement en oxygène dissous, la réduction photosynthétique ainsi que le colmatage des sols.

III.9 Approche technique pour le traitement en amont et en aval de l'eau du processus

En tenant compte des résultats obtenus, concernant les échantillons prélevés en amont et en aval, nous arrivons ainsi à constater l'eau de forage utilisée est initialement chargée en sulfates, ce qui engendre au niveau du poste de décantation, des réactions chimiques exothermiques amplifiées par l'ajout des additifs, carbonate de sodium et de la soude ce qui implique l'obtention d'une saumure chaude.

Egalement la précipitation lente du $Mg(OH)_2$ qui favorise l'apparition d'une turbidité très élevée, ce qui conduit au colmatage qui risque d'entraîner une perte du sable avec la saumure au niveau du poste de filtration sur sable et un mauvais échange ionique au niveau du poste de filtration sur résine.

A cet effet nous recommandons d'éviter l'injection simultanée de NaOH et du Na_2CO_3 lors de la décantation de la saumure, il est aussi souhaitable d'installer un piquage d'air afin de procéder régulièrement au lavage air/saumure au niveau des filtres à sable pour éviter l'accumulation des dépôts sur les crépines situées au fond. En ce qui concerne l'eau de rejet totale, étant donné que le coefficient de biodégradabilité, déterminé par le rapport, $k = DCO/DBO_5$ et qui est dans notre cas, supérieur à la valeur 3, nous préconisons une solution de traitement physico-chimique, réalisé par le biais d'une station d'épuration qui vise d'améliorer la qualité d'eau des rejets pour son éventuelle réutilisation dans le processus. Cette dernière est conçue par une série de trois (03) bassins (Figure 67.)

L'eau totale de rejet, issue de l'usine FCI, est récupérée au niveau d'une cuve métallique pour une pré-décantation avant de s'écouler par gravité dans le premier bassin de décantation, son passage au second bassin s'effectue par débordement à travers une ouverture intermédiaire.

Une pompe sert à aspirer la phase supérieure de l'eau décantée afin de l'introduire dans d'un filtre à sable où elle subira, en plus de la filtration, une désinfection à l'eau de javel ; pour maintenir l'efficacité de filtration, le sable doit être périodiquement lavé sous pression par fluide constitué d'air et eau.

L'eau filtrée obtenue est collectée dans un troisième (3^{ème}) bassin, à ce niveau, elle sera traitée par chloration et aspirée ensuite par une deuxième pompe qui l'achemine vers la bache de stockage de l'eau brute pour son éventuelle réutilisation dans le processus de l'usine.

En fin, les boues résultant après décantation dans les bassins (1,2 et 3), sont récupérées au fond, dans un puisard, et feront l'objet de cession pour le compte d'un preneur spécialisée dans le traitement des boues agréementé par la direction de l'environnement de la wilaya d'Ouargla, qui se chargera de les évacuer de la station d'épuration au fur et à mesure de leur accumulation.

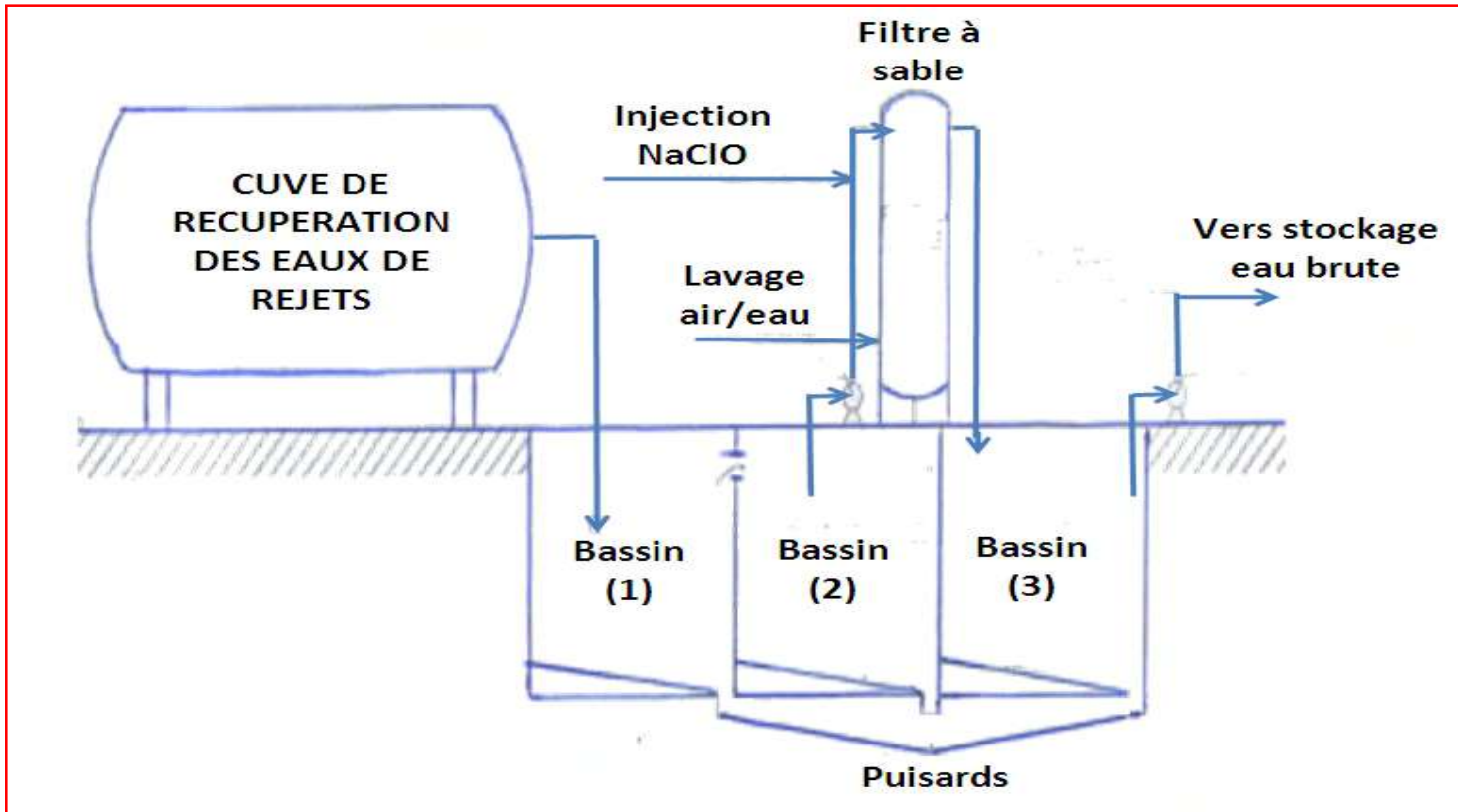


Figure 67 : Station d'épuration des eaux de rejets proposée



Conclusion

Conclusion :

Conclusion

Au terme de l'étude présentée à travers ce mémoire et qui avait pour objectif , l'étude de l'impact du traitement en amont sur l'élimination des impuretés de l'eau utilisée dans le processus de l'usine FCI et cela, dans un premier temps, à travers l'analyse de la variation des paramètres physico chimiques relatives à la saumure et à l'eau brute filtrée par osmose inverse. Dans un second temps, de voir la possibilité de réaliser un traitement en aval qui serait efficace pour réutiliser l'eau de rejet totale dans le circuit de la chaîne de production de l'usine sinon d'assurer sa dépollution avant de la restituer au milieu naturel.

Compte tenu des résultats obtenus pour les échantillons analysés après le traitement en amont, montrent que la valeur du pH, malgré des petites fluctuations, elle indique dans tous les cas un milieu alcalin du fait qu'elle est à chaque fois contrôlée et ajustée sur site afin de la maintenir dans la fourche ($7 < \text{pH} < 12$).

Pour le paramètre de conductivité électrique, les valeurs enregistrées oscillent autour d'une valeur moyenne de $94965 \mu\text{s}/\text{cm}$ indiquant ainsi une très forte minéralisation due principalement à la dissolution des particules du sel effectuée lors de préparation de la saumure au niveau du saturateur.

Les variations constatées sur (la turbidité, les matières en suspension, la dureté, la teneur en sulfates) à l'issue des filtrations et d'adoucissement réalisés respectivement, sur sable et résine échangeuse d'ions, montrent que ces paramètres ont tous diminué à des valeurs très basses et répondent parfaitement aux exigences dictées par les prescriptions des conditions opératoires de l'électrolyseur à membrane.

Les résultats obtenus relatifs à l'analyse de l'eau brute après son passage à travers l'unité d'osmose inverse révèlent des valeurs très satisfaisantes, la conductivité électrique de l'eau brute a été réduite d'une valeur d'approximativement 90 % de sa valeur initiale pour l'eau destinée à l'unité d'acide, et de 97 % pour celle destinée à la production de la soude caustique.

L'opération d'osmose inverse s'avère une meilleure technique pour avoir une eau parfaitement adoucie sans que cela ne soit une source de dépenses excessives.

Les résultats obtenus après l'analyse de l'eau de rejet totale, indiquent qu'elle présente une valeur de pH qui dépasse de presque une unité la valeur limite tolérée, ils indiquent également, la présence des sulfates et des matières en suspension à des concentrations très élevées et qui sont inadmissibles du point de vue des normes en vigueur.

Il est à signaler que l'analyse de l'eau de rejet totale, après son traitement conformément à la solution préconisée selon l'approche technique exposée dans ce mémoire, n'a pas été effectuée à cause du non achèvement des travaux de réalisation, au niveau du site FCI, de la station d'épuration des eaux usées.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Références bibliographiques

[01]	Zahhid Amjad, <i>The Science And Technology Of Industrial Water Treatment</i> , Co-published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, 2010
[02]	Michel Roustan, <i>Eau propriétés, qualité, valeurs d'usage</i> , Edition N°4 Techniques de l'ingénieur, 2002.
[03]	Rapport mondial des nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau, <i>Les Eaux Usées Une Ressource Inexploitée</i> , UNESCO 2017
[04]	Jean-Claude Boeglin, <i>Traitements Physico-chimiques de la pollution insoluble</i> , Techniques de l'ingénieur, Traité Environnement, 2002
[05]	Boeglin Jean-Claude. <i>Propriétés des eaux naturelles</i> . Dossier N° G1110. Environnement Technologies de l'eau. Techniques de l'ingénieur, 2001
[06]	Jacques Le Coarer, <i>Chimie le minimum à savoir</i> , EDP Sciences, Grenoble, 2003
[07]	Durend Roger. <i>L'eau et la vie</i> . Opéra. Nantes. 2001.
[08]	Martin Elizabeth., Hine Robert.(2008). <i>A Dictionary of Biology</i> . Oxford University Press. Reference Online
[09]	André Musy, Christophe Higy. <i>Hydrogéologie Une science de la nature</i> , Collection Gérer l'environnement, Presse polytechnique et universitaire Normande, Lausanne, 2003
[10]	Claude E.Boyd, <i>Water Quality An Introduction</i> , Springer International Publishing Switzerland, 2015
[11]	N.Manivaskam, <i>Industrial Water Quality Requirements</i> , Chemical Publishing Co ,USA, 2011
[12]	F.Berné J.Cordonnier, <i>Traitement des eaux</i> , Edition TECHNIP, Paris, 1991
[13]	Guide et suivi de la qualité des eaux usées, <i>Protocole de détermination des paramètres physico-chimiques et bactériologiques</i> , centre collaborant de l'OMS, 2007
[14]	Claude Pelletier, <i>Mesure de turbidité</i> , Edition N°4 Techniques de l'ingénieur, 2002.
[15]	Gaagai Aissam, <i>Etude de l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Babar (Sud-Est Algérien) et l'impact de la rupture de la digue sur l'environnement</i> , Thèse de Doctorat, Université Batna, 2017.
[16]	Centre d'expertise en analyse environnemental du Québec. <i>Détermination de la demande chimique en oxygène méthode de reflux en système fermé suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium</i> , MA. 315 – DCO 1.1, Rév. 4, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2016.
[17]	Frank R.Spellman, <i>Mathematics Manual for water and wastewater treatment operators</i> , CRC Press LLC, USA, 2004
[18]	Hamchaoui Samir, <i>Intégration de l'aléa pluviométrique dans le cadre d'une gestion du service d'eau potable</i> , Thèse de doctorat, Université de Batna, 2017.
[19]	Reinhard Manns, <i>Guide de la mesure de conductivité</i> , Jumo Régulation SAS, Metz, 2007
[20]	<i>Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Lybie) Gestion commune d'un bassin transfrontalier</i> OSS_Collection synthèse N°1 Tunis, 2008
[21]	Houari Idir Menad Nezli Imed Eddine et Bouregaa Slimane, <i>Description géologique et géométrique des formations aquifères de la cuvette de Ouargla</i> , Algerian Journal of Arid And Environment (AJAE), Vol 4 N°01 Année 2014.

Références bibliographiques

[22]	Chaouch Noura, <i>Utilisation des sous-produits du palmier dattier dans le traitement physico-chimique des eaux polluées</i> , thèse de Doctorat en science, Université de Batna, 2014
[23]	Tabouche N Achour S, <i>Etude de la qualité des eaux souterraines de la région oriental du Sahara septentrional Algérien</i> , Larhyss Journal , ISSN 1112-3680, n° 03 , Juin 2004.
[24]	Morgan Mozas & Alexis Ghosn , <i>État des lieux du secteur de l'eau en Algérie</i> ,Institut de prospective économique du monde méditerranéen (IPEMED),2013
[25]	Sarah Cheret. <i>Les grandes catégories d'usages de l'eau dans l'industrie</i> . Dossier N° G1150. Environnement . Techniques de l'ingénieur, 2001.
[26]	Erwan Lozach , <i>Le Sel et les Micro-organismes</i> ,Thèse de doctorat, Faculté de medecine Creteil,2001
[27]	<i>Les potentialité minières</i> , site officiel du Ministère de l'Énergie et Mines, www.energy.gov.dz/ ,consulté le 20 01 2018.
[28]	Françoise Valentini, <i>L'indispensable en biochimie</i> , Boréal, 2005
[29]	<i>Manuel opérationnel d'une unité de traitement de sel et de production d'hypochlorite de sodium</i> , Engineering Chemical industry,E C I , Flash chemicals industrie,2016.
[30]	John C. Kotz,Paul M. Treichel Jr , <i>Chimie des solutions</i> ,5e édition, Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles,2006.
[31]	<i>Chlorine Principles and Industrial Practice</i> , Edited by Peter Schmittinger, WILEY VCH, First Edition 2000.
[32]	<i>Document de référence sur les meilleures techniques disponibles</i> , Industrie du chlore et de la soude, Art 16 Paragraphe 2 Directive 96/61, Commission européenne, 2001.
[33]	Marian Chatenet, <i>Cathode à air pour l'électrolyse chlore-soude</i> , thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
[34]	<i>OxyChem Sodium Hypochlorite Handbook</i> , Occidental Chem Corp, Dallas, 2000.
[35]	<i>L'Eau de Javel Solution aqueuse d'hypochlorite de sodium</i> , Chambre Syndicale Nationale de l'Eau de Javel, NEUILLY, 2010.
[36]	<i>Méthode de détermination de la teneur en chlore actif</i> , Journal officiel de la république Algérienne N°13, février 2007.
[37]	Richard L. Myers , <i>The 100 Most Important Chemical Compounds A Reference Guide</i> , GREENWOOD PRESS, London,2007.
[38]	<i>Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali</i> , Institute for Prospective Technological Studies, European IPPC Bureau,2014.
[39]	Inoussa Zongo, <i>Étude Expérimentale et Théorique du Procédé d'Electrocoagulation</i> , Thèse de Doctorat en génie des procédés et produits, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
[40]	Bonnin.J, <i>Hydraulique urbaine</i> . Edition Eyrolles, 1986.
[41]	Valérie Jacquet Violleau, <i>Déminéralisation Par Electrodialyse en Présence d'un complexant Application Au Lactosérum</i> , Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999.
[42]	Alfa arzate, <i>procédés de séparation membranaire et leur applications dans l'industrie alimentaire</i> , revue du centre de recherche, de développement et transfert technologique acericol inc, ACER,Saint-Nobert d'Arthabaska ,Quebec,2008.
[43]	Mathias Monnot , <i>Conception d'une filière intensifiée par membrane pour le dessalement autonome d'eau de mer</i> , thèse de doctorat, Université de Toulouse,2015.
[44]	Vivek V. Ranade Vinamy M. Bhandari , <i>Industrial Wastewater Treatment,Recycling and reuse</i> , Elsevier Ltd, USA,2014.

Références bibliographiques

[45]	Jaidev singh, <i>Effluent treatment plant Design, operation and analysis of wastewater</i> , M.M.Modi, Patiala-india, 2012.
[46]	F. Delmas. <i>Production de chlore et de soude par le procédé à membrane échangeuse d'ions</i> . Journal de Physique IV Colloque, 1994, 04 (C1), pp.C1-223-C1-232.



Table de matières

Table des matières

Page de garde			
Citation			
Dédicaces			
Remerciements			
Résumés			
Sommaire			
Liste des abréviations			
Liste des illustrations graphiques			
Les mots clés			
Introduction			2
	I. L'eau et le sel (NaCl) Généralités, ressources locales et usage industriel		6
	I.1. Définitions, propriétés, caractéristiques et qualité		7
	I.1.1. Qu'entend-on par « eau » ?		7
	I.1.1.1. Les eaux naturelles		7
	A. Leur origine		7
	B. Leur utilisation		7
	I.1.1.2. Les eaux usées (ou résiduaires), urbaines ou industrielles		7
	I.1.2. Propriétés physiques		7
	I.1.3. Propriétés chimiques		7
	I.1.3.1. Pouvoir solvatant		9
	I.1.3.2. Ionisation et caractère amphiprotique		9
	I.1.4. Qualité de l'eau : Définition et paramètres d'évaluation		10
	I.1.4.1. Introduction		10
	I.1.4.2. Paramètres physico-chimiques		10
	A. Température		10
	B. pH		11
	C. Matière en suspension		11
	D. Turbidité		12
	E. Le Calcium		14
	F. Le Magnésium		14
	G. Les Chlorures		14
	H. Les Sulfates		15
	5I. Le Sodium		15
	J. Le Fer		15
	K. Les Nitrites		16
	L. Les Nitrates		16
	M. La Demande biologique en oxygène (DBO5) :		16
	N. Demande chimique en oxygène (DCO) :		18
	O. Dureté (Titre hydrotimétrique):		19
	1. Calcul de la dureté Calcique en CaCO₃		19
	2. Calcul de la dureté Magnésienne en CaCO₃		19
	3. Calcul de la dureté Totale en (mg/l)		19
	p. Conductivité		20
	1. Principe de mesure, conductif		21
	2. Le principe de mesure, inductif		23
	I.2. Ressources hydriques locales		24
	I.2.1. Système aquifère du Sahara septentrional		24
	I.2.1.1. La nappe Phréatique		25

Table des matières

Première partie	Chapitre II	I.2.1.2.	La nappe du complexe terminal	25
		A.	La nappe du Miopliocène « nappe des sables »	25
		B.	La nappe Eocène-Sénonien « nappe des calcaires »	25
		I.2.1.3.	La nappe du continentale intercalaire	25
		I.2.2.	Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines locales	25
		I.3.	L'eau et l'industrie	26
		I.3.1.	Introduction	26
		I.3.2.	Utilisation de l'eau et ses fonctions en industrie	27
		I.3.2.1.	L'eau est une utilité	27
		I.3.2.2.	L'eau intervient en amont du processus de fabrication	27
	I.3.3.	L'eau intervient dans le processus de fabrication	27	
	I.4.	Le sel (NaCl)	28	
	I.4.1.	Définition, propriétés générales, ressources et usage industriel	28	
	I.4.1.1.	Définition et propriétés générales	28	
	I.4.1.2.	Ressources locales de sel (NaCl)	29	
	A.	Le sel rocheux	29	
	B.	Le sel lagunaire	30	
	I.4.1.3.	Usage industriel	30	
	I.4.1.4.	Solubilité du sel (NaCl) dans l'eau	31	
	A.	Définition de la solubilité	31	
B.	Mécanisme de dissolution du sel dans l'eau	31		
a.	Dissociation	31		
b.	Solvatation (Hydratation)	31		
c.	Dispersion	31		
I.4.1.5	Electrolyse d'une solution de sel NaCl (saumure)	33		
A.	Description de l'électrolyse	33		
B.	Le principe de fonctionnement de l'électrolyse	33		
a.	A l'anode	34		
b.	A la cathode	34		
II.	Industrie du chlore, soude caustique et acide chlorhydrique	36		
II.1.	Production du chlore	36		
II.1.1.	Généralités.	36		
II.1.2.	Procédés et techniques de production du chlore.	36		
II.2.	Production de la soude caustique.	38		
II.3.	Production de l'hypochlorite de sodium.	39		
II.3.1.	Teneur en chlore actif.	39		
II.3.2.	Degré de chlorométrie	40		
II.4.	Production de l'acide chlorhydrique.	42		
III.	Traitement en amont	46		
III.1.	Traitement en amont	46		
III.1.1.	Introduction	46		
III.1.2.	Composition typique du chlorure de sodium utilisé pour préparation de la saumure	46		
III.1.3.	Purification primaire de la saumure	47		
III.1.3.1.	Coagulation-Floculation	47		
III.1.3.2.	Décantation	47		
III.1.3.3.	Filtration par filtre à sable	47		
III.1.4.	Purification secondaire de la saumure	48		
III.1.4.1.	Filtration par filtre à résine	48		
	Chapitre III			

Table des matières

Deuxième partie	Chapitre I	III.1.5. Traitement de l'eau par osmose inverse	48
		III.1.5.1. Introduction	48
		III.1.5.2. Osmose directe	48
		III.1.5.3. Osmose inverse	49
		III.2. Traitement en aval	51
		III.2.1. Introduction	51
		III.2.2. Station d'épuration des eaux usées industrielles	51
		III.2.2.1 Définition	51
		III.2.2.2 Caractéristiques des stations d'épuration des eaux industrielles	52
		III.2.3. Processus de traitement unitaire	52
		A. Le traitement préliminaire	52
		B. Le traitement primaire,	52
		C. Le traitement secondaire	52
		D. Le traitement tertiaire	52
		III.3. Normes Algériennes de diversement des eaux usées industrielles	53
		I. Présentation de l'entreprise Sarl Flash Chemicals Industry (FCI)	56
		I.1. Données générales du site industriel	56
		I.1.1. Missions, objectifs et domaines d'activité	56
		I.1.2. Implantation et localisation	56
		I.1.2.1. Situation géographique	56
A. Superficies exploitées	56		
B. Repartions de surface exploitée	57		
C. La superficie non exploitée	58		
I.1.2.2. Coordonnes de géo-localisation par satellite	58		
I.1.2.3. Principales proximités du site industriel	58		
I.1.2.4. Données Climatiques	58		
I.1.3. Infrastructure, moyens et activités	59		
I.1.3.1. Ouvrage	59		
I.1.3.2. Utilités et équipements de servitudes	59		
A. Alimentation en eau industriel	59		
B. Gaz naturel	59		
C. Energie électrique	59		
D. Redresseur	60		
E. Onduleurs	60		
F. Polarisateur	60		
G. Armoires électriques	61		
H. Groupe électrogène	61		
L. Compresseur d'air comprimé	61		
J. Osmoseurs	62		
K. Groupe froid	62		
L. Chaudière	62		
M. Générateur d'azote	63		
A. Hypochlorite de sodium « NaClO » (48 ± 2)	63		
B. Acide chlorhydrique « HCl » (32 à 33%)	63		
C. Soude caustique liquide « NaOH » (45 à 50%)	63		
I.1.3.3. Matière première, capacité de production et de stockage	64		
A. Matière première	64		
B. Capacité de production	64		
C. Capacité de stockage	64		

Table des matières

Deuxième partie	Chapitre II	I.2.	Description des opérations unitaires du processus.	64
		I.2.1.	Processus de production	64
		I.2.2.	Matières premières principales.	65
		I.2.2.1.	L'eau de forage	65
		I.2.2.2.	Le sel brut (Chlorure de sodium « NaCl »)	66
		I.2.2.3.	Electricité	67
		I.2.3.	Schéma du processus de traitement et de production adopté	67
		I.2.3.1.	Préparation et traitement de la saumure	68
		A.	Dissolution du sel au niveau du saturateur	68
		B.	Précipitation des éléments indésirables	68
		C.	Décantation des éléments indésirables	69
		D.	Filtration sur support à sable	70
		E.	Filtration sur support à résine	71
		I.2.3.2.	Traitement de l'eau de forage au niveau de l'osmoseur	71
		I.2.3.3.	Principe de fonctionnement de l'électrolyse à membrane	74
	I.3.	Unités de production	77	
	I.3.1.	Unité de production d'hypochlorite de sodium « NaClO »	77	
	I.3.2.	Unité de synthèse d'acide chlorhydrique « HCl »	78	
	II	Matériels et méthodes	80	
	II.1.	Introduction	80	
	II.2.	Plan général descriptif des circuits d'eau d'alimentation et des rejets liquides	81	
	II.3.	Analyse des matières premières de la chaîne de production	82	
	II.4.	Paramètres contrôlés au niveau du saturateur	82	
	II.4.1.	Contrôle de la densité de saumure	82	
	II.4.2.	Mode opératoire	83	
	II.4.3.	Contrôle et ajustement du pH de la saumure	83	
	II.4.4.	Mode opératoire	84	
	II.4.5.	Contrôle de la présence du chlore dans la saumure	84	
	II.4.6.	Mode opératoire	84	
	II.5.	Paramètres contrôlés au niveau de réservoir de décantation	84	
	II.5.1.	Titre alcalimétrique simple (TA)	85	
	II.5.2.	Titre alcalimétrique totale (TAC)	85	
	II.5.3.	Mode opératoire	85	
	II.6.	Paramètres contrôlés au niveau des filtres à sable	85	
	II.6.1.	Mode opératoire	85	
II.6.2.	Les étapes de mesure sont :	86		
II.7.	Paramètres contrôlés au niveau des filtres à résine	86		
II.7.1.	Réactifs utilisés	87		
II.7.2.	Matériel utilisé	88		
II.7.3.	Mode opératoire :	88		
II.8.	Paramètres contrôlés au niveau de l'unité d'osmose inverse	88		
II.8.1.	Matériel utilisé	88		
II.8.2.	Mode opératoire	88		
II.9.	Paramètres contrôlés de l'eau de rejet totale avant épuration	88		
III.	Résultats et interprétations	90		
Chapitre III	III.1.	Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des matières premières	90	
	III.1.1.	Eau de forage	90	

Table des matières

III.1.2.	Sel (chlorure de sodium « NaCl ») provenant de la région Hamraia	92
III.2.	Concentration du sel au niveau du saturateur	94
III.3.	Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure au niveau du saturateur	95
III.4.	Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure décantée	97
III.5.	Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à sable	98
III.6.	Analyse des paramètres physico-chimiques de la saumure après filtration à résine	98
III.7.	Récapitulation et représentations graphiques	99
III.8.	Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux osmosées	111
III.9.	Analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau finale de rejet	112
III.10.	Approche technique du traitement des eaux des rejets du processus	114
Conclusion		117
Références bibliographiques		119
Table de matières		123