



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : Réutilisation des eaux non conventionnelles

THEME :

**Etude de dimensionnement de la station de
déminéralisation des eaux saumâtres. (W. EL Oued)**

Présenté par :

MEZRAG Lisa

Devant les membres du jury

| Noms et Prénoms | Grade | Qualité |
|------------------------|--------------|----------------|
| DJODAR Dahbia | M.C.A | Présidente |
| BETATACHE Hayat | M.C.B | Examinatrice |
| TAFET Leila | M.A.A | Examinatrice |
| MIHOUBI Mustapha Kamel | Professeur | Promoteur |

Session : Novembre 2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à,

La mémoire de mon défunt oncle décédé la semaine passée ;

Mes chers parents symbole de grands sacrifices, de courage, d'humilité et d'amour sans qui rien de tout ça n'aurait jamais été possible, que Dieu les protège et leur procure une longue vie en bonne santé, et à qui j'espère pouvoir rendre un jour ne serait-ce qu'une partie de tout ce qu'ils m'ont offert ;

Ma chère petite sœur et mon cher petit frère dont je suis très fière et à qui je me dois de prodiguer le bon exemple à suivre ;

Tous mes amis proches de mon cœur qui m'ont accompagnée tout le long de cette expérience unique et qui m'ont aidée par leur présence et leurs conseils ;

*Mes enseignants défunts et vivants depuis mon enfance ;
A ceux qui me sont chers et ceux que j'aime du fond de mon cœur.*

LISA

Remerciements

Tout d'abord je rends grâce à Dieu tout puissant pour sa miséricorde et sa bonté infinie.

*Je remercie mon encadreur le professeur **Mustapha K. MIHOUBI** qui a une grande contribution dans l'accomplissement de ce travail.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont aidée dans l'élaboration de ce travail et tout particulièrement :

- *Mr **Hamid BENALI**, directeur de la station de déminéralisation d'El Oued pour m'avoir facilité la tâche d'accès à toutes les données nécessaires.*
- *Mr. **Mohamed KHATEB**, directeur de la station de dessalement **Miyah à Fouka, Tipaza** pour tous ses conseils très précieux et la documentation qu'il m'a prodiguée.*
- *Mr. **Samir YAHYAOUI**, qui a été mon professeur et guide pendant ces cinq dernières années, et qui jusqu'à aujourd'hui fait à tout fait pour m'aider.*

*Mes Sincères remerciements vont également à **Mme Dahbia DJOUDAR**, pour présider le jury lors de ma soutenance, ainsi qu'à mes deux professeurs **Mme Hayat Betatache** et **Mme Leïla Tafat** qui m'honoreront de leurs présence pour examiner mon travail.*

Merci à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste ouvrage.

Nelson MANDELA a dit "je ne perds jamais. Soit je gagne, soit j'apprends."

Donc je remercie toutes les personnes sans exception que j'ai rencontrée pendant ces cinq dernières années car cette aventure a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

ملخص:

واد سوف هي وحدة موارد مائية تقع في جنوب شرق الجزائر. تحتوي على خزان مياه كبير جدًا يتكون من ثلاثة جداول للمياه الجوفية: منسوب المياه الجوفية (منسوب المياه)، منسوب المياه لمجمع المحطة، منسوب المياه في القارات القارية. تُستخدم جميع المياه تقريبًا لإطعام السكان، حيث تُعتبر المورد المائي الوحيد المتاح في هذه المنطقة. على الرغم من هذا الثراء، إلا أن جودة هذه المياه تظل من المتوسط إلى السيئ مع نسبة عالية من التمعدين (التي يرجع أصلها إلى الطبيعة الجيولوجية للأرض المحيطة) وتتجاوز المعايير التي أوصت بها منظمة الصحة العالمية. لهذا، يجب المطالبة بمعايير صارمة لتحسين جودة هذه المياه وضمان صلاحيتها للشرب وفقًا للمعايير الوطنية والدولية، قبل تعبئتها للمستهلكين. هذا الوضع المقلق هو أصل دراستنا التي تتكون من بناء محطة تنقية في هذه المنطقة. الهدف الرئيسي لعمَلنا هو إجراء دراسة مقارنة بين تقنيات التنقية المختلفة (تقنيًا واقتصاديًا) واقتراح تحجيم المحطة (محطة التنقية والمعالجة الفيزيائية المسبقة).

الكلمات المفتاحية: الواد -المياه المالحة -نزع المعادن -التناضح العكسي

Résumé :

La région d'Oued-Souf est une unité de ressource en eau située au Sud-Est algérien. Elle possède un réservoir en eau très important constitué de trois nappes souterraines : la nappe libre (phréatique), la nappe du complexe Terminal, et la nappe du continental intercalaire. Dont la quasi-totalité des eaux est destinée à la l'alimentation de la population et à l'irrigation, car elle est considérée comme la seule ressource hydrique disponible dans cette région. Malgré cette richesse, la qualité de ces eaux reste néanmoins de médiocre à mauvaise avec une minéralisation élevée et dépassant les normes recommandées par l'OMS. Pour cela, il faut exiger des critères rigoureux pour améliorer la qualité de ces eaux et garantir leur potabilité selon les normes nationales et internationales, avant de les mobiliser aux consommateurs. Cette situation alarmante est à l'origine de notre étude qui consiste en la réalisation d'une station de déminéralisation dans cette région avec une capacité de production de 30 000 m³/j. Notre travail a pour but principal l'établissement d'une étude comparative entre les différentes techniques de déminéralisation (techniquement et économiquement) ce qui a eu pour ressort la qualification de l'osmose inverse pour la suite des calculs. Puis, de proposer un dimensionnement de la station. Ce qui nous a permis d'obtenir une configuration d'OI avec 3 lignes en 2 étages, et un prétraitement physique avec 6 filtres à sable et 3 filtres à cartouches

Mots clés : El-Oued, Eau saumâtre, Déminéralisation, Osmose Inverse.

Abstract:

The Oued-Souf region is a water resource unit located in south-eastern Algeria. It has a very large water reservoir made up of three underground water tables: the free water table (water table), the water table of the Terminal complex, the water table of the intermediate continental. Almost all of the water of which is intended to feed the population, as it is considered the only water resource available in this region. Despite this richness, the quality of these waters nevertheless remains from mediocre to bad with a high mineralization (the origin of which is essentially the geological nature of the surrounding land) and exceeds the standards recommended by the WHO. For this, rigorous criteria must be demanded to improve the quality of these waters and guarantee their potability in accordance with national and international standards, before they are mobilized to consumers. This alarming situation is at the origin of our study which consists of the construction of a demineralization station in this region. The main goal of our work is to establish a comparative study between the different demineralization techniques (technically and economically) and to propose a sizing of the station (demineralization station and physical pre-treatment).

Keywords: El-Oued, Brackish water, Demineralization, Reverse osmosis.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des planches

Introduction générale

CHAPITRE I : Description de la zone d'étude

| | | |
|--------|----------------------------|----|
| I. | Situation géographique : | 4 |
| II. | Situation topographique : | 5 |
| III. | Description géologique : | 7 |
| III.1. | Séismicité : | 7 |
| III.2. | Géologie du site : | 7 |
| IV. | Situation climaologique : | 10 |
| IV.1. | La température : | 10 |
| IV.2. | Les précipitations : | 11 |
| IV.3. | Diagramme ombrothermique : | 12 |
| IV.4. | Vitesse du vent : | 12 |
| IV.5. | Humidité : | 12 |
| IV.6. | Taux d'insolation : | 12 |
| IV.7. | L'évaporation : | 12 |
| IV.8. | Diagramme d'Emberger : | 13 |

CHAPITRE II : Quantification de la ressource et des besoins

| | | |
|--------|---|----|
| I. | Les nappes souterraines du SASS : | 20 |
| I.1. | La nappe libre : | 20 |
| I.2. | Nappe du complexe terminal (CT) : | 21 |
| I.3. | Nappe du Continental Intercalaire (CI) : | 22 |
| II. | Cadre sociologique de la wilaya et de la commune d'El Oued : | 23 |
| III. | Cadre économique de la wilaya et de la commune d'El-Oued : | 24 |
| III.1. | L'artisanat : | 24 |
| III.2. | Le commerce : | 25 |
| III.3. | L'industrie : | 25 |
| III.4. | Agriculture et Elevage : | 26 |
| III.5. | Le tourisme : | 27 |
| IV. | Estimation des ressources et des besoins : | 28 |
| IV.1. | Les ressources : | 28 |
| IV.2. | Description de l'état de secteur de l'eau de la ville d'El oued : | 28 |
| IV.3. | Les besoins : | 29 |

CHAPITRE III : Etude comparative entre les différentes techniques de déminéralisation des eaux saumâtres et choix du procédé

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Partie I : généralités sur les techniques de déminéralisation : | 31 |
| I.1. | Les ressources de l'eau dans la nature : | 31 |
| I.2. | L'eau : | 32 |
| I.3. | L'eau potable : | 33 |
| I.4. | Historique du dessalement : | 35 |
| I.5. | Qualité des eaux marines et des eaux saumâtres : | 36 |
| I.6. | Définition du dessalement et de la déminéralisation : | 37 |
| I.7. | Situation du dessalement dans le monde : | 38 |
| I.8. | Le dessalement en Algérie : | 39 |
| I.9. | Les stations de déminéralisation en Algérie : | 41 |
| I.10. | Les stations de déminéralisation de la wilaya d'El oued : | 41 |
| I.11. | Les différentes techniques et procédés de déminéralisation : | 44 |
| II. | Partie II : comparaison entre les différentes techniques de déminéralisation : | 67 |
| II.1. | comparaison technique : | 67 |
| II.2. | Comparaison économique : | 72 |
| II.3 | Choix de la technique la plus convenable : | 78 |

CHAPITRE IV : Etude de dimensionnement de la station de déminéralisation

| | | |
|------|---|-----|
| I. | Bases de conception et données nécessaires pour la conception d'une unité de déminéralisation : | 84 |
| I.1 | Les caractéristiques de l'eau brute : | 84 |
| I.2 | Les objectifs de traitement : | 85 |
| I.3 | Les conditions environnementales : | 85 |
| I.4. | Relation entre les conditions d'opération et le colmatage des membranes : | 85 |
| I.5. | Ressources humaines et techniques : | 85 |
| II. | Chaine de traitement de la station d'El Oued : | 86 |
| II.1 | Capacité nominale de l'usine : | 87 |
| II.2 | Résultats de l'étude géologique du sol de fondation : | 87 |
| II.3 | Les forages : | 88 |
| II.4 | Le dimensionnement : | 88 |
| a. | Caractéristiques de l'eau brute | 88 |
| b. | Le prétraitement | 89 |
| c. | Le prétraitement chimique | 90 |
| d. | Le prétraitement physique | 91 |
| e. | L'unité d'osmose inverse | 100 |
| f. | Le post-traitement | 111 |
| g. | Stockage et impulsion de l'eau produite et de rejet ----- | 113 |
| II.5 | Limitations de l'osmose inverse : | 115 |
| II.6 | Le nettoyage des membranes : | 118 |
| II.7 | Prévention du colmatage : | 119 |

CHAPITRE V : Devis estimatif de la station de déminéralisation d'El Oued

| | | |
|--|-------|-----|
| I. Calcul économique : | _____ | 121 |
| I.1 L'investissement : | _____ | 121 |
| I.2 Coût d'Exploitation : | _____ | 124 |
| I.3 Coût Global de la station : | _____ | 126 |
| I.4 Montant total avec la TVA : | _____ | 126 |
| I.5 Prix Unitaire du Mètre Cube d'Eau Traité : | _____ | 126 |

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

- Tableau I.1** : Températures annuelles moyennes d'El oued (2011-2019)
- Tableau I.2** : Cumul des précipitations moyennes annuelles d'El Oued (2000-2019)
- Tableau II.1** : Étendue et volume des ressources en eaux souterraines
- Tableau II.2** : Liste des sites de production d'eau de la ville d'El-Oued
- Tableau II.3** : Liste des ouvrages de stockage de la ville d'El-Oued
- Tableau II.4** : Récapitulatif des besoins en eau de la wilaya d'El Oued en 2012
- Tableau III.1** : Normes de potabilité de l'eau fixées par l'OMS (2013)
- Tableau III.2** : Stations de déminéralisation dans le Sud algérien
- Tableau III.3** : Analyse complète des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'El Oued
- Tableau III.4** : Stations de déminéralisation d'El Oued.
- Tableau III.5** : Principaux paramètres caractérisant le fonctionnement du procédé membranaire
- Tableau III.6** : Caractéristiques des techniques de dessalement s'appuyant sur la distillation
- Tableau III.7** : Avantages et inconvénients des techniques de dessalement s'appuyant sur la distillation
- Tableau III.8** : Comparaison technique entre les différentes techniques membranaires
- Tableau III.9** : Avantages et inconvénients de l'osmose inverse
- Tableau III.10** : Avantages et inconvénients de l'électrodialyse
- Tableau III.11** : Comparaison technique entre l'OI et l'électrodialyse
- Tableau III.12** : Avantages et inconvénients de la congélation et de l'échange d'ions
- Tableau III.13** : Répartition des dépenses par poste de dépense
- Tableau III.14** : Coûts du dessalement selon le type d'énergie
- Tableau III.15** : Ordres de grandeur des investissements pour les différents procédés de dessalement.
- Tableau III.16** : Répartition de couts d'investissement d'une usine de déminéralisation par OI
- Tableau III.17** : Ordres de grandeur du cout de l'eau dessalée
- Tableau IV.1** : Capacité nominale et apport en eau brute de l'usine
- Tableau IV.2** : les capacités portantes du sol de fondation
- Tableau IV.3** : Caractéristiques des forages alimentant l'usine
- Tableau IV.4** : Tableau de calcul de la minéralisation
- Tableau IV.5** : Avantages et inconvénients entre les techniques de filtration à sable lente et
- Tableau IV.6** : Caractéristiques des composantes du média filtrant rapide
- Tableau IV.7** : caractéristique des eaux préfiltrées
- Tableau IV.8** : Caractéristiques du filtre à sable
- Tableau IV.9** : Caractéristiques des eaux de lavage
- Tableau IV.10** : Caractéristiques des eaux des filtres à cartouche
- Tableau IV.11** : Récapitulation de la chaine de prétraitement.
- Tableau IV.12** : Caractéristiques des pompes haute-pression
- Tableau IV.13** : La molalité moyenne des composants.
- Tableau IV.14** : Valeurs des capacités recalculées avec les nouvelles conversions
- Tableau IV.15** : Calcul de la concentration de l'eau osmosée
- Tableau IV.16** : Résultats de calculs de l'installation d'osmose inverse.
- Tableau IV.17** : Caractéristiques du système de pompage à la sortie de la station
- Tableau IV.18** : Caractéristiques du système de rejet de la saumure
- Tableau V.1** : Montant du système de forage et d'adduction d'eau brute
- Tableau V.2** : Montant de l'ensemble de la tuyauterie et des accessoires
- Tableau V.3** : Montant de l'ensemble du système énergétique et de pompage
- Tableau V.4** : Montant de l'ensemble des salaires annuels

Liste des figures

- Figure I.1** : Situation géographique de la zone d'étude
Figure I.2 : Situation topographique de la zone d'étude
Figure I.3 : Carte de zonage sismique du territoire national
Figure I.4 : Extrait de la carte géologique d'El-OUED
Figure I.5 : Colonne stratigraphique d'un forage à El Oued
Figure I.6 : Evolution des températures moyennes annuelles d'El Oued (2011-2019)
Figure I.7 : Cumul des précipitations moyennes annuelles d'El Oued (2000-2019)
Figure I.8 : Diagramme ombrothermique d'El Oued (2019)
Figure I.9 : Diagramme d'Emberger
Figure II.1 : Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale
Figure II.2 : Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe
Figure II.3 : Carte d'extension des Systèmes Aquifères (CT et CI) en Algérie
Figure II.4 : L'artisanat au Souf
Figure II.5 : Les activités commerciales
Figure II.6 : L'agriculture du Souf
Figure III.1 : Principe de base du dessalement de l'eau de mer
Figure III.2 : Capacités de dessalement dans le monde
Figure III.3 : Localisation des grandes stations de dessalement de l'eau de mer
Figure III.4 : Principales techniques de déminéralisation
Figure III.5 : Distillateur à simple effet
Figure III.6 : Distillateur à multiple effets
Figure III.7 : Distillation à détentes successives
Figure III.8 : Schéma de principe de la compression de la vapeur
Figure III.9 : Schéma du principe de fonctionnement d'une membrane
Figure III.10 : Principales caractéristiques des matériaux membranaires prix moyens
Figure III.11 : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale
Figure III.12 : Présentation du fonctionnement de la filtration tangentielle.
Figure III.13 : Etapes de fabrication d'une membrane
Figure III.14 : Module à membrane tubulaire
Figure III.15 : Module spiralé
Figure III.16 : Principe de fonctionnement du procédé d'osmose et d'osmose inverse
Figure III.17 : Schéma de principe de l'électrodialyse à deux compartiments
Figure III.18 : Schéma de principe de l'électrodialyse à trois compartiments
Figure III.19 : Schéma de principe de l'électrodialyse à quatre compartiments
Figure III.20 : Les différents composés rencontrés dans les eaux naturelles et les techniques permettant leur élimination
Figure III.21 : fonctionnement d'une résine échangeuse d'ions
Figure III.22 : Coûts de production du m³ d'eau traitée pour trois procédés
Figure III.23 : Cout du mètre cube d'eau dessalée ou déminéralisée
Figure IV.1 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse
Figure IV.2 : Filtration sous pression
Figure IV.3 : sable et anthracite
Figure IV.4 : Schéma de la chaine de prétraitement de la station de déminéralisation d'El Oued
Figure IV.5 : Schéma de l'unité d'osmose inverse et du post-traitement de la station de déminéralisation d'El Oued
Figure IV.6 : Mécanismes de colmatage
Figure IV.7 : Schéma explicatif de la chaine de déminéralisation de la station d'El Oued

Liste des planches

Planche n°1/3 : Plan d'implantation de la station de déminéralisation

Planche n°2/3 : Plan d'aménagement extérieur

Planche n°3/3 : Plan des équipements

Nomenclature

SASS : Le système aquifère du Sahara septentrional

CT : Nappe du complexe terminal

CI : Nappe du Continental Intercalaire

OMS : Organisation mondiale de la santé

MES : Matières en suspension

MRE : Ministère des ressources en eaux

MSF : La distillation multi-flash

MED : La distillation à multiples effets.

VC : La compression mécanique de vapeur.

OI : Osmose inverse

ED : Electrodialyse

MA : Membrane anionique

MC : Membrane cationique

UF : Ultrafiltration

NF : Nanofiltration

MF : Microfiltration

GPD : Gallon par jour

GPM : Gallon par minute

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Un jour une personne demanda à quelqu'un de sage : « Qu'est-ce que tu prends ? » Et il lui répondit : « La plus accessible quand elle existe et la plus précieuse quand elle disparaît » Et l'autre lui donna de l'eau.

L'eau est un élément cosmique, au même titre que le soleil et la terre, elle est la condition de la vie, non en fait c'est la vie elle-même. L'existence humaine dépend entièrement de cette substance. La géosphère, l'atmosphère et la biosphère entretiennent toutes les trois des relations étroites avec elle.

L'eau interagit avec l'énergie solaire pour déterminer le climat, et elle transforme et transporte les substances physiques et chimiques nécessaires à toute vie sur Terre. Sans l'eau, la terre ne serait qu'un astre mort, et aucune vie humaine, végétale, ou animale n'existerait.

L'eau est aussi un élément indispensable pour le développement socioéconomique réel et durable d'un pays, il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eau existantes. Toutefois, avec le développement de l'humanité et des mégapoles, et l'industrialisation galopante, le problème de la disponibilité de l'eau se pose avec acuité et se posera davantage dans un avenir proche, ce qui constitue une perspective inquiétante. Cela consiste en un problème en matière de qualité pour les pays de l'hémisphère nord et en matière de quantité et également de qualité pour les pays de l'hémisphère sud.

Au cours des années entre 1950 et 1990, la consommation mondiale d'eau a triplé, tandis que la population de la planète augmentait de 2,3 milliards d'habitants. La pénurie d'eau touche déjà tous les continents et plus de 40 % de la population de la planète (*Jacques, 2007*).

La rareté de l'eau se fait de plus en plus sentir et devient sans doute l'un des défis majeurs de ce siècle. D'après le « *Water Resources Institute* » il existe déjà plus de 26 pays, qui commencent à souffrir du manque d'eau et d'ici 2032, ce chiffre dépassera la barre des 50 % de la population mondiale. Par ailleurs, le « *Conseil Mondial de l'Eau* », avait avancé que sur une population de 6 milliards d'habitants, 1 sur 4 n'accède pas à une eau de qualité et en quantité suffisante, qu'un habitant sur deux ne dispose pas d'un système d'assainissement adéquat et chaque année 7 millions de personnes meurent à cause des maladies d'origine hydrique.

Les origines des eaux de consommation sont multiples : eaux de surface et eaux souterraines, mais ceux qui répondent aux normes de potabilités qui sont très peu nombreuses.

Dans les pays en voie de développement à climat aride, le rôle des eaux souterraines est d'autant plus important qu'elles constituent souvent la seule source d'approvisionnement en eau potable, qui reste une ressource indispensable pour le développement aux pays.

La gestion des ressources en eau, en quantité et en qualité, reste au centre des préoccupations du pays compte tenu de l'insuffisance des ressources qui est souvent aggravée par la sécheresse.

L'Algérie n'échappe malheureusement pas à cette situation de raréfaction de ce précieux liquide, les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les

besoins grandissants liés à l'essor démographique avec un exode rural vers la zone côtière et les grandes villes, à une élévation du niveau de vie et au développement accéléré des activités économiques, notamment l'agriculture et l'industrie. De plus, les changements climatiques, qui provoquent de longues périodes de sécheresse, viennent augmenter la pression due au déficit en ressource en eaux.

L'Algérie reçoit approximativement 90 milliards m³ de pluie par an, dont 85% s'évaporent et le reste s'infiltré dans le sol. En matière de ressources souterraines, le volume exploitable est estimé à 1,8 milliards m³ au nord (SASS, 2003). Au sud et exactement dans le Sahara Septentrional, d'importantes ressources en eau existent telles que la nappe du Continentale Intercalaire (CI) et celle du Complexe Terminal (CT).

Donc, c'est sans tenir compte des caprices de la météo que notre pays tente de mettre à disposition de la population au moins 1000 m³ d'eau par an et par habitant.

Pour la résolution de cette problématique, l'Algérie, comme beaucoup d'autres pays ont eu recours, depuis une quinzaine d'années, à des ressources en eaux dites « Non conventionnelles ». La plus importante méthode sur laquelle s'est basée la politique du MRE pour mettre fin à cette situation de crises est la technique de dessalement de l'eau. La nécessité de dessaler l'eau de mer se fait de plus en plus pressante, face à ces défis vitaux, l'Algérie est lancée depuis peu, mais de façon intense, dans le dessalement de l'eau de mer. Cette solution s'est imposée afin de faire face à ces besoins grandissants, mais aussi pour atténuer la pression sur les ressources locales.

Comme l'Algérie est connue par son vaste paysage et sa diversité environnementale, on aura :

- Le dessalement de l'eau de la mer méditerranée, dont la salinité est de 35 mg/litre, pour alimenter en eau potable les villes de la zone côtière.
- La déminéralisation des eaux saumâtres, dont la salinité varie entre 1 et 10 mg/l, pour alimenter les régions enclavées et désertiques.

Pour le Sahara septentrional algérien, l'essentiel des ressources est constitué par les eaux souterraines. Ces dernières, contenues dans les formations continentales du continental intercalaire (C.I) et du complexe terminal (C.T) constituent l'un des plus vastes réservoirs hydrauliques du monde (BEL et CUCHE, 1970 ; CDTN, 1992), dont les potentialités mobilisables sont estimées à 5 milliards de mètres cubes d'eau (ANRH, 1986).

Malgré la richesse de cette région en eau souterraine, elle présente néanmoins des qualités médiocres à mauvaises. La qualité des eaux souterraines au Sahara diffère d'une région à une autre et d'un aquifère à un autre, mais d'une manière générale la qualité des eaux dans les différentes régions sahariennes et notamment, celles situées au centre et au nord du Sahara (Ouargla, El oued, Biskra etc...) est très mauvaise, surtout celle destinée à l'alimentation en eau potable dans la région de Oued Souf, qui justement est notre région d'étude et où la vente de l'eau se fait par camion transporteur et par des commerçants privés à partir de points d'eau très éloignés des centres urbains.

L'accroissement démographique dans la partie sud-est de la wilaya d'El-Oued, nécessite des besoins en eau de plus en plus croissants. La sécheresse et les risques de pollution des eaux

souterraines nécessitent une attention particulière, mais le problème majeur réside dans les teneurs élevées en sel.

Cette salinité excessive, face à des conditions climatiques défavorables, à une croissance de la demande en eau potable, et au développement industriel, les volumes d'eau mobilisés et mobilisables sont insuffisants, et le recours à des ressources en eau non conventionnelles tel que la déminéralisation des eaux saumâtres semble être la solution incontournable.

La déminéralisation des eaux est un sujet très important actuellement, et de penser à réaliser des unités de déminéralisation devient jour après jour une nécessité, car il permet la satisfaction des besoins des consommateurs en eau potable soit du côté quantitatif ou qualitatif (eau de bonne qualité, douce et agréable).

Il existe plusieurs méthodes qui permettent l'obtention de l'eau déminéralisée à partir de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Parmi les techniques utilisées à l'échelle industrielle, deux principales familles se distinguent : les techniques thermiques, et les techniques à membranes. Ces techniques très intéressantes au premier abord posent toutefois tout un tas des problèmes. Les stations de déminéralisation des eaux se composent essentiellement d'un prétraitement visant à éliminer les colloïdes, les bactéries, les macromolécules et les sels bivalents ; un système de déminéralisation pour éliminer les sels monovalents ; et un post-traitement pour améliorer la qualité de l'eau destinée à la consommation.

Le marché du dessalement connaît une forte hausse, dans les pays en situation de manque d'eau, et particulièrement ces dernières années avec l'amélioration des techniques utilisées.

En effet, cette solution vient répondre parfois précipitamment à un manque d'eau là où une meilleure gestion pourrait amener des économies d'eau. De plus, les rejets de saumure des usines de dessalement posent des problèmes pour la protection de l'environnement.

Par ailleurs, chaque technique a sa spécificité et son utilisation doit être raisonnée et soumise à critique selon le contexte de cette région.

Dans ce contexte, notre étude aura pour objectif le dimensionnement de la station de déminéralisation des eaux saumâtres de la ville d'El Oued.

Les principaux objectifs fixés dans le cadre de ce travail sont :

- La comparaison technico-économique entre les différents process de déminéralisation des eaux saumâtres.
- Le dimensionnement de l'unité de déminéralisation et du prétraitement physique.



Description de la zone d'étude

CHAPITRE I

Description de la zone d'étude

Introduction

L'étymologie du mot « SOUF » vient du berbère désignant « Rivière » ou « OUED ». La région du SOUF ou communément appelée El Oued par rapport à sa capitale El Oued se trouve également dans la région du grand Erg Oriental et fait partie du Sahara Septentrional qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable ocres ou blanches déposées longitudinalement et dépassant parfois les 60 mètres de hauteur.

Marqué par des paysages époustouflants, El Oued est caractérisée par une combinaison de la splendeur originelle de dame nature qui épouse parfaitement l'originalité des constructions coiffées de coupoles.

L'oued devint une commune en 1957, puis une wilaya depuis janvier 1984 avec une superficie de 54 573 km² divisé en 30 communes et une population de 791 000 habitants et par conséquent une densité de 14.49 hab/km² avec un taux d'accroissement de la population égale à 3,4% (l'ONS, 2015) Dans cette Partie, nous mettrons en évidence la localisation géographique, topographique et géologique de la région d'EL-Oued, en exposant les paramètres climatiques importants. Ce qui nous donnera une idée bien précise de la problématique que nous traiterons tout au long de ce travail.

I. Situation géographique :

El Oued également appelée Oued Souf, est surnommée « la ville aux mille coupoles », c'est une commune de la wilaya d'El Oued, dont elle est le chef-lieu. La wilaya d'El Oued se trouve au Sud-Est de l'Algérie en d'autres termes au nord-est du Sahara algérien ; avec une superficie de 54 573 km² soit plus de 2% de la superficie totale du pays. El' Oued fait partie d'un immense territoire géomorphologique qui constitue le grand Erg oriental défini par une vaste étendue de sable 200000 km² Elle est délimitée comme suit (Figure I.1).

- Au nord, par les wilayas de Tebessa, Khenchela et Biskra.
- Au nord-ouest par la wilaya de Biskra.
- Au sud et au sud-ouest par la wilaya d'Ouargla.
- A l'est par la frontière Algéro-Tunisienne (chotts El-Djérid : région de Tozeur).



Figure I.1 : Situation géographique de la zone d'étude (OpenEdition, 2018)

II. Situation topographique

La wilaya d'EL Oued ainsi que la commune sont situées relativement à une latitude de $33^{\circ} 07' 00''$ Nord et une longitude de $07^{\circ} 11' 00''$ Est pour l'Oued et de $33^{\circ} 22' 06''$ Nord de latitude et une longitude de $06^{\circ} 52' 03''$ Est en ce qui concerne son chef-lieu. Figure (I.2).

Cette région également appelée région du Bas-Sahara à cause de sa faible altitude est située à une hauteur maximale de 125 m, alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29m. L'altitude moyenne de la région est de 80m et accuse une diminution notable du Sud vers le Nord pour être de 25m au-dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts qui occupent le fond de l'immense bassin du bas Sahara.

Le pendage général de la zone d'étude est orienté Sud/Nord, avec une pente moyenne très faible (au mieux de l'ordre de 0,002 m/m à 0,003 m/m).

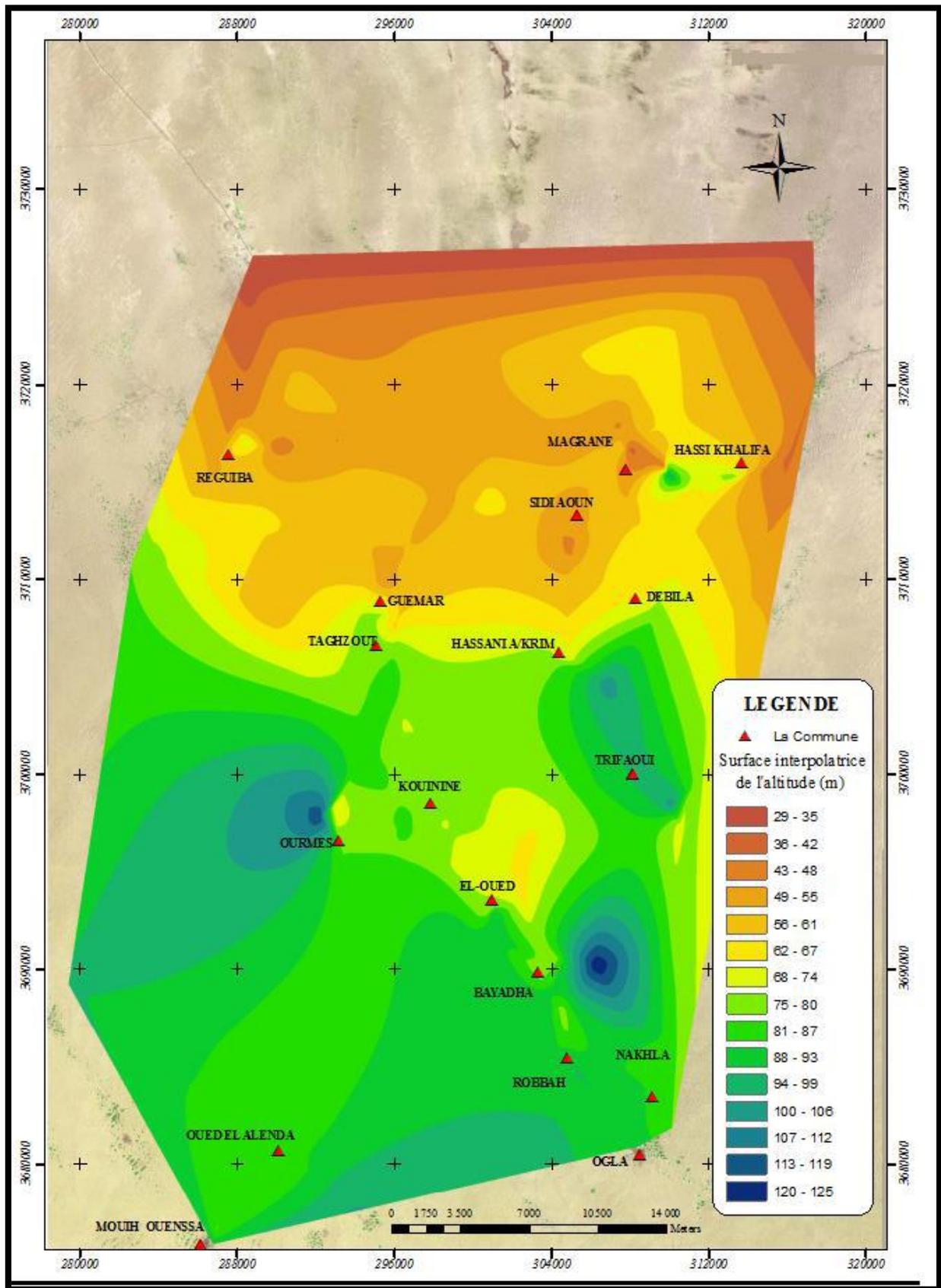


Figure I.2 : Carte topographique de la zone d'étude (ZINE.B.2008) (Echelle : 1/3500)

III. Description géologique

III.1 Séismicité : L'Algérie est découpée en cinq zones sismiques distinguées : zone 0, zone I, zone II a, zone II b, zone III. D'après le découpage (Figure I.3), la willaya d'El Oued se trouve dans la zone 0 où le risque de l'occurrence d'un tremblement de terre est très faible à voir quasi improbable et c'est ce qui est d'ailleurs confirmé par l'historique sismique algérien.

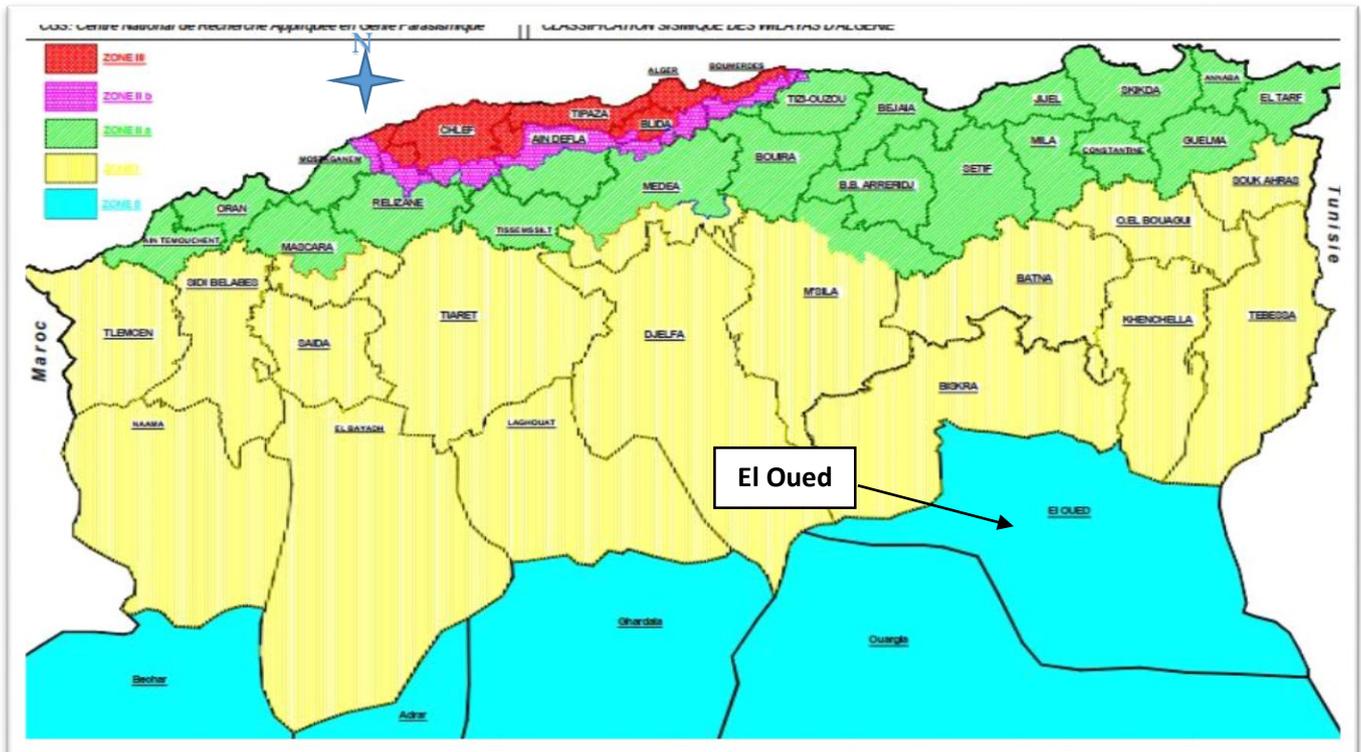


Figure I.3 : Carte de zonage sismique du territoire national (RPA 99 / Version 2003)
(Echelle : 1/5 000)

III.2 Géologie du site

La région d'El Oued fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km².

La carte géologique d'El-Oued montre que seuls les terrains d'âge quaternaire sont visibles à l'affleurement. Ils sont recouverts par de considérables épaisseurs de dépôts quaternaires à base de dunes et cordon d'Erg. (Figure I.4).

La succession des terrains et leur description lithologique ont été rendus possibles grâce aux logs de forage d'eau réalisés dans la zone d'étude faits par la DRE en 2015 sur la région d'El Oued (Figure I.5). Nous pouvons citer les principales couches repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente.

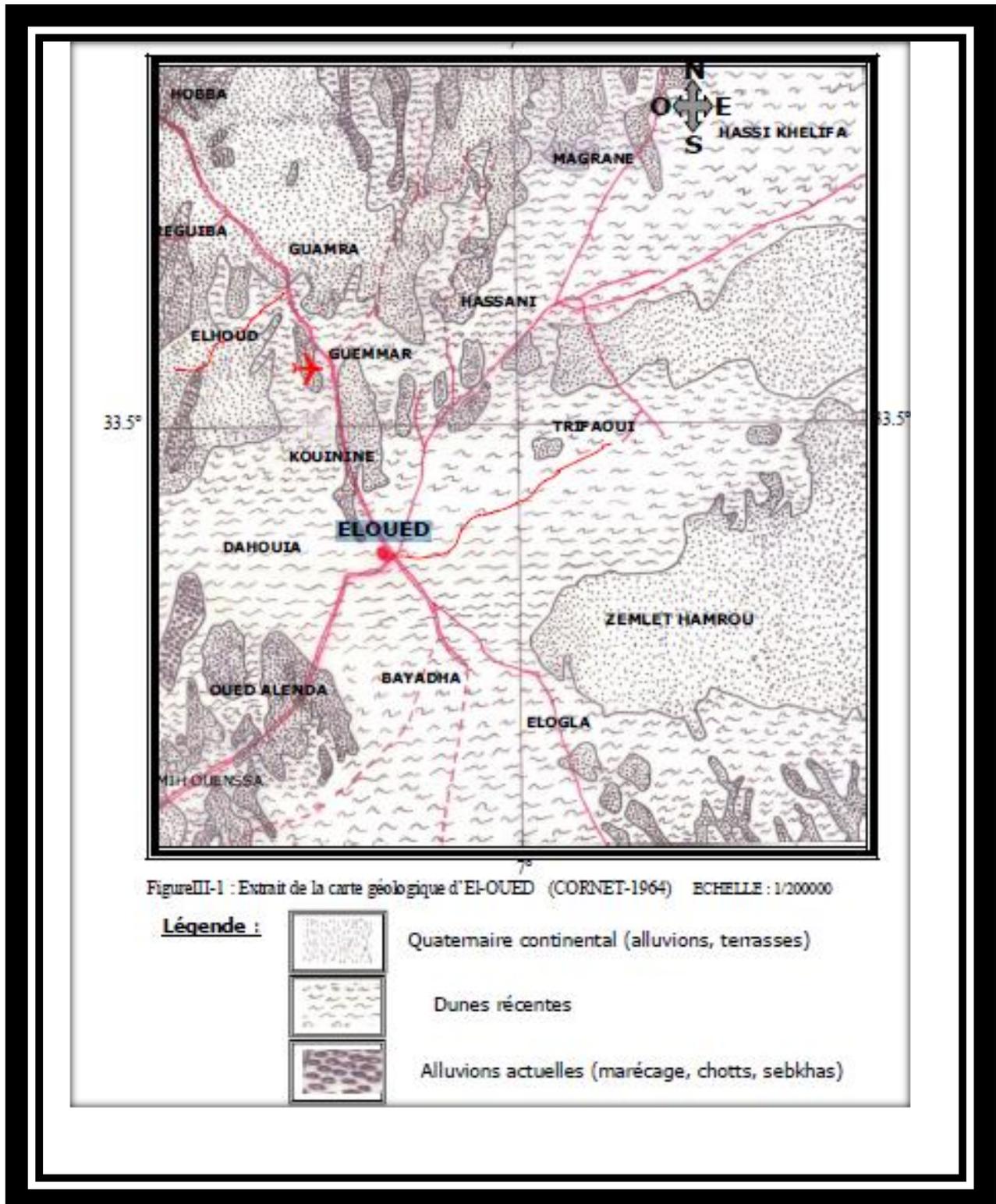


Figure I.4 : Extrait de la carte géologique d'El-OUED (CORNET-1964) ECHELLE : 1/200000

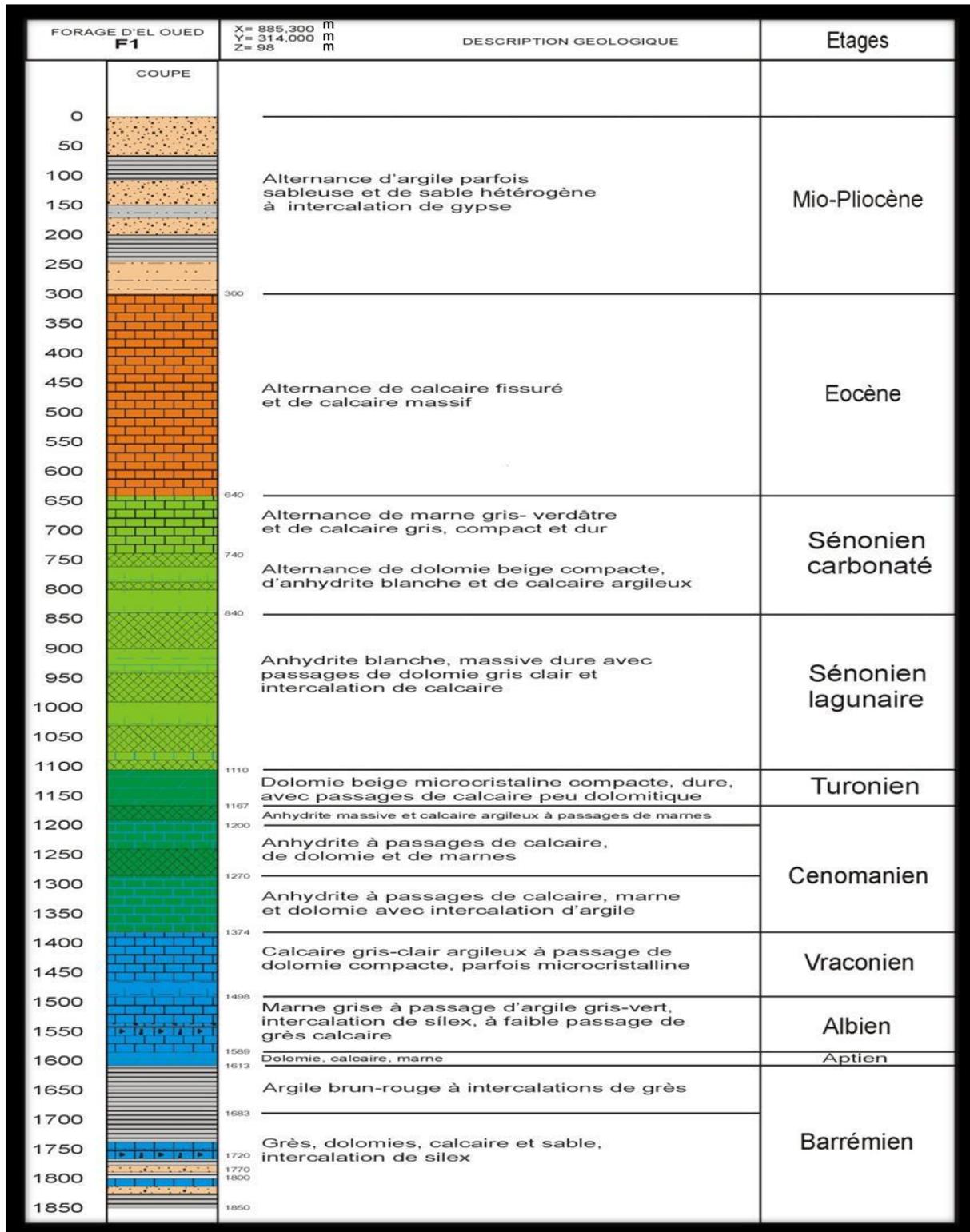


Figure I.5 : Colonne stratigraphique d'un forage à El Oued (ANRH, 1993).

IV. Situation climatologique

La wilaya et la ville d'El-Oued se trouvent au Nord du Sahara Oriental elles sont caractérisées par un climat Saharien où l'écart de température entre jours et nuit est important avec un été très chaud et sec, et un hiver doux durant le jour, mais froid au cours de la nuit atteignant parfois des valeurs négatives.

Les principales contraintes climatiques connues par cette région sont la sécheresse et la fréquence régulière des vents et leur violence connus sous le nom de Sirocco ainsi que les vents de sables durant le printemps.

L'état de l'atmosphère peut se caractériser par la mesure des différentes grandeurs physiques comme la température, les précipitations, l'humidité, le vent, etc. Qui sont nécessaires pour toute étude hydrologique et hydraulique permettant d'évaluer l'alimentation des nappes souterraines de cette région.

IV.1 La température : La température influence considérablement les autres paramètres météorologiques ce qui a un effet direct sur l'évaporation, l'évapotranspiration, la végétation et le déficit d'écoulement.

Le Souf est caractérisé par des étés brûlants qui sont aussi durs que ceux qui s'observent dans le Sahara central. Les températures sont constamment variables. Les écarts entre la nuit et le jour dépassent parfois 21°C.

Le tableau (I.1) ainsi que la figure (I.6) au-dessous représentent respectivement es températures annuelles moyennes allant de l'année 2011 jusqu'à l'année 2019.

Tableau I.1 : Températures annuelles moyennes d'El oued (2011-2019)

| Années | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|-----------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Tmoy (C°) | 9.24 | 8.96 | 10.27 | 9.45 | 11.09 | 10.53 | 10.20 | 10.21 | 9.63 |

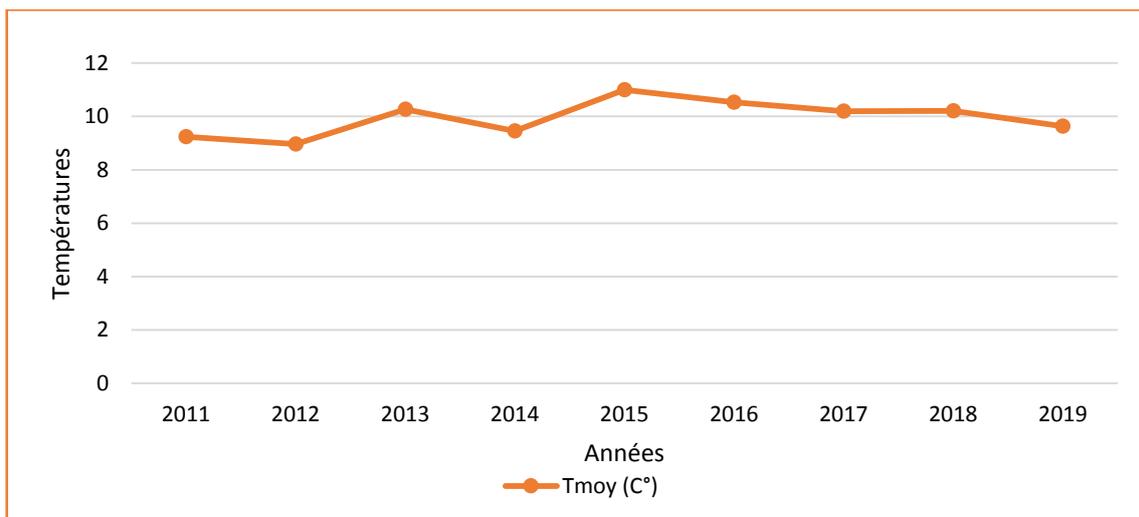


Figure I.6 : Evolution des températures moyennes annuelles d'El Oued (2011-2019)

IV.2 Les précipitations : Dans cette région saharienne la pluviosité est faible à cause du caractère d'aridité qui règne sur tout le Sahara Algérien, mais du Nord vers le Sud le gradient pluviométrique est décroissant.

Les précipitations dans la wilaya d'El-Oued sont caractérisées par des irrégularités dépassant rarement les 150 mm en moyenne par an.

La pluviométrie est résumée dans le tableau et le graphe comme suit :

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Années | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Précipitations Annuelles (mm) | 257.41 | 193.24 | 177.76 | 250.05 | 230.09 | 342.81 | 229.73 | 146.86 | 179.68 | 251.78 |
| Années | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| Précipitations Annuelles (mm) | 294.55 | 337.75 | 209.16 | 170.09 | 250.22 | 322.56 | 265.84 | 261.49 | 315.65 | 292.54 |
| Années | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Précipitations Annuelles (mm) | 257.41 | 193.24 | 177.76 | 250.05 | 230.09 | 342.81 | 229.73 | 146.86 | 179.68 | 251.78 |
| Années | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| Précipitations Annuelles (mm) | 294.55 | 337.75 | 209.16 | 170.09 | 250.22 | 322.56 | 265.84 | 261.49 | 315.65 | 292.54 |

Tableau I.2 : Cumul des précipitations moyennes annuelles d'El Oued (2000-2019)

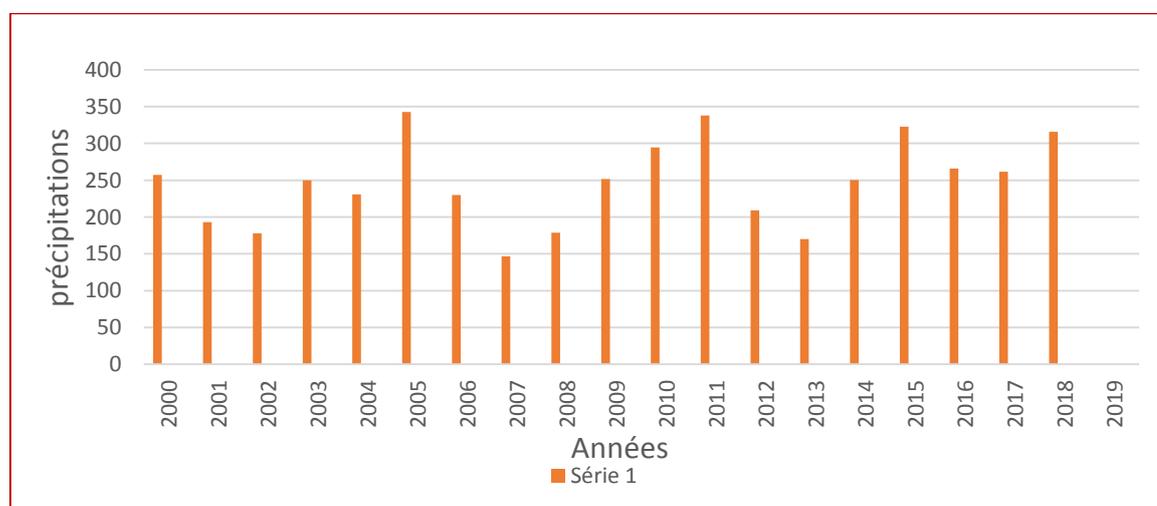


Figure I.7 : Cumul des précipitations moyennes annuelles d'El Oued (2000-2019)

IV.3 Diagramme ombrothermique

Pour établir ce diagramme (Figure I.8), on doit présenter les deux courbes : températures (C°) et précipitations (mm) sur un même graphe contenant les deux paramètres à la fois. Les températures sont représentées sur une échelle double à celle des précipitations. L'intersection des deux courbes, définit la zone humide. Autrement dit, si la courbe des précipitations est au-dessus de celle des températures, la période est dite humide. Si on a au contraire, la courbe des précipitations au-dessous de celle des températures, la période est dite sèche.

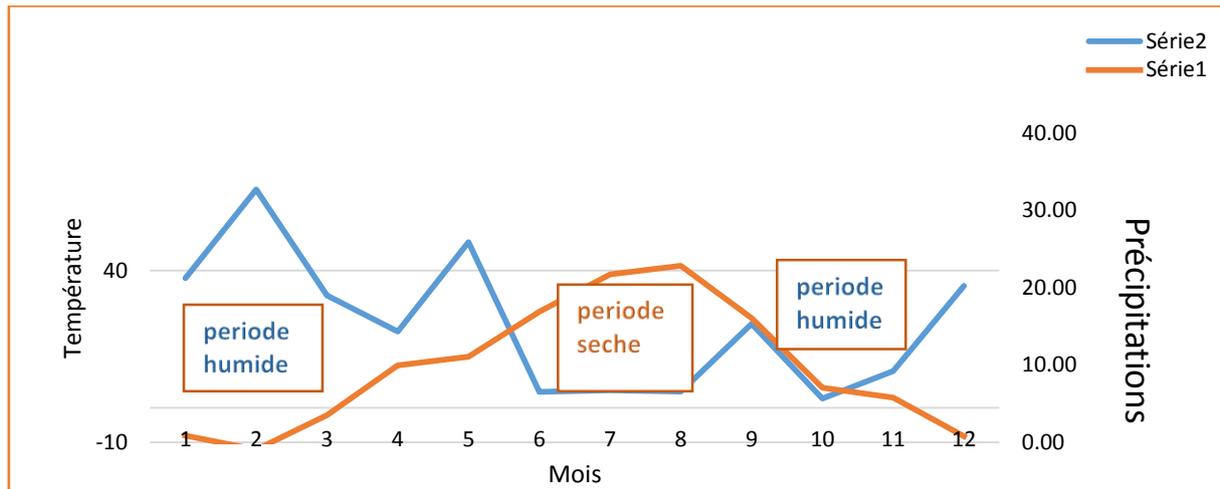


Figure I.8 : Diagramme ombrothermique d'El Oued (2019)

IV.4 Vitesse du vent

Les vents de direction Est et Nord-est prédominent, puis à un degré moindre ceux de direction Ouest et Sud-ouest, caractérisés par le Sirocco. Généralement c'est au printemps que les vents sont les plus forts, ils sont chargés de sables éoliens pouvant durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse allant de 40 à 50 Km/h.

IV.5 Humidité

L'humidité est définie comme étant un état du climat qui représente le pourcentage de la vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère. En moyenne, le taux d'humidité le plus fort est celui du mois de décembre, et le plus faible est celle du mois de Juillet.

IV.6 Taux d'insolation

Il est exprimé en heure, sa durée débute par le lever du soleil jusqu'au coucher. L'insolation varie en fonction des quatre saisons et aussi de l'angle d'incidence de ses rayons. Dans cette région le taux d'insolation est très élevé et peut atteindre jusqu'à 3500 heures par année.

IV.7 L'évaporation

Avec une température de l'air souvent élevée surtout pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable de vents secs, les plans d'eau de la région sont constamment soumis à une évaporation

considérable surtout pendant la période estivale, à titre d'exemple on a pu compter l'année dernière un total de 1257.22mm.

IV.8 Diagramme d'Emberger

Afin de déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, Emberger (1955) a mis au point un quotient pluviométrique calculé comme suit :

$$Q = 3.43 \frac{p}{M - m} \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec :

- Q** : facteur des précipitations d'Emberger
- P** : Précipitation moyenne annuelle (mm)
- M** : moyenne des maxima du mois le plus chaud (°C).
- m** : moyenne des minima du mois le plus froid (°C).

Le calcul du facteur d'Emberger dans la zone d'El-Oued pendant l'année 2019 donne la valeur suivante :

$$Q = \frac{3.43 * 24.38}{41.5 - 4.5} = 2.26 \frac{mm}{C}^{\circ}$$

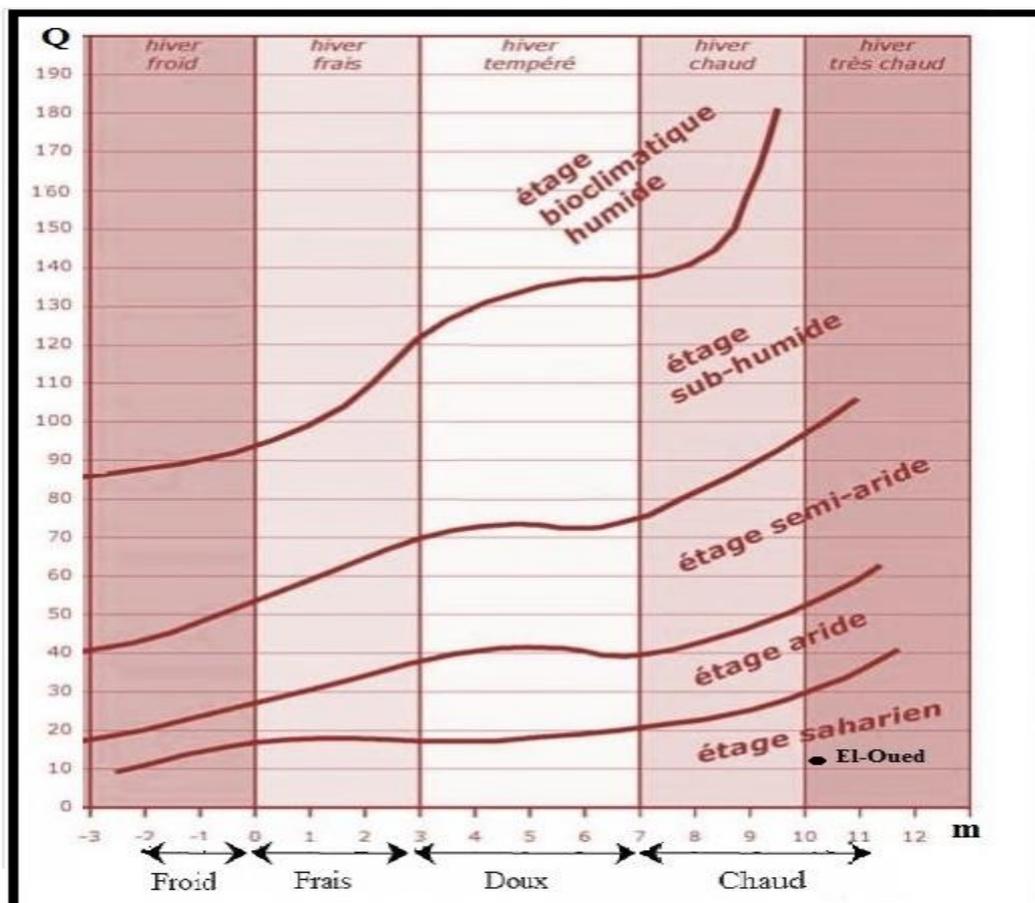


Figure I.9 : diagramme d'Emberger pour l'année 2019

Selon la position sur le Diagramme d'Emberger (Figure 1.9) la zone d'étude est caractérisée par un climat saharien avec un hiver frais.

Conclusion

Etant une région désertique du sud-est algérien, El Oued fait partie du Sahara septentrional formé de dunes, de sables, d'oasis, tout comme on retrouve en cette même zone une population importante, des villes et des villages peuplés d'habitants conviviaux et unis par une organisation sociétale.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la situation géographique ainsi que le relief et la topographie de la région et ses caractéristiques géologiques.

L'étude climatique de cette région pour un intervalle allant de 2000 jusqu'à 2019, nous a permis de synthétiser les spécifications exactes dont nous avons besoin pour avancer dans ce travail.

L'Oued est caractérisé par un climat hyper aride de type saharien marqué par une pluviosité irrégulière annuelle et interannuelle avec des précipitations annuelles totales de 292.54mm en 2019.

Le mois le plus humide est le mois de décembre, il est caractérisé par une forte humidité, et le mois le plus sec est celui de juillet avec une faible humidité.

Les mois d'été sont très chauds, et les températures atteignent jusqu'à 50C° à l'ombre et plus les jours de Sirocco, mais la température chute à la nuit tombante d'une vingtaine de degrés, créant un écart très considérable entre les températures.

Cela dit nous sommes en mesure de distinguer deux périodes : l'une est sèche et chaude se prolongeant entre le mois de mai jusqu'à novembre et l'autre est humide et froide s'étalant entre novembre et avril.

Les vitesses du vent les plus élevées sont enregistrées durant la période allant du mois d'avril jusqu'au mois de septembre, provoquant ainsi des taux d'évaporation plutôt élevés.

Avec tous ces facteurs réunis, nous pouvons conclure que la zone d'étude est caractérisée par une aridité extrême, l'évaporation et la transpiration sont des mécanismes majeurs de perte en eau résultants de la chaleur élevée et des vents forts.



Chapitre II

Quantification des ressources et des besoins

CHAPITRE II

Quantification de la ressource et des besoins

Introduction

La vallée du Souf, regroupe un certain nombre d'oasis au sein du Grand Erg oriental où l'eau est d'une nécessité primordiale surtout pour l'irrigation des cultures. Cependant, les seules ressources hydriques disponibles sont les nappes souterraines. Celles de la région du Souf, sont contenues dans des formations aquifères de natures différentes mais sont considérées comme ayant un potentiel hydrique volumique très important. Ces eaux proviennent essentiellement de trois nappes aquifères à différentes profondeurs, une nappe libre et deux autres captives. L'étude hydrogéologique générale a montré l'existence de trois horizons d'aquifères abritant plus de 40 000 milliards de m³ de réserves d'eau sous forme nappes superposées (Figure II.1). Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) est partagé entre les trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Il recouvre une étendue de plus d'un million de km², dont 70 % se trouvent en Algérie, 6 % en Tunisie, et 24 % en Libye.

Le bassin sédimentaire du Sahara septentrional possède une envergure de 1800 km E-W et de 900 km N-S (OSS, 2003).

Il est limité par :

- Les piémonts du versant Sud de l'Atlas saharien au Nord-ouest
- L'accident sud atlasique au Nord des Chotts, relayés vers le golfe de Gabès par la faille d'El Hamma – Médenine au nord.
- L'Oued Saoura-Reggane, A l'Ouest.
- Un alignement Est-ouest, de plateaux (Hamadas) du Tinrhert et du Tademaït au Sud.
- Enfin, la limite Nord-est se situe un peu après les reliefs du Dahart et celle du Sud-est parcourt la région de Syrte et va jusqu'à la ville de Hun en Libye.

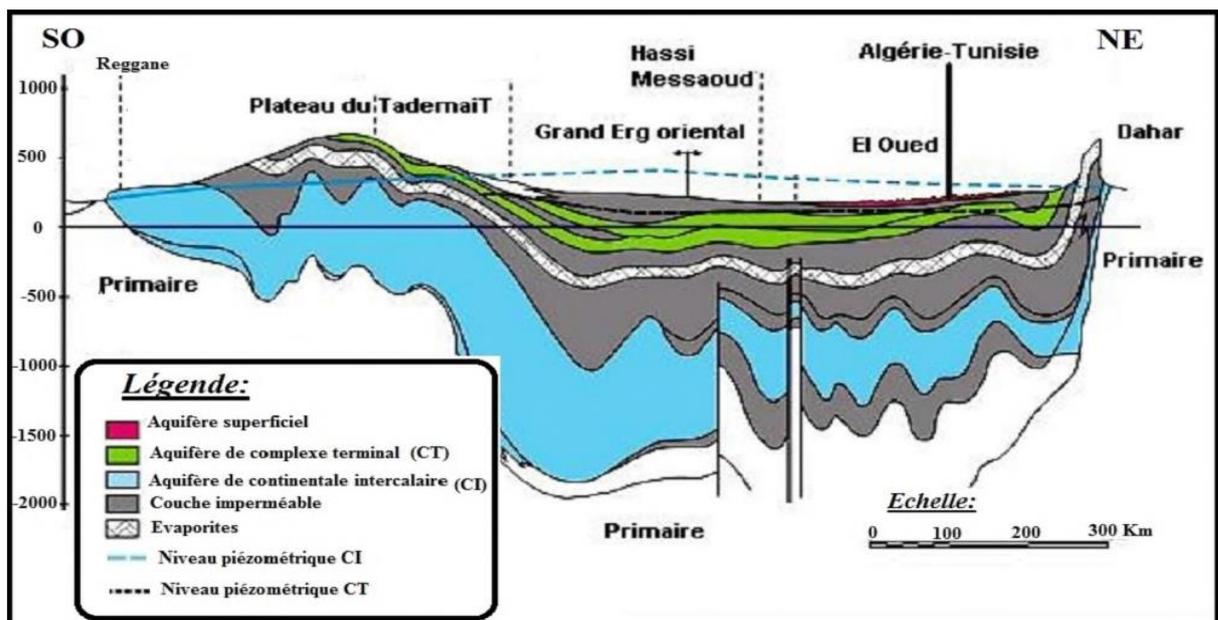


Figure II.1 : Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).

I. Les nappes souterraines du SASS

I.1 La nappe libre

La nappe phréatique superficielle s'étend pratiquement sur tout le territoire d'El Oued, et elle peut être rencontrée à des profondeurs variant de 1 et 20 mètres (BG2002).

Elle est composée de formations du Quaternaire dont l'épaisseur varie entre 10 à 40 mètres

C'est une nappe libre, son eau est soumise à la pression atmosphérique, elle est formée de sable gypseux légèrement salée dont le débit est de 5 à 10 litres/seconde (DER-57 & 58).

Excepté dans la région des Chotts, la nappe libre est présente sur toute la région de Souf. Elle correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire, la nappe libre est constituée de formations détritiques d'âge quaternaire et Miopliocène représentée par des sables, grés, sables argileux et des argiles sableuses avec un substratum constitué d'argiles. La porosité efficace a été définie de la nappe libre, comprise entre 6 % et 23 %. Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins (BG, 2003).

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement lente sur toute la région d'El-Oued, particulièrement dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influent sur la perméabilité des sables.

Elle est alimentée principalement par les infiltrations des eaux pluviales (oueds, cours d'eau) et bénéficie également d'un apport en provenance des nappes profondes et des infiltrations des eaux domestiques sous les zones urbaines (Figure II.2).

D'après la carte suivante, le sens d'alimentation va en général du Sud vers le Nord. Cette nappe occupe une place importante, quant à l'adduction en eau et à son exploitation. Vu l'importance de cette nappe, elle représenterait la source principale d'irrigation d'importantes palmeraies, elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui sont en nombre de 10 000 puits forés selon l'enquête effectuée en 1993 par l'A.N.R.H, de Ouargla.

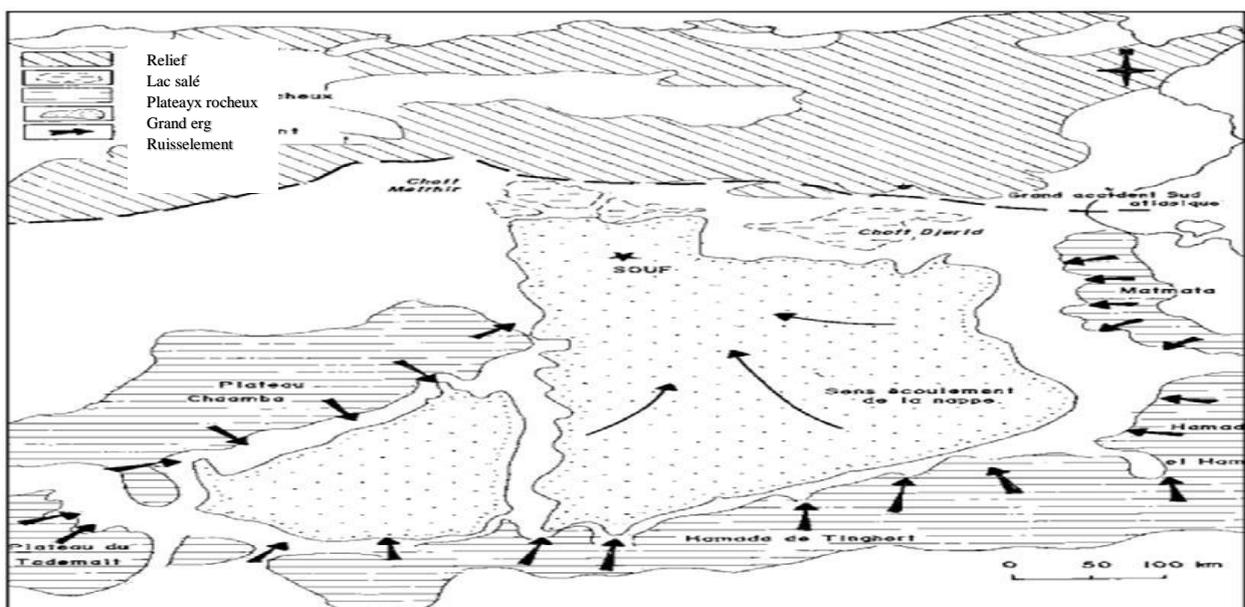


Figure II.2 : Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement
De la nappe (Cote Marc, 2006)

I.2 Nappe du complexe terminal (CT)

Au tout début, cette nappe conçue « la continental terminal » désignait les formations continentales argileuses et sableuses du Miopliocène. Par la suite ce terme s'est approprié une autre définition car d'après BEL et DEMARGNE (1966) : « La nappe du Continental Terminal contenue dans les sables du Miopliocène est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe : celle du Continental Terminal, par opposition à celle du Continental Intercalaire ».

Plus tard la notion du «Complexe Terminal» est apparue grâce au projet ERESS. Cette appellation publiée pour la première fois par BEL et Cuhe (1969) regroupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes faisant partie d'un même ensemble hydraulique.

Le continental ou le complexe terminal se compose de la nappe des sables couvrant pratiquement tout le nord du Sahara algérien avec une superficie de plus de 350000km². C'est une nappe artésienne, formée de sable et de gravier, dont la profondeur varie entre 250 et 300 mètres et un débit variant entre 20 à 80 mètres/seconde, Son eau est de qualité médiocre, le taux de salinité varie entre 3 à 5 gr/l avec la présence de traces de fluor.

La construction de la carte piézométrique du "CT" est le résultat de l'accumulation des travaux successifs élaborés depuis la publication par Cornet, (1964) de la première carte piézométrique couvrant tout le Continental indiquant clairement la direction du mouvement et les sources d'alimentation de cette nappe.

Certains auteurs pensent que les eaux des nappes du Sahara sont fossiles, c'est-à-dire qu'elles se sont infiltrées et accumulées au cours des temps géologiques, leur alimentation s'est poursuivie au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire par infiltration sur les affleurements des couches perméables jusqu'à débordement de ces derniers, et que le niveau actuel des nappes traduit le résultat d'un tarissement pur depuis l'Holocène (Quaternaire). Pour d'autres par contre il existe une recharge actuelle des nappes sahariennes. Cette alimentation se manifeste lorsque certaines conditions climatiques, topographiques et géologiques sont réunies.

D'après Baba SY (2005), les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires (Sénonien, Eocène inférieur +Turonien), ou à travers des nappes d'inféro-flux des oueds : bordure Sud-atlasique, M'Zab, Jebel Tebaga, Dahar, Jebel Nefousa. Dans les deux grands ergs (Occidental et Oriental), par infiltration de pluies exceptionnelles à travers des formations dunaires perméables (BRL-BNEDER, 1992).Et à l'Est du Djérid la partie nord de la "chaîne" des Chotts est considérée comme source de recharge potentielle (Figure III.3).

Le premier forage profond artésien de prospection au niveau du CT fut exécuté en 1953 à Sif El Menadi (90 Km au Nord-ouest. D'El Oued). Foré à 435 m de profondeur, il a débité quelques 4 m³/min exploité pour l'irrigation de la première plantation de palmiers (Najah, 1970).

Dans la région du Souf, l'eau jaillit depuis le printemps 1956 d'un forage exécuté à El-Oued, à près de 300 m de profondeur ; le débit est assez faible 3,3 l/s et la pression au sol est assez réduite +2,4 m (Voisin A.R, 2004).

Et depuis, 102 autres forages ont été implantés et exploités dans la région d'après l'inventaire et l'enquête sur les débits extrait dans la Wilaya (B.G 2002).

I.3 Nappe du Continental Intercalaire (CI)

Le terme du Continental Intercalaire, correspond aux formations continentales du Crétacé inférieur, qui est la période continentale intercalée entre deux cycles sédimentaires ; la régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur.

Le Continental Intercalaire (C.I) occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien.

Car d'après Kilian, (1931), le «Continental Intercalaire» désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins : à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne, alors qu'au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomaniennne. .

L'aquifère est continu du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar, et d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen.

C'est la nappe la plus importante, elle a une prédominance gréseuse perméable. Les forages qui ont traversé le continental intercalaire ont montré une proportion d'argile plus grande.

Le réservoir aquifère est considérable, il représente le plus important aquifère dans le Sahara septentrional avec ses 600 000 Km² de superficie et une épaisseur qui est estimée dans la région d'El Oued Souf entre 1400 et 2000m.

L'intérêt majeur de ce système aquifère réside dans la grande quantité d'eau stockée au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et peut être maintenant exploitée, il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoires (Figure II.3).

Baba SY et al. (2006) met en évidence les zones d'alimentation qui sont :

- Piémont sud atlasique au Nord-Ouest,
- Tinrhert au Sud.
- Dahar à l'Est.
- Jebel Nafusa au Nord-est.
- Jebel Hassawna au Sud.

Et Les zones d'exutoire sont :

- Les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt ;
- L'exutoire tunisien marqué par la faille d'El-Hamma ;
- L'exutoire libyen au niveau d'Ain Tawargha.

L'exploitation du Continental Intercalaire remonte à plusieurs siècles déjà par le système traditionnel des foggaras, introduit sur la bordure du plateau du Tademaït dès le Xe siècle (UNESCO, 1972a;BRL-BNEDER, 1992).

La commune d'El-Oued exploite cet aquifère par deux forages artésiens pour l'AEP avec un débit de 340 l/s et une température avoisinant les 70 °C.

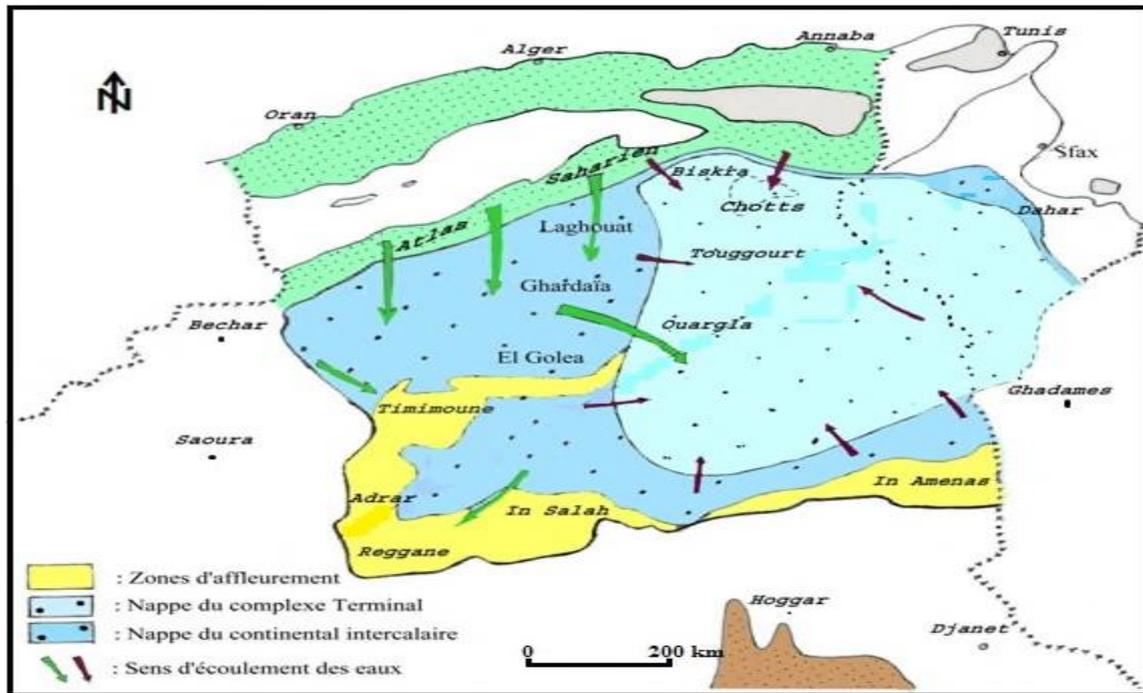


Figure II.3 : Carte d'extension des Systèmes Aquifères (CT et CI) en Algérie (UNESCO, 1972a, BRL-BNEDER, 1992) (Echelle : 1/200000)

II. Cadre sociologique de la wilaya et de la commune d'El Oued

Dans le but de faciliter les conditions de vie sociale, culturelle, professionnelle et de limiter les difficultés dues à l'isolement, El oued fut d'abord une commune en 1957 puis devint une wilaya en 1984.

Aujourd'hui avec une superficie égale à 54 573 km², elle est divisée en 12 daïras regroupant 30 communes et demeure l'une des collectivités administratives les plus étendues du pays.

La démographie totale de la wilaya est estimée à 791 000 habitants, soit une densité de 14.49 hab/Km² avec un taux d'accroissement de population égal à 3.4% selon le recensement de l'ONS de 2015.

La population ayant un âge inférieur à 15 ans représentant 30 % du total de la population, constitue dans les années à venir une importante ressource humaine.

Quant au chef-lieu de la wilaya qui est la commune d'El Oued, on a compté un quadruplement de ses effectifs en l'espace de 32ans, plus précisément entre 1966 et 1998 car selon les recensements de la population et de l'habitat en 1966, 1987 et 1998 (RGPH, l'année 1966, 1987 et 1998).

Le nombre est passé de 24 747 habitants à 105 957 habitants. Cela représente un apport moyen de 2707 hab/an. Depuis 1998, la croissance démographique continue d'être rapide et importante.

De 1998 à 2008, elle est passée de 106 000 à 134 699 habitants, avec un apport annuel moyen de 2870 habitants,

L'évolution des taux d'accroissement montre un ralentissement de la croissance démographique à partir des années 1990. Avec une superficie de 77 km², le taux d'accroissement est sensiblement plus bas entre 1987 et 1998 (3,43%) qu'entre 1966 et 1987 (6,2%, 3,56%). Cela s'explique par une natalité décroissante et par une hausse de la mortalité due à la conjugaison de plusieurs facteurs (pauvreté, crise de logements, chômage, progrès médical, etc.).

Par conséquent, la croissance démographique est essentiellement alimentée par l'apport des migrations rurales et interurbaines.

Parallèlement, 20% de la population totale de la wilaya (soit 128 000 habitants sur 640 000 habitants) est concentrée dans la commune d'El Oued. Celle-ci a donc une densité de 1 662,30 hab/km², c'est-à-dire une densité très forte par rapport à la densité moyenne de la wilaya.

III. Cadre économique de la wilaya et de la commune d'El-Oued

Avec une superficie considérable, une population active et des terres fertiles ; les manifestations de la vie quotidienne à El Oued traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale.

Les principales activités, exercés dans la région d'El-Oued sont :

III.1 L'artisanat

El Oued a toujours été un centre artisanal et culturel, notamment pour les objets liés à l'ancien artisanat traditionnel car ces métiers d'antan dont chaque région est fière et qui appartiennent à notre identité patrimoniale sont toujours d'actualité et exercés par des artisans habiles et expérimentés, il s'agit des tailleurs, des tapissiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers et des forgerons.

Quant aux articles produits on peut citer : les produits de bijouterie, les produits de couture et de broderie, les produits de tissage traditionnels tels que le burnous, la Kachabia et les tapis, réalisés soit manuellement soit à l'aide d'équipements traditionnels. Des produits de maroquinerie tels que 'el affane' (chaussures traditionnelles à peau caprine ou cameline), ainsi que des articles de poterie et de vannerie qui connaissent toutefois une nette régression des ventes en dépit des efforts déployés pour tenter de pérenniser l'activité, et enfin des objets d'ornement ou d'instruments de musique.



Figure II.4 : L'artisanat au Souf (dknews, 2006)

III.2 Le commerce :

La wilaya d'El Oued compte 29 143 opérateurs économiques inscrits à l'année 2014. La ville D'El-Oued seule compte 3 200 commerçants. Grâce à la position géographique entre trois états (Algérie, Tunisie, Libye).

El-Oued a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville d'El Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue le centre d'achat de toute la région d'El-Oued, d'où l'importance de son marché.

Cette activité commerciale se traduit par le grand axe commerçant qui s'étale sur plus de 15km, s'allongeant le long de la Route Nationale de Kouinine-Robbah où la densité commerciale y est forte au centre 15 à 20 établissements pour 100 m pour décroître vers les extrémités. Tout soufi est commerçant dans l'âme, la ville d'el Oued compte 7000 registres de commerces, et 10000 l'ensemble du Souf.



Figure II.5 : Les activités commerciales (marché El-Mellah 2018)

III.3 L'industrie

Depuis la décennie 1980 la wilaya d'El Oued a connu une lancée remarquable dans le domaine de l'industrie qui est apparu tout à fait comme un nouveau phénomène économique dans la région avec la montée et le développement des petites unités privées. La région se caractérise par un nombre important des activités industrielles et est considérée comme un leader dans le domaine de fabrication des produits cosmétiques et d'hygiènes corporelles et aussi des produits d'entretiens.

Au domaine cosmétique sont venues s'ajouter d'autres branches d'activité : l'agroalimentaire, les plastiques, les matériaux de construction et les boissons.

Au total, aujourd'hui plus de 1600 personnes travaillent dans le domaine industriel et voici un bref inventaire des unités industrielles du Souf :

- Parfums et cosmétique : 20 unités.
- Transformation du plastique : 15 unités.
- Fabrication carrelage : 7 unités.

- Transformation aluminium : 6 unités.
- Insecticides et détergents : 4 unités.
- Semoulerie, pâte alimentaire : 3 unités.
- Unité déminéralisation eau : 2 unités.
- Unité de fabrication de peinture : 1 unité.
- Unité de fabrication des boissons : 1 unité.

III.4 Agriculture et Elevage :

- **Agriculture** : L'agriculture dans les régions arides a été longtemps considérée comme synonyme d'une agriculture traditionnelle, souvent de subsistance. Cependant, ces dernières décennies ces zones arides dont le Souf ont connu des processus d'intensification agricole marqués par le développement des cultures irriguées via l'exploitation des eaux souterraines via les forages.

La Wilaya d'El Oued dispose d'une superficie agricole totale égale à 1 600 000 hectares, avec une superficie réellement exploitée de 99 814 hectares, la superficie irriguée est égale à 90 000 hectares selon la DSA (Direction de Service Agricole d'El-Oued en 2015). Depuis les années 2000, la région de Souf (El Oued) a connu un impressionnant développement agricole. Cette dynamique agricole est liée au développement de cultures maraîchères de pleins champs ainsi que d'autres cultures citées tous en dessous :

- La phoéniculture : qui est un terme employé pour la culture du palmier (dattier) principalement exercée dans des ghouts, ces derniers symbolisent un système hydro-agricole ingénieux qui consiste en effet à aller chercher l'eau directement dans la nappe phréatique de la région en plantant les palmiers de telle sorte que les racines des arbres atteignent la nappe phréatique et s'alimentent ainsi sans recours à un système d'irrigation. Les limites des ghouts atteignent la frontière libyenne au sud et voisinent avec les Monts des Nemamchas, suivant une ligne passant par Negrine, s'étire à l'est à la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis d'Oued Righ. La production des dattes est de 2 137 520 quintaux (toutes espèces confondues) sur une superficie de 36 317 ha dont la production de Deglet Nour est de 1 423 000 quintaux.
- La pomme de terre : La wilaya d'El Oued s'est imposée à la tête des régions productrices de la pomme de terre avec une contribution de 40% à la production nationale sur une période de quinze ans (1999-2015 :MADR, 2015), les récoltes obtenues ces dernières années pour la pomme de terre placent cette wilaya saharienne, du grand erg oriental, en tête des zones productrices à l'échelle nationale, à la faveur de la réunion des facteurs et conditions pédoclimatiques propices au développement de cette culture. La production de la pomme de terre est de 11 725 000 quintaux sur une superficie de 35 000 ha soit un rendement de 335 quintaux/ha représentant aussi 70% de la production végétale locale.
- L'oléiculture : une expérience récente dans la wilaya qui a, gagné du terrain avec l'intérêt croissant que lui accordent les agriculteurs de la région pour atteindre aujourd'hui une surface de 2 913 ha d'oliveraies ayant donné lieu à une production

annuelle de 15 000 quintaux d'olives de bonne qualité nutritive, selon les responsables de la direction locale des services agricoles (DSA).

Aux côtés de la phoéniculture qui la vocation principale de la région, de la pomme de terre et de l'oléiculture, d'autres produits sont également cultivés à l'Oued tels que la tomate, le tabac et encore d'autres cultures maraîchères. Ce qui a valu à la région du Souf ce statut de « pôle agricole par excellence ». Le secteur de l'agriculture est actuellement en plein développement dans cette wilaya à la faveur des résultats enregistrés, ces dernières décennies transformant ces zones désertiques en un nouvel Eldorado agricole.



Figure II.6 : L'agriculture du Souf

- **L'élevage :** Le développement agricole et de l'élevage dans la wilaya a commencé, depuis l'année 2000, en atteignant en 2014 une surface de 2.215 hectares structurés en 41 périmètres agricoles, éparpillés à travers les 30 communes de la wilaya, dont la grande part est revenue aux collectivités à vocation agricole. Cette démarche d'extension de la surface agricole a fait passer le nombre des exploitations agricoles dans la wilaya d'El Oued à 48 400 entités ayant impulsé le développement agricole et l'élevage, pour la production de viandes rouges.

Les animaux domestiques les plus élevés sont : les chèvres, les ovins, les chameaux, les chevaux, les mulets, les ânes les poulets, les pigeons.

L'élevage est une activité qui se répartie comme suit (DSA, 2015)

- Ovin : 560 000 têtes.
- Caprin : 540 000 têtes.
- Camelin : 40 000 têtes.
- Bovin : 16500 têtes.

III.5 Le tourisme

Le secteur du tourisme, dans la wilaya d'El-Oued, dispose de nombreux atouts que les autorités locales tentent de mettre en valeur, à travers notamment l'encouragement des investissements privés, elle dispose aussi d'importantes potentialités, notamment une faune et une flore diversifiées, des lacs et des chotts, des ksour antiques et des paysages naturels qualifiés de

sublimes qui peuvent faire de la région une destination de luxe pour les touristes. Les établissements hôteliers sont en nombre de 06 hôtels dont 03 classés, leurs capacités d'accueil de 314 chambres pour 643 lits, 10 sites et monuments archéologiques et historiques

IV. Estimation des ressources et des besoins

Avant les années soixante, les Oasiens utilisaient uniquement les eaux de la nappe phréatique pour satisfaire leurs besoins en eau destinés aux différents usages, et cela assurait un équilibre entre les besoins et les ressources en eau. Toutefois, la rareté des précipitations et la croissance démographique avec le développement économique rapide et l'urbanisation a engendré une demande d'eau exponentielle.

Pour y répondre il fut en effet nécessaire de réaliser de nombreux forages à haut débit pour prélever l'eau dans les nappes profondes et très profondes. En effet les prélèvements des eaux à partir du complexe terminal et du continentale intercalaire augmentent chaque année : 1134 Hm³ en 1999, 1566 Hm³ en 2010 et 1722 Hm³ en 2012. Les premiers forages, assez peu profonds, entrepris dès 1956 dans l'aquifère du complexe terminal pour les besoins en eau potable de la ville d'El Oued, avaient été limités et sans grands effets sur le niveau de la nappe phréatique. Mais, à partir de 1970, ils ont été multipliés. En 1987, d'autres forages plus profonds ont été réalisés dans la nappe du continental intercalaire, à une profondeur de 1 800 m et avec un débit de 200 litres/seconde par forage.

IV.1 La ressource

Le potentiel des ressources en eaux souterraines, établi par la direction de l'hydraulique de la Wilaya d'El-Oued, se répartit comme suit :

- Nappe phréatique : 0.13 Millions hm³
- Nappes profondes : 4.90 Millions hm³
- 2.7 Millions hm³ pour le CT
- 2.2 Millions hm³ pour le CI.

Tableau II.1 : Étendue et volume des ressources en eaux souterraines (ANRH, 2005)

| Type des nappes souterraines | Superficie (km ²) | Volume (millions hm ³) |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| La nappe phréatique | 250 000 | 0.13 |
| Le complexe terminal | 350 000 | 2.7 |
| Le continental intercalaire | 600 000 | 2.2 |

IV.2 Description de l'état de secteur de l'eau de la ville d'El oued

• Forages

Les ressources en eau sont situées au niveau même de l'agglomération et sont constituées par 12 forages pas très profonds 234 m à 345 m.

Tableau II.2: Liste des sites de production d'eau de la ville d'El-Oued (ADE)

| Désignation Du forage | Chouhada 01 | 400 logements | Nadour | Chott | Sidi mastour | Université | Tiksebt ouest | 08 mai | Bouh mid | 19 mars | Chouhada 02 |
|-----------------------|-------------|---------------|--------|-------|--------------|------------|---------------|--------|----------|---------|-------------|
| Debit (l/s) | 121 | 141 | 371 | 261 | 331 | 201 | 231 | 281 | 181 | 231 | 261 |

- **Ouvrages de stockage**

Les ouvrages de stockage sont des châteaux d'eau (réservoirs surélevés). La liste des ouvrages est présentée dans le tableau (II.3).

Tableau II.3 : Liste des ouvrages de stockage de la ville d'El-Oued (Source ADE)

| Château d'eau | Université | 08 mai | Tiksebt ouest | Nadour | Sidi mestour | El Gara | Chott | Chouhada | 400 logements | 19 mars | Total |
|---------------|------------|--------|---------------|--------|--------------|---------|-------|----------|---------------|---------|--------|
| Capacité | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1500 | 14 000 |

IV.3 Les besoins

Les demandes totales en eau à El Oued en 2012 ont dépassé 1.14 Milliards m³, les besoins par habitant de cette année se répartissent comme suit :

- **L'alimentation en eau potable (AEP) :** Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable sont principalement effectués à partir de 148 forages dans la nappe du Complexe Terminal (CT) et 02 forages dans la nappe du Continental Intercalaire (CI). En 1999, la mobilisation est de 0.3 hm³/j en 1999 qui atteint 0.4 hm³/j en 2012 où les ressources mobilisables à but d'alimentation en eau potable représentent 8.29 % du total de la mobilisation. Les besoins en eau domestique est évaluée à 0.03 hm³/j en 1999 qui s'accroît jusqu'à 0.14 hm³/j en 2012 avec une moyenne d'augmentation annuelle de 2202 m³/j.
- **L'alimentation en eau pour l'irrigation(AEA) :**L'agriculture, qui utilise plus de 88 % des ressources en eau mobilisées représente la part du lion. Dans la vallée de Souf, la ressource en eau est fortement exploitée par l'irrigation, la culture de la pomme de terre a connu un fort développement depuis la fin des années 90, sachant que les besoins en eaux d'un hectare sont évalués à 16430 m³/an. Ceux-ci s'effectuent essentiellement par le pompage au sein des forages des nappes profondes (CT et CI) et surtout de nombreux puits dans la nappe phréatique (autour de 20000 puits en 2010).Les besoins augmentent continuellement de 2.67 hm³/j en 1999 à 3.35 hm³/j en 2003 pour atteindre 4.39 hm³/j en 2012.
- **L'alimentation en eau pour industrie (AEI) :** La consommation d'eau industrielle est faible vu l'absence des grandes unités industrielles dans la région. Les ressources mobilisables à des fins industrielles ne représentent que 3.55 % du total des ressources mobilisables. Les besoins industriels en eau en 1999 est estimé à 0.03 hm³/j qui s'accroît en 2012 à 0.07hm³/j en 2012.

Tableau II.4 : Récapitulatif des besoins en eau de la wilaya d'El Oued en 2012

| Usagers | Besoins (hm³/an) | Taux (%) |
|---------------------|------------------------------------|-----------------|
| Domestique | 51.10 | 8.29 |
| Agricole | 1602.35 | 88 |
| industrielle | 25.55 | 3.55 |

Conclusion

Le distributeur d'eau potable a toujours le souci de couvrir les besoins des consommateurs en qualité et quantité suffisante. Il a aussi la responsabilité de la bonne gestion et à la perfection de toutes les infrastructures.

Avec la mise en service de nombreux forages dans les nappes souterraines, l'eau est apparue comme un bien disponible en quantité quasi illimitée, avec un taux de raccordement des ménages à l'eau potable qui atteint les 84 % en 1993 (selon DHW de la wilaya). Dès le début des années 2000, le débit disponible permettait l'eau courante 24 h/24 ; la consommation journalière se situait en moyenne aux alentours de 400 l/hab./jour, mais elle pouvait atteindre certains jours le volume impressionnant de 700 l/hab./jour (Farhi, 2006). Toutefois l'exploitation et l'utilisation de ces eaux nécessitent un traitement particulier en premier lieu vu leur qualité médiocre, et cela en passant par des stations de déminéralisation qui sont plutôt nombreuses.



Chapitre III

***Etude comparative entre les différentes
techniques de déminéralisation des eaux
saumâtres et choix du procédé***

CHAPITRE III

Etude comparative entre les différentes techniques de déméralisation des eaux saumâtres et choix du procédé

Introduction

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1,4 milliard de km³. Cependant, selon les Nations Unies, 97,5% du stock d'eau de la planète est salé et seulement une fraction correspondant à 2,5 % se compose d'eau douce. Environ 70% de cette eau douce est fixée dans les calottes glaciaires des pôles et une partie importante des 30% restants est constituée par des nappes aquifères souterraines. Seule une fraction minuscule de l'eau douce moins de 1% de l'eau douce totale, soit 0,07 % donc environ Un million de km³ du stock d'eau mondial sont alors disponibles dans les cours d'eau. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce tandis que vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Pour faire face à cette pénurie d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres.

La qualité de l'eau potable distribuée aux consommateurs dépend de la qualité des eaux superficielles ou des nappes souterraines dans lesquelles elles sont prélevées et des traitements effectués après le prélèvement.

Dans la région d'El-Oued l'eau potable est prélevée des nappes souterraines qui sont considérées comme la seule source d'approvisionnement disponible, la qualité de ces eaux est en général de goût salé, légèrement saumâtre et médiocre, car la composition de ces eaux est reliée à la nature chimique des couches géologiques traversées. Cette eau en plus de sa qualité désagréable, elle influe négativement sur la santé des consommateurs. Cette situation alarmante est à l'origine de la réalisation de plusieurs stations de déminéralisation dans cette région pour l'obtention d'une eau de bonne qualité.

La déminéralisation des eaux salées et des eaux saumâtres est un sujet très important actuellement, et l'idée de réaliser des unités de dessalement et de déminéralisation là où il est possible de le faire en Algérie devient jour après jour une grande nécessité, car elle permet la satisfaction des besoins des consommateurs en eau potable du côté qualitatif comme du quantitatif.

I. Partie I : généralités sur les techniques de déminéralisation

I.1. Les ressources de l'eau dans la nature

I.1.1. Les eaux de pluie

Théoriquement, les eaux de pluie ou les précipitations sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine en leur ajoutant bien sûr les éléments nécessaires pour qu'elles

deviennent potables tels que les sels minéraux car elles sont généralement peu minéralisées et pauvres en matières organiques.

Dans les régions industrialisées, ces eaux sont souvent acidifiées en étant contaminées par des poussières atmosphériques et polluées par divers contaminants dont l'azote ammoniacal, des ions nitrites et divers résidus d'activités humaines. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de leurs captages freinent l'utilisation de cette source.

I.1.2 Les eaux de surface

Ce type d'eaux également appelées eaux superficielles englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents. Elles sont constituées, par opposition aux eaux souterraines, de l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées qui sont en contact direct avec l'atmosphère (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leur parcours dans l'ensemble des bassins versants.

I.1.3. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont habituellement de bonne qualité. La composition des eaux souterraines est fonction de la composition des sols qui les contiennent. On peut cependant noter d'une façon générale l'absence d'oxygène, une faible turbidité, et une forte minéralisation. De plus, les eaux souterraines sont de composition relativement constante. La présence de fer et de manganèse et l'agressivité de l'eau due à la haute teneur en dioxyde de carbone (CO₂) sont les principales sources de problèmes avec ces eaux.

I.1.4. Les eaux de mer et les eaux saumâtres

La salinité mesure la concentration en sels dissous ; elle s'exprime en [g/L]. Du fait que les quantités de sels dissous sont souvent très inférieures au gramme, l'unité communément utilisée est le [mg/L].

- **L'eau de mer**

La salinité des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantique, Manche, Mer du Nord, Pacifique) est de l'ordre de 35 g/l et c'est cette valeur qui est considérée comme salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus ou moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitations-évaporation. La salinité peut être très différente dans le cas des mers fermées ou peu ouvertes sur les masses océaniques.

- **Eau saumâtre**

L'eau saumâtre est un milieu où l'eau douce rencontre l'eau de mer. On en trouve dans les estuaires, les embouchures de fleuves. Mais pour réaliser un tel milieu, il faut veiller à bien respecter certains paramètres. La marée et la saison des pluies jouent un rôle essentiel. Les lagunes possèdent aussi des eaux saumâtres mais c'est aussi le cas de certaines mers comme la mer Baltique ou bien l'océan Arctique lors de la fonte de la banquise. Certains lacs peuvent aussi avoir des eaux saumâtres lorsque des infiltrations de sel parviennent à saliniser l'eau douce.

I.2. L'eau

Il est classique et très banal de dire que l'eau est source de toute vie, mais chimiquement parlant, l'eau est un corps incolore, inodore et sans saveur, c'est un composé chimique simple, sa formule est H₂O, c'est -à- dire que chaque molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène (O) relié à deux atomes d'hydrogènes (H) par deux liaisons covalentes simples, formant un angle de 104,5°. L'eau présente sur notre Terre est indispensable à la survie de tout

être vivant, animal ou végétal car elle entre pour 70 à 80 % en moyenne dans la composition de la matière vivante et c'est le principal constituant de l'organisme humain.

I.3. L'eau potable

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque pour la santé. Afin de définir précisément une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives et susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne signifie donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur.

I.3.1. Les normes de potabilité

Les normes de l'eau potable sont établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ou par l'Union Européenne (UE) ou le ministère algérien des ressources en eaux ou le ministère d'économie. L'eau potable doit être exempte de matières en suspension, micro-organismes et produits toxiques. Les recommandations quant aux concentrations en minéraux varient d'un pays à un autre avec toutefois pour la plupart des minéraux une concentration maximale afin de garantir une eau équilibrée et agréable à boire. (Lenntech).

L'élaboration des normes de potabilité est basée sur les études scientifiques montrant les effets nocifs sur la santé. Elles sont liées à la qualité physicochimique et bactériologique de certains éléments.

Le tableau ci-dessous montre les normes de potabilité de l'eau fixées par l'OMS.

Tableau III.1 : Normes de potabilité de l'eau fixées par l'OMS (2013)

| Eléments/Substance | Symbole/Formule | Lignes directrices fixées par l'OMS |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Turbidité | / | Non mentionnée |
| Dureté | mg/l CaCO ₃ | 200 ppm |
| Total des solides dissous | / | 1000mg/l |
| PH | / | 6.5 - 9.5 |
| Aluminium | Al | 0.2 mg/l |
| Ammonium | NH ⁴⁺ | Pas de contraintes |
| Antimoine | Sb | 0.02 g/l |
| Arsenic | As | 0.01 mg/l |
| Baryum | Ba | 0.7 mg/l |
| Bore | B | 0.5 mg/l |
| Cadmium | Cd | 0.003 mg/l |
| Chlore | Cl | 250 mg/l |
| Chrome | Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ | 0.05 mg/l |
| Cuivre | Cu ²⁺ | 2 mg/l |
| Cyanure | Cn ⁻ | 0.07 mg/l |
| Fluore | F ⁻ | 1.5 mg/l |
| Sulfure d'hydrogène | H ₂ S | 0.05 à 1 mg/l |
| Fer | Fe | Pas de valeur guide |
| Plomb | Pb | 0.01 mg/l |
| Manganèse | Mn | 0.4 mg/l |
| Mercure | Hg | 0.006 mg/l |

| | | |
|---------------------------|-----------------------------------|---|
| Molybdène | Mb | 0.07 mg/l |
| Nickel | Ni | 0.07 mg/l |
| Nitrate et Nitrite | NO ₃ , NO ₂ | 50 et 3 mg/l (exposition à court terme) 0.2 mg/l (exposition à long terme) |
| Sélénium | Se | 0.01 mg/l |
| Argent | Ag | Pa de valeur guide |
| Sodium | Na | Pa de valeur guide |
| Sulfate | SO ₄ | 500 mg/l |
| Etain inorganique | Sn | Pa de valeur guide |
| Uranium | U | 0.015 mg/l |
| Zinc | Zn | 3 mg/l |

I.3.2. Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation

Une eau est dite "potable" si elle respecte les valeurs imposées par la loi, il existe cinq catégories de paramètres :

- **Les paramètres organoleptiques**

- **Le goût et l'odeur** : Ensemble complexe des sensations olfactives, gustatives perçues au cours de la dégustation, il doit être non désagréable ; le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV.
L'odeur a pour origine principale la présence de substances organiques volatiles ou de certains gaz.

Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère (Monique, 1991).

- **La couleur** : La couleur de l'eau est liée à la présence de substances organiques colorées et de métaux (le fer et le manganèse).
- **La turbidité** : La turbidité est la mesure de l'aspect plus ou moins trouble de l'eau ; c'est l'inverse de la limpidité. Techniquement, la turbidité correspond à la propriété optique de l'eau permettant à une lumière incidente d'être déviée (diffraction) ou absorbée par des particules plutôt que transmise en ligne droite. Elle est causée par diverses matières particulaires ou colloïdales composées de limon, d'argile, de composés organiques ou inorganiques ainsi que du plancton et d'autres micro-organismes.

- **Les paramètres physico-chimiques**

- **La température** : La température d'une eau potable devrait être inférieure en été et supérieure en hiver à la température de l'air. Pour que l'eau potable soit désaltérante, sa température doit situer entre 8 et 15°C. L'OMS ne recommande aucune valeur.

La température de l'eau, est un facteur qui agit sur la densité, la viscosité, et la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes (W.H.O, 1987).

- **La dureté** : La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins Na^+ , K^+ et H^+ . Elle est souvent due aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 par litre. On l'exprime aussi en degré français.
- **Le PH** : Le PH exprime l'acidité ou l'alcalinité suivant qu'il se trouve dans la bande de 0 à 7 ou de 7 à 14, le 7 constitue la neutralité du milieu. La mesure du pH grâce à un PH-MÈTRE ou un comparateur colorimétrique approprié est tout à fait valable pour déterminer la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Himmi et *al*, 2003).
- **La minéralisation** : La minéralisation est la concentration en sels dissous (Sulfates, Chlore, Sodium, Magnésium, Aluminium).
- **Les paramètres bactériologiques**
L'eau contient une multitude de micro-organismes (bactéries, virus, parasites) issus de l'activité biologique naturelle. Certains de ces micro-organismes peuvent être pathogènes pour l'homme. Les maladies d'origine microbienne constituent d'ailleurs le risque sanitaire le plus important dans le domaine de l'eau : les effets sanitaires (gastro-entérite, ...) peuvent se produire à court terme et se caractériser dans certaines situations par la survenue d'épisodes épidémiques.
L'eau ne doit en aucun cas contenir des organismes pathogènes et/ou d'organismes indicateurs d'une contamination fécale, tels les bactéries coliformes fécales, les bactéries *Escherichia coli*, les bactéries entérocoques et les virus coli-phages. L'eau ne doit pas contenir plus de 10 bactéries coliformes totales par 100 millilitres d'eau prélevée.
- **Matières en suspension** : Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, de régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc. (Rodier, 1996). Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution (HEBERT & LEGERE, 2000).
- **La conductivité électrique** : La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm^2 de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau (HCEFLCD, 2006).

I.4. Historique du dessalement

L'idée de fabriquer de l'eau pure à partir de l'eau de mer tourmente les populations assoiffées depuis des centaines, pour ne pas dire des milliers d'années

Il faut savoir que ce sont les Grecs qui ont découvert la distillation au Vème siècle av J.C. En effet, cela leur permettait de subvenir à leurs besoins en eaux lorsqu'ils effectuaient de longs séjours en mer, car les marins de l'antiquité confrontés à l'approvisionnement en eau à bord des bateaux avaient déjà imité la nature en faisant bouillir de l'eau de mer pour en extraire de l'eau non salée par condensation de la vapeur produite. Dans *Meteorologica*, Aristote (384-

322 av. J.C.) écrit : « *J'ai prouvé expérimentalement que l'eau salée qui s'évapore s'adoucit et que la vapeur condensée ne reforme pas de l'eau de mer* ».

Mais il a fallu attendre le 18^{ème} siècle pour qu'on évoque des procédés permettant d'augmenter la production, améliorer la pureté de l'eau ou économiser l'énergie. Et ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que sont apparus les premiers procédés vraiment industriels de distillation, c'est-à-dire de concentration des solutions et de production d'eau douce par vaporisation puis condensation. La perm sélectivité des membranes a été découverte dès le XVIII^e siècle (Abbé Jean-Antoine Nollet, 1735). Puis, autour de 1959, un procédé appelé osmose inverse a été mis au point à l'Université de Californie, et avec le développement industriel d'autres techniques à membranes ont vu le jour tel que la dialyse dans les années 1960 et les techniques de solvo-transferts en 1970.

I.5. Qualité des eaux marines et des eaux saumâtres

I.5.1. Les eaux de mer

L'eau de mer est une source d'eau inépuisable qu'on peut utiliser pour s'approvisionner en eau douce après l'opération du dessalement. Les eaux de mer sont caractérisées par leurs concentrations en sel dissous ou salinité. La salinité des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantique, Manche, Mer du Nord, Pacifique) est de l'ordre de 35g/l et cette valeur qui est considérée comme la salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus ou moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitations- évaporation.

L'eau de mer est une solution complexe qui contient tous les éléments indispensables à la vie : calcium, silicium, carbone, azote, phosphore, oligo-éléments, des matières organiques (teneur comprise entre 0.5 et 2mg), et naturellement les gaz présents dans l'atmosphère.

Elle est faiblement alcaline, son pH étant compris entre 7.5 et 8.4 (Rapinat, 1982).

I.5.2. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre, une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels, en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃ et le NaCl (Huot, 2001).

I.5.3. Caractéristiques des eaux de mer et des eaux saumâtres

La caractéristique la plus importante des eaux est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels : chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates.

Ce qui caractérise une eau de mer ou une eau saumâtre, c'est leurs salinités, leurs températures et leurs teneurs en matière en suspension (MES). Ces trois paramètres sont déterminants car ils influent sur le fonctionnement de l'unité de dessalement ou de déminéralisation et sa rentabilité.

- **La salinité** : La salinité mesure la concentration des sels dissous dans l'eau de mer, elle s'exprime le plus souvent en [g/l]. La salinité peut être différente d'une mer à une autre. Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles ou dans les zones de fort apport d'eau douce. La salinité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des tropiques. Dans certaines zones telles que l'Arabie Saoudite, elle peut dépasser 45g/l. Ceci est dû aux faits que les eaux sont peu profondes et que la chaleur

est excessive, ce qui favorise l'évaporation donc la concentration en sels. À titre d'exemple, citons quelques valeurs moyennes de salinité :

- Océan Atlantique : 35g/l.
- Mer Méditerranée : 38g/l.
- Mer Rouge : 40g/l.
- Golfe Persique : 46g/l.

Pour les eaux saumâtres, les taux de salinités sont inférieurs à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 grammes de sels par litre.

- **La température :** Le deuxième paramètre qui caractérise une eau de mer est sa température. Notons que ce sont les courants polaires qui influent sur la température des mers et des océans. Au niveau de la péninsule arabe la température de l'eau de mer peut atteindre 35°C. La température influence beaucoup plus les systèmes fonctionnant par osmose inverse que ceux fonctionnant par distillation à détentes successives. En effet, la production des membranes augmente d'environ 3% par degré Celsius. En contrepartie, la qualité de l'eau produite diminue et le vieillissement de la membrane s'accélère. L'expérience montre que l'optimum se situe autour de 25°C. C'est pour cela que la capacité d'une unité d'osmose inverse devrait s'exprimer toujours pour une température donnée.
- **La teneur des matières en suspension (MES) :** La troisième caractéristique d'une eau de mer et sa teneur en MES. En effet, en plus des organismes vivants souvent microscopiques, l'eau de mer transporte des matières minérales telles que les sédiments et les morceaux de coquillage : il s'agit d'MES. De plus, la pollution par les rejets urbains et industriels ne peut pas, surtout de nos jours, être négligée. Pour toutes ces raisons, le site de la prise d'eau et sa conception seront choisis afin de minimiser toute pollution et éviter quand cela est possible les zones à forte teneur en matières en suspension. Certes, les membranes d'osmose arrêtent parfaitement toutes les matières en suspension mais cela se fait en provoquant leur colmatage diminuant ainsi leur taux de conversion. Pour conserver son efficacité, il est impératif d'alimenter les membranes avec une eau de mer aussi limpide que possible : c'est le but du prétraitement.

Le contrôle de ces trois paramètres nous permet d'optimiser les installations de dessalement pour la production d'eau douce

I.6. Définition du dessalement et de la déminéralisation

I.6.1. Le dessalement : Le dessalement ou aussi appelé dessalage ou dessalination, consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale (DUNGLAS, 2014).

I.6.2. La déminéralisation : Pour faire simple nous dirons que la déminéralisation est une opération qui consiste en l'élimination partielle ou totale des sels minéraux contenus dans un liquide. Elle est couramment pratiquée sur les eaux, les boissons et le lactosérum. Quant à la déminéralisation des eaux, cela concerne toute eau dont on a artificiellement retiré les sels minéraux dissous en utilisant différentes technologies qui changent l'état des sels de l'eau de dissous à insolubles et donc pouvant être supprimés. L'eau utilisée dans ce processus provient de nombreuses sources. Certaines d'entre elles,

particulièrement l'eau souterraine et les lacs réservoirs contiennent des sels d'eau, les plus communs étant le Calcium et le Magnésium.

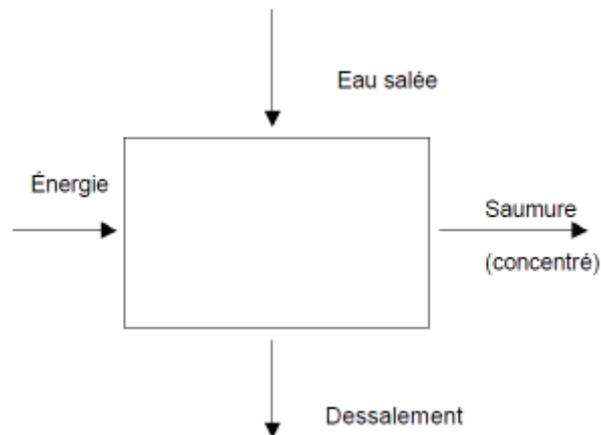


Figure III.1 : Principe de base du dessalement de l'eau de mer

I.7. Situation du dessalement dans le monde

Le dessalement avec la réutilisation des eaux usées ont été classés comme ressources en eaux non conventionnelles. Cette classification peut facilement soulever la controverse dans les pays qui ont eu recours aux procédés de dessalement depuis plus de 50 ans.

De nos jours, il ne peut plus être considéré comme étant une ressource marginale parce que certains pays, comme le Qatar et le Koweït, 100% de leurs besoins en eau pour l'usage domestique et industrielle proviennent du dessalement, en Arabie saoudite, ce taux est de près de 60 % (ESCWA 2009).

Pas seulement dans cette région mais c'est au niveau mondial que le dessalement de l'eau est en très forte croissance car l'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose de plus en plus, en additionnant à cela la répartition géographique inégale en eau douce sur la totalité des continents.

Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est venu s'imposer pour pallier à ce déséquilibre. La capacité installée de dessalement augmente chaque année en moyenne de plus de 10%. Aujourd'hui, on compte plus de 15 000 unités de dessalement dans 120 pays produisant environ 40 millions de m³/j, dont les trois quarts issus de l'eau de mer et un quart des eaux saumâtres. Sur ces 40 millions, 75% sont destinés à la consommation humaine, 25% à un usage industriel ou agricole. Rappelons que la capacité mondiale de production en eau potable est de l'ordre de 500 millions de m³/j (Figure III.1).

La Chine a annoncé 1 million de m³/j d'eau de mer traitée en 2010 et jusqu'à 3 millions de m³/j en 2020. En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a débuté d'abord dans les pays tels que : Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades et littorales de la Libye. Actuellement presque tous les pays du bassin méditerranéen dont l'Algérie et l'Espagne ont clairement opté pour cette option pour résoudre leur problème de pénurie considèrent maintenant le dessalement comme étant une option potentielle pour leur approvisionnement en eau potable. Cette demande accrue est causée par les pénuries d'eau chroniques dues à la persistance des sécheresses, l'augmentation des populations, la demande croissante d'eau par habitant et la croissance de l'industrialisation (Mohamed et Al-Mualla2010). A ce jour, la

Méditerranée représente environ un quart du dessalement mondial. Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel. (Boye, 2008).

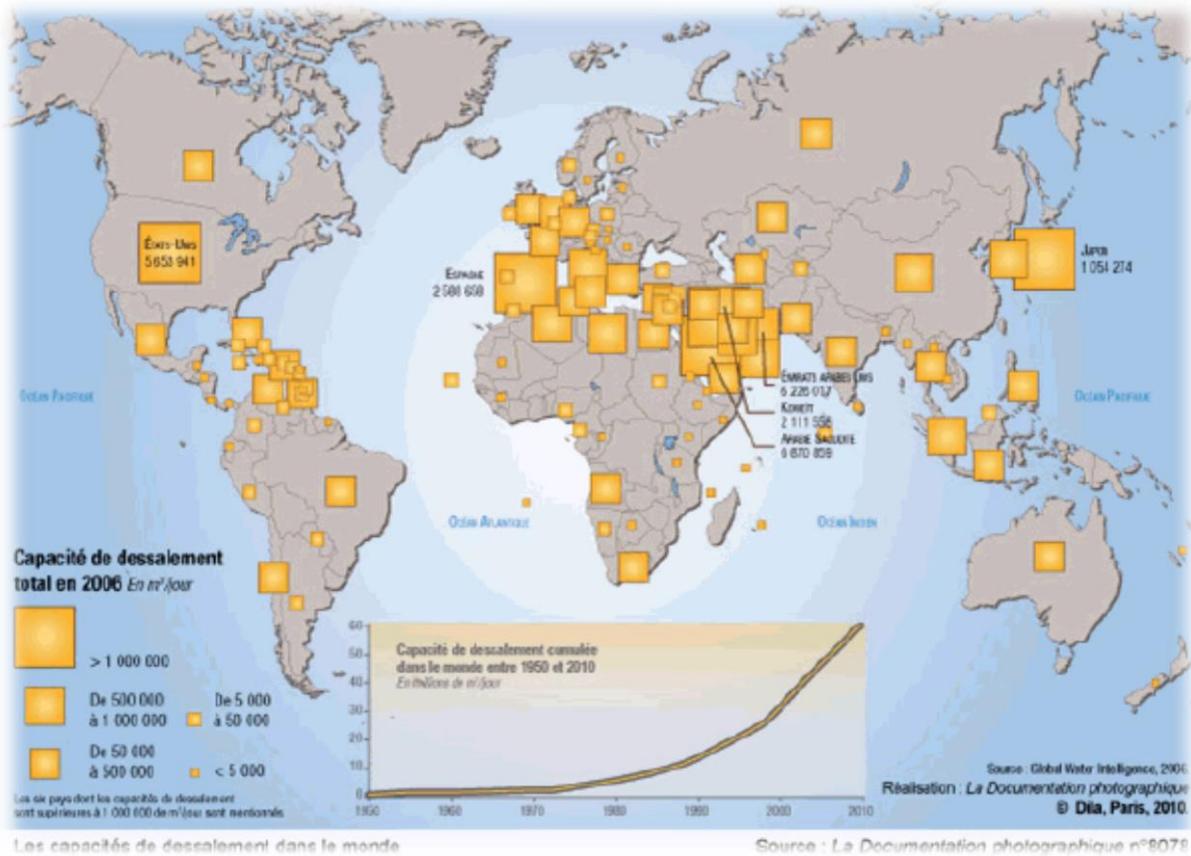


Figure III.2 : Capacités de dessalement dans le monde (Patier & Blanchon, 2010)

I.8. Le dessalement en Algérie

L'Algérie compte, environ, 40 millions d'habitants, elle a un taux de croissance annuelle de 1,7% et une densité de population globale, au nord du pays, de 11 personnes par kilomètre carré (ONS, 2011).

La plupart des méga projets de dessalement sont donc installés dans cette zone où, justement, environ 80% de la population y est concentrée.

En Algérie, la sécheresse fait rage depuis plus de deux décennies, principalement dans l'Ouest du pays. Cette sécheresse a considérablement affecté le niveau des réservoirs d'eau qui ont atteint leur niveau le plus bas. Cette situation s'est aggravée à cause des taux de pompage élevés qui ont durement affecté les niveaux des nappes phréatiques. Face à cette situation et afin de compenser le manque d'eau, entre 2002 et 2004, une étude générale sur le dessalement a été réalisée par le MRE dans le but de définir une stratégie de dessalement pour le court, moyen et long terme. L'étude a porté sur 30 wilayas, 16 sur la côte et 14 à l'intérieur du pays. Ce programme comprend la construction de 12 usines à petite échelle (monobloc) d'une capacité totale de 53 00 m³/jour. Les capacités de ces usines étaient soit de 2500 m³/jour ou 5000 m³/jour. Cette action d'urgence n'était pas suffisante pour résoudre la pénurie d'eau dans ces régions et a montré plusieurs échecs de fonctionnement en raison du manque d'opérateurs qualifiés, il a donc été décidé de construire de plus grandes usines de dessalement. Donc treize

stations de dessalement ont été lancées tout au long du littoral Algérien (*MRE 2013*) (Figure III.2).

Plusieurs de ces stations sont déjà en exploitation, à savoir El Kahrama (Oran), El Hamma (Alger), Skikda, Béni Saf (Ain Temouchent), Souk Tleta et Honaine (Tlemcen), Fouka (Tipaza), Cap Djinet (Boumerdès) et Mostaganem. Ces stations assurent une production annuelle de 1 410 000 m³/j pour desservir 6.036.043 habitants. Pour les autres stations restantes, elles sont en cours de réalisation ou en cours de lancement de travaux.

La plus grande usine de dessalement au monde utilisant la technique de l'osmose inverse est celle de Maqtaa (Mostaganem) avec une capacité totale de 500.000 m³/jour.

Dans les années à venir, la capacité totale de production algérienne atteindra environ 3,5 millions de mètres cubes par jour d'eau douce pour satisfaire les besoins en eau pour la population vivant à moins de 50 km de la côte méditerranéenne.

Grâce à ce vaste programme et, compte tenu des projets de dessalement contractés dans le monde, l'Algérie est passée du 8^{ième} au 6^{ième} rang dans le classement mondial. De plus elle est devenue, avec l'Australie et l'Espagne, les pays où la croissance des capacités de dessalement est la plus rapide dans le monde.

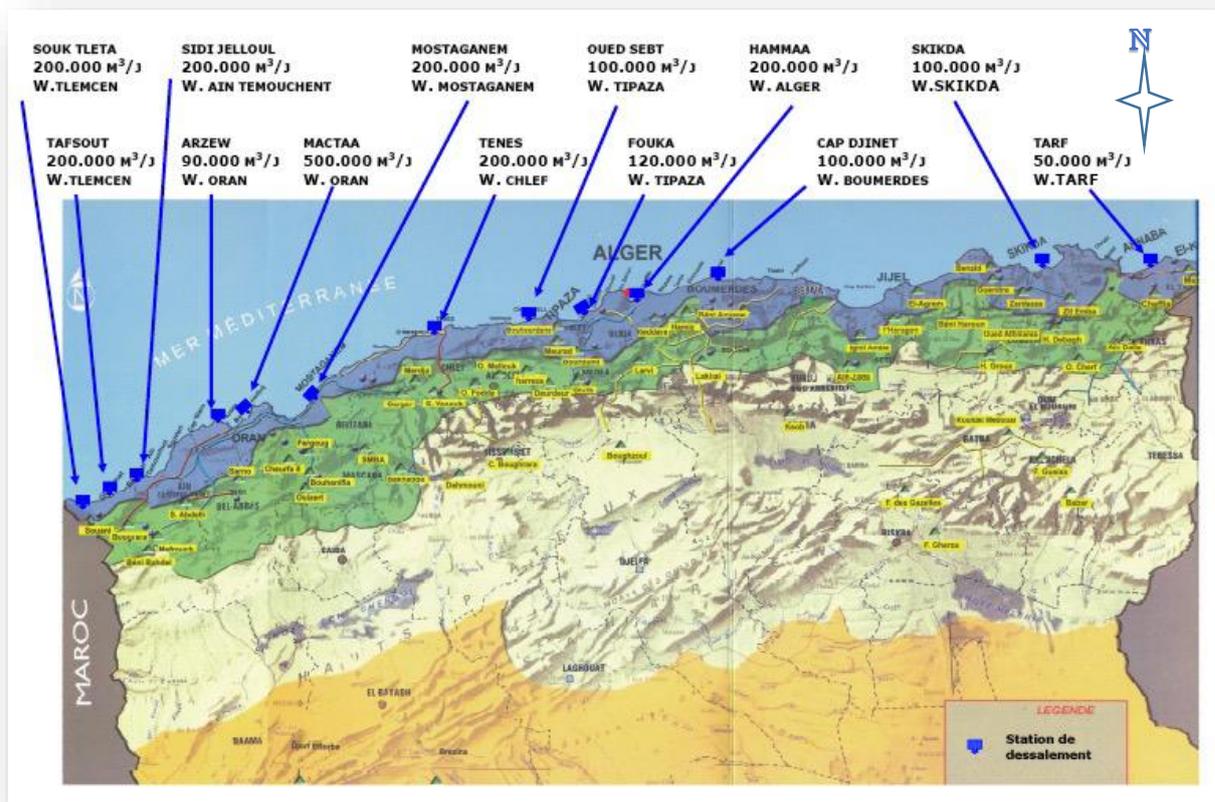


Figure III.3 : Localisation des grandes stations de dessalement de l'eau de mer (*MRE 2013*)(Echelle 1/5000)

I.9. Les stations de déminéralisation en Algérie

Le gouvernement algérien s'est lancé dans un vaste programme d'installation de stations de déminéralisation des eaux saumâtres. On retrouve ces eaux saumâtres à l'Ouest du pays (Oran 7g/l) et dans le sud du pays (salinité de 3,5 à 5 g/l). Au sud, l'état algérien a décidé d'installer des usines de déminéralisation de petites tailles pour répondre à des besoins locaux en eau douce. Le tableau (3.2) regroupe les différentes installations en activité et en cours de

réalisation. Si ces stations fonctionnent normalement, elles réduiront la salinité de ces eaux saumâtres à des niveaux acceptables, c'est-à-dire entre 0,5 et 0,8 g/l.

La station d'Ouargla, en plus d'alimenter les populations avoisinantes, irrigue plus de trois millions de palmiers dattiers. De plus, elle a la particularité d'être pourvue en énergie par une centrale électrique hybride, solaire-gaz, d'une capacité de 400 MW : ce qui est une première en Algérie.

Tableau III.2 : Stations de déminéralisation dans le Sud algérien (MRE 2013)

| Localisation de la station | Capacité (m ³ /j) |
|----------------------------|------------------------------|
| In Salah | 100 000 |
| Gharbouz | 5 000 |
| Ain El Kheir | 9 000 |
| Hai Bouzid | 10 000 |
| Mekhadma | 3 000 |
| Bamendil (El Khafdji) | 7 500 |
| Village Bamendil | 3 000 |
| Ifri-Gara | 10 500 |
| Sokra | 3 000 |
| Ruisset El Haddeb | 27 000 |
| Touggourt | 34 500 |
| El Oued | 30 000 |
| Ouargla | 27 000 |

I.10. Les stations de déminéralisation de la wilaya d'El oued

Les ressources d'El Oued ont fait l'objet d'une étude particulière. Dans le cadre de cette étude, les principales conclusions portent sur les eaux des forages des nappes souterraines de cette région qui sont fortement minéralisées (3.5g/l), chargées en chlorures, en sulfates, et en sodium. Le principal souci que rencontre l'exploitant, est l'entartrage des conduites de distribution, dont certaines se colmatent presque en totalité en quelques mois à quelques années. Ce phénomène est lié au déplacement de l'équilibre chimique des eaux prélevées à leur arrivée à l'air libre (notamment le dégazage de CO₂, la variation de la pression). Pour faire face à ce genre de problèmes, il existe beaucoup de techniques et de procédés afin de traiter les eaux de la nappe du CT et du CI, dans le but de les rendre propres à la consommation humaine en passant par des stations de déminéralisation.

Le tableau suivant : Tableau (III.3), met en évidence les caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes provenant des forages implantés dans la nappe phréatique et qui feront l'objet de notre étude pour la réalisation de la station de déminéralisation.

Les analyses ont été faites par la compagnie SEAAL à la date du 15 novembre 2017

Tableau III.3 : Analyse complète des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'El Oued (SEAAAL, 2017)

| Paramètre | Résultat | Unité | Limite |
|--|----------|-------|--------|
| Dosage du calcium | 220 | mg/l | 200 |
| Détermination du titre hydrotimétrique | 94 | °f | 50 |
| Dosage du magnésium | 95 | mg/l | / |
| Dosage des bicarbonates | 170 | mg/l | / |
| Dosage des MES | 7.9 | mg/l | / |
| Dosage du chlorure | 510 | mg/l | 500 |
| Détermination des sulfates | 950 | mg/l | 400 |
| Dosage de l'aluminium | <0.05 | mg/l | 0.2 |
| Bore | 0.256 | mg/l | 1 |
| Barium | 0.226 | mg/l | 0.7 |
| Chrome | <2 | mg/l | 50 |
| Cuivre | <0.002 | µg/l | 2 |
| Zinc | <0.002 | mg/l | 5 |
| Détermination du manganèse | 0.031 | mg/l | 0.05 |
| Détermination du fer | 0.294 | mg/l | 0.3 |
| Dosage du sodium | 261 | mg/l | 200 |
| Dosage du potassium | 65.4 | mg/l | 12 |
| Dosage de cadmium | <2 | µg/l | 3 |
| Dosage de l'arsenic | <2 | µg/l | 10 |
| Dosage du sélénium | <2 | µg/l | 10 |
| Dosage du plomb | <2 | µg/l | 10 |
| Dosage des fluorures | <0.5 | mg/l | 1.5 |
| Détermination de la turbidité | 7.3 | NTU | 5 |

| | | | |
|--|-------|-------|-----------|
| Détermination du PH | 7.21 | | 6.5 - 9.5 |
| Détermination de la température | 22 | C° | |
| Détermination de la conductivité électrique | 2740 | µs/cm | 2800 |
| Dosage des nitrates | <2 | mg/l | 50 |
| Dosages des nitrites | <0.03 | mg/l | 0.2 |
| Dosage de l'ammonium | 0.16 | mg/l | 0.5 |

Au niveau de la wilaya d'El Oued on trouve les stations suivantes qui sont en marche et il existe encore neuf autres futurs projets en cours de lancement. (Source DRE, El Oued)

Tableau III.4 : Stations de déminéralisation d'El Oued. (DRE, 2012).

| Commune | Agglomération | Nom de la station | Mode de traitement | Capacité (m ³ /j) | Usage | Gestionnaire |
|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------------------|-------|--------------|
| Kouinine | Zone d'activité | Massafi | OI | 80 000 | AEP | DIA |
| El Oued | Teksebt | Chamel Afrika | OI | 66 000 | AEP | HLASS |
| Bayada | Zone d'activité | Tiba | OI | 85 000 | AEP | DREHEM |
| Reguiba | Bachagha | Bachag-ha | OI | 87 000 | AEP | Commune |
| El Oued | Om Salma | Attrra | OI | 30 000 | AEP | DRE |
| Djamaa | / | / | OI | 12 504 | AEP | Amenhyd |
| Mghaier | / | / | OI | 14 200 | AEP | Amenhyd |

Le traitement d'une eau brute dépend de sa qualité, laquelle est fonction de son origine et qui peut varier dans le temps. L'eau à traiter doit donc être en permanence analysée car il est primordial d'ajuster le traitement d'une eau à sa composition et, si nécessaire, de le moduler en fonction de la variation observée de ses divers composants. Il peut arriver cependant qu'une pollution subite ou trop importante oblige l'usine à s'arrêter momentanément.

Le traitement classique et complet d'une eau s'effectue en plusieurs étapes dont certaines ne sont pas nécessaires aux eaux les plus propres.

En général une station de déminéralisation comporte :

- Une prise d'eau par forage.
- Un poste de prétraitement
- Une installation de déminéralisation
- Un poste de post-traitement
- Une installation de stockage et de refoulement des eaux traitées.

À l'issue de ces étapes, l'eau de mer ou l'eau saumâtre est rendue potable ou utilisable industriellement, pour cela elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

I.11. Les différentes techniques et procédés de déminéralisation

Il a été recensé 27 procédés différents de dessalement des eaux de mer et déminéralisation des eaux saumâtres. Ces procédés peuvent être classés en trois grandes familles (Figure III.3) :

- Les procédés thermiques ;
- Les procédés membranaires ;
- Échanges d'ions et extraction par solvant sélectif.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés, généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

On peut classer les méthodes de dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres comme suit :

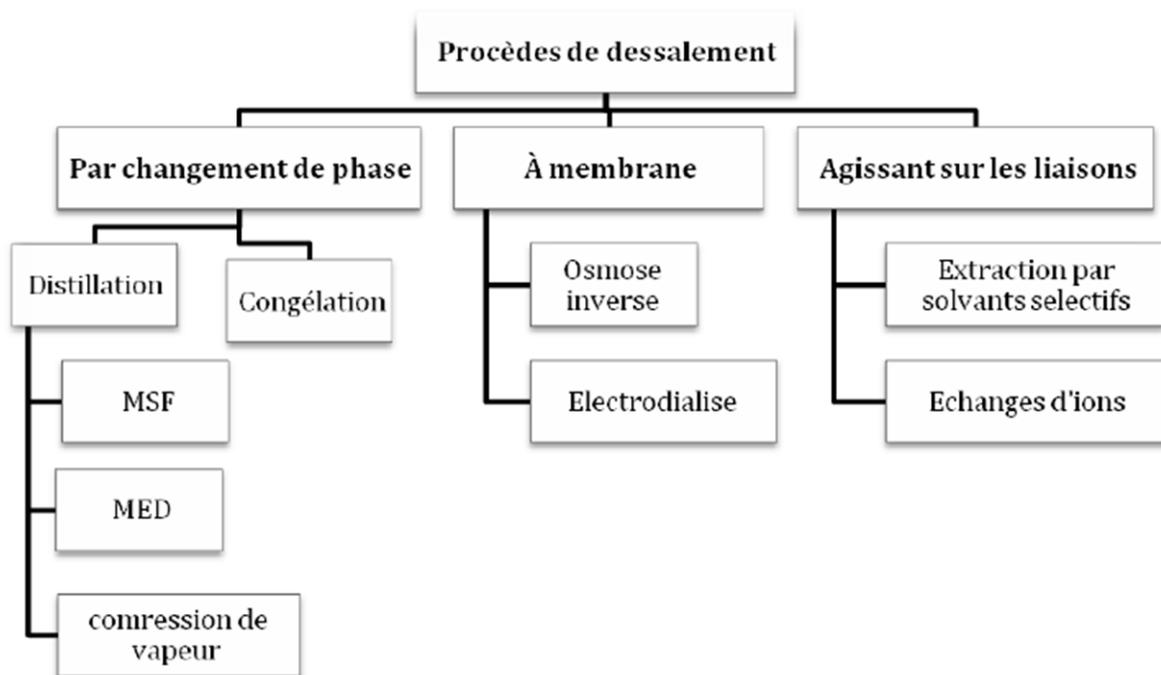


Figure III.4 : Principales techniques de déminéralisation

I1.11.1. Procédés de déminéralisation par changement de phase

a) La distillation

Ou également appelée évaporation, c'est la technique de dessalement la plus ancienne. Basée sur l'évaporation de l'eau à traiter, puis la récupération et la condensation de sa vapeur. Elle conduit à la production d'une eau pure et d'une solution concentrée, qui est nommée le concentrât.

Ce procédé thermique est un grand consommateur d'énergie. En effet, la vaporisation d'un volume d'eau salée exige une quantité de chaleur importante pour augmenter la température jusqu'à ébullition puis la vaporisation de l'eau.

Il est évident, dans ces conditions, que les procédés d'évaporation sont des procédés globaux, en ce sens qu'ils éliminent tous les sels et que l'eau déminéralisée produite est presque pure dénuée de minéraux qui ont été entraînés par la vapeur formée. Ils s'appliquent plus spécialement au dessalement de l'eau de mer, puisque l'énergie dépensée est pratiquement indépendante de la salinité de l'eau à traiter.

L'apport de chaleur nécessaire dépend en fait des conditions de température et de pression : à une pression inférieure à la pression atmosphérique, la quantité de chaleur à fournir est moindre car la température d'ébullition de l'eau est plus basse.

L'ajustement des conditions de pression et de température, les principes de la distillation en série et de la récupération d'énergie calorifique ont été utilisés pour optimiser le procédé de distillation simple, qui pâtit en outre de rendements faibles (Buros, 1990).

L'optimisation de la consommation énergétique et du rendement, nécessaire pour assurer un intérêt économique à la distillation, a conduit aux techniques actuelles. Les plus utilisées sont :

- La distillation multi-flash (MSF).
- La distillation à multiples effets (MED).
- La compression mécanique de vapeur (VC).

- **Distillation à simple effet** : C'est un dispositif qui permet de reproduire le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par de l'eau de mer froide. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième, l'eau de mer concentrée (TATA DUCRU, 2009). La consommation spécifique de ce procédé, c'est à dire l'énergie nécessaire à la production d'un kg d'eau douce est :

$$Y = \frac{Q}{P} = \frac{K \cdot P \cdot C_p \cdot \Delta T + L}{P} = K C_p \Delta T + \frac{L}{P} \dots \dots \dots (III.1)$$

- Q : quantité de chaleur consommée (kJ)
- P : production d'eau distillée (Kg)
- K : rapport Débit d'eau de mer admis / Débit d'eau produite
- ΔT : écart de température entre l'eau en ébullition et l'eau de mer.
- C_p : la capacité thermique massique supposée égale à 4,18 kJ/ (kg · K), quelle que soit la salinité de l'eau.
- L : l'enthalpie (ou chaleur latente) de vaporisation (en kJ).

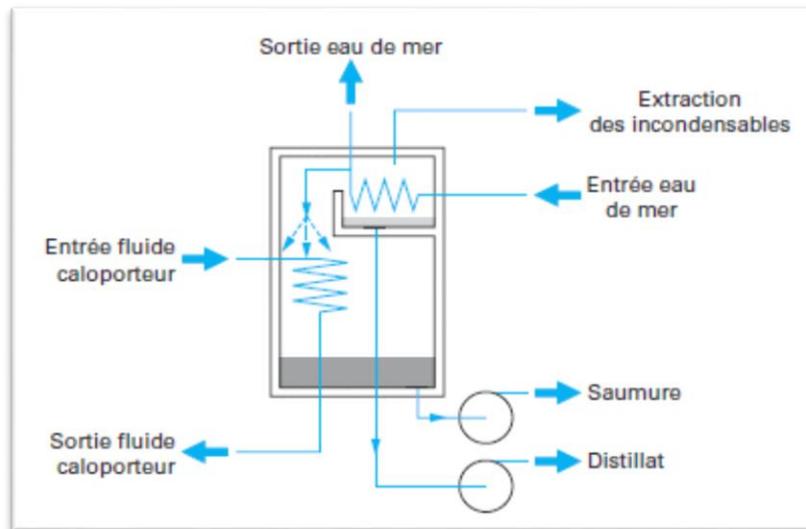


Figure III.5 : Distillateur à simple effet (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

Pour limiter au mieux l'entartrage en n'utilisant qu'un traitement antitartre simple, les constructeurs fixent la température maximale de ce procédé entre 60 et 65 °C. De plus, de telles températures limitent considérablement la corrosion.

Par cette méthode, on peut même obtenir une eau condensée très pure (jusqu'à 1 mg/L de sels) à l'aide de dispositifs spéciaux (filtres à gouttelettes) installés au-dessus de la zone de vaporisation.

- **Distillation à multiples effets :** Son objectif est d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur simple effet. On sait que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression. On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faible et ainsi de suite (MAUREL, 2006).

En d'autres mots c'est un dispositif constitué par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple. Le fluide caloporteur porte à ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est aussi la cellule où règnent la plus haute température et donc la plus haute pression. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où le condenseur maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise une fraction de l'eau de mer présente dans cette deuxième cellule : c'est le deuxième effet, et ainsi de suite

La vapeur du dernier effet sert à réchauffer l'eau d'alimentation du premier effet. En l'absence de pertes calorifiques, on peut donc réutiliser la chaleur latente une infinité de fois : plus il y a d'effets, plus le coût énergétique sera faible. En réalité, il y a toujours des pertes et le nombre d'effets est limité par des contraintes techniques et économiques.

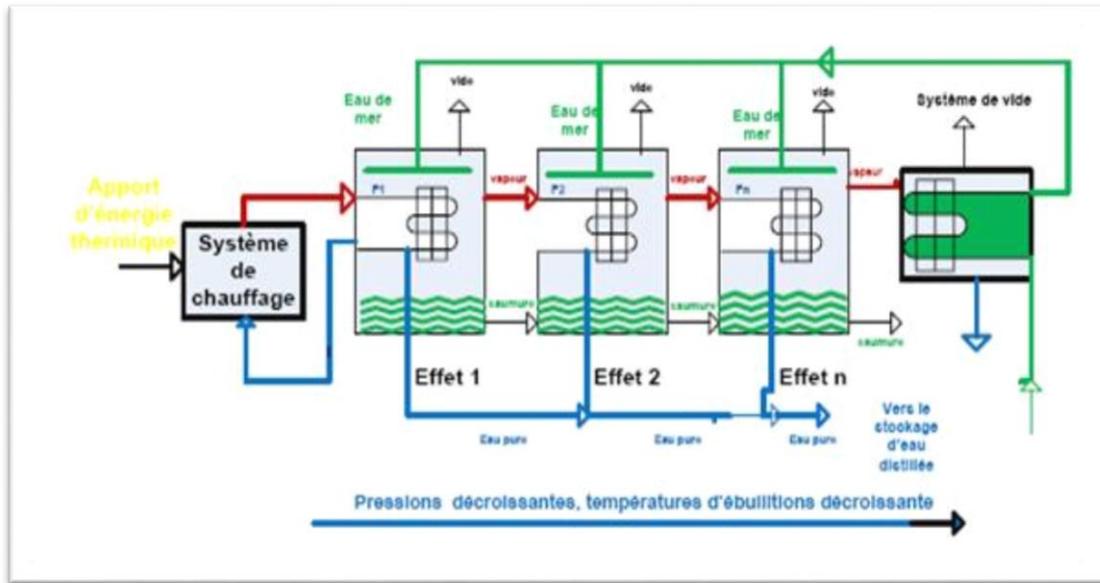


Figure III.6 : Distillateur à multiple effets (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*)

Pour évaluer la consommation thermique de ce procédé, on supposera que, **n** est le nombre d'effets et **P** la production d'eau douce des **n** cellules, la production de chaque cellule est égale à **P/n**.

$$Y = Q/P/n = (K \cdot Cp \Delta T + \dots) / n \dots \dots \dots (III.2)$$

Cette équation montre que la consommation d'énergie est approximativement celle de la distillation simple effet divisée par le nombre de cellules. En d'autres termes, le rapport de la masse d'eau douce sur celle de la vapeur est presque égale au nombre d'effets. Ce qui signifie qu'à la différence du simple effet, ce procédé permet de fournir de plus grandes quantités d'eau de façon économique.

Le bilan thermique est d'autant meilleur que le nombre d'effets est plus grand, mais c'est au prix d'une augmentation du coût de premier investissement. Pour fixer le nombre d'effets, on tient compte de la différence globale de température disponible entre la source chaude et la source froide et du gradient de température nécessaire dans chaque évaporateur pour assurer efficacement la transmission de chaleur de la vapeur de chauffe à l'eau saline à distiller.

Le nombre d'effet dépend aussi du prix du combustible utilisé. S'il est cher, il y a intérêt à multiplier celui-ci.

Pour réchauffer l'eau de mer à l'intérieur de chaque cellule, on dispose de plusieurs méthodes :

- Échangeur immergé ;
- Échangeur à tubes verticaux ;
- Échangeur à tubes horizontaux.

La mise en marche de ce type d'unités est rapide. De plus, ces unités ont une certaine souplesse de fonctionnement qui permet d'adapter la production d'eau douce à la demande.

- **Distillation par détente successive ou Flash(MSF)** : Le procédé d'évaporation à détente étagée, appelé MSF (multistage flash) dans la littérature anglo-saxonne, consiste à mettre une enceinte sous vide, isolée et ne contenant que de l'eau de mer. On la maintient en équilibre avec sa vapeur à une température « T » et une pression « P » lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C elle est introduite dans l'enceinte où la pression est inférieure à la pression de saturation, on observe une vaporisation instantanée par détente. La chaleur de la vapeur est transférée à l'eau froide circulant dans les tubes de condenseur. Elle est alors condensée sur un faisceau tubulaire situé dans la partie supérieure de l'enceinte. On peut alors récupérer l'eau distillée pure (DAUSSY et al. 2012).

Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successive dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, et l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer. Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

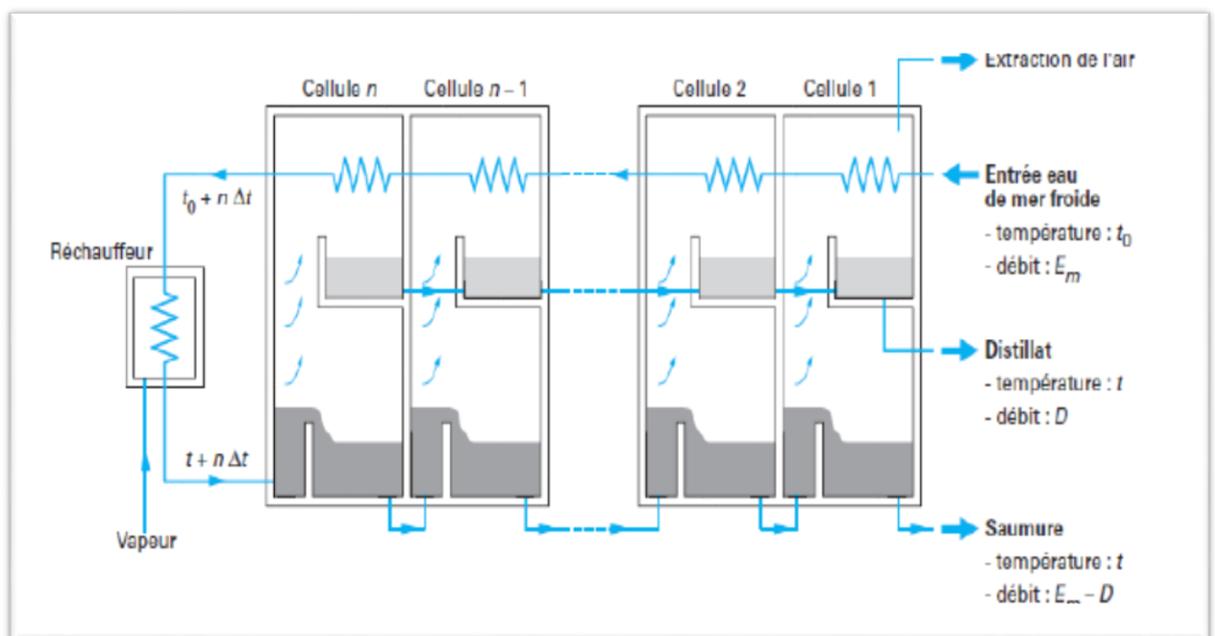


Figure III.7 : Distillation à détente successive (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*)

- **Distillation avec compresseur de vapeur** : Consiste à une revalorisation de la vapeur d'eau du dernier effet par compression grâce à un compresseur mécanique ou via un éjecteur, on parle alors de thermocompression. La compression par éjecteur nécessite par ailleurs une vapeur motrice (SAMAKÉ, 2013).

Son principe est simple, l'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolée. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée ; grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée et le cycle d'évaporation condensation de l'eau douce est extraite ainsi que la saumure (figure III.8).

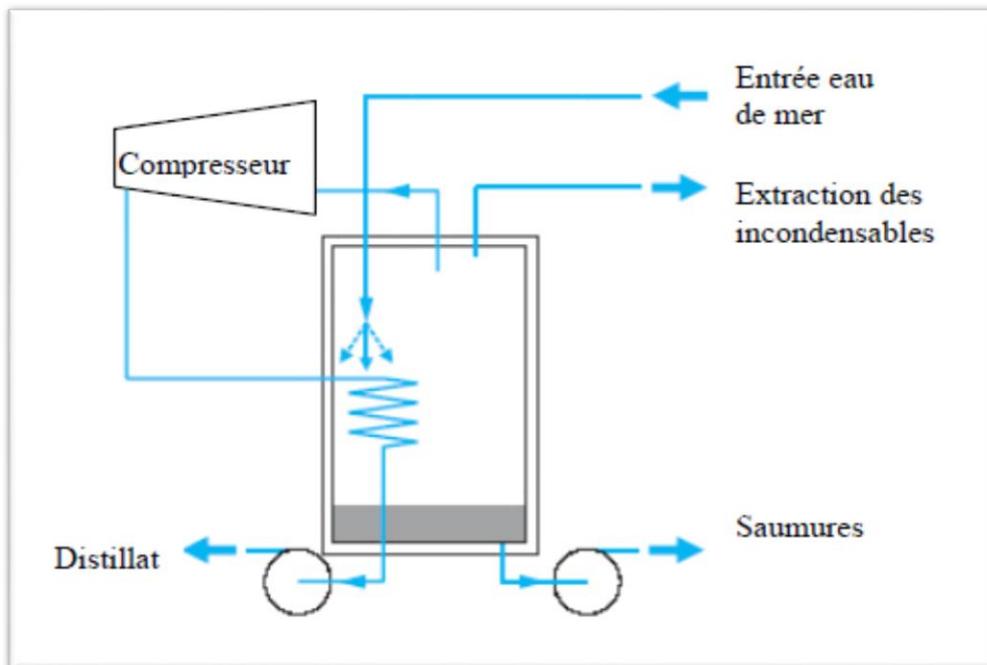


Figure III.8 : Schéma de principe de la compression de la vapeur
(Techniques de l'Ingénieur 2010)

b) La congélation

C'est un procédé qui se base sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau salée. Ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer est souvent inférieure à 0 °C (Maurel et al, 2001). En effet Il est possible de dessaler l'eau par congélation car la température de congélation est quasiment indépendante de la pression. Plus la concentration en sels est élevée et plus la température de solidification de l'eau est faible. Alors qu'elle est de 0°C pour de l'eau pure, elle descend à -2°C pour l'eau de mer et -4°C pour une eau qui a une concentration en sels deux fois supérieure à celle de l'eau de mer. Le principe repose sur le fait qu'une fraction de l'eau salée s'enrichit en sels lors de la congélation d'eau pure. Il existe trois étapes :

La congélation partielle de l'eau à dessaler.

La séparation des cristaux de glace et de la saumure.

La fusion des cristaux de glace pour obtenir l'eau douce à l'état liquide.

Le dessalement peut se faire par congélation naturelle dans les régions où la température de l'air demeure suffisamment longtemps inférieure à la température de congélation de l'eau à traiter. Dans le cas échéant, une congélation artificielle est envisageable car une

technologie de ce procédé a été proposée comme alternative de la distillation et de l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer dans plusieurs travaux. Cette technologie peut également être appliquée au traitement des eaux usées. On distingue deux types de procédés par congélation :

- **La congélation directe** : Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer. Ce réfrigérant peut être l'eau de mer elle-même : la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite. Ce procédé est appelé VFVC (Vacuum Freezing Vapour Compression) dans la littérature Anglo-saxonne.

La congélation directe peut également être assurée par un réfrigérant secondaire : le refroidissement est obtenu par la vaporisation de butane liquide et froid injecté sous pression directement dans la saumure. Le procédé est alors appelé SRF (Secondary Refrigerant Freeze). Quelques petites unités de dessalement par congélation directe ont été développées au cours des quarante dernières années, mais la technologie n'a jamais été utilisée commercialement pour produire de l'eau potable. Les unités pilotes de Wright ville Beach en Caroline du Nord (USA) et d'Eilat (Israël) utilisaient la technologie VFVC. Une unité construite en Floride (USA) était basée sur le procédé SRF.

- **Dessalement par congélation indirecte** : Dans le cas de la congélation indirecte, le refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur et une couche de glace est déposée sur les parois froides de l'échangeur. Donc, l'enthalpie nécessaire pour la congélation partielle de l'eau de mer est évacuée par transfert de chaleur indirect à travers une paroi.

I.11.2. Procédés de déminéralisation à membranes

a) Généralités sur les membranes

- **Définition d'une membrane** : Une membrane est définie comme étant une couche mince de matière. Son objectif principal est d'éliminer les sels. Elle assure également la rétention des composants indésirables dans l'eau (micro algues, bactéries, certains virus, microorganismes, micropolluants), supprime la turbidité (eaux troubles), limite les sous-produits de désinfection et permet la production d'une eau épurée.

Une membrane est constituée d'une surface plane dont la perméabilité est sélective, qui permet l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert. Une membrane semi-sélective est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres, ou plus généralement, en favorisant certains par rapport à d'autres.

Cette barrière constituée par la membrane va jouer le rôle d'interface sélective entre les deux phases. Le transfert de matière d'une phase à l'autre va dépendre de l'intensité de la contrainte appliquée de part et d'autre de cette interface. Cette contrainte a pour but d'accélérer le processus de séparation. Elle peut être :

- un gradient de pression.

- un gradient de potentiel électrique.
- un gradient de potentiel chimique.

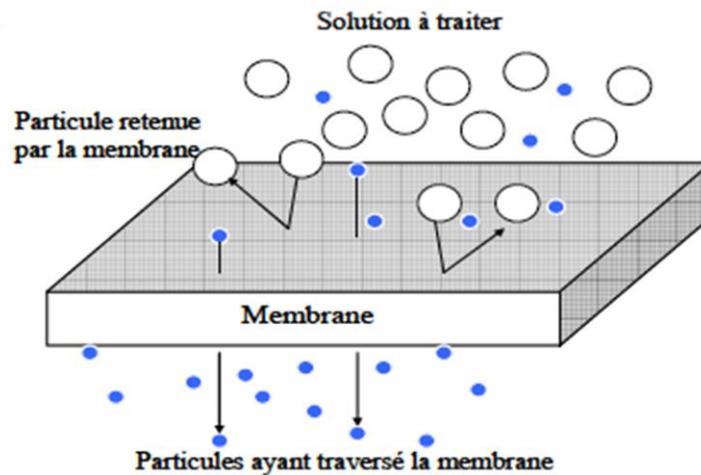


Figure III.9 : Schéma du principe de fonctionnement d'une membrane (*Semantic scholar, 2008*)

- **Les différents types de membranes** : Les membranes présentent une large variété de textures physiques (denses ou poreuses) et d'origines (naturelle ou artificielle). Elles peuvent être inorganiques (céramiques), organiques (polymères de synthèse), mixtes, neutres ou chargées (échangeuses d'ions), homogènes ou à structures asymétriques. Cependant, toute classification systématique est assez arbitraire car certaines membranes peuvent présenter à la fois plusieurs propriétés : microporeuses, asymétriques dans leur structure et électriquement chargées.
 - **Membrane dense** : Elle se caractérise, comme son nom l'indique, par l'absence de porosité. Le transfert des molécules à travers la membrane se fait selon le mécanisme de solubilisation-diffusion (sélectivité chimique). Elle est soit à base de polymère de haute densité se présentant sous forme de feuilles souples, soit à base de matériau céramiques ou métalliques.
 - **Membrane poreuse** : Elle doit posséder une très grande résistance mécanique mais une épaisseur faible qui permet un débit de perméation élevé. Ces deux exigences contradictoires sont résolues par la mise au point de membranes à structure asymétrique. La séparation s'y effectue selon un mécanisme analogue à la filtration, c'est-à-dire qu'une particule traverse ou est retenue par la membrane selon que sa taille est inférieure ou supérieure au diamètre des pores. A cette catégorie appartiennent les membranes composites qui sont réalisées à partir de la superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Qu'elles soient asymétriques ou composites, les membranes sont formées d'un support poreux qui assure les fonctions mécaniques, et d'une peau active de faible épaisseur qui assure les fonctions séparatrices (sélectivité).
 - **Membrane homogène** : Elle est formée de solides microporeux ou denses constitués d'un seul matériau. Ce sont des couches séparatrices épaisses à porosité

constante (isotrope) ou à porosité décroissante ou à structure asymétrique. La zone superficielle a la plus faible porosité. Ces membranes sont de type polymère (acétate de cellulose) ou inorganique. Les membranes échangeuses d'ions appartiennent à ce groupe et leurs propriétés résident dans la présence de charges électriques fixées en certains points de leurs structures. Les ions de signes opposés à celui de ces groupes se déplacent librement dans la membrane tandis que ceux de même signe sont repoussés par celle-ci.

- **Membrane minérale :** Les membranes minérales sont toutes de structures asymétriques. Le support et la couche active peuvent être composés de matériaux différents (membrane composite) ou de même nature. Dotées d'un support macroporeux qui assure la résistance mécanique sur lequel on dépose une ou plusieurs couches qui assurent la séparation proprement dite, ces membranes sont les dernières apparues sur le marché. Elles présentent des caractéristiques de résistance mécanique, thermique et chimique très élevées qui permettent leur utilisation à longue durée.

Aujourd'hui, la classification la plus compréhensible semble être la classification par nature et on trouve :

- **Membrane Organique :** Les membranes à base de polymères comptent parmi les plus utilisées dans les installations de dessalement en fonctionnement. Plusieurs polymères différents sont utilisés pour être adaptés au seuil de coupure des poids moléculaires, pour obtenir la résistance au colmatage désirée ou le rendement voulu. Les matériaux les plus usités pour les membranes organiques sont les polymères organiques ou naturels : acétate de cellulose, polysulfone, polyamides aromatiques, polyacrylonitrile...

- **Membranes inorganiques :** Les membranes peuvent aussi être préparées à partir de matériaux inorganiques tels que les céramiques, métaux, et verre.

Les membranes inorganiques rivalisent avec les membranes organiques pour des applications en conditions extrêmes. Elles peuvent fonctionner à des températures très élevées, la plupart des membranes métalliques résistent à des températures de 500 à 800°C, et de nombreuses membranes céramiques sont adaptées pour des usages à des températures supérieures à 1000°C.

Elles sont nettement plus résistantes aux attaques chimiques et ont une durée de vie largement supérieure (Carola *et al*, 2007). Cependant, ces membranes présentent de nombreux inconvénients : leur coût très onéreux, leur porosité... Pour ces raisons, les matériaux inorganiques sont très peu adoptés.

- **Membranes hybrides :** Les matériaux hybrides organiques-inorganiques offrent des avantages spécifiques pour la préparation de membranes exigeant une sélectivité importante et des débits élevés, ou une résistance chimique et thermique considérable (Sforça *et al*, 1999).

- **Critères de choix des membranes :** Le choix se fait tout d'abord par rapport à la séparation à réaliser : de façon générale la taille des pores est généralement 2 fois plus petite que l'espèce la plus petite à retenir (pour assurer une bonne rétention tout en

limitant le colmatage en profondeur de la membrane). Le matériau doit être choisi afin de limiter les affinités avec les espèces du fluide à traiter (pour limiter les phénomènes d'adsorption). Il faut aussi satisfaire les contraintes du fluide (pH, température) et du domaine d'utilisation (stérilisation, agrément ...) et que le coût soit compatible avec la valeur ajoutée du produit.

Pour résumer, il faudrait prendre en compte les paramètres suivants : la perméabilité, la résistance, le taux de conversion et de rejet, et enfin la durée de vie et le prix.

| | Membranes céramiques | | | Membranes organiques | | | |
|--|------------------------------------|---------|---------------|--------------------------------|-------|------|------|
| | Alumine | Zircone | Ox. de titane | Acétate | PAN | PS | PVDF |
| pH | 0-14 | 0-14 | 0-14 | 3-8.5 | 3-9 | 1-13 | 1-12 |
| température | pas de limite – stérilisable | | | <35°C | <35°C | 80°C | |
| solvant | très bonne résistance | | | faible résistance | | | |
| prix* <small>(membrane + système)</small> | 2300 € < < 7500 € / m ² | | | 300 < < 750 € / m ² | | | |

Figure III.10 : Principales caractéristiques des matériaux membranaires
Prix moyens (Aptel et al. 2002)

- **Les paramètres et modes de fonctionnement d'un procédé à membrane :** Il existe différents paramètres qui caractérisent le fonctionnement du procédé résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Principaux paramètres caractérisant le fonctionnement du procédé membranaire

| Paramètre | Symbole | Signification | Relation |
|--|------------|--|--------------------------------|
| Pression transmembranaire | PTM | Force agissante de l'opération, définie par la moyenne des pressions alimentation PA , et retentât PR , à laquelle on soustrait la pression du compartiment perméat PP . | $PTM = \frac{Pa + Pr}{2} - Pp$ |
| Flux de perméation | J | Productivité du procédé défini par le débit de perméation Qp , divisé par la surface membranaire. Il représente aussi la vitesse du fluide perpendiculaire à la surface de la membrane. | $J = \frac{Qp}{S}$ |
| Taux de rejet (ou taux de rétention) | R | Sélectivité du procédé : un taux de rejet de 1 signifie que le soluté est parfaitement retenu par la membrane (la concentration dans le perméat (Cp=0) alors qu'un taux de rejet de 0 correspond à un soluté non retenu, concentration identique dans le perméat Cp et le retentât Cr. | $R = 1 - \frac{Cp}{Cr}$ |
| Perméabilité de la membrane au solvant | J | Paramètre intrinsèque de la membrane décrivant sa résistance hydraulique Rm vis à vis du solvant | $J = Lp. PTM = \frac{PTM}{Rm}$ |

| | | | |
|--------------------|---|---|---------------------|
| Taux de conversion | Y | Fraction de liquide qui traverse la membrane. | $Y = \frac{Qp}{Qa}$ |
|--------------------|---|---|---------------------|

- **Mode de fonctionnement des systèmes membranaires** : Il y a deux types de fonctionnement des systèmes membranaires : la filtration frontale (Dead-end) et la filtration tangentielle (cross-flow).
 - **Filtration frontale** : En mode frontal (Figure III.10), le flux d'alimentation arrive dans la direction perpendiculaire au plan de la membrane. Les particules solides et les solutés sont retenus à la surface et leur dépôt entraîne une superposition de couches qui vont progressivement provoquer le colmatage par la formation d'un gâteau. Cela exige un nettoyage périodique.

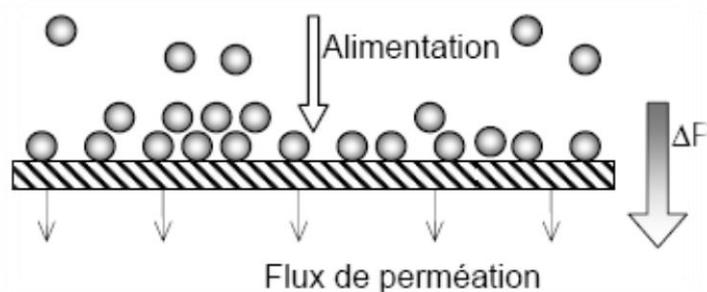


Figure III.11 : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale (Docplayer, 2012)

- **Filtration Tangentielle** : En filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module pour venir au contact de la membrane suivant un flux tangential. Dans ce mode de mise en œuvre, il y a donc nécessairement une entrée correspondant à l'alimentation et deux sorties que sont le perméat qui correspond au passage d'une partie du flux initial à travers la membrane et le concentrât ou retentât qui représente le flux qui n'est pas passé à travers la membrane comme l'illustre la figure (III.11).

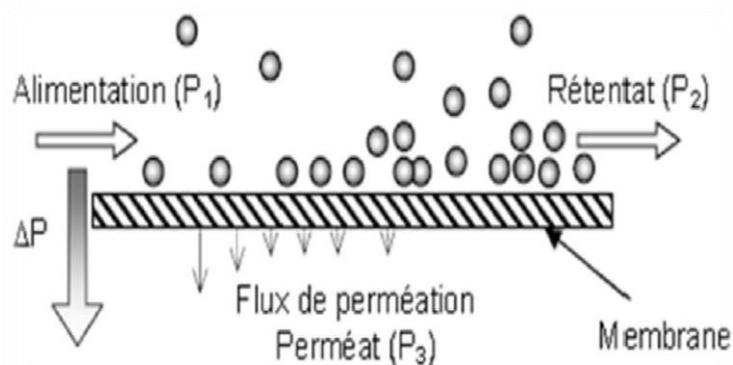


Figure III.12 : Présentation du fonctionnement de la filtration tangentielle (Docplayer, 2012).

- **Fabrication des membranes :** La majorité des membranes polymères poreuses commercialisées sont élaborées via un procédé de séparation de phases. La séparation de phases ou également appelée inversion de phase ou démixtion résulte d'un changement d'état thermodynamique d'une solution de polymère initialement homogène. Le changement d'état thermodynamique peut être induit par différentes méthodes :
 - Variation de la température ;
 - Evaporation différentielle du solvant d'une solution ternaire polymère/solvant/non-solvant ;
 - Intrusion d'un non-solvant dans une solution binaire polymère/solvant.

Les propriétés et les performances d'une membrane dépendent étroitement de sa morphologie. L'objectif majeur d'un fabricant de membranes consiste donc à contrôler les processus de texturation pour leur conférer les caractéristiques requises tout en leur assurant de bonnes propriétés de résistance mécanique, thermique et chimique en fonction des conditions opératoires choisies

Cette méthode de fabrication comporte en générale cinq étapes :

- Préparation d'une solution de polymère appelée : collodion (polymère + solvant)
- Coulée de la solution sur une plaque de verre en vue de former un film d'environ 250µm d'épaisseur.
- Evaporation d'une partie de solvant.
- Précipitation des polymères par immersion dans un non solvant ou coagulant (eau froide à 0 C° pendant une heure pour l'acétate de cellulose).
- Traitement thermique qui va déterminer la sélectivité et de la perméabilité de la membrane.

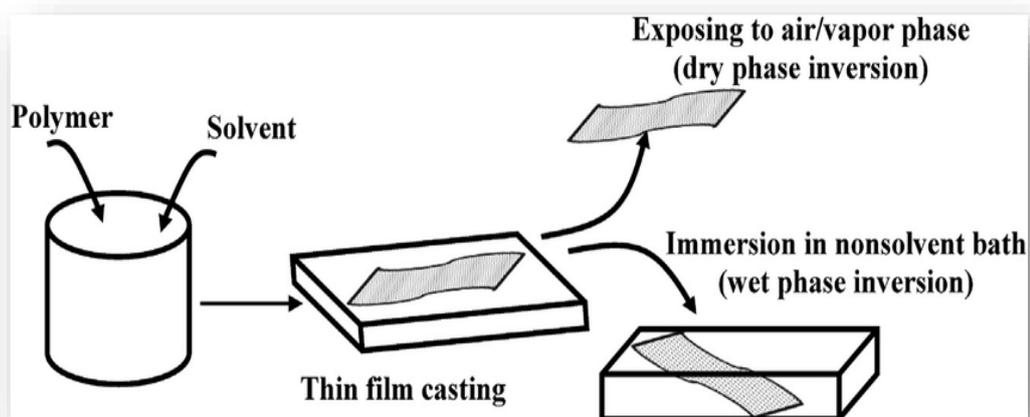


Figure III.13 : Etapes de fabrication d'une membrane (cours de dessalement ENSH, 2019)

- **Géométrie des membranes et des modules** : Les membranes sont incorporées dans un dispositif appelé module et celui-ci peut se répéter à un certain nombre d'exemplaires disposés selon divers arrangements dans une unité, quatre grands types de modules sont commercialisés :
 - **Les modules tubulaires** : Ce type de module est constitué de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixée la membrane semi-perméable. L'eau à traiter circule, sous pression, à l'intérieur du tube et le perméat est collecté à l'extérieur du tube. Les tubes sont rassemblés en petit nombre (quelques dizaines) dans un module et ils y sont disposés parallèlement les uns aux autres avec un espacement régulier.

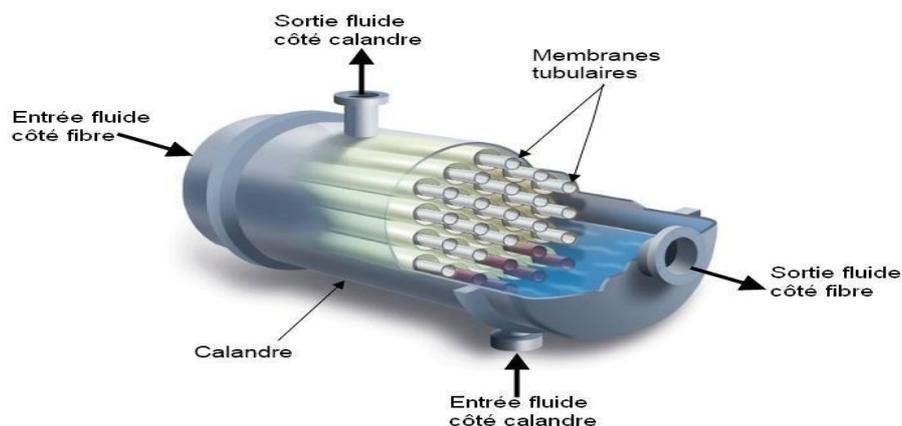


Figure III.14 : Module à membrane tubulaire (TAKABAIT Fatah, 2012)

- **Les modules fibres creuses** : Constitué d'une quantité prodigieuse de fibres cylindriques creuses, le module à fibres creuses se présente comme une extrapolation du module tubulaire vers des diamètres fins ou ultrafins. A la différence des modules tubulaires qui sont constituées d'une membrane et d'un support inerte, les fibres creuses jouent à la fois le rôle de membrane et de support. Le faisceau de fibres est disposé en U à l'intérieur d'une enveloppe et les extrémités ouvertes des fibres sont d'abord noyées sur une longueur de quelques centimètres dans une résine d'époxy ; la plaque de résine est ensuite sectionnée pour donner accès à la collecte de perméat. L'eau à traiter circule généralement à l'extérieur de la fibre et le perméat est collecté à l'intérieur des tubes.
- **Les modules plans** : Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples, les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadre intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.
- **Les modules spirales** : Au sein des modules spiraux, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multicouche où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

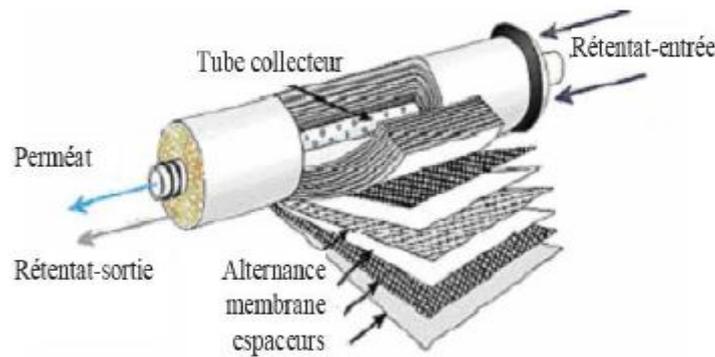


Figure III.15 : Module spirale (Wintsi, 2017).

Pour choisir un module on prend en considérations les critères suivants :

- Le type d'écoulement (laminaire ou turbulent) qui permet de minimiser les phénomènes de polarisation
- La compacité qui est le rapport entre la surface filtrante et le volume du module, elle s'exprime en m^2/m^3 .
- La facilité de démontage et de remplacement des membranes abimées.
- Le volume mort de l'appareil qui s'exprime en L/m^2 .

b) L'osmose inverse

- **Principe du phénomène de l'osmose :** L'osmose est un phénomène naturel basé sur le principe fondamental de l'équilibre. Lorsque deux liquides contenant différentes concentrations de solides dissous sont mis en contact, ceux-ci se mélangent jusqu'à uniformisation des concentrations. Lorsque ces deux liquides sont séparés par une membrane semi-perméable (laquelle laisse passer les liquides tandis que les solides dissous restent dans leur compartiment), le liquide contenant la plus faible concentration de solides dissous va traverser la membrane pour aller dans le liquide contenant la plus forte concentration de solides dissous. Après un temps donné, le niveau de l'eau sera plus élevé d'un côté de la membrane.
- **Principe de l'osmose inverse :** L'osmose inverse est basée sur le principe opposé à celui de l'osmose qui se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaye d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. Si pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée ; c'est le phénomène d'osmose inverse (MAUREL, 2006).

En d'autres mots l'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen des membranes semi-perméables sous l'action d'un gradient de pression. Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase.

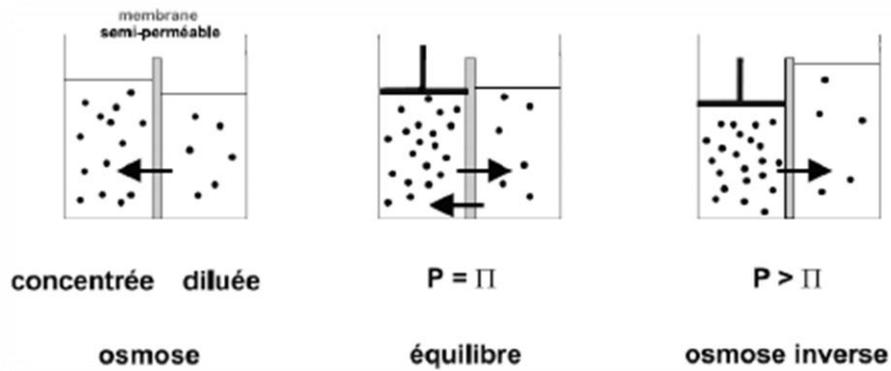


Figure III.16 : Principe de fonctionnement du procédé d’osmose et d’osmose inverse (*Esprit santé, 2012*)

- **La Pression osmotique:** La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van 't Hof qui exprime que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en *i* ions, la pression osmotique sera *i* fois supérieure.

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés :

$$\Pi = i \cdot C \cdot R \cdot T \dots \dots \dots (III.3)$$

Avec :

- Π : Pression osmotique (bar) ;
- i* : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte ;
- C : Concentration molaire (mol. 1)
- R : Constante des gaz parfaits (0,082 L.bar.mol⁻¹K⁻¹) ;
- T : Température absolue (K);

Dans le cas d'une solution saline, la pression osmotique peut être, en première approximation estimée à 0.7 bar par gramme/litre de salinité :

$$\Pi = 0.7 C$$

Avec :

- Π : pression osmotique (bar) ;
- C : concentration (g/l).

- **Mécanismes de transfert :** En osmose inverse, les transferts de solvant et de soluté au travers d'une membrane semi-perméable se font par solubilisation-diffusion : toutes les espèces moléculaires (solvant et soluté) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme à travers un solide ou un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression.

Les flux de solvant (*J_v*) et de soluté (*J_s*) sont donnés par les relations ci-dessous :

$$J_v = A (\Delta P - \Delta \Pi) \dots \dots \dots (III.4)$$

- J_v* : flux d'eau à travers la membrane,
- A : perméabilité de la membrane au solvant (eau),
- Δ*P*: différence de pression de part et d'autre de la membrane,

$\Delta \Pi$: différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

$$J_s = B (C_0 - C_p) \dots\dots\dots(III.5)$$

J_s : flux de soluté à travers la membrane,

B : perméabilité de la membrane au soluté,

ΔC : différence de concentration en soluté de part et d'autre de la membrane,

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

c) L'électrodialyse

- **Définition** : L'électrodialyse (ED), un procédé membranaire très ancien dont la première installation date des années 1960, consiste à éliminer des sels dissous dans l'eau saumâtre par migration à travers des membranes sélectives sous l'action d'un champ électrique.

- **Les membranes utilisées** : Les procédés électro dialytiques utilisent des membranes organiques composées de matériaux similaires à ceux des résines échangeuses d'ions. La structure de la membrane est fabriquée à partir d'un matériau polymère, comme du chlorure de polyvinyle (PVC). La nature des ions détermine le type de membrane : les membranes cationiques sont perméables aux cations (membranes échangeuses de cations, MEC) et les membranes anioniques sont perméables aux anions (membranes échangeuses d'anions, MEA).

Parfois un prétraitement de la solution est nécessaire. En effet les particules en suspension d'un diamètre supérieur à 10 nm sont susceptibles de boucher les pores de la membrane. De plus certaines substances chimiques sont capables de neutraliser les effets sélectifs de la membrane tels que les anions organiques de grandes tailles, les oxydes de fer ou de manganèse.

Les membranes peuvent être homogènes ou hétérogènes et doivent avoir les caractéristiques suivantes pour être performantes :

- très grande sélectivité ionique,
- faible résistance électrique,
- bonne résistance mécanique.

- **Mécanismes de transfert** : L'appareil consiste en une alternance de membranes anioniques et cationiques délimitant des compartiments de dilution (D) et de concentration (C). On alimente en solution saline MX (M+, X-) le compartiment central. Sous l'effet d'un champ électrique, les cations migrent vers la cathode : ils sortent des compartiments D en traversant une membrane cationique MC, mais ils ne peuvent quitter les compartiments C car ils sont bloqués par une membrane anionique MA.

Simultanément, les anions migrent vers l'anode : ils sortent des compartiments D en traversant une membrane anionique MA, mais ils ne peuvent quitter les compartiments C car ils sont bloqués par une membrane cationique MC.

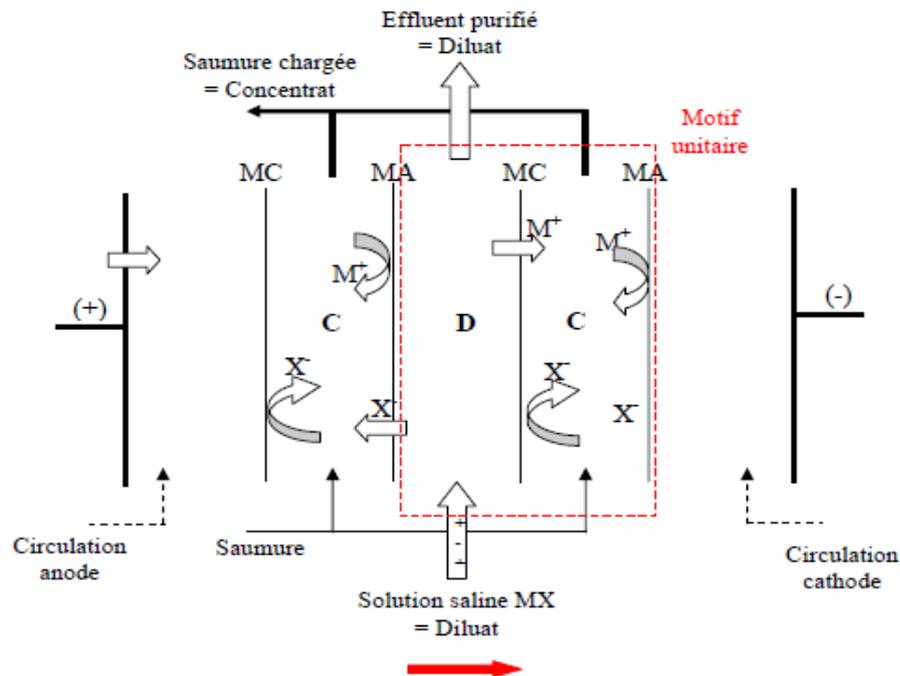


Figure III.17 : Schéma de principe de l'électrodialyse à deux compartiments (Frédéric SCHAB, 2007)

En conséquence, les compartiments D s'appauvrissent en sels, on les nomme « compartiments dilués », et les compartiments C s'enrichissent en sels, on les nomme « compartiments saumure ou concentrés ». Cette configuration permet de concentrer et/ou de déminéraliser des solutions contenant des espèces chargées telles que des espèces minérales (sels minéraux, ions métalliques), ou organiques (sels d'acides faibles).

Aux bornes du système, deux solutions électrolytiques (sels, acides ou bases selon la nature de l'opération) baignent les compartiments où sont disposées les électrodes afin d'assurer la conductivité du courant. Ces deux compartiments ne sont pas impliqués dans le bilan de transfert des ions.

On appelle « cellule unitaire » le motif élémentaire nécessaire à l'opération : dans ce cas précis, la cellule unitaire (en pointillés sur la Figure) se compose des seuls compartiments Dilué et Concentré, ainsi qu'une paire de membranes cationique et anionique. Il est possible de superposer N cellules unitaires à l'intérieur d'un même stack, en respectant l'agencement des membranes : le courant électrique est alors utilisé N fois pour déminéraliser chaque compartiment Diluât, ceci afin de diminuer les coûts de fonctionnement et d'investissement d'un tel système.

- **Applications** : La principale application de l'électrodialyse est le dessalement des eaux saumâtres. Ce procédé de déminéralisation a été essentiellement développé au Japon pour la production de saumure à partir d'eau de mer. Une autre grande

utilisation de l'électrodialyse est la déminéralisation du lactosérum. Elle représente une capacité mondiale de production de 250 000 m² de membranes installées. La nouvelle application à grande échelle de l'électrodialyse qui semble se développer est l'élimination des nitrates pour la production d'eau potable. Cela nécessite la mise en œuvre de membranes uniquement perméables aux ions monovalents et préférentiellement aux nitrates et d'empilements à propriétés hydrodynamiques performantes.

Les applications nouvelles de l'électrodialyse concernent des domaines aussi variés que la métallurgie, la chimie et la pharmacie, les biotechnologies, l'agro-industrie, le traitement d'eau et d'effluents, etc.

- **Les différents types d'électrodialyse**

- **L'électrodialyse (ED) dite conventionnelle** : est une technique séparative permettant l'extraction d'ions à travers des membranes ioniques sous l'effet d'un champ électrique. Les membranes utilisées sont de deux types. Les membranes cationiques qui ne se laissent traverser que par des cations et les membranes anioniques qui ne se laissent traverser que par les anions. Elles sont imperméables aux liquides. Un module d'électrodialyse (stack) est composé par l'assemblage d'un grand nombre de membranes alternativement cationiques et anioniques délimitant des compartiments de dessalement et des compartiments de concentration.
- **Les configurations de l'électro dialyseur** : Le procédé d'électrodialyse à deux compartiments précédemment décrit est de loin le plus répandu industriellement. Néanmoins, diverses variantes existent également et l'on peut adapter la configuration du module selon l'application recherchée.
- ✓ **Electrodialyse à trois compartiments** : Un électro dialyseur à trois compartiments a pour objectif d'assurer une substitution d'ions (cation ou anion) sur l'effluent circulant dans le compartiment central.

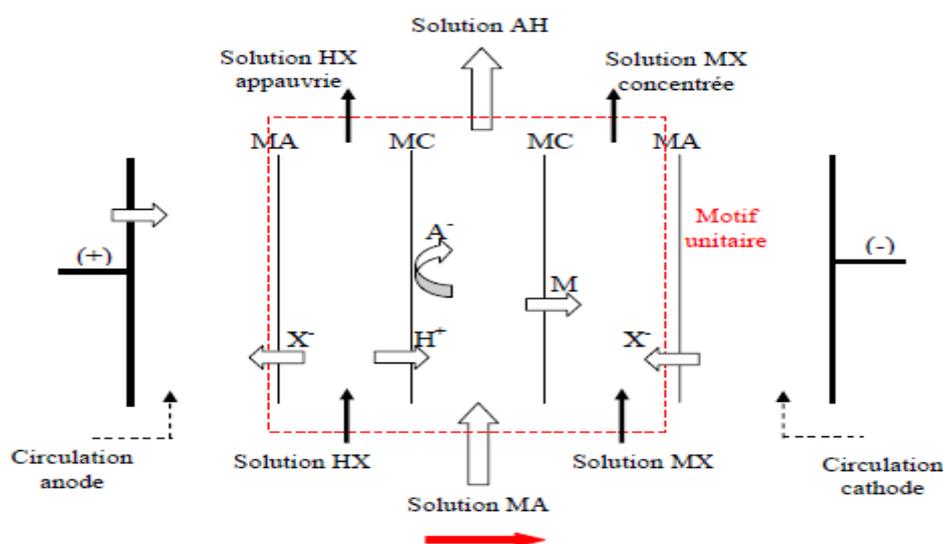
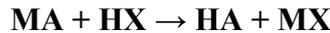


Figure III.18 : Schéma de principe de l'électrodialyse à trois compartiments (Frédéric SCHAB, 2007)

Ainsi, dans l'exemple choisi présentant un empilement de type MA / MC / MC, on effectue une transformation de type :



C'est-à-dire une substitution de l'ion M⁺ par un proton dans l'effluent d'entrée MA. Inversement, un empilement de type MC / MA / MA permettra de substituer un anion dans l'effluent à traiter.

Les applications de ce procédé sont diverses, parmi lesquelles :

- Acidification
- Basification
- Neutralisation d'une base

- ✓ **Electrodialyseur à quatre compartiments** : Un électro dialyseur à quatre compartiments a pour objectif d'assurer une double substitution entre les ions de deux solutions alimentées dans les compartiments 1 et 3.

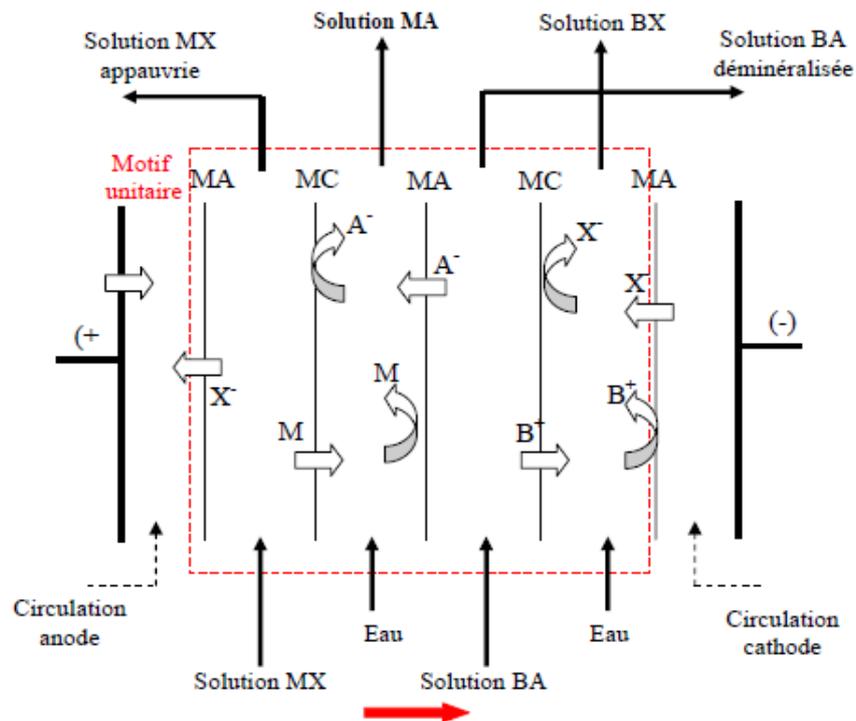
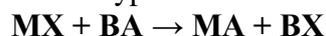


Figure III.19 : Schéma de principe de l'électrodialyse à quatre compartiments (Frédéric SCHAB, 2007)

L'exemple choisi présente un empilement de type MA / MC / MA / MC : on effectue une transformation de type :



C'est-à-dire une substitution de l'ion M⁺ par un ion B⁺ dans l'effluent d'entrée MA. Les compartiments 1 et 3 sont alimentés respectivement avec MX et BA : ils sont déminéralisés en cours d'opération. Les compartiments 2 et 4 sont les compartiments récepteurs de la manipulation : parcourus initialement par de l'eau

ou un sel faiblement concentré, ils reçoivent et concentrent les cations et anions des compartiments adjacents pour finalement produire les deux sels désirés : MA et BX.

- **L'électrodialyse bipolaire (EDBIP)** : est une technique membranaire utilisant la propriété particulière de la membrane bipolaire consistant à dissocier l'eau (en H⁺ et OH⁻) sous l'action d'un champ électrique (water splitting). Un module d'électrodialyse bipolaire (stack) est constitué par l'assemblage de membranes bipolaires et monopolaires (cationiques /anioniques) permettant de convertir des solutions salines (minérales ou organique) en acides et bases.

d) L'ultrafiltration

L'ultrafiltration (UF) repose sur un mécanisme de transfert de fluide sous l'effet de la pression. Cette technique utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes). La séparation dépend principalement de la taille mais aussi de la forme des solutés. Les molécules de taille supérieure à la taille des pores de la membrane vont être retenues par cette dernière, alors que les petites molécules (et le solvant) vont pouvoir librement traverser la membrane. Le flux de solvant à travers la membrane est directement proportionnel à la pression appliquée, qui est généralement comprise entre 1 et 10 bars. L'efficacité d'une membrane d'UF est en général caractérisée par son seuil de coupure qui correspond à une rétention pratiquement totale (90% le plus souvent) d'une macromolécule déterminée par le fabriquant.

Les applications de l'UF sont multiples : l'UF sert ainsi à la production d'eaux purifiées, à déminéralisation des jus sucrés, à la clarification des jus de fruits, à la séparation des protéines du lait, à la concentration et à la déminéralisation des protéines dans l'industrie pharmaceutique ou encore à l'élimination des macromolécules présentes dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel ou médical (Holtzer, 2006 ; Maurel, 1993).

e) La nanofiltration

Le terme nanofiltration (NF) est composé du préfixe 'nano' qui se réfère à 1 nm (10⁻⁹ m), l'ordre de grandeur de la taille des plus petites molécules retenues par les membranes de nanofiltration et du terme 'filtration'. C'est une technique membranaire relativement récente qui couvre un domaine de séparation intermédiaire entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse et fonctionnant sous l'action d'un gradient de pression. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane.

Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus (MAUREL Alain – 1993).

Les caractéristiques principales de la nanofiltration sont les suivantes (Guizard, 2000) :

- Les masses moléculaires des solutés retenus se situent entre 200 et 1000 g/mol.

- Les pressions de travail (de 10 à 50 bars) sont plus basses que celles utilisées en osmose inverse (de 30 à 100 bars) et les débits de filtration supérieurs à ceux obtenus avec cette technique.
- La séparation des solutés électriquement chargés ne se fait pas sur le seul critère de leur taille mais aussi en fonction de leur charge.

La couche active des membranes de nanofiltration est composée d'un matériau organique présentant une structure microporeuse avec des diamètres de pores de l'ordre du nanomètre. Ces membranes de type organique sont actuellement commercialisées sur le marché. D'autres types de membranes de nanofiltration sont en cours de développement, en particulier des membranes mixtes organiques/inorganiques ou bien des membranes purement inorganiques.

Les membranes organiques présentent une résistance au pH convenable ; par contre la résistance à la température reste inférieure à 100°C. En plus, ces membranes sont trop sensibles aux oxydants, aux solvants organiques ou à certaines molécules comme les tensioactifs. Ce qui justifie les efforts actuellement consentis pour mettre au point des membranes inorganiques de nanofiltration capables de fonctionner dans des conditions plus dures que celles organiques.

La nanofiltration peut être utilisée pour la déminéralisation sélective des eaux (adoucissement des eaux) ou pour la concentration de composés organiques de faible masse molaire (pesticides, herbicides, insecticides, sucres, colorants...). Ses applications sont donc nombreuses : outre le traitement de l'eau potable, on peut également citer le dessalement du lactosérum dans l'industrie laitière, la récupération d'éthylène glycol provenant de liquides antigels usagés ou encore le recyclage d'eau à partir d'effluents de teinturerie (Mulder, 1996 ; Guizard, 2000).

f) La microfiltration (MF)

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 µm. Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexation, précipitation ou floculation.

Théoriquement, la différence entre ultrafiltration et microfiltration est très nette :

- L'ultrafiltration fonctionne en phase liquide homogène alors que la microfiltration a pour objectif une séparation solide-liquide ;
- La pression de travail est généralement plus faible dans le cas de la microfiltration (Pression transmembranaire < 3 bars) ;
- Les flux de filtration sont souvent plus importants dans le cas de la microfiltration

La Microfiltration est un procédé basse pression qui inclut dans ses applications la récupération de cellules issues de bouillons de fermentation, le fractionnement de protéines de lait, la clarification du sirop de maïs et la récupération de produits chimiques utilisés dans les phases de Nettoyage en Place (NEP).

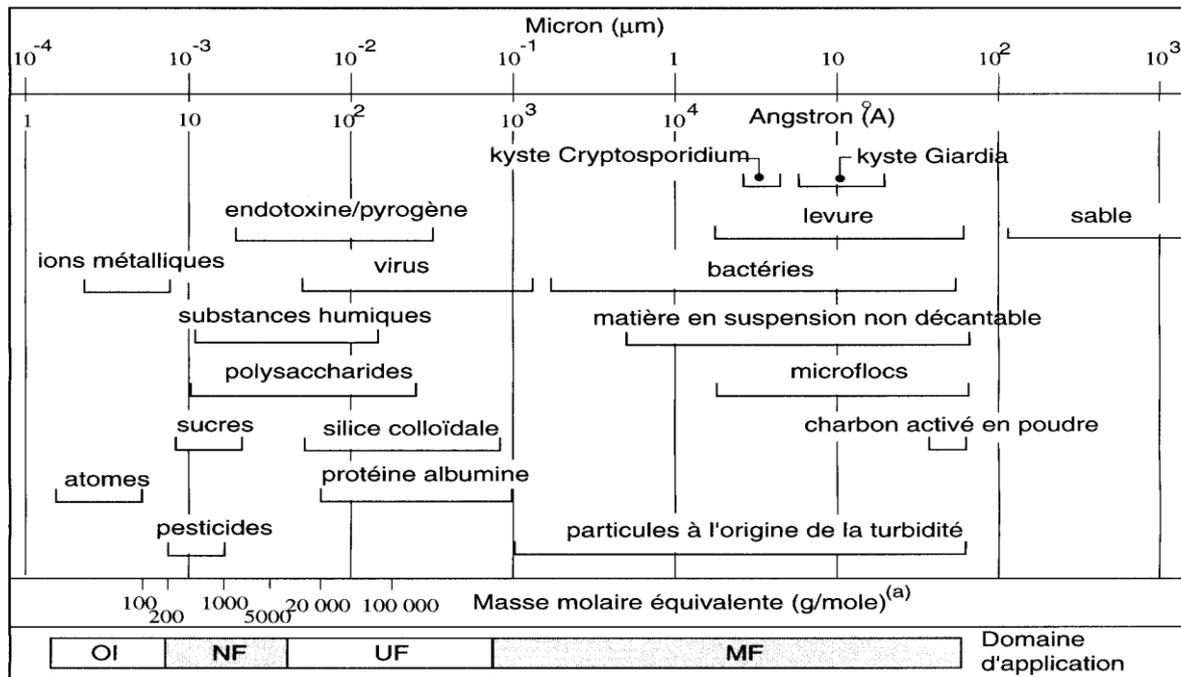


Figure III.20 : Les différents composés rencontrés dans les eaux naturelles et les techniques permettant leur élimination (Metaiche, 2014)

I.11.3. Procédés de déminéralisation chimiques

a. Extraction par solvants sélectifs

L'extraction par solvant est l'opération fondamentale qui permet d'extraire un composé (soluté) d'un liquide, par un autre liquide (solvant). Elle peut être utilisée lorsque l'on souhaite extraire une espèce chimique d'une solution où elle est dissoute. Pour extraire une espèce chimique dissoute dans une solution on utilise un autre solvant (d'où l'appellation d'extraction liquide-liquide) qui va dissoudre également cette espèce. Lors du contact entre la solution et le solvant d'extraction, l'espèce chimique passe de l'un à l'autre, par conséquent, en fin d'extraction on obtient une nouvelle solution. Cette méthode repose sur la miscibilité de certains solvants avec l'eau, sans être solvant pour les sels. On obtiendra de l'eau douce par extraction.

Au premier abord il peut sembler curieux de faire appel à une technique qui ne fait que déplacer le problème en faisant passer l'espèce chimique convoitée d'une solution à une autre mais ce transfert peut présenter des intérêts variables suivant les situations:

- obtenir une nouvelle solution avec un unique soluté alors que le mélange initial en contenait plusieurs (à condition que les autres solutés soient insolubles dans le solvant d'extraction)
- obtenir une solution directement exploitable
- élimination plus facile du solvant et l'obtention d'un corps pur

L'efficacité d'une extraction liquide-liquide dépend du solvant utilisé, celui-ci doit posséder les propriétés suivantes :

- L'espèce chimique à extraire doit avoir une meilleure solubilité dans ce solvant que dans celui de la solution initial.

- Il ne doit pas être miscible avec le solvant de la solution initial, il doit former avec lui un mélange hétérogène constitué de deux phases distinctes afin qu'il soit possible de les mettre en contact et ensuite de les séparer.
- L'état physique du solvant car il doit être liquide.
- La Densité car il est nécessaire de connaître ce paramètre car c'est lui qui détermine si la phase organique, contenant le composé à extraire, se trouve au-dessus ou en dessous de la phase aqueuse (à éliminer).

b. L'Echange d'ions

Le procédé de traitement des eaux par résines échangeuses d'ions est connu depuis longtemps, il consiste à retirer un ion d'une solution par un absorbant et à le remplacer par un autre ion de même charge. L'échange d'ions est donc un procédé sélectif qui permet d'éliminer certains sels dont on veut particulièrement se débarrasser.

En d'autres mots, l'échange d'ions est une opération par laquelle, dans certaines conditions, une substance insoluble (résine) attire un ion positif ou négatif d'une solution et rejette un autre ion de même signe.

On distingue :

- Les échangeurs cationiques qui échangent des cations et, de ce fait, sont constitués de groupes chargés négativement.
- Les échangeurs anioniques comportent des groupes chargés positivement qui se combinent avec un éventail d'ions négatifs, et ce de manière réversible.

Les échangeurs d'ions sont des substances granulaires insolubles, comportant dans leur structure moléculaire des radicaux acides ou basiques susceptibles de permuter, sans modification apparente de leur aspect physique, et sans altération ou solubilisation, les ions positifs ou négatifs, « fixés » sur ces radicaux, contre des ions de même signe se trouvant en solution dans le liquide à leur contact. Cette permutation appelée échange d'ions permet de modifier la composition ionique du liquide objet du traitement, sans modification du nombre total de charges existant dans ce liquide avant l'échange.

Les échangeurs ioniques commerciaux courants sont, aujourd'hui, des résines synthétiques au sein desquelles des groupes chimiques fonctionnels jouent le rôle d'échangeurs. La capacité d'échange d'un échangeur ionique est exprimée en milliéquivalent par gramme ou par litre d'échangeur on trouve aussi les unités de CaCO_3 par gramme ou par litre d'échangeur. La capacité totale d'échange n'est, en pratique jamais atteinte.

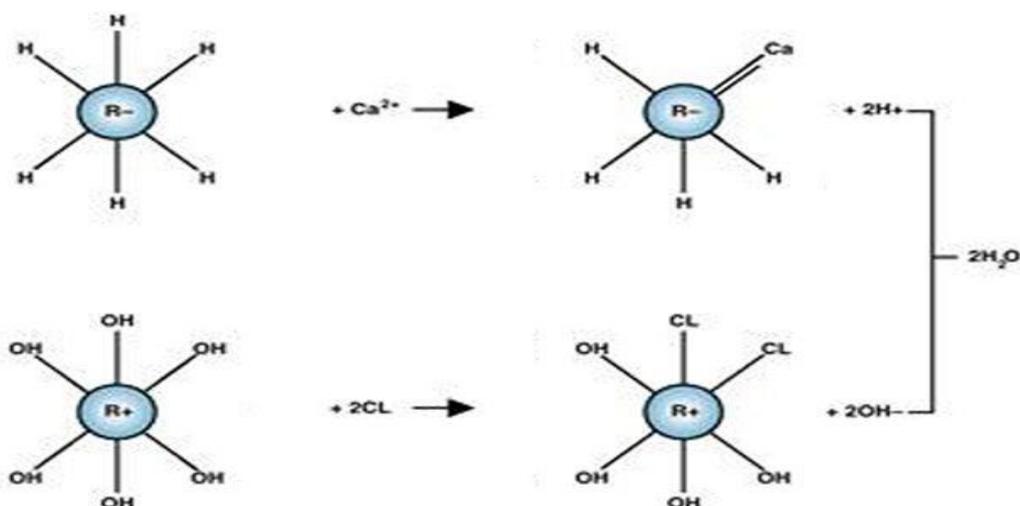


Figure III.21 : fonctionnement d'une résine échangeuse d'ions (Waterconcept, 2006)

On recourt à l'échange d'ions dans l'industrie, notamment comme moyen d'obtenir de l'eau à haut degré de pureté (eau de chaudière, par exemple), dans le but de l'adoucir et pour réduire les concentrations d'azote et de phosphore.

II. Partie II : comparaison entre les différentes techniques de déminéralisation

II.1. Comparaison technique

Comme nous avons précédemment cité, il existe différentes méthodes de déminéralisation des eaux, mais le choix d'une technique par rapport à une autre pour obtenir une eau potable dépend de beaucoup de paramètres et de conditions techniques à prendre en considération pour choisir un procédé adéquat.

On peut citer :

- Les caractéristiques physiques de l'eau à traiter (turbidité, matières en suspension...) pour déterminer le type de prétraitement à utiliser.
- La composition chimique de l'eau à traiter surtout dans le cas des eaux saumâtres (dureté, teneur en sulfates).
- La salinité de l'eau à traiter : en général, les procédés de distillation permettent de traiter des eaux de fortes concentrations, tandis que les procédés à membrane sont généralement appliqués aux eaux saumâtres.
- La salinité de l'eau produite : selon l'usage qui en sera fait, elle peut varier de 300 à 500ppm pour l'approvisionnement en eau potable à 15-30 ppm pour l'alimentation en eau industrielle
- Les caractéristiques des eaux produites, par exemple les eaux produites par osmose inverse sont généralement agressives et exigent la remise à l'équilibre donc un post-traitement.
- Les caractéristiques d'utilisation de l'installation : temps de fonctionnement, capacité, main d'œuvre ou automatisation de l'installation.
- Les sources d'énergie disponibles.
- La consommation énergétique de chaque technique.
- La durée de vie de l'unité.
- L'impact sur l'environnement.
- Les conditions locales.
- Le volume total d'eau à traiter.

Et c'est dans cet esprit-là et en prenant en compte tous ces paramètres que nous allons citer les avantages et les inconvénients de chaque technique.

II.1.1. Comparaison entre les différents types de distillation

Les deux tableaux suivants résument les avantages et les inconvénients ainsi que toutes les caractéristiques des différentes techniques s'appuyant sur la distillation.

| | Distillation multi-flash (MSF) | Distillation à multiples effets (MED) | Compression mécanique de vapeur |
|---|--|--|---|
| Température de fonctionnement (°C) | < 120 | < 70 | < 70 |
| Pression (bar) | 2 | 0.25-0.4 | 0.7-1 |
| Prétraitement de l'eau | Nécessaire | Nécessaire | Nécessaire |
| Capacité de traitement (m3/j) | 5 000 – 60 000 | 500 – 12 000 | 10 – 2 500 |
| Principale source d'énergie | Thermique | Thermique | Mécanique (via électricité) |
| Consommation thermique (KWh/m³) | 3.5 | 1.5 | 8 - 14 |
| Salinité de l'eau brute (g/l) | 30 - 100 | 30 - 100 | 30 – 50 |
| Salinité de l'eau traitée (mg/l) | < 10 | < 10 | < 10 |
| Impact sur l'environnement | - Saumure 10% plus salée et 2.8° que l'eau de mer - Fonds marins peu oxygénés - Destruction de certains organismes | - Saumure 50% plus salée - Eau très peu oxygénée - Floculants toxiques à fortes concentrations | Tambours de l'eau blessent les poissons |
| Risque de corrosion | Moyen | Faible | Faible |

Tableau III.6 : Caractéristiques des techniques de dessalement s'appuyant sur la distillation**Tableau III.7 :** Avantages et inconvénients des techniques de dessalement s'appuyant sur la distillation

| Les procédés | Avantages | Inconvénients |
|---------------------------------------|--|--|
| Distillation multi-flash (MSF) | - Fiabilité, technique éprouvée - Flexibilité de la salinité de l'eau d'alimentation. - Production de haute pureté (<30ppm). - Haute capacité de production. - Faible nécessité des opérateurs qualifiés. - Utilisées à double fins: production d'eau et d'électricité. | - Important prétraitement - Consommation élevée de l'énergie. - Faible taux de conversion (30% -40%). - Beaucoup d'exigences pendant la construction. - Potentiel limité d'amélioration après fin de construction. |

| | | |
|--|--|---|
| Distillation à multiples effets (MED) | <ul style="list-style-type: none"> - Récupération d'énergie (chaleur latente de vaporisation) maximale - Bons rendements - Haute capacité de production. - Haute pureté du produit (<30ppm). - Apport énergétique indépendant de la salinité. - Opérateur qualification minimale des opérateurs | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité plus faible que MSF - Longue période de construction. - Faible conversion de l'eau d'alimentation (30%-40%). - Nécessite un grand espace avec exigences des équipements |
| Compression mécanique de vapeur | <ul style="list-style-type: none"> - Faible consommation électrique - Simplicité - Haute qualité de l'eau produite (20ppm). - Courte période de construction | <ul style="list-style-type: none"> -Rendement limité à cause de problèmes de corrosion et d'entartrage des composants. - Capacité limitée. - Haute consommation d'énergie. |

D'après les deux tableaux précédents nous pourrions dire de manière générale que la distillation (toutes les techniques comprises) est la méthode la plus ancienne mais aussi la plus grosse consommatrice d'énergie qui se développe principalement dans les pays où l'installation peut être couplée à une unité de production d'énergie thermique, dont elle utilise une partie de la chaleur basse température. Cela dit, la distillation se caractérise par son exploitation relativement aisée et son indépendance à la variation de la qualité d'eau brute à condition que la teneur en sel soit assez élevée (dépassant les 30g/l); ce qui fait que Cette technique est principalement réservée au traitement de l'eau de mer et son utilisation est réservée pour des grandes capacités de production d'eau.

Le distillat est très peu minéralisé (10 à 50 mg/l), ce qui nécessite une reminéralisations pour obtenir une eau apte organoleptique à la consommation humaine.

II.1.2. Comparaison entre les différents types de techniques membranaires :

Les procédés membranaires ne faisant pas intervenir de changement de phase doivent présenter une consommation d'énergie plus faible que d'autres procédés de séparation telle que la distillation par exemple.

Dans un premier temps nous allons d'abord comparer entre les paramètres caractérisant l'osmose inverse, la nanofiltration, l'ultrafiltration, et la microfiltration.

Tableau III.8 : Comparaison technique entre les différentes techniques membranaires

| | OI | NF | UF | MF |
|----------------------------------|-----------|----------------|-----------------------------|-------------------------|
| Diamètre des pores (µm) | < 0.0005 | 0.001 | 0.002 – 0.5 | 0.1 – 10 |
| Espèces retenues | Sels | Ions divalents | Macromolécules Colloïdes | Particules Colloïdes |
| Pression appliquée (bars) | 30 – 80 | 10 - 40 | 0.5 - 10 | 0.5 - 3 |

| | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---|---------------|---------------|
| Flux (L/m³/h) | 10 – 60 | 50 - 100 | 50 - 500 | 200 – 450 |
| Application | Affinage Dessalement | Affinage Micropolluants Couleur MO | Clarification | Clarification |

D’après les résultats du tableau précédent, nous pouvons très bien sortir avec la conclusion que parmi tous ces procédés, seul l’osmose inverse pourra être qualifiée de procédé de déminéralisation ou de dessalement tandis que le reste des techniques vont être évidemment utilisées pendant les étapes de prétraitement et de post- traitement.

En ce qui suit, nous donnerons d’abord les avantages et les inconvénients du côté technique de l’osmose inverse et de l’électrodialyse, ensuite on procédera à la comparaison entre leurs différentes caractéristiques.

II.1.2.1 L’osmose inverse

Le tableau suivant montre les inconvénients et les avantages du procédé d’OI :

Tableau III.9 : Avantages et inconvénients de l’osmose inverse

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Une gamme très importante de capacité disponible commercialement. - Une faible consommation énergétique (3-4 kWh/m³) l’osmose est le procédé le moins énergivore des procédés de dessalement. - Convient pour l’eau de mer et saumâtre. - Flexibilité dans la quantité et la qualité de l’eau. - Flexibilité pour l’emplacement du site. - Flexibilité dans le démarrage et l’arrêt de l’opération de dessalement. - Technique simple. - Elimination des éléments physico-chimiques et biologiques indésirables est quasiment totale. - Recyclage immédiat des matières récupérées. - Limitation du nombre de rinçage. - Diminution de la consommation en eau. - Amélioration de la qualité des traitements. - Meilleur respect de la réglementation des eaux de rejet. - Rendement de 95 à 97%. - Un taux conversion élevé (supérieur à 55%) ; - Une durée de mise en œuvre réduite. | <ul style="list-style-type: none"> - Les membranes sont sensibles au colmatage, aux variations de débits, et aux MES. - La salinité d’eau produite qui se situe aux environs de 300-500 ppm convient bien pour les usages domestiques, mais est trop importante pour certains usages industriels. - Nécessite une eau d’alimentation de haute qualité. - Exigence de la haute pression. - Temps assez Long de construction pour les usines à grande échelle. -Procédé non sélectif. -Préfiltration nécessaire pour enlever les particules solides et les huiles ou graisses qui pourraient colmater la membrane. -Concentration des produits parasites. -Mise en place impérative d’un rinçage Statique. -Sensibilité à la quantité d’eau brute et surtout aux pollutions. -Nécessité d’un personnel qualifié. -Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement. -L’élimination d’un grand pourcentage des sels ce qu’il nécessite une reminéralisations pour être dans les normes coincement l’eau potable. |

II.1.2.2 L'électrodialyse

Tableau III.10 : Avantages et inconvénients de l'électrodialyse

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Source d'énergie flexible. - Taux élevé de conversion (80%). - Faible consommation d'énergie. - Encombrement faible. - Faibles exigences sur les équipements. - Consommation d'énergie électrique directement proportionnelle à la quantité de sel à extraire. - Limitation du nombre de rinçage. - Meilleur respect de la réglementation des eaux de rejets. - C'est une technique de longue durée de vie. | <ul style="list-style-type: none"> - Conseillée seulement pour des eaux à salinité relativement faible (<3000ppm). - Nécessité un prétraitement minutieux de l'eau d'alimentation. - Faible capacité de production. - Pureté affectée par la qualité de l'eau d'alimentation. - Les bactéries et les virus restent dans l'eau traitée. - L'impossibilité d'obtenir des eaux fortement déminéralisées. - La limitation du taux d'élimination des sels - La formation de chlore à l'anode, et l'utilisation de tensions relativement élevées en courant continu. - Faible capacité de production. |

II.1.2.3 Comparaison technique entre l'OI et l'électrodialyse

Tableau III.11 : Comparaison technique entre l'OI et l'électrodialyse

| Paramètres de comparaison | Osmose inverse | Electrodialyse |
|---|-----------------------------|----------------|
| Température de fonctionnement (C°) | < 45 | < 45 |
| Energie utilisée | Mécanique (via électricité) | Electrique |
| Consommation électrique (KWh/m ³) | 4 – 7 | 1 |
| Salinité de l'eau brute (g/l) | 1 – 45 | 0.1 – 3 |
| Salinité de l'eau traitée (mg/l) | < 500 | < 500 |
| Capacité d'un train (m ³ /j) | 10 000 | 12 000 |

D'après ces deux derniers tableaux nous pouvons remarquer que l'électrodialyse n'est compétitive avec l'osmose inverse qu'en dessous de 3mg/L de concentration de sels, au-dessus de ce taux, l'osmose inverse est beaucoup plus intéressante.

II.1.3. Avantages et inconvénients des techniques de la congélation et d'échange d'ions**Tableau III.12 : Avantages et inconvénients de la congélation et de l'échange d'ions**

| Technique | Avantages | Inconvénients |
|------------------|--|--|
| La congélation | <ul style="list-style-type: none"> - Les appareillages sont moins exposés à la corrosion grâce à leur exposition à de faibles températures. - Il n'y a pas de problèmes d'entartrage car les sels restent dissous à faible température. - L'eau douce obtenue est bien minéralisée et bien aérée ce qui constitue une excellente boisson. - L'absence d'un prétraitement poussé de l'eau de mer. | <ul style="list-style-type: none"> - Cette technique est généralement une grande consommatrice d'énergie en forme de chaleur voir même plus que l'évaporation de l'eau. - Il existe une difficulté majeure concernant la séparation des cristaux de glace et de la saumure qui nécessite des opérations complexes : il reste une couche limite de saumure collée aux cristaux. |
| L'échange d'ions | <ul style="list-style-type: none"> - Une bonne stabilisation physique. - Une grande capacité d'élimination les ions. - utilisée comme système de prétraitement des procédés à membranes en permettant d'éliminer de l'eau les principaux sels entartrant et les matières organiques naturelles. | <ul style="list-style-type: none"> - Colmatage des résines. - Ne s'applique qu'aux eaux dont la salinité totale est inférieure à 1 ou 1,5 g/l. - La régénération périodique des résines. |

En conclusion, on peut dire que le procédé par échange d'ions est très fiable et rentable pour le traitement des eaux saumâtres de salinité inférieure à 1 g/l. En Afrique du Nord, il peut trouver un débouché important en tant que procédé de prétraitement de l'électrodialyse ou de l'osmose inverse.

En ce qui concerne la congélation, bien qu'elle représente de nombreux avantages bien prendre en compte, elle reste une technique très énergivore qui un sérieux désavantage.

II.2. Comparaison économique

Un classement des différents procédés de déminéralisation des eaux en fonction du coût de l'eau produite est impossible à effectuer, bien que des centaines d'études économiques aient été réalisées depuis vingt ans. Les coûts dans la littérature spécialisée sont, en effet, calculés à partir d'hypothèses techniques et économiques mal précisées et ne correspondent jamais, de toute façon, au cas précis que l'on cherche à résoudre.

Le coût du dessalement a baissé de moitié au cours des dix dernières années, avec cependant une remontée de prix récente, conséquence de la hausse de coût des matières premières.

Au plan économique, le coût de l'eau dessalée est estimé en faisant la somme des trois postes

suiuants : charges financières, coût de l'énergie, coûts d'exploitation et d'entretien.

Le coût de l'eau saumâtre dessalée est nettement inférieur à celui de l'eau de mer dessalée. Il ressort aussi, pour de grandes unités des chiffres moins élevés que pour des unités plus petites, moins performantes ou anciennes, et bien sûr ces coûts sont très sensibles au coût de l'énergie électrique qui diffère selon les pays, et qui est moins élevée dans les pays pétroliers et gaziers comme l'Algérie et les pays du Golfe. L'effet de taille fait baisser le coût de l'eau douce obtenue, d'où l'intérêt de construire des installations de capacité importante, si la demande le justifie et en veillant aux impacts environnementaux. Il est également important de rappeler que le coût de mobilisation d'un mètre cube d'eau conventionnelle est compris entre 15.25 et 45.76 DA/m³ et celui de la réutilisation des eaux usées entre 45.76 et 76.27 DA/m³. L'eau dessalée pour de grandes unités coute donc environ deux fois plus que l'eau conventionnelle et une fois et demie plus que l'eau réutilisée, mais avec des grandes différences selon les situations de terrain.

II.2.1. Les conditions économiques

Se faire une opinion des coûts est assez difficile, Ils dépendent en effet d'un ensemble de paramètres et de conditions :

- Cout de main d'œuvre.
- Condition de financement : détails, taux d'intérêt, durée d'amortissement et facteur de charge de l'installation.
- Cout des produits chimique : selon qu'ils sont disponibles localement ou importés.
- Fluctuation des monnaies : particulièrement pour les unités d'osmose inverse, provenant de manière quasi exclusive des USA, et dont le coût dépend donc des fluctuations du dollar.
- Coût de l'énergie : dépend de sa nature (énergie renouvelable, gaz, fuel) et de sa disponibilité locale (pays importateurs ou producteurs...).
- Inflation variable en fonction des pays et au cours de temps.
- Cout des investissements.
- Caractéristiques de l'eau à traiter et, par conséquent, du prétraitement, contenu du projet (station de pompage de l'eau à traiter et station de rejet des saumures concentrées, stockage d'eau produite, etc.)
- Caractéristiques de la station : capacité de l'installation, la technologie employée, la situation géographique des équipements et leur accès, les réseaux de distribution.
- Un autre coût, non pris en compte actuellement dans les chiffres annoncés, concerne les déchets produits par le dessalement (saumures et autres produits chimiques) rejetés dans l'environnement.

De ces conditions il résulte une large gamme de prix de revient de mètre cube d'eau dessalée.

II.2.2. Coûts d'exploitation et d'énergie

Dans une unité de dessalement, les postes les plus chers sont dans l'ordre :

- L'énergie et la durée d'amortissement de l'installation.
- Le suivi et la maintenance.

- Le prix des membranes de remplacement.
- Les pièces de rechange.
- Les produits chimiques indispensables au procédé.

L'US Office of Saline Waters et certains bureaux de recherche internationaux proposent actuellement la répartition des dépenses par poste pour chaque procédé selon le tableau suivant :

Tableau III.13 : Répartition des dépenses par poste de dépense

| Désignation | OI | MSF | MED |
|--------------------------------|------|-----|-----|
| Energie électrique (%) | 32 | 20 | 10 |
| Production de vapeur (%) | / | 15 | 15 |
| Produits chimiques (%) | 3 | 1.5 | 1.5 |
| Frais de laboratoires (%) | 10 | 4.5 | 5 |
| Entretien et maintenance (%) | 4.2 | 4 | 4.5 |
| Remplacement des membranes (%) | 16 | / | / |
| Amortissement (%) | 34.8 | 55 | 64 |
| Total (%) | 100 | 100 | 100 |

Nous voyons bien d'après ce tableau, que le cout energitique est tres imporant et represente un pourcentage considerable des dépenses totales.

Et comme il est très courant de nos jours la consommation énergétique peut être conventionnelle (électrique où vapeur) comme elle peut tout à fait faire partie des énergies renouvelables, ce qui aura bien sur un impact direct sur les dépenses de la station.

Le tableau suivant montre le montant du mètre cube d'eau déminéralisée ou dessalée selon le type d'énergie exploitée au niveau de la station.

Tableau III.14 : Coûts du dessalement selon le type d'énergie (Karagiannis I.C., Soldatos P.G., 2008).

| Coûts selon le type d'énergie (DA/m ³) | Eau de mer | Eau saumâtre |
|--|------------|--------------|
| Conventionnelle | 53.39 | 32.03 |
| Eolienne | 152.53 | / |
| Photovoltaïque | 478.95 | 686.40 |
| Capteurs solaires | 533.86 | |

II.2.3. Coûts d'investissements

L'investissement spécifique peut être scindé en deux parties :

- Coût de l'usine proprement dite :

Cette partie correspond au coût de l'usine de dessalement montée sur un site aménagé où vapeur et électricité sont disponibles sauf pour les petites unités de distillation où le générateur de vapeur est inclus.

- Frais de l'investisseur :

Cette partie des investissements comprend :

- Les études préliminaires ainsi que les frais d'ingénieurs-conseils.
- L'achat éventuel du terrain et l'aménagement du site (génie civil, route d'accès, clôtures, ...).
- La prise d'eau de mer (pompage, filtration grossière, chloration).
- Les rejets de saumure (il faut en effet que le lieu de rejet soit situé à une distance suffisante de la prise d'eau de mer).
- Les tuyauteries ainsi que le stockage de l'eau douce.
- Les magasins pour pièces détachés et outillages ainsi qu'un jeu de pièces de rechange.
- Le démarrage de l'usine ainsi que la formation du personnel.

Il est évident que cette partie des investissements dépend de chaque cas particulier.

Elle peut être très faible dans le cas d'une usine qui s'implante sur un site industriel existant.

Elle peut être élevée dans le cas d'une usine construite sur un site sans infrastructure.

Les ordres de grandeur des investissements des différents procédés de dessalement d'eau de mer et d'eaux saumâtres sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.15 : Ordres de grandeur des investissements pour les différents procédés de dessalement (Maurel, 2001).

| Type des eaux | Procédés | DA par m ³ |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| Eau de mer | MSF | 193716.54 |
| | Multiple Effets | 173887.29 |
| | Compression à vapeur | 173887.29 |
| | Osmose inverse | 152532.71 |
| Eaux saumâtres | Osmose inverse | 250 – 570 |
| | Electrodialyse | 370 |

Certes il n'est pas mentionné dans les tableaux précédents mais l'Electrodialyse est classée parmi les techniques à Faibles coûts d'exploitation et d'investissement.

Pour donner un aperçu des répartitions des coûts d'investissement nous allons traiter le cas d'une usine de déminéralisation selon un modèle de calcul établi par l'US Office of Salline Waters d'une capacité de 23 000 m³/j utilisant le procédé d'osmose inverse.

Tableau III.16 : Répartition de coûts d'investissement d'une usine de déminéralisation par OI (US Office of Salline Waters, 2002)

| Type du coût d'investissement | Le montant (DA) |
|---|-----------------|
| Cout des équipements | 2858969332.18 |
| Cout aménagement du site | 77081944.79 |
| Cout système de prise d'eau | 11562291.72 |
| Total des coûts d'investissements directs | 305116031.45 |

II.2.4. Le prix du mètre cube d'eau

Il est très difficile de donner des coûts précis sans une étude effectuée au cas par cas prenant en compte les conditions locales.

Le coût de l'eau dessalée peut être estimé en faisant la somme des trois postes suivants :

- Charges financières.
- Coût de l'énergie.
- Coût de conduite d'exploitation et d'entretien.

Comme nous l'avons précédemment cité, le prix du mètre cube d'eau dessalée dépend de plusieurs paramètres qu'il faudrait prendre en compte. Parmi ces paramètres, nous pourrions affirmer que la salinité de l'eau à brute ainsi que la grandeur (la capacité) de la station ont un impact primordial qu'il faudrait traiter avant tout pour ne pas fausser l'estimation finale du prix de l'eau produite et destinée à la distribution.

- **La salinité des eaux :** Dans notre cas nous allons traiter l'influence de la salinité de l'eau sur les coûts. Les coûts du dessalement par des procédés de distillation sont dans une première approche indépendante de la salinité. Ce n'est pas vrai pour les procédés membranaires. Une augmentation de salinité se traduit dans le cas de l'électrodialyse par des investissements liés à une utilisation de surface membranaire plus importante et une consommation électrique supérieure puisqu'elle est proportionnelle à la quantité de sel à extraire.

Dans le cas de l'osmose inverse, une hausse de salinité implique l'utilisation de membranes plus sélectives et par là même de perméabilité plus faible. Le flux d'eau produite étant proportionnel à cette dernière il diminue. D'autre part la pression osmotique augmentant avec la salinité, il convient d'appliquer des pressions plus élevées.

Comme le montre la figure suivante où sont comparés les coûts de production du m³ d'eau traitée pour trois procédés, dans le cas d'une usine de dessalement de 10 000 m³.j⁻¹, et pour différente salinité de l'eau, on constate que seuls les procédés membranaires dépendent de la salinité.

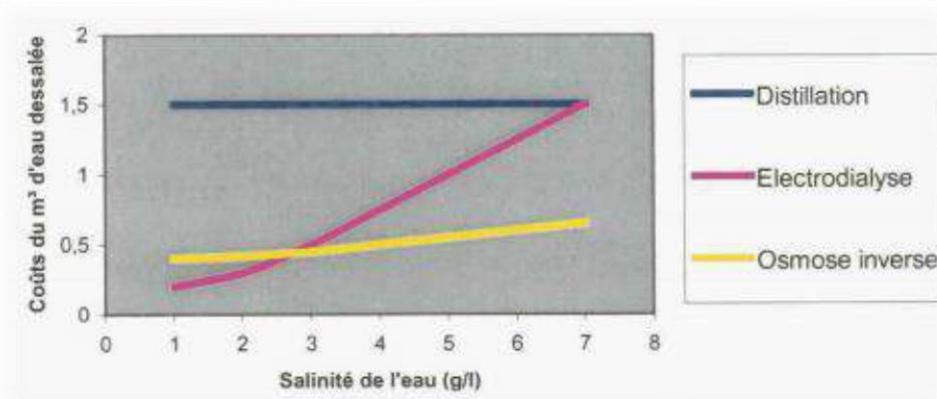


Figure III.22 : Coûts de production du m³ d'eau traitée pour trois procédés (Maurel, 2001).

- **Ordre de grandeur de la station :** Le cout du dessalement des eaux saumâtres est nettement inférieur à celui du dessalement de l'eau de mer : le rapport entre les deux est environ 40%. ceci est dû à la moindre quantité d'énergie nécessaire pour purifier des eaux moins chargées.

Les couts de dessalement diminuent de manière importante en fonction de la taille de l'installation d'où l'intérêt de construire des installations de capacité importantes si la demande le permet.

Les ordres de grandeur du cout de l'eau dessalée sont sommés dans le tableau suivant :

Tableau III.17 : Ordres de grandeur du cout de l'eau dessalée (Maurel, 2001).

| | Capacité de l'unité (m ³ /jour) | Cout (DA/m ³) |
|---------------------|--|---------------------------|
| Eau de mer | Unités très grandes (> 5000) | 106.77 |
| | Unités moyennes (100 – 5000) | 152.53 |
| | Unités petites (< 100) | 305.05 |
| Eau saumâtre | Grandes unités | 30.51 |
| | Petites unités | 76.26 |

Le recours au dessalement est également renforcé par la diminution des coûts de production par m³, en raison, principalement, de l'amélioration de la technologie et de la concurrence. En effet, au cours des trois dernières décennies, le coût total de l'eau dessalée a diminué pour certains projets d'envergure spécifiques (Reddy et Ghaffour 2007).

En Algérie, plus de la moitié, 63,6% de la capacité totale, est produite par des procédés à membrane et 34,8% par des procédés thermiques. 60% de l'eau d'alimentation est de l'eau de

mer, 21,5% de l'eau saumâtre et le reste est de l'eau de surface et les eaux usées. Plus de 66% de l'eau dessalée est utilisée pour les municipalités et 23,5% pour l'industrie. Ces chiffres sont susceptibles de changements rapides vu que le marché de dessalement se développe très rapidement, avec un taux de croissance annuel d'environ 55%.

Donc c'est en considérant tous ces points, que nous pourrions avancer des estimations approximatifs, susceptibles à des variations à tout moment.

Les tableaux suivants mettent en évidence les prix du mètre cube théorique d'eau dessalée ou déminéralisée par différentes techniques avancées par les industriels

La distillation des eaux

| Prix du m ³ théorique (DA) | Température (C°) |
|---------------------------------------|------------------|
| 1505.07 | 15 |
| 1413.85 | 20 |
| 1322.64 | 25 |

L'électrodialyse :

| Prix du m ³ théorique (DA) | Salinité (g/l) | Type d'eau |
|---------------------------------------|----------------|-------------------|
| 45.61– 121.62 | 1 – 10 | Eau saumâtre |
| 228.04 – 380.07 | 10 – 35 | Eau de mer diluée |
| ≥ 380.07 | ≥35 | Eau de mer |

L'osmose inverse :

| Prix du m ³ théorique(DA) | Concentration | Pression nécessaire |
|--------------------------------------|---------------|---------------------|
| ≤ 152.03 | 1 – 10 | Pression faible |
| ≈ 152.03 | 10 – 35 | Pression moyenne |
| ≥ 152.03 | ≥35 | Pression forte |

Figure III.23 : Cout du mètre cube d'eau dessalée ou déminéralisée (Oboulo ; 2010)

Pour notre thème qui porte sur la déminéralisation, on prendra en considération seulement les prix des eaux saumâtres, par conséquent seules les techniques membranaires comptent. Dans les conditions techniques et économiques les plus favorables le cout de l'eau déminéralisée se situe aux environs de : 30.51 – 61.01 DA/m³ dans le cas des eaux saumâtres (Maurel, 2001).

II.3 Choix de la technique la plus convenable

On vient de voir que les techniques de déminéralisation existent, qu'elles sont généralement fiables et qu'elles peuvent apporter une réponse positive à la plupart des problèmes qui se posent.

Un classement de ces différents procédés en fonction des caractéristiques des eaux à traiter est impossible à effectuer, on peut simplement donner quelques indications grossières.

Un récapitulatif de la comparaison technique puis économique va nous permettre d'aboutir au choix le plus adéquat pour notre cas traité qui est une station de déminéralisation au niveau de la ville d'El Oued :

- **Choix technique**

- Lorsque la salinité des eaux à traiter est faible (inférieure à 1 ou 1,5 g/l) et qu'il suffit de se débarrasser d'un ou quelques éléments indésirables pour rendre l'eau potable, on pensera de préférence à des procédés sélectifs tels que les traitements par précipitation chimique, par résines échangeuses d'ions, ou encore les procédés membranaires telles que la MF, la NF et l'UF. Mais cela seulement dans le cas du prétraitement ou du post-traitement selon les caractéristiques de l'eau brute.
- Lorsque la salinité des eaux à traiter est de plusieurs g/l, on pourra envisager des procédés globaux, c'est-à-dire qui éliminent tous les sels, comme l'osmose inverse ou l'électrodialyse, le domaine d'utilisation de ce dernier procédé étant cependant plus restreint. L'un ou l'autre traitement possède ses avantages et ses inconvénients et il conviendra souvent d'envisager les deux possibilités et de n'arrêter un choix qu'après une analyse poussée des caractéristiques des eaux à traiter, des conditions locales et de la qualité de l'eau que l'on souhaite obtenir, L'électrodialyse, qui s'adresse plus spécialement à des eaux dont la salinité est comprise entre 1 et 2,5 g/l, est caractérisée par une consommation d'énergie proportionnelle à la masse de sel éliminée, mais présente l'inconvénient d'avoir une trop grande sensibilité aux variations de salinité de l'eau à traiter.
- Enfin, pour les eaux de mer ou de très forte salinité, les procédés d'évaporation semblent plus rentables car leur consommation d'énergie est indépendante de la teneur en sels. Mais il ne faut pas pour autant les rejeter a priori pour le traitement d'eaux de faible salinité, surtout lorsqu'on envisage d'utiliser les énergies renouvelables (solaire, géothermique ou éolienne) comme source d'énergie.

Par cela on peut conclure que seuls les procédés membranaires (l'osmose inverse et l'électrodialyse) sont présentés comme candidats idéaux pour notre déminéralisation, mais avant de faire un choix définitif qu'en est-il de l'aspect économique ?

- **Choix économique**

Comme nous avons pu constater de la comparaison économique précédente, le cout du mètre cube dépend de plusieurs facteurs qui influent sur la rentabilité de ces techniques, tels que la concentration en sel de l'eau à traiter, le climat des régions où les usines sont installées... Donc il n'est pas évident de donner des chiffres précis.

Toutefois à grande échelle, l'osmose inverse reste la méthode la plus rentable car elle est moins coûteuse que la distillation ou que l'électrodialyse et qu'elle permet de traiter une plus grande quantité d'eau.

En effet la méthode de distillation revient à un coût très élevé : rappelons que le mètre cube d'eau revient environ à 1418.55 DA à une température ambiante de 20°C. C'est en grande partie pour cette raison que 60% des usines de dessalement d'eau par distillation sont situées autour du bassin méditerranéen et en Asie occidentale. La température ambiante dans ces régions étant de 40°C en moyenne, le coût du

dessalement de l'eau est alors déjà considérablement réduit. En ce qui concerne la congélation, cette technique est généralement plus onéreuse que l'évaporation de l'eau : la chaleur nécessaire pour congeler de l'eau est plus coûteuse que celle utilisée pour son évaporation, c'est dans ce cadre-là qu'on n'a même pas traité ce cas.

La méthode d'électrodialyse, quant à elle, est très rentable pour des eaux saumâtres et s'avère être une concurrente pour l'osmose inverse mais elle n'est pas adaptée pour des stations de grandes capacités et revient peu plus cher qu'elle. En effet, il existe plusieurs fournisseurs de membranes d'osmose inverse, ce qui n'est pas le cas pour les membranes d'électrodialyse.

De plus, les éléments d'osmose inverse sont normalisés dimensionnellement. Il est donc possible de changer de fournisseurs. Ce n'est à nouveau pas le cas pour l'électrodialyse.

Donc nous pouvons affirmer que le choix technique et économique concordent fortement, c'est finalement la technique de l'osmose inverse qui s'impose comme la référence pour notre cas de déminéralisation à El Oued. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport aux autres techniques, il a été développé par la NASA pour recycler toute l'eau utilisée par les cosmonautes (hygiène, urines, etc.). C'est surtout parce que cette méthode est moins gourmande en énergie, du fait de la possibilité d'alimenter les usines par des panneaux solaires, et que son implantation est rapide (24 mois pour construire l'usine d'El-Hamma en Egypte), qu'elle est utilisée par plus de 1500 usines sur la planète.

Conclusion

Après avoir vu en détails et analysé chaque procédé de déminéralisation dans ce chapitre, nous pouvons conclure que le procédé d'osmose inverse est le principal moyen de déminéralisation de l'eau saumâtre grâce auquel nous pouvons éliminer les sels, les matières organiques et autres contaminants dissous dans l'eau. Il peut également rejeter les bactéries, les sucres, les protéines, les particules colorants et encore d'autres constituants dont la taille est supérieure à celle des membranes utilisées. L'osmose inverse est également capable d'éliminer sélectivement les cations divalents comme le calcium et le magnésium, qui causent la dureté de l'eau.

En plus de purifier l'eau d'origine naturelle à usage humain, les systèmes d'osmose inverse sont utilisés partout dans le monde pour purifier l'eau destinée aux industries alimentaires et des boissons, dans les hôpitaux et dans l'agriculture pour modifier les sols et dans de nombreuses autres applications

Cette technique utilise l'énergie noble sous forme de travail (énergie de meilleure qualité), malgré le fait que le coût d'exploitation de l'usine soit très élevé, car en plus de l'énergie, les coûts d'exploitation de l'installation comprennent le remplacement des membranes, sauf que le montant reste le plus abordable et le moins couteux par rapport aux autres procédés.

Sans oublier de mentionner que les installations d'OI peuvent être installées partout où il y a un accès à l'eau d'alimentation brute, les usines nécessitent de petits espaces, en plus, elles ont une conception modulaire et peuvent être facilement développées et redimensionnées selon les besoins.

Ces avantages, en plus des progrès incessants de la technologie membranaire, font de l'osmose inverse la technique la plus importante pour déminéraliser de l'eau, ce qui rend ce procédé plus fréquent autour du monde.

Et au vu des critères de notre région d'étude et de la qualité des ressources en eau dont elle dispose, la solution technique et économique retenue pour la production d'eau potable pour la vallée d'El Oued est donc le traitement de l'eau par osmose inverse.



Chapitre IV

***ETUDE DE DIMENSIONNEMENT DE LA
STATION DE DEMINERALISATION***

CHAPITRE IV

Etude de dimensionnement de la station de déminéralisation

Introduction :

Comme on a vu dans le deuxième chapitre, la région d'El Oued souffre d'un stress hydrique chronique à cause de l'aridité de la région et des besoins croissants de la population, par conséquent le seul scénario envisagé pour y remédier a été de recourir à l'exploitation des eaux souterraines et plus récemment des eaux du complexe terminal et du continental intercalaire, vu qu'elles sont considérées comme la seule source, avec un projet en cours de concrétisation ayant pour but le traitement de ces eaux, et ça concerne en premier pas, seulement la ville d'El-Oued, puis va être généralisé, en deuxième étape, sur toute la wilaya.

Les eaux souterraines de cette région présentent une forte salinité, car la composition de ces eaux est reliée à la nature chimique des couches géologiques traversées.

La déminéralisation des eaux saumâtres est un sujet très important actuellement, et l'idée de réaliser des unités de dessalement devient jour après jour une nécessité, car elle permet la satisfaction des besoins des consommateurs en eau potable du côté qualitatif (eau de bonne qualité, douce et agréable) et aussi du côté quantitatif pour faire face à la pénurie.

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, la déminéralisation par osmose inverse a été le procédé le plus avantageux donc celui qu'on a retenu pour la suite de cette étude. Adopter un traitement par OI exige avant tout un prétraitement très poussé de l'eau pour éviter le dépôt de matière en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une réduction des produits d'écoulement. Et un post-traitement pour une éventuelle reminéralisation.

D'une manière générale, les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse dans la plupart des cas sont schématisés sur la figure suivante (Figure IV.1) :

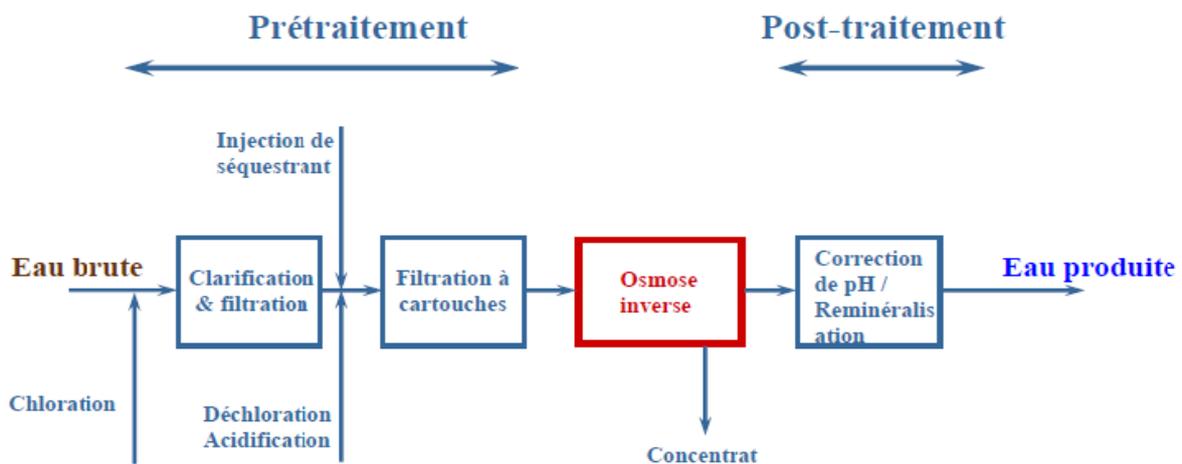


Figure IV.1 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse (culture Sciences-chimie, 2008)

Le présent travail, vise à proposer une configuration adéquate à la station de déminéralisation de notre étude dans la ville d'El Oued en proposant un dimensionnement du système d'osmose inverse ainsi que l'intégrale de la chaîne de traitement.

I. Bases de conception et données nécessaires pour la conception d'une unité de déminéralisation

La mise au point d'un système de dessalement ou de déminéralisation fait appel à des calculs, des paramètres, des méthodes et à du matériel plus au moins complexe, accomplis dans la plupart du temps par des professionnels du domaine hautement qualifiés.

Pour notre étude, la conception de notre système se basera sur les données suivantes :

I.1 Les caractéristiques de l'eau brute : (Mentionnées dans l'annexe tableau I)

- **Potentiel colmatant des particules en suspension :** Ce paramètre peut être évalué à l'aide du test de SDI (Silt Density Index = filtration d'une eau à 0,45 μm et mesure de la baisse de vitesse de filtration due au colmatage du filtre). La mesure de la turbidité et / ou les comptes de particules de l'eau brute peuvent aussi être utilisés pour évaluer ce potentiel.
- **Variation de la température de l'eau :** Cette variation affecte directement et significativement la perméabilité des membranes, ainsi que le taux de rétention.
- **MON – Matière organique naturelle :** Elle est présente naturellement dans l'eau brute, mais sa quantité et sa réactivité diffèrent selon les sources d'eau considérées (lac, rivière, ruisseau, eau souterraine). Elle est principalement le résultat de la dégradation, totale ou partielle, de la faune et la flore entourant et constituant le système aquatique où l'eau brute est puisée. Les MON jouent un rôle important dans la formation des sous-produits de désinfection (SPD). Par ailleurs, les membranes se distinguent les unes des autres par leur taux de rétention de la MON. La nature de la MON varie d'un cours d'eau à l'autre. Cette constatation implique que la caractérisation chimique de la MON doit être faite pour chaque type d'eau et qu'elle peut difficilement être généralisée. La mesure du carbone organique total (COT) et de l'absorbance UV à 254nm permettent de caractériser la MON. En effet, plus le rapport UV / COT augmente et plus la MON est d'origine hydrophobe et donc plus la masse molaire de la MON est élevée, plus le pouvoir colmatant de la MON augmente et plus la fraction coagulable de MON augmente.
- **Alcalinité :** Ce paramètre est particulièrement important quand il y a coagulation avant filtration sur membrane.
- **Conductivité :** Ce paramètre permet d'estimer la pression osmotique et donc la pression minimale à appliquer.
- **Dureté et présence de sel dont la limite de solubilité pourrait être dépassée :** Les sels les plus courants qui risquent de précipiter sont CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , SiO_2 . A cela, il faut ajouter les risques de précipitation des sels de fer, de manganèse et de magnésium.

- **Risques d'événements ponctuels de pollution** : Cette situation peut, par exemple, impliquer l'ajout occasionnel de charbon activé en poudre.

I.2 Les objectifs de traitement :

Cela caractérisera l'objectif fixé par le traitement, en d'autres mots l'aspect quantitatif et qualitatif des eaux traitées.

I.3 Les conditions environnementales :

- **Disponibilité de la ressource en termes de quantité** : Une disponibilité réduite de l'eau brute exigera un taux élevé de récupération
- **Conditions dans lesquelles le rejet contrôlé du concentrât dans l'environnement peut être autorisé.** : Cela va conditionner le taux global de récupération ainsi que le choix des produits chimiques à utiliser.

I.4 Relation entre les conditions d'opération et le colmatage des membranes

Les conditions d'opération peuvent influencer fortement les risques de colmatage des membranes. Elles doivent donc être établies en fonction de la durée de vie ciblée des membranes. Elles vont également influencer le dimensionnement des ouvrages. Des études pilotes peuvent s'avérer nécessaires afin d'optimiser les conditions d'opération.

I.5 Ressources humaines et techniques

Du niveau d'automatisation et d'autonomie des systèmes dépendra la spécialisation du personnel.

La conception d'un système consiste à déterminer les points suivants :

- Le type de membrane avec le type de module.
- Le mode d'opération.
- Le nombre d'unités de traitement.
- Le nombre de modules par unité de traitement et agencement des modules à l'intérieur d'une unité de traitement.
- Le nombre, type et caractéristiques des pompes.
- Les conditions d'opération des modules : pressions ; débits ; taux de récupération ; fréquence, débits et conditions des rétrolavages.
- Le type, caractéristiques et conditions d'opération du prétraitement
- Les procédures de lavage des membranes.
- La procédure de vérification de l'intégrité des membranes.
- Procédure d'hygiène et de sécurité.
- L'estimation de la consommation d'énergie et de produits chimiques.

La plupart de ces points seront déterminés grâce à des méthodes de calculs et tout cela au fur et à mesure pendant chaque étape du traitement des eaux brutes.

II. Chaîne de traitement de la station d'El Oued

La solution proposée à ce jour pour améliorer l'alimentation en eau potable de la ville d'El Oued, est le traitement des eaux prélevées par forages au niveau des nappes souterraines, et la filière préconisée que nous avons établie suite au diagnostic est la suivante :

- 3 forages établis basés sur une étude géologique détaillée des lieux.
- Dosage de l'antiscalant et de l'hypochlorite de calcium
- Refroidissement des eaux brutes.
- Réservoir d'eau brute.
- Pompes d'alimentation des filtres à sable
- 6 Filtres à sable
- Bâche d'eau filtrée
- Pompes d'alimentation basse pression
- Dosage du Méta Bisulfite de sodium et du séquestrant
- 3 filtres à cartouches
- Pompes d'alimentation haute pression
- Unité d'osmose inverse à deux étages.
- Bâche de rejet
- Potabilisation de l'eau par dosage de l'hypochlorite de calcium et de soude et par eau de mélange.
- 2 Réservoirs d'eaux traitées
- Bâche de rinçage et de nettoyage
- Pompes d'évacuation des eaux.

En outre, les unités auxiliaires suivantes sont prévues pour l'exploitation dans les règles de l'art de la station de traitement :

- Poste de rinçage des filtres à sable.
- Poste de nettoyage de membrane.
- Poste de pompage des eaux usées (eau de nettoyage, eau de rinçage, saumure).
- Poste de préparation et de dosage des produits chimiques.
- Poste d'eau de service.

L'usine comprendra également les éléments suivants :

- Les infrastructures de distribution électriques, supervision et automatisme
- Les bâtiments administratifs et techniques parmi eux ceux dédiés au stockage et aux analyses chimiques.
- Les locaux de vie du personnel et le parking.

En ce qui suivra nous traiterons chaque étape de la chaîne de traitement séparément et avec détails :

II.1 Capacité nominale de l'usine

La capacité de production d'eau traitée est prévue à 30 000 m³/j pour contribuer à l'alimentation en eau potable d'une partie de la région d'étude et fournir une eau en quantité et qualité satisfaisante pendant toute la journée.

Vu que le total des pertes estimées tout le long de la chaîne de traitement réparties entre : l'eau saumâtre rejetée, l'eau destinée au nettoyage des post et la somme des fuites est égal à 25% du total d'eau brute pour les stations de moyennes capacités.

Le taux de conversion de la déminéralisation des eaux souterraines est de 70-75%, on aura donc après calcul : 10 000 m³ seront consommées au niveau de la station et 30 000 m³ pour alimenter la population. Donc le besoin en eau brute est de :

$$(40\ 000 \cdot 100)/75 = 53\ 000\ \text{m}^3/\text{j}.$$

Tableau IV.1 : Capacité nominale et apport en eau brute de l'usine

| Capacité de production projetée | Taux de pertes et de rejet | Apport en eau brute |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 30 000 m ³ /j | 23 000 m ³ /j | 53 000 m ³ /j |

II.2 Résultats de l'étude géologique du sol de fondation :

Ces constatations sont établies sur une étude faite par le laboratoire des travaux publics du Sud-Antenne d'El Oued, suite à la demande de la DRE. On peut récapituler les résultats de l'étude comme suit :

- Le site est situé à l'ouest de l'évitement des véhicules des poids lourds, menant d'El Oued à Robah, en face de la nouvelle gare routière de la cité 19 Mars.
- Le terrain a une forme rectangulaire avec des dimensions 200*300 m²
- Il existe dans cette région 4 niveaux d'aquifères : la nappe phréatique (entre 1 et 25m), la nappe du Moi-pliocène (entre 60 et 100m), la nappe du sénonien (entre 100 et 200m), la nappe albienne (entre 1000 et 1700m).
- La lithologie du site a été mise en évidence grâce à 5 sondages carottés figés à vingt-deux mètres de profondeur, elle est régulière et homogène constitué par un sable brunâtre
- On retient des essais de pénétration standard qui ont été effectués sur le dépôt de sable moyen rencontré sur les différents sondages et au niveau des profondeurs 1.5m, 3.0m, 4.5m, 6.0m, et 7.5m, que le dépôt de sable est situé dans un état compact à partir de 1.5m de profondeur.
- Pour les analyses chimiques, les résultats ont révélé que la teneur en sulfates dans le sol est généralement faible variant entre 0.2 et 1.1%
- Pour les essais mécaniques, on a l'essai de cisaillement rectiligne effectué grâce à la boîte de casagrande et on a obtenu les résultats suivants :
 - - L'angle de frottement interne ($\phi = 30$) ; une cohésion nulle ($c=0$)
- Pour l'estimation du tassement, vu la nature géologique des formations constituant le sol de fondation, les tassements seront faibles et se produiront en cours de construction.
- Les capacités portantes du sol de fondation on a les contraintes admissibles moyennes dans le tableau suivant.

Tableau IV.2 : les capacités portantes du sol de fondation

| | | |
|---------------------------------|-----|------------|
| Profondeur (m) | 1.5 | 2.0 |
| Contrainte moyenne du sol (bar) | 1.5 | ≥ 2.5 |

II.3 Les forages

Préalablement, il sera indispensable de réaliser des études portant sur :

- La disponibilité réelle aujourd'hui des forages.
- La faisabilité d'exploiter ces forages par l'usine.
- La répartition géographique des forages
- La qualité respective des aquifères, leur productivité et la configuration des réseaux.

Les forages exploités par notre station seront au nombre de 3 forages et auront les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.3 : Caractéristiques des forages alimentant l'usine

| Nappe exploitée | Profondeur (m) | Nombre de forages | Matériau | Distance par rapport à l'usine (km) | Diamètre normalisé (mm) | Débit d'exploitation (l/s) |
|--------------------------|----------------|-------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Complexe terminal | 250 | 3 | Fonte | 10 | 400 | 613 |

II.4 Le dimensionnement

a. Caractéristiques de l'eau brute

D'après les résultats obtenus des échantillons analysés par SEAAL de notre eau brute et qui sont présentés dans le **tableau (III.3)**, nous remarquons que :

- Le pH de l'eau brute est de l'ordre de 7.21, cette valeur est conforme aux normes de l'OMS (6,5 – 8,5).
- En ce qui concerne la dureté de l'eau totale, elle est estimée à 95 F° alors qu'elle ne devrait pas dépasser le seuil de 50 F°.
- La turbidité est évaluée à 7.3 mg/l, ce qui représente une valeur plutôt élevée en matières en suspension.
- Pour la conductivité électrique, les teneurs sont abordables 2740 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ce chiffre est conforme aux normes de l'OMS (2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$). La mesure de la CE, permet d'évaluer la minéralisation globale à 22°C. Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'eau et sa conductivité, et le tableau de calcul de la minéralisation suivant nous permet de calculer la minéralisation à partir de la conductivité.

Tableau IV.4 : Tableau de calcul de la minéralisation

| Conductivité uS/cm | Minéralisation mg/l |
|--------------------------------|-------------------------|
| Conductivité < 50 uS/cm | 1.365079× conductivité |
| Conductivité [50 à 166] uS/cm | 0.947658 × conductivité |
| Conductivité [166-333] uS/cm | 0.769574 × conductivité |
| Conductivité [333-833] uS/cm | 0.715920 × conductivité |
| Conductivité [833-10000] uS/cm | 0.758544 ×conductivité |
| Conductivité > 10000 uS/cm | 0.850432 × conductivité |

En utilisant la dernière formule, on obtient une eau brute minéralisée à 2330.18 mg/l, cela revient à la teneur élevée en Calcium (220 mg/l), en Sulfates (950 mg/l), en Chlorures (510 mg/l), en Sodium (261), et en Potassium (65.4).

Ce bilan minéral de l'eau brute montre que les valeurs sont supérieures aux normes de l'OMS,

- Pour les teneurs en éléments traces, elles sont très basses et ne comportent donc aucun danger.

Les principaux paramètres à traiter dans cette station sont : Sulfates et calcium, sodium et chlorure, potassium et turbidité donc c'est la salinité en général. Et c'est suivant cette conclusion que nous établirons une chaîne de traitement spécifique.

b. Le prétraitement

Le prétraitement est l'ensemble des opérations de correction effectuées sur l'eau d'alimentation en vue de la rendre compatible avec le bon fonctionnement du système d'osmose inverse de point de vue physique, chimique et bactériologique et la prévention du colmatage.

Le prétraitement peut servir à :

- Éliminer les particules en suspension, les matières organiques, et les micro-organismes.
- Régler le pH pour déplacer les équilibres de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de fer, de manganèse, de calcium, de baryum...) conformément aux

conditions exigées par le matériau de la membrane utilisée dans le système d'osmose inverse.

- Réduire la température.
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel.
- Ajout des antiscalants appelés séquestrant pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes.

Le prétraitement est aussi nécessaire pour éviter la détérioration des pompes, l'incrustation, l'encrassement et la dégradation des membranes d'osmose inverse par les microorganismes. Cette étape comporte deux types :

c. Le prétraitement chimique

Avant de passer à travers les membranes, l'eau est conditionnée à l'aide de différents réactifs, de manière à garantir la meilleure traitabilité. Le contrôle du pH est très important. S'il est trop haut, il y a risque de précipitation des métaux dans la membrane. En fonction des cas, il est également ajouté un antiscalant ainsi qu'un biocide qui permettent d'éviter un bouchage de la membrane.

Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants et de désinfectants.

- Une acidification (acide sulfurique) pour éviter les précipitations du calcium lié aux bicarbonates, et/ou une injection d'un séquestrant pour éviter celles du calcium lié principalement aux sulfates.
- Une injection de chlore pour l'oxydation des micro-organismes, suivie d'une déchloration (injection de bisulfite de sodium) afin de ne pas oxyder les membranes.

Le dosage de l'antitartre doit être effectué avant d'atteindre les membranes d'osmose inverse pour briser les précipités de sulfate, le carbonate de calcium et d'autres salissures minérales. Un produit chimique antitartre est utilisé pour traiter une eau d'alimentation de très mauvaise qualité à des taux de récupération très élevés. Lorsqu'il est utilisé correctement, l'antiscalant prolonge le temps entre les nettoyages de la membrane de quelques semaines à quelques années dans certains cas. Sans l'antiscalant, les systèmes à membranes osmose inverses ne seraient pas aussi efficaces pour l'industrie du traitement de l'eau.

Dans le cas de notre étude les réactifs chimiques ajoutés sont :

- **L'hypochlorite de calcium $\text{Ca}(\text{ClO})_2$** : Cette étape se fait grâce à deux citernes de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ d'une capacité de 140 m³, munie de pompes destinées à injecter l'hypochlorite de calcium au niveau du système de pompage de l'eau brute vers le refroidisseur. L'hypochlorite de calcium utilisé est en granulats à 65%. Pour le dosage, on prépare une solution aqueuse à 5% avec de l'eau de perméat.

- **Le méta bisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$)** : L'utilisation du méta bisulfite de sodium permet d'éliminer le chlore résiduel contenu dans l'eau de mer avant son arrivée aux membranes d'osmose inverse, évitant leur détérioration par oxydation. L'injection de la solution de $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ se fait par l'ensemble des pompes (3+1) avant la filtration à cartouche. Le méta bisulfite de sodium est livré sous forme solide, il est préparé en solution d'environ 25%, la concentration dans l'eau prétraitée devrait être de 15 à 20 mg/l
- **L'antiscalant ou le séquestrant** : Dans un premier temps, le séquestrant est injecté dans la conduite à l'entrée de la station. L'eau est ensuite dirigée vers le refroidisseur, puis récupérée dans une bache d'eau brute. Puis on réinjecte le séquestrant une deuxième fois juste avant l'arrivée des eaux au niveau des filtres à cartouches.

On doit injecter le séquestrant en amont du refroidisseur pour limiter l'effet d'entartrage. Il faut que l'eau soit à une température de 22-32 °.

Par définition, les séquestrants ou les antiscalants sont des produits chimiques synthétiques sous forme de polymères, ou à base de phosphates. Ils sont utilisés au niveau des installations du dessalement par osmose inverse pour renforcer le prétraitement de l'eau brute juste avant d'entamer les modules d'osmose inverse. Grâce aux différents pouvoirs qu'ils peuvent présenter, ces produits sont qualifiés de meilleurs protecteurs des membranes contre l'encrassement et le colmatage. L'utilisation des séquestrants n'a pas d'impact sur la qualité du perméat, et ils ne produisent pas de dioxyde de carbone (CO_2), ce qui évite la corrosion des conduites.

Il est important de respecter les consignes des fournisseurs d'équipement pour ne pas endommager les membranes de manière irréversible.

d. Le prétraitement physique

C'est un traitement destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique, par le passage de l'eau de brute à travers des filtres à sable et anthracite et à travers des filtres à cartouches.

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

La filtration est un procédé utilisant le passage d'un mélange solide liquide à travers un milieu poreux qui retient les solides et laisse passer le liquide.

Dans tous les cas, les installations d'osmose inverse doivent être protégées par une filtration, pour cela nous avons prévu :

- Une filtration sur filtre à sable.
- Une microfiltration sur filtre à cartouches.

a) Filtration à sable

Il existe plusieurs types de filtres à eau suffisamment différents les uns des autres pour que leur étude distincte soit justifiée. Lorsqu'il s'agit de choisir un modèle, il faut nécessairement tenir compte non seulement des avantages et des inconvénients de chacun, mais aussi des conditions locales.

Pour notre cas, on fera d'abord une comparaison entre deux types de filtration : filtration lente sur sable et filtration rapide, puis on procèdera au dimensionnement.

a.1) Comparaison entre la filtration lente et la filtration rapide

Le tableau suivant désigne les avantages et les inconvénients de chaque technique, ce qui nous permettra de faire un choix :

Tableau IV.5 : Avantages et inconvénients entre les techniques de filtration à sable lente et rapide

| Type de filtration à sable | Avantages | Inconvénients |
|----------------------------|---|--|
| Filtration lente | <ul style="list-style-type: none"> • C'est la technologie la moins onéreuse et la plus simple de filtration. • Elle est plus efficace pour le traitement des eaux. • Ses avantages pratiques ont été démontrés sur une longue période, et elle est encore la méthode privilégiée pour la purification de l'eau dans certaines parties du monde. • Le système ne comporte aucun élément mécanique. • Ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques. • Peut être utilisée et implémentée dans des pays en voie de développement • Produit une eau de bonne qualité • Nécessite des maintenances périodiques. | <ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de grandes surfaces et de grandes quantités de médias filtrants. • Les eaux très chargées peuvent colmater rapidement ces filtres. • Les eaux peu chargées en matière organique peuvent limiter l'enlèvement biologique • Limitation dans les pays froids |
| Filtration rapide | <ul style="list-style-type: none"> • Ce type de filtration est utilisé lorsque l'usine doit fournir de grande quantité d'eau ($> 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$), lorsque les terrains sont limités et/ou que le prix des médias filtrant est élevé. • Absence des processus biologiques. • Technologie de choix en Amérique du Nord. • Taux de filtration plus élevés : $120 - 240 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. • Possibilité de l'utiliser pour éliminer les flocs produits directement. • Utilisé dans la majorité des usines. | <ul style="list-style-type: none"> • Le coût de construction de ces bassins limite l'utilisation de ces technologies • Ce type de procédé nécessite préalablement une étape de coagulation/floculation • Pertes de charge considérable. |

En prenant en considération tous ces paramètres, il est à constater que la technique la plus adaptée pour notre cas est la filtration sur sable rapide.

Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation. Ces filtres peuvent être gravitaires ou sous pression, et les bassins en béton ou en acier.

- Filtres sous pression :
 - Bassins sous pression en acier.
 - Typiquement petites installations.
 - Utilisé dans la majorité des usines
- Filtres gravitaires :
 - Doit typiquement surmonter une perte de charge de 2-3mètres.
 - Bassins ouverts.
 - Coût de construction de ces bassins élevé.

a.2) Filtres à sable rapide sous pression

Pour des raisons économiques, nous adopterons la filtration sous pression qui est un procédé destiné à traiter l'eau peroxydée par ajout de produits chimiques en la faisant traverser un milieu filtrant composé de couches successives d'antracite et de sable vert. Ce procédé permet un enlèvement du fer et du manganèse, de la couleur, de la turbidité, des particules en suspension, des bactéries et de certains goûts et odeurs.

Lorsque le milieu filtrant est encrassé, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau, le milieu filtrant est alors en expansion, et les particules d'impuretés beaucoup moins denses que les grains de sable sont décollés vers l'égout à l'aide des gouttelettes de lavage. (*Desjardins .R, 1990*)

L'efficacité d'un filtre est fortement influencée par le mode de régulation de son débit et du taux (vitesse) de filtration. On doit éviter dans la mesure du possible les brusques variations de débit. En ce sens, il est préférable que le filtre opère continuellement à débit réduit plutôt qu'en marche-arrêt fréquents à fort débit.

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

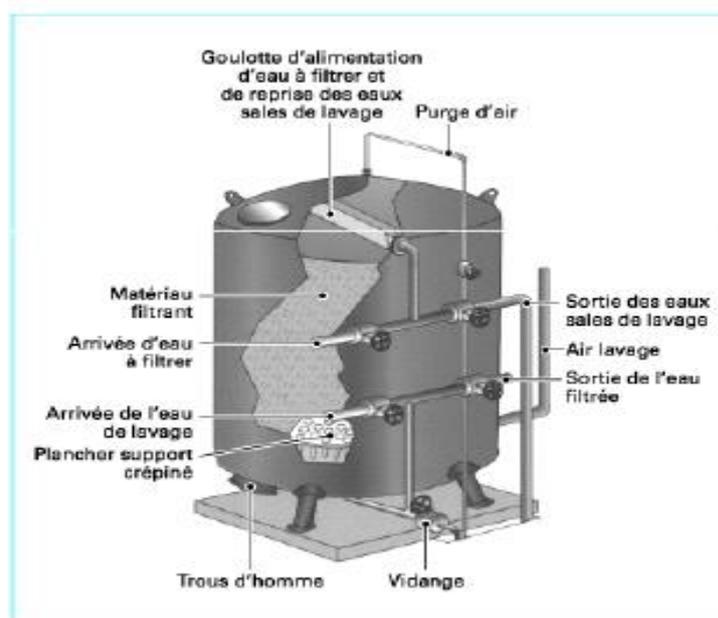


Figure IV.2 : Filtration sous pression (techniques de l'ingénieur, 2000)

Les principaux éléments de filtration à sable rapide sont : **(Desjardins ,1990)**

- **Fond de filtre** : Le fond de filtre est une structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant, il permet en outre :
 - De collecter et d'évacuer les eaux filtrées.
 - De distribuer uniformément l'eau de lavage.
- **Gravier de support** : Le gravier de support, se situe immédiatement au-dessus du fond de filtre, permet :
 - De retenir le sable de milieu filtrant.
 - D'améliorer la réparation de l'eau de lavage dans le filtre.

L'épaisseur et la caractéristique granulométrique de la couche de gravier de support dépendent des caractéristiques du fond de filtre et de celles du milieu filtrant.
- **Milieu filtrant** : Les matériaux filtrants les plus utilisées sont les sables et l'antracite.

a.3) Média filtrant

Le média filtrant représente le lit ou le milieu filtrant, il existe différentes configurations possibles :

- Couche de granulométrie uniforme (sable)
- Bicouche (anthracite + sable)
- Multicouche (Sable + Anthracite + Grenat)

Pour notre cas nous allons apprivoiser le cas d'utilisation le plus typique qui est celui du design de la couche unique, qui se compose soit d'antracite soit de sable pour former une seule couche distincte filtrante.

Tableau IV.6 : Caractéristiques des composantes du média filtrant

| Matériau | Taille effective (mm) | Coefficient d'uniformité | Profondeur (cm) |
|------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| Sable | 0.45 – 1.00 | 1.2 – 1.7 | 50 – 150 |
| Anthracite | 0.5 – 1.5 | 1.2 – 1.7 | 50 – 150 |

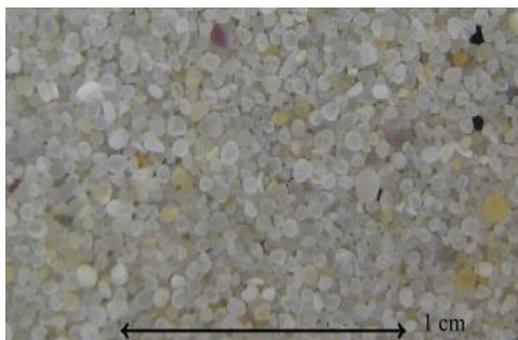


Figure IV.3 : sable et anthracite (Hubert Cabana, 2009)

a.4) Mode de calcul

Tout d’abord nous allons donner les caractéristiques des eaux qui subiront cette filtration à sable, puis nous passerons vers l’étape des calculs :

Tableau IV.7 : caractéristique des eaux préfiltrées

| Origine des eaux | Nombre de pompes | Débit des pompes (l/s) | Pression des pompes (bars) |
|-----------------------|------------------|------------------------|----------------------------|
| Bâche des eaux brutes | 4 (3 + 1) | 147 | 1.8 |

Les données :

- Débit d’eau entrant vers les filtres : **147 l/s** soit **12 700 m³/j**
- La viscosité dynamique du fluide : **1.024.10⁻³ Kg. m-1.s-1**
La masse volumique du fluide : **1032 kg/m³**

Caractéristiques de Filtre à sable : (Guenoun. S et Homci .S, 2003)

- Porosité su sable : $\epsilon_s = 0,45$
- Diamètre des particules du sable : **dps = 0,6 mm**
- La vitesse de passage de l’eau à travers le filtre est de : **V_F = 2 à 15 m/h**
- La hauteur totale du lit filtrant (hauteur standard : **L = 1,5 m**)

Pour avoir un bon rendement de filtration, on prévoit généralement de point de vue hauteur 1/3 de sable et 2/3 de gravier. La vitesse de passage doit être choisie à condition que les pertes de charge dans le filtre soit faible (< **1m**)

- **Pertes de charge** : Le modèle suivant permet de calculer la perte de charge à travers un lit de particule de porosité donnée par la formule suivante (loi d’Ergun) :

$$\frac{\Delta p}{L} = 151.2 \frac{\mu}{d^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} V_f + 1.8 \frac{\rho}{d} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} V_f^2 \dots\dots\dots(IV.1)$$

La perte de charge à travers la couche de sable :

$$\Delta p / L = 5.99.10^{-2} \text{ bars}$$

Et on a : **1 bars** \longrightarrow **10 m**

On trouve :

$$\Delta p / L = 0,599 \text{ m} < 1 \text{ m} \text{ donc c'est une valeur acceptable}$$

- **Le nombre de filtres** :
Pour de petites installation (<90 l/s) le nombre de filtres minimal est de 2, pour les autres on applique la formule suivante :

$$N = 1.2 \times Q^{0.5} \dots \dots \dots (IV.2)$$

N = nombre de filtres

Q= débit journalier max (MGD)

On a : **1 MGD** \longrightarrow **3785 (m3/j)**

Donc on a : **Q = 10.57 MGD**

$$N = 1.2 \times 10.57^{0.5}$$

N = 4 filtres au minimum

Par mesure de sécurité on prend toujours (N = 4 + 2) donc on obtient

N = 6 filtres à sable

- **La surface filtrante Ω :**

$$\Omega = Q_{\text{filtres}} / VF \dots \dots \dots (IV.3)$$

$$\Omega = 12700 / (15 \times 24) = 35.27 \text{ m}^2$$

$$\Omega = 35.27 \text{ m}^2$$

On a N = 06 filtres, d'où la surface d'une filtration sera égale à :

$$S = \Omega / N \dots \dots \dots (IV.4)$$

$$S = 5.87 \text{ m}^2$$

- **Le diamètre :** le diamètre d'un filtre sera égale à :

$$D = \sqrt{S.4/\pi} \dots \dots \dots (IV.5)$$

$$D = 2.73\text{m}$$

D'après les produits normalisés commercialisés nous choisirons les filtres avec les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.8 : Caractéristiques du filtre à sable

| Type du média filtrant | Profondeur du média (cm) | Vitesse de passage (m/h) | Pertes de charges (m) | Nombre de filtres | Surface filtrante (m ²) | Diamètre (m) | Longueur (m) |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
| Uniforme en sable | 150 | 15 | 0.306 | 6 | 35.27 | 2.6 | 10 |

a.5) Rétrolavage des filtres

Les filtres doivent subir un lavage pour une régénération de leur pouvoir filtrant, on applique un rétrolavage lorsque :

- Perte de charge supérieure à la valeur de design ;
- Diminution de la qualité de l'eau (turbidité) ;
- Temps d'opération dépassé.

Le lavage à contre-courant des filtres se fait avec de l'eau ou avec eau + air.

La vitesse de l'écoulement doit être suffisante pour fluidiser le lit. Lors du lavage ascendant à l'eau il y a :

- Expansion du média filtrant (fluidisation) ;

- Séparation des particules (augmentation de l'espace entre les particules et de la porosité du lit).
- Cisaillement au niveau des particules ;
- Les petites particules (initialement retenues) ayant une vitesse terminale de chute libre inférieure sont emportées.
-

On injecte simultanément, par le fond du filtre, de l'air et de l'eau, l'eau entraîne les impuretés vers les gouttelettes de lavage alors que l'air assure un brassage suffisant pour décoller ces impuretés, la charge superficielle (air) doit être supérieure à 5m/h. Signalons qu'il n'est pas nécessaire que le milieu filtrant soit en expansion pour que le lavage soit efficace.

Après l'arrêt des soufflantes, il faut toutefois continuer le lavage à l'eau afin d'entraîner toutes les impuretés vers les goulottes de lavage. La vitesse de l'eau de lavage est alors de 37 m/h ou plus, car seules une vitesse élevée permet de chasser les impuretés vers les goulottes et de reclasser le matériau filtrant. (Desjardins, 1990)

- **Débit d'eau de lavage :**
Typiquement pour un rétrolavage d'un média à granulométrie uniforme monocouche en sable ($d_{10} = 0.5\text{mm}$) on a :
 - Injection d'air $Q = 18\text{-}36 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
 - Rétrolavage à l'eau $Q = 12\text{-}20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- Utilisation simultanée (air + eau)
 - Injection d'air : $Q = 37\text{-}73 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
 - Rétrolavage à l'eau : $Q = 15 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- Pour améliorer le rétrolavage on applique le nettoyage des surfaces
 - Démarrage : **1-3 minute** avant le rétrolavage,
 - arrêt **5-10 minutes** avant la fin.
 - Buses de **2.4 - 3.1 mm** ;
 - Espacées de **5 – 8.6 cm** ;
 - Rotatifs $Q=1.2 – 2.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
 - Fixes $Q=5 – 10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
 - Pression **350 – 520 kPa**
 - Situées à **2.5 – 5 cm** du média filtrants
- **La quantité d'eau de lavage nécessaire :**
La quantité d'eau nécessaire dépend du débit et du temps de rétrolavage nécessaire ; typiquement 4-5% de l'eau traitée quotidiennement est utilisée pour le lavage et le rinçage des filtres.
- **Durée du cycle de lavage :**
La durée du lavage dépend de la qualité de l'eau à traiter, de la nature des floes, de la présence de lavage à l'air, etc. Typiquement, un cycle complet de lavage dure entre 8 et 15 minutes, chaque filtre est nettoyé à toutes les 12-24 heures.

Le tableau suivant met en évidence les détails du nettoyage des filtres :

Tableau IV.9 : Caractéristiques des eaux de lavage

| Origine des eaux de lavage | Nombre des pompes de lavage | Débit des pompes de lavage (l/s) | Pression des eaux de lavage (bars) | Débit du lavage des filtres (l/s) | Salinité des eaux de lavage |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Bâche d'eau filtrée | 2 (1 + 1) | 180 | 1 | 8 | 2116l |

Donc pour ainsi résumer, on a six filtres à sable sous pression qui sont alimentés par pompage, via la bâche d'eau brute. Des variateurs de vitesse seront prévus sur les pompes d'eau brutes pour réguler le débit d'alimentation des filtres à sable. Ces filtres sont lavés à contre-courant avec un pompage d'eau filtrée et de l'air provenant d'un suppresseur. L'eau filtrée est recueillie dans un réservoir d'eau filtrée, ou bâche d'eau prétraitée. Une fraction de cette eau est pompée et utilisée pour le nettoyage des filtres.

b) Filtration à cartouche

Avant son passage sur les membranes d'osmose inverse, l'eau est prétraitée physiquement par une étape de microfiltration. Le traitement chimique par ajout de séquestrant aura eu lieu à l'entrée de la station de traitement pour limiter l'entartrage du refroidisseur puis on en ajoutera encore une fois simultanément avec du Méta Bisulfite de sodium avant l'entrée des filtres à cartouches.

La filtration à cartouches est une microfiltration assurée par des cartouches, dans des réservoirs métalliques en position verticale. Ces filtres sont renouvelés périodiquement après 171 jours d'utilisation.

Dans tous les cas, une installation d'osmose inverse doit être protégée par une filtration de sécurité sur cartouches aux environs de 5 à 10 μm . Son rôle est la protection des pompes à haute pression, contrairement aux filtres à sable et anthracite Ils permettent de stopper les fines particules qui sont passés par les filtres à sable, son rôle est d'éviter le colmatage de membrane d'osmose, ils sont équipés d'indicateur de colmatage, pour lire la différence de pression en amont et en aval du filtre, cette valeur ne doit pas dépasser 1 bar ($\Delta P < 1$ bar), les cartouches sont changeables et non lavables si $\Delta P > 1$.

A l'heure actuelle, la plupart des usines d'osmose inverse utilise un procédé de prétraitement conventionnel qui généralement consiste en un prétraitement physique et chimique sans procédé membranaire.

Avec la baisse constante du prix des éléments membranaires et la dégradation de la qualité des ressources en eau, le prétraitement par procédé membranaire trouve de plus en plus sa place dans les étapes de prétraitement avant osmose inverse.

Il existe deux types de filtre à cartouche : (Guennoun. S et Homci .S, 2003)

- Les cartouches consommables
- Les cartouches régénérables (par nettoyage).

Le tableau suivant montre les caractéristiques des eaux qui subiront la filtration à cartouche.

Tableau IV.10 : Caractéristiques des eaux des filtres à cartouche

| Origine des eaux | Type de pompe | Nombre de pompes | Débit des pompes (l/s) | Pression des pompes (bars) |
|---------------------|----------------|------------------|------------------------|----------------------------|
| Bâche d'eau filtrée | Basse pression | 4 (3 + 1) | 116 | 4 |

Le filtre à cartouche choisi pour notre cas est de type consommable avec les caractéristiques suivantes : (*Oussedik S, 2001*)

- Longueur : $L = 0,79$ m.
- Surface effective de filtration : $S = 0,37$ m³/j.m²
- Vitesse effective de filtration : $V = 235$ m³/j.m²
- Perte de charge : $\Delta P = 2.04. 10^{-3}$ bars.
- Le débit traité grâce à un filtre est de 10 000 m³/j.

- **Calcul du débit par cartouche :**

$$Q_c = S.V \dots \dots \dots (IV.6)$$

$$Q_c = 0,37. 235$$

$$Q_c = \mathbf{86.95 \text{ m}^3/\text{j}}$$

- **Le nombre de cartouches par filtre :**

Sachant que filtre traite 10 000 m³/j d'eau, donc le nombre de cartouches placées par filtre est :

$$N = 10\ 000 / 86.95 = 115$$

$$N = \mathbf{115 \text{ cartouches}}$$

On prend 115 cartouches par filtre. Soit au total 345 cartouches pour trois filtres à cartouches, sachant qu'on comptera un seul filtre à cartouche pour deux filtres à sable rapides.

- **La perte de charge par filtre :**

$$\Delta P = 115. 2.04.10^{-3} = 0.23 \text{ bars}$$

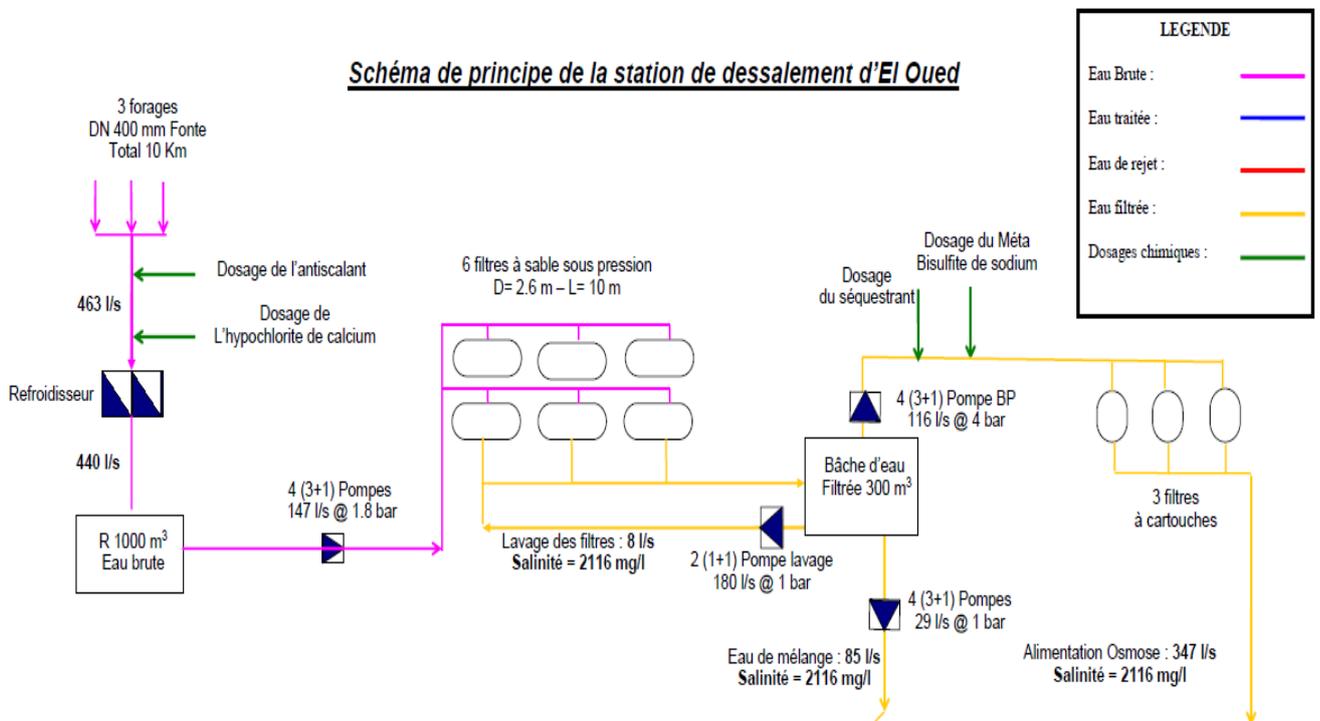
$\Delta P = 2.3m$

Figure IV.4 : Schéma de la chaine de prétraitement de la station de déminéralisation d’El Oued

Le tableau suivant résume les principaux résultats de déminéralisation de la chaine de prétraitement physique.

Tableau IV.11 : Récapitulation de la chaine de prétraitement.

| Ouvrages | Caractéristiques | valeurs |
|---------------------------|---|---------------------------------------|
| Filtre à sable | Nombre de filtres | 06 filtres |
| | Surface filtrante | 35.27 m ² |
| | Surface d’un filtre | 5.87 m ² |
| | Diamètre de filtre | 2.6m |
| | La hauteur totale du lit filtrant | 1.5 m |
| Filtre à cartouche | Nombre de filtres | 03 filtres |
| | Nombre de cartouches placées par filtre | 115 cartouches |
| | Longueur | 0.79 m |
| | Surface effective de filtration | 0,37 m ³ /j.m ² |
| | Débit par cartouche | 86.95 m ³ /j |



e. Unité d’osmose inverse

- Durée de vie des membranes :

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse. En effet, la durée de vie dépend de la nature de la membrane mais aussi des conditions d'utilisation : (*Maurel. A, 2006*)

- Pression de fonctionnement,
- Température de l'eau,
- PH
- Qualité du prétraitement.

Enfin, la notion même de la durée de vie d'une membrane n'est pas très nette. Les performances d'une membrane d'osmose inverse évoluent lentement au cours du temps et en générale on change les membranes lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Mais pour différentes raisons, l'exploitant peut très bien augmenter la durée de vie des membranes en faisant fonctionner l'installation au-delà de ce seuil.

(*Maurel .A, 2006*)

Les principales causes de baisse des performances des membranes :

- Dégradation d'origine mécanique
- Dégradation d'origine chimique (oxydation et / ou hydrolyse)
- Colmatage / fouling

Les différents types de dépôts sont les suivants :

- Bio- fouling
- Colloïdes inorganique
- Composés / silicates
- Dépôts minéraux (hors silice)

La durée de vie des membranes, qui était, il y a quelques années, de 2 à 3 ans, est actuellement supérieure à 5 ans : ce qui se traduit par un taux de renouvellement compris entre 10 et 20% par an.

➤ **Les différents types de montage de l'installation d'OI :**

- **Montage en parallèle :** Dans ce type de montage, tous les modules travaillent dans les mêmes conditions. Ce système est utilisé pour la plupart des unités de faible capacité. Un filtre à cartouche protège à la fois la pompe à haute pression, et les membranes contre l'introduction de matières en suspension, deux manomètres, respectivement situés en amont et en aval des modules, permettent de contrôler en permanence la perte de charge à l'intérieur du système, deux débitmètre (M) sur l'eau traitée et sur le rejet, visualisent la conversion qui est réglée par deux vannes de régulation. (*Guennoun .S et Homci .S, 2003*)
- **Montage série- rejet :** Pour augmenter le taux globale de conversion tout en assurant un balayage efficace de la surface des membranes, on adopte une disposition des modules en séries de telle façon que le rejet de du premier étage alimente les modules du second étage. Une pompe intermédiaire n'est pas nécessaire puisque la pression disponible au rejet du premier étage est très peu différente de la pression d'alimentation du second (2 à 3 bar de la perte de charge).

Un tel système, habituellement appelé montage en « série- rejet » a une conversion de 70% à 90% (série de deux ou trois étages). (*Guennoun. S et Homci .S, 2003*)

- **Montage en série- production :** Pour une raison de production d'eau de très haute qualité, on peut utiliser un traitement à deux étages « série-

production ». La production du premier étage est reprise par un groupe de pompes et traitée une nouvelle fois. (Guennoun .S et Homci .S, 2003)

➤ **Pompe haute-pression :**

Les pompes haute-pression d'alimentation des modules d'osmose inverse destinées à la déminéralisation de l'eau de mer ainsi que les dispositifs de récupération de l'énergie hydraulique du concentrât qui y sont associés, représentent des postes très importants dans la conception des usines de dessalement, tant du point de vue de l'investissement, que de celui de l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement. Les pompes haute-pression des membranes d'osmose doivent permettre d'assurer un débit d'eau à une pression donnée, tout en absorbant le minimum d'énergie. (Corsin & Cedric, 2003)

Dans le cas de notre étude nous allons utiliser quatre pompes haute-pression ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.12 : Caractéristiques des pompes haute-pression

| Type de pompe | Nombre des pompes | Débit des pompes | Pression des pompes |
|----------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Haute-pression | 4 (3 + 1) | 116l/s | 12 bars |

➤ **Dimensionnement et méthode de calculs :**

Pour concevoir le système d'osmose inverse qui permet de produire 22 896 m³/j contenant des solides totaux dissous (TDS) < 1000 ppm à partir d'eau de 3 forages, Contenant 2218.4 ppm de TDS, nous avons choisi le perméateur (Dupont Permazep type B9), qui est le mieux adapté aux eaux saumâtres de la zone et à ce taux de salinité d'eau brute.

Nous proposons un montage en série rejet avec trois lignes à deux étages avec un arrangement 2/1 pour réduire au maximum le débit de production et minimiser débit de rejet.

Ces perméateurs ont un débit de production Q_{w0} établi sous les conditions standards de fonctionnement préconisées par les constructeurs (Audinos .R, 2000)

- Débit spécifique initiale Q_{w0} = 15840 GPD = 11 GPM = 60 m³/j
GPD : gallon par jour et 1 m³/j = 264 GPD
GPM : gallon par min
- Diamètre : 8 inches = 20,32 cm (1 inche = 2,54 cm)
- Conversion : y = 75 %
- Température : T = 25 C°
- Pression de fonctionnement : PF = 400 psi = 27,2 atm
1 psi = 0,068 atmo et 1 atmo = 105 pas
- Concentration de l'eau d'alimentation en (NaCl) : CF0 = 1500 PRR
- Taux de passage de sel : SP0 < 10 %
- La perte de charge moyenne : $\Delta P_{fr0} / 2 = 3 \text{ psi}$

C'est sous conditions que le constructeur a établi les caractéristiques du module B9. Dans notre cas, les conditions de fonctionnement sont différentes des conditions standards par conséquent quelques corrections s'imposent notamment la salinité de l'eau.

En effet le constructeur a utilisé une solution ne contenant que du NaCl, donc il faut qu'on ramène la salinité de notre eau à une salinité équivalente exprimée en ppm NaCl

a) Les facteurs influençant le dimensionnement :

Dans le but de concevoir une installation en utilisant le perméateur B9, il est nécessaire de corriger la capacité ou débit de production du perméateur en tenant compte des conditions de travail.

Le débit initial de production sous les conditions de fonctionnement est donné par :

$$Q_{w0} = k_{wi} (\Delta P_0 - \Delta \Pi_0) \dots\dots\dots (IV.7)$$

Avec :

Q_{w0} : débit initial à travers la membrane

k_{wi} : perméabilité initiale de la membrane

ΔP_0 : différence de pression à travers la membrane

$\Delta \Pi_0$: différence de pression osmotique

$$\Delta P = PFR - Pp \dots\dots\dots (IV.11)$$

$$PFR = PF + PR / 2 = PF_{abs} - \Delta PFR / 2 \dots\dots\dots (IV.8)$$

$$\Delta PFR = PF - PR \dots\dots\dots (IV.9)$$

Où :

PF_{abs} : pression absolue de l'alimentation en (psi)

Pp : pression de l'eau produite en (psi)

PFR : pression moyenne de l'eau dans le module en (psi)

ΔPFR : perte de charge à travers le module

Si on connaît le débit initial Q_{w0} aux conditions standards précitées, il est possible de calculer la perméabilité de la membrane qui à son tour peut être utilisée dans des conditions autre que standard.

$$k_{wi} = Q_{wi} / \Delta P - \Delta \Pi$$

On pose:

$$k'_{wi} = 1 / \Delta P - \Delta \Pi$$

Avec :

k_{wi} : perméabilité initiale de la membrane

k'_{wi} : facteur de pression aux conditions standards en (psi)

La pression osmotique Π peut être calculée à partir de la loi de Van 't Hoff :

$$\Pi = 1,12 (T+273) \Sigma m_i \dots\dots\dots (IV.10)$$

La pression osmotique moyenne entre alimentation et rejet dans l'étage est donnée par

$$\Pi = 0,0385.C. (T+273) / 1000 - (C/1000) \dots\dots\dots (IV.11)$$

Où :

T : température en (°C)

m_i : molalité du soluté i en (moles/1000 gr de H₂O)

C : concentration en (ppm NaCl)

La différence de pression osmotique entre les solutions concentrées par la membrane est prise égale la pression osmotique moyenne entre les deux solutions :

$$\Delta \Pi = \Pi_{FR} = 0.0385 CFR (T+273) / 1000 - (CFR/1000)$$

Avec :

$$CFR = CF+CR / 2 \dots\dots\dots (IV.12)$$

$$CR = CF - CP / 1 - y \dots \dots \dots (IV.13)$$

Si on estime que dans la production $CP = 0$ ($SP < 10\%$)

$$CR = CF / 1 - y$$

Avec :

CF : Concentration en sels dans l'eau d'alimentation en (ppm NaCl)

CR : Concentration en sels dans l'eau de rejet en (ppm NaCl)

Y : Taux de conversion = 0.75

Pour le module B9, aux conditions standards on a : $\Delta PFRO / 2 = 3$ psi

$$\Delta p_0 = PF_0 - (\Delta PFRO / 2) = 400 - 3$$

$$\Delta p_0 = 397 \text{ psi}$$

- **Concentration en sels du rejet :**

$$CR_0 = CF_0 / (1 - y_0) = 1500 / (1 - 0,75)$$

$$CR_0 = 6000 \text{ ppm NaCl}$$

- **Concentration moyenne entre l'alimentation et rejet :**

$$CF_0 = (CF_0 + CR_0) / 2 = (1500 + 6000) / 2$$

$$CF_0 = 3750 \text{ ppm NaCl}$$

Donc on obtient :

$$\Delta \Pi = \Pi FR = (0,0385 \cdot CFR_0 (T+273)) / (1000 - (CFR_0 / 1000))$$

$$= (0,0385 \cdot 3750(25+273)) / (1000 - (3750/1000))$$

$$K'_{wio} = 1 / (\Delta P - \Delta \Pi_0) = 1 / (397 - 43,19)$$

$$\Delta \Pi_0 = 43,19 \text{ psi}$$

$$K'_{wio} = 0,00283 \text{ psi}^{-1}$$

En utilisant $k'_{wio} = 0,00283 \text{ psi}^{-1}$, il nous sera possible de calculer le facteur de correction de la production des modules :

$$PCF = k'_{wio} (\Delta P - \Delta \Pi) = k'_{wio} (\Delta P - \Delta \Pi FR) \dots \dots \dots (IV.14)$$

Avec :

$$\Delta P = PF - \Delta PFR / 2$$

Donc la relation de PCF devient :

$$PCF = k'_{wio} (PF - \Delta PFR / 2 - \Pi FR) C$$

Un autre facteur peut entrer en compte, il s'agit du coefficient de rétention de l'eau au niveau de la membrane (**MFRC**), il varie linéairement avec la pression pour une durée de vie donnée (voir l'annexe).

Un dernier facteur correctif du débit de production est dû à l'effet de la température sur la productivité du perméateur (**TCF**), il est défini par :

$$TCF = (1.03)^{(T-25)} \dots \dots \dots (IV.15)$$

Avec :

TCF : facteur de correction du débit de production

Q_w (T) : débit de l'eau à la température ambiante

Q_w (25°C) : débit de l'eau à 25°C

D’où le débit corrigé :

$$QF = Q_{wio} \cdot PCF \cdot TCF \cdot MFRC \dots \dots \dots (IV.16)$$

• **Emplacement des perméateurs B9 dans l’installation :**

La plus grande performance est obtenue quand le flux traversant un paquet de perméateurs est suffisant pour maintenir une bonne distribution.

La pression d’alimentation au deuxième étage est plus faible que celle du premier étage du fait de la perte de charge à travers les perméateurs et différents raccords.

$$PF2 = PF1 - \Delta PFR1 / 2 - \Delta PBAL$$

Pour les perméateurs **B9** en utilisant les raccords en nylon ($\Delta PBAL = 35$ psi)

b) Calcul de la molalité :

La molalité est déterminée par la relation suivante :

$$mi = Ci * 1000 / [Mi (10^6 - TDS)] \dots \dots \dots (IV.17)$$

Ci : Concentration de l’élément i (mg/l)

Mi : masse molaire de l’élément (g/mol)

TDS= Σ Ci : total des sels dissous (mg/l)

Avec cette relation on peut calculer la molalité de chaque constituant, et déduire la molalité totale, en faisant la somme des molalités de tous les constituants.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau IV.13 : La molalité moyenne des composants.

| Composant | Masse molaire (g/mol) | Concentration (mg/l) | Molalité (mol/1000 gr d’eau) |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| Ca ⁺² | 40 | 220 | 0.0055 |
| Mg ⁺² | 24 | 95 | 0.0040 |
| Na ⁺ | 23 | 261 | 0.0041 |
| K ⁺ | 39 | 65.4 | 0.0017 |
| HCO ₃ ⁻ | 61 | 170 | 0.0028 |
| SO ₄ ²⁻ | 96 | 950 | 0.0099 |
| Cl ⁻ | 35.5 | 510 | 0.014 |
| Σ | | 2118.4 | 0.042 |

$$M_T = 0.042 \text{ mol/1000 gr d’eau}$$

c) Calcul de la concentration de l’eau d’alimentation en ppm NaCl :

Par l’égalité entre les deux équations A et B représentés ci-dessous on peut déterminer la concentration de l’eau d’alimentation en ppm NaCl.

$$\Pi = 1,12 (T+273) \text{ mT} \dots\dots\dots (A)$$

$$\Pi = 0,0385CF (T+273) / (1000-(CF/1000)) \dots\dots\dots (B)$$

$$(A) = (B) \rightarrow CF = 1,12 \text{ mT} \cdot 10^6 / (38,5 + 1,12 \text{ mT})$$

Application :

$$CF = 1,12 \cdot 0,042 \cdot 10^6 / (38,5 + 1,12 \cdot 0,042)$$

$$CF = 1220,33 \text{ ppm NaCl.}$$

d) Calcul de nombre de perméateurs :

Nous admettons deux étages avec une conversion totale de 75% pour élever le débit de production. La perte de charge moyenne : $\Delta PFR = 6 \text{ psi}$; $\Delta PFR/2 = 3 \text{ psi}$, par module ou perméateur.

Étage 1 :

- **Concentration de l'eau d'alimentation :**

$$CF1 = 120.33 \text{ ppm NaCl} \quad y1 = 50\%$$

- **Concentration en sel du rejet :**

$$CR1 = CF1 / (1 - y1)$$

A.N :

$$CR1 = 1220.33 / (1 - 0,5)$$

$$CR1 = 2440.66 \text{ ppm NaCl}$$

- **Concentration moyenne en sel entre l'alimentation et le rejet :**

$$CFR1 = (CF1 + CR1) / 2$$

A.N:

$$CFR1 = (1220.33 + 2440.66) / 2$$

$$CFR1 = 1780.5 \text{ ppm NaCl}$$

- **Pression osmotique de l'alimentation :**

$$PPF1 = 8,308 \cdot 0,9 \cdot (T+273) \text{ mt}$$

$$= 8,308 \cdot 0,9 \cdot (21 + 273) \cdot 0,042$$

$$PPF1 = 93.58 \text{ kpa}$$

- **Pression osmotique de production :**

$$PPP1 = 0,01 PPF1 = 0,01 \cdot 93,58 = 0,94 \text{ kpa}$$

$$PPP1 = 0,94 \text{ kpa}$$

- **Pression osmotique moyenne entre l'alimentation et le rejet :**

$$PPFR1 = (0,0385 CFR1 (T+273)) / (1000 - (CFR1 / 1000))$$

$$= (0,0385 \cdot 1780,5 \cdot (21+273)) / (1000 - (1780,5/1000))$$

$$PPFR1 = 20,46 \text{ psi}$$

- **Facteur de correction de la production :**

$$PCF1 = k' w_{io} (PF0 - (\Delta PFR0/2) - PPFR1) = 0,00283(400 - 3 - 20,46)$$

$$PCF1 = 1.07$$

- **Facture de correction du flux de rétention de la membrane :**

$$MFRC1 = 0,836 \text{ à } 400 \text{ psi, } 21 \text{ C}^\circ \text{ et } 3 \text{ ans la durée de vie de la membrane.}$$

(Voir l'annexe)

- **Facture de correction de température :**

$$TCF = (1,03)^{(T-25)} = (1,03)^{(21-25)}$$

$$TCF = 0,888$$

- **Débit de production :**

$$QP1 = PCF1 \cdot TCF \cdot MFRC1 \cdot Q_{wio} = 1,07 \cdot 0,888 \cdot 0,836 \cdot 11$$

$$QP1 = 8.73 \text{ GPM}$$

- **Débit d'alimentation :**

$$QF1 = QP1 / y1 = 8.73 / 0,5$$

$$QF1 = 17.47 \text{ GPM}$$

- **Débit de rejet :**

$$QR1 = QF1 - QP1 = 17.47 - 8.73$$

$$QR1 = 8.75 \text{ GPM}$$

- **Débit moyen entre l'alimentation et le rejet :**

$$QFR1 = (QF1 + QR1) / 2 = (8.75 + 17.47) / 2$$

$$QFR1 = 13.11 \text{ GPM}$$

- **Facteur de correction du passage de sels :**

$$SPCF1 = CF0.CFR1/PCF1.CF1.CFR0$$

$$= 1500.1780,5 / 1,07.1120,33.3750$$

$$SPCF1 = 0,55$$

- **Taux de passage de sels :**

$$SP1 = SP0.SPCF1 = 0,10,55$$

$$SP1 = 0,055 = 5.5 \%$$

- **Les solides totaux dissous :**

$$TDSP1 = TDS.SP1 = 2118,4.0,055$$

$$TDSP1 = 116.51 \text{ mg/l}$$

- **Les solides totaux dissous de rejet :**

$$TDSR1 = (1 - SP1).TDS0 = (1 - 0,055).2118,4$$

$$TDSR1 = 2001.89 \text{ mg/l}$$

- **Perte de charge à travers perméateur :**

On a $QFR1 = 13.11 \text{ GPM}$, en projetant cette valeur sur la courbe (voir l'annexe), on trouve la valeur de la perte de charge à travers le perméateur $\Delta PFR1$.

$$\Delta PFR1 = 8 \text{ psi}$$

Étage 2 :

- **Concentration de l'eau d'alimentation :**

$$CF2 = CR1 = 2240.66 \text{ ppm NaCl} \quad y2 = 50 \%$$

- **Pression d'alimentation :**

$$PF2 = PF1 - \Delta PFR1 / 2 - \Delta PBAL$$

$$= 400 - 4 - 35$$

$$PF2 = 361 \text{ psi}$$

- **Concentration en sels du rejet :**

$$CR2 = CF2 / (1 - y2) = 2240.66 / (1 - 0,5)$$

$$CR2 = 4881.32 \text{ ppm NaCl}$$

- **Concentration moyenne en sels entre l'alimentation et le rejet :**

$$CFR2 = (CF2 + CR2) / 2 = (2240.66 + 4881.32) / 2$$

$$CFR2 = 3660.99 \text{ ppm NaCl}$$

- **Pression osmotique a l'alimentation :**

$$PPF2 = 8,308.0,9 (T+273).m2$$

Avec :

$$m2 = SP1.m1 = 0,055.0,042$$

$$m2 = 0,0023 \text{ mol/1000gr d'eau}$$

$$PPF2 = 8,308.0,9 (21 + 273).0,0023$$

$$PPF2 = 5.1 \text{ kpa}$$

- **Pression osmotique de production :**

$$PPP2 = 0,01.PPF2 = 0,01.5,1$$

$$\text{PPP2} = 0,051 \text{ kpa}$$

- **Pression osmotique moyenne entre l'alimentation et le rejet :**

$$\text{PPFR2} = (0,0385\text{CFR2}(T+273)) / (1000-(\text{CFR2} / 1000))$$

$$= (0,0385 \cdot 3660,99 \cdot (21+273)) / (1000-(3660,99 / 1000))$$
PPFR2 = 41, 59 psi
- **Facture de correction de la production :**

$$\text{PCF2} = k'_{\text{wio}} (\text{PF1} - (\Delta\text{PFR1} / 2) - \text{PPFR2})$$

$$= 0,00283(361 - (8 / 2) - 41,59)$$
PCF2 = 0,75
- **Facture de correction du flux de rétention de la membrane :**
 MFRC2 = 0,836 à 357 psi, 21 C° et 3 ans la durée de vie de la membrane
- **Débit de production :**

$$\text{QP2} = \text{PCF2} \cdot \text{TCF} \cdot \text{MFRC2} \cdot \text{Q}_{\text{wio}} = 0,75 \cdot 0,888 \cdot 0,836 \cdot 11$$
QP2 = 6.13 GPM
- **Débit de d'alimentation :**

$$\text{QF2} = \text{QP2} / y_2 = 6,13 / 0,5$$
QF2 = 12.26 GPM
- **Débit de rejet :**

$$\text{QR2} = \text{QF2} - \text{QP2} = 12,26 - 6,13$$
QR2 = 6.13 GPM
- **Débit moyen entre l'alimentation et le rejet :**

$$\text{QFR2} = (\text{QF2} + \text{QR2}) / 2 = (12,26+6,13)/2$$
QFR2 = 9.20 GPM
- **Facteur de correction du passage de sels :**

$$\text{SPCF2} = \text{CF0} \cdot \text{CFR2} / \text{PCF2} \cdot \text{CF2} \cdot \text{CFR0}$$

$$= 1500 \cdot 3660,99 / 0,75 \cdot 2440,66 \cdot 3750$$
SPCF2 = 0,8
- **Taux de passage de sels :**

$$\text{SP2} = \text{SP0} \cdot \text{SPCF2} = 0,1 \cdot 0,8$$
SP2 = 0,080 = 8%
- **Les solides totaux dissous :**

$$\text{TDSP2} = \text{TDSP1} \cdot \text{SP2} = 116,51 \cdot 0,080$$
TDSP2 = 9.32 mg/l
- **Les solides totaux dissous de rejet :**

$$\text{TDSR2} = \text{TDSP1} \cdot (1 - \text{SP2}) = 116,51 \cdot (1-0,080)$$
TDSR2 = 107.19 mg/l
- **Perte de charge à travers perméateur :**
 On a QFR2 = 9.20 GPM, on tire ΔPFR2
ΔPFR2 = 7psi

e) **Calcul des conversions :**

Nous nous sommes intéressées dans cette section à étudier l'arrangement 2/1, pour la détermination du taux de conversion globale et du débit de la production totale.

- **Calcul de l'arrangement 2/1 :**
 Etage1 : 2QP1= 2.8, 73 = **17.46 GPM**
 Etage2 : 1QP2= 1.6, 13 = **6.13 GPM**
 Donc : QPT = 17.46 + 6.13
QPT = 23.59 GPM
 Soit une alimentation : QFT = QPT / yT= 23.59/ 75 %

$y_T = 75 \%$

QFT = 31.45 GPM

$Y_1 = (17.46/31.45).100 = 0,5551 \rightarrow y_1 = 55,51 \%$

$Y_2 = (6.13/ (31.45-17.46)).100 = 0,4382 \rightarrow y_2 = 43,82 \%$

- **Calcul corrigé des capacités en utilisant les nouvelles conversions :**
Tous les résultats des valeurs recalculées sont résumés dans le tableau suivant

Tableau IV.14 : valeurs des capacités recalculées avec les nouvelles conversions

| | Etage 01 | Etage 02 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| C_F | 1220.33 | 2742.93 |
| C_R | 2742.93 | 4882.40 |
| C_{FR} | 1981.63 | 3812.66 |
| PPFR | 22.78 | 43.32 |
| PCF | 1.0 | 0.89 |
| MFRC | 0.836 | 0.836 |
| Q_P | 8.65 | 7.26 |
| Q_F | 15.58 | 16.60 |
| Q_R | 693 | 9.31 |
| Q_{FR} | 11.25 | 12.96 |
| SPCF | 0.61 | 0.62 |
| S_P | 0.061 | 0.062 |
| TDSP | 129.80 | 8.05 |
| TDSR | 1989.18 | 121.75 |
| ΔPFR | 7 | 8 |

- **Calcul des nouvelles conversions :**
Etage 1 : $3.QP1 = 2*8.65 = 17.3 \text{ GPM}$
Etage 2 : $2.QP2 = 1*7.26 = 7.26 \text{ GPM}$

Donc : **QPT = 24.56 GPM**

Soit une alimentation :

$QFT = QPT / y_T \quad Y_T = 75 \%$

QFT = 32.75 GPM

$y_1 = (17.3 / 32.75).100 = 52.83 \neq 55.51 \rightarrow \Delta y_1 = 2.7 \% < 5\%$

$y_2 = (7.26 / (32.75-17.3)).100 = 46.99 \neq 43.82 \rightarrow \Delta y_2 = 3.2 \% < 5\%$

Ces résultats sont en bon accord avec les premiers.

$Q_{sp} = Q_{pt} / 2 + 1 = 24.56/3$

$Q_{sp} = 8.19 \text{ GPM / perméateur.}$

Qsp = 44.65 m3/j

- **Calcul du nombre des perméateurs total de l'installation :**
 $NT = QWT / QSP \dots \dots \dots (IV.18)$

$QWT = 22896 \text{ m3/j}$

D'où : $NT = 22896/44.65 = 512 \text{ perméateurs}$

- **Calcul du nombre de perméateurs dans chaque ligne :**

Le calcul ce fait comme suite :

$$N = NT / 2 = 512 / 3 = \mathbf{171 \text{ perméateurs.}}$$

Calcul de la disposition par étage :

$$\text{Étage 1 : } 171.2 / 3 = 114 \text{ perm}$$

$$\text{Étage 2 : } 171 / 3 = 29 = 57 \text{ perm}$$

- **Calcul du débit de production :**

Donc le débit de production d'une ligne devient :

$$QPT = 44.65 (114 + 57) 3$$

$$\mathbf{QPT = 22905.45 \text{ m}^3/\text{j}}$$

- **Calcul de débit de rejet :**

$$QRT = Q_F - Q_{PT}$$

$$\mathbf{QRT = 7594.48 \text{ m}^3/\text{j}}$$

- **Calcul de conversion total :**

$$Y_T = QPT / (QPT + QRT)$$

$$= (22905.45 / (22905.45 + 7594.48)) .100$$

$$\mathbf{YT = 75.1 \%}$$

f) Calcul de la qualité de l'eau produite

Nous raisonnons sur le perméateur B9 dont le taux de passage des sels à travers la membrane (SP) est inférieur à 10%, sous les conditions standards de fonctionnement.

Le calcul de la concentration en sels se fera par la méthode suivante :

Exemple de calcul :

[Ca+2] F = 220 mg/l à l'état initial

$$SP1 = 0,061 = 6,1 \% \quad y1 = 52,83 \%$$

$$SP2 = 0,062 = 6,2 \% \quad y2 = 46,99\%$$

Etage 1 :

- **Concentration de l'eau produite :**

$$[Ca+2]P1 = SP1. [Ca+2]F1 = 0,061.220$$

$$[Ca+2]P1 = 13.64 \text{ ppm}$$

- **Concentration du l'eau de rejet :**

$$[Ca+2]R1 = ([Ca+2] F1 - y1 [Ca+2] P1) / (1-y1)$$

$$= (220 - (0,5283.13.64)) / (1-0,5283)$$

$$\mathbf{[Ca+2]R1 = 451.12 \text{ ppm}}$$

Etage 2 :

- **Concentration de l'eau produite :**

$$[Ca+2]P2 = SP2. [Ca+2]R1 = 0,062.451, 12$$

$$[Ca+2]P2 = 27.52 \text{ ppm}$$

- **Concentration du l'eau de rejet :**

$$[Ca+2]R2 = ([Ca+2] R1 - y2 [Ca+2] P2) / (1-y2)$$

$$= (451, 12 - (0,4699.27, 52)) / (1-0.4699)$$

$$\mathbf{[Ca+2]R2 = 8226.62 \text{ ppm}}$$

- **Calcul de la concentration moyenne :**

$$[Ca+2] \text{ moy} = QP1. [Ca+2] P1 + Q P2. [Ca+2] P2 + Q P3. [Ca+2]P3 / QPT$$

$$[Ca+2] \text{ moy} = 17, 3.13.64 + 7, 26.27, 52 / 24.56$$

$$\mathbf{[Ca+2] \text{ moy} = 17.74 \text{ ppm}}$$

Remarque :

Suivant la même méthode on fait les calculs pour le reste des concentrations des éléments présents, le tableau suivant présente les différents résultats trouvés

Tableau IVI.15 : Calcul de la concentration de l'eau osmosée

| Eléments | Etage 01 | | | | | Etage 02 | | | | Concentration moyenne (mg/l) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | C _{F1} (mg/l) | Sp ₁ | Y ₁ | C _{P1} (mg/l) | C _{R1} (mg/l) | Sp ₂ | Y ₂ | C _{P2} (mg/l) | C _{R2} (mg/l) | |
| Ca ⁺² | 220 | 0.061 | 0.5283 | 13.64 | 451.12 | 0.062 | 0.4699 | 27.52 | 826.62 | 17.74 |
| Mg ⁺² | 95 | | | 5.80 | 194.91 | | | 12.08 | 355.97 | 12.90 |
| Na ⁺ | 261 | | | 15.92 | 535.49 | | | 33.2 | 982.62 | 21.03 |
| K ⁺ | 65.4 | | | 3.99 | 134.18 | | | 8.92 | 245.75 | 5.27 |
| HCO ₃ ⁻ | 170 | | | 10.37 | 348.78 | | | 21.62 | 68.72 | 13.7 |
| SO ₄ ²⁻ | 950 | | | 57.95 | 1949.09 | | | 120.84 | 356.97 | 76.54 |
| Cl ⁻ | 510 | | | 31.11 | 1046.35 | | | 64.87 | 91.37 | 41.09 |

Le tableau suivant résume les principaux résultats de calculs de l'installation d'osmose inverse.

Tableau IVI.16 : Résultats de calculs de l'installation d'osmose inverse.

| Etage | Y (%) | Nombre de perméateurs par ligne | Q _p (m ³ /j) | Nombre total | Y _T (%) | Q _{PT} (m ³ /j) | Somme des C _{moy} (mg/l) |
|-------|-------|---------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | 52.83 | 144 | 15270.31 | 171 | 75.1 | 22905.45 | 188.25 |
| 02 | 46.77 | 57 | 7635.15 | | | | |

f. Le Post-traitement

A la fin du procès de l'osmose inverse, l'eau osmotique produite par les usines appelée perméat est caractérisée par une teneur faible en minéraux, dureté, alcalinité, et pH. Par conséquent, elle doit être conditionnée et reminéralisée avant sa distribution pour l'usage.

Les principaux objectifs de reminéralisation sont :

- La protection du système de distribution de l'eau contre la corrosion ;
- satisfaire les besoins diététiques humains
- faciliter d'autres utilisations potentielles de l'eau dessalée telles que l'irrigation.

➤ **Définition de la reminéralisation**

Des produits chimiques contenant le calcium, tels que la chaux, la calcite, l'hypochlorite de calcium ou le calcium et le magnésium tels que la dolomite sont typiquement ajoutés à l'eau dessalée dans un dosage de 60 à 120 mg/l (comme CaCO₃) pour la commande et le contrôle de corrosion du système de distribution de l'eau ainsi que la protection de la santé publique.

Ces produits chimiques produisent le carbonate de calcium ou une combinaison de carbonate de calcium et de magnésium dans l'eau dessalée qui, se précipitent en quantités proportionnées sur la surface intérieure de pipe de distribution pour former le film protecteur qui sert de barrière physique empêchant la corrosion (*Nikolay, 2011*).

➤ **Technologies de la reminéralisation**

La reminéralisation de l'eau déminéralisée est typiquement accomplie par trois groupes principaux de technologies, qui sont : reminéralisation chimique, mélange de l'eau dessalée à une eau de source riche en minerais, et par dissolution des minerais naturels.

- **La reminéralisation chimique :** Processus qui sont basés sur l'addition directe des produits chimiques contenant du calcium ou du magnésium.
- **Reminéralisation par mélange aux minerais d'une eau de source :** Cette technique de reminéralisation est réalisée par le mélange de l'eau dessalée à une partie de l'eau de source utilisée pour le dessalement, ou avec d'autres sources d'eau douce.

Cette pratique est fréquemment employée dans les usines de dessalement des eaux saumâtres par l'osmose inverse et les usines thermiques de dessalement.

- **Reminéralisation par dissolution des minerais naturels dans l'eau dessalée :** Soit par addition de calcium qui est une pierre à chaux (calcite) c'est-à-dire un minéral naturel composée essentiellement de carbonate de calcium. Soit par addition de dolomite [CaMg(CO₃)₂], qui est un minéral naturel qui contient le carbonate de calcium et de magnésium.

➤ **Reminéralisation des eaux osmosées de notre étude**

La salinité de l'eau produite est faible (188.25 ppm) cette eau n'est pas recommandée à la consommation humaine, étant donné qu'elle ne satisfait pas les standards de qualité concernant l'eau potable. Pour cette raison-là, une partie des sels dissous éliminés doivent être restitués. Donc on est dans l'obligation de faire quelques améliorations, pour obtenir l'eau souhaitable (500 ppm).

Principalement, comme on l'a déjà cité, cette reminéralisation peut être mise en œuvre de deux façons différentes :

- À partir d'un ajout de sels (chaux, carbonate de calcium, etc.) à l'eau osmosée
- En mélangeant une partie de l'eau prétraitée avec l'eau osmosée

La deuxième méthode est beaucoup plus simple et plus conseillée pour des eaux d'apport à faible salinité (telles que celles de notre étude). Toutefois une chloration (ajout de l'hypochlorite de calcium) et un rééquilibrage du Ph (ajout de la soude) restent nécessaires.

Selon ce qui a pu être observé au bilan de masse fourni, en mélangeant approximativement 25 % de l'eau prétraitée à 75 % de l'eau osmosée, le mélange résultant satisfait alors la qualité exigée à la consommation humaine. C'est pour cette raison-ci qu'une étape de reminéralisation de l'eau à partir d'un dosage de chaux n'est pas nécessaire.

En éliminant le dosage de chaux, nous obtenons les avantages suivants :

- Élimination des coûts de l'installation de dosage de chaux
- Élimination des coûts de chaux
- Élimination des problèmes dérivés du maintien de l'installation (tamponnade des équipements, encrassement de l'installation, etc.)

Afin d'obtenir ce mélange, nous proposons l'installation de 4 (3+1) pompes d'impulsion d'eau depuis le réservoir d'eau filtrée jusqu'à l'entrée du réservoir d'eau traitée, avec un dosage de soude et d'hypochlorite de calcium.

Les pompes doivent être installées avec un variateur de fréquence, ainsi que des débitmètres électromagnétiques sur la ligne de mélange, en faisant en sorte que le mélange puisse se réaliser automatiquement et de façon proportionnelle à la mesure de conductivité du réservoir d'eau traitée.

g. Stockage et impulsion de l'eau produite et de rejet

- **L'eau traitée** : Ce système a pour objet de pomper l'eau produite vers le réseau de distribution à travers le réseau de transport d'eau externe géré par l'algérienne des eaux. Le système d'impulsion et de stockage d'eau produite est composé de :
 - Réservoir d'eau reminéralisée.
 - Système de pompage d'eau reminéralisée.
 - Regard de livraison.

Après l'étape de la reminéralisation l'eau est stockée dans deux réservoirs en béton armé, avec une capacité de stockage de 5000 m³ chacun. Une quantité de 30 000m³/j d'eau traitée est pompée à l'aide de plusieurs pompes en deux lignes, afin d'être distribuée par l'ADE, alimentant les châteaux d'eau existants, situés en proximité.

Le tableau suivant détermine les caractéristiques du système de pompage mis en place :

Tableau IV.17 : caractéristiques du système de pompage à la sortie de la station

| Couloir | Nombre de pompes | Débit | Pression |
|---------|------------------|--------|----------|
| 01 | 4 (3 + 1) | 77 l/s | 4 bars |
| 02 | 3 (2 + 1) | 67 l/s | 4 bars |

- **L'eau de rejet**
Les chaînes de traitement utilisant des membranes produisent différents types de rejets :
 - Concentrât ;
 - Eaux de rinçage ;
 - Eaux de lavage.

Le concentrât est rejeté en continu pendant la production. Le débit et la composition du concentrât sont liés aux taux globaux de récupération et de séparation. Le taux de récupération étant, en général, supérieur ou égal à 75%, le débit de concentrât correspond au maximum à 25% du débit d'alimentation. Les eaux de rinçage et de lavage sont rejetées de manière discontinue. Lorsque la chaîne de traitement comprend un ou des ajouts de produits chimiques dans l'eau brute (coagulant, oxydant, acide, agent antitartre, etc.), les rejets des membranes contiennent en plus des substances présentes dans l'eau brute, les produits injectés pour traiter l'eau. Les eaux de rejet ou saumure résultants de l'unité d'osmose inverse seront d'abord collectées dans une bache de rejet de 250 m³, puis pompées et évacuées par un émissaire d'adduction en PEHD de 315mm de diamètre au long de 15 km jusqu'à l'exutoire à la sortie de la STEP de Kouinine.

Tableau IV.18 : Caractéristiques du système de rejet de la saumure

| Nombre de pompes | Débit | Pression | Type de conduite | Longueur de la conduite | Diamètre de la conduite | Exutoire |
|-------------------------|--------------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 4 (3 + 1) | 29 l/s | 4 bars | PEHD | 15 km | 315 mm | Sotie à la STEP de Kouinine |

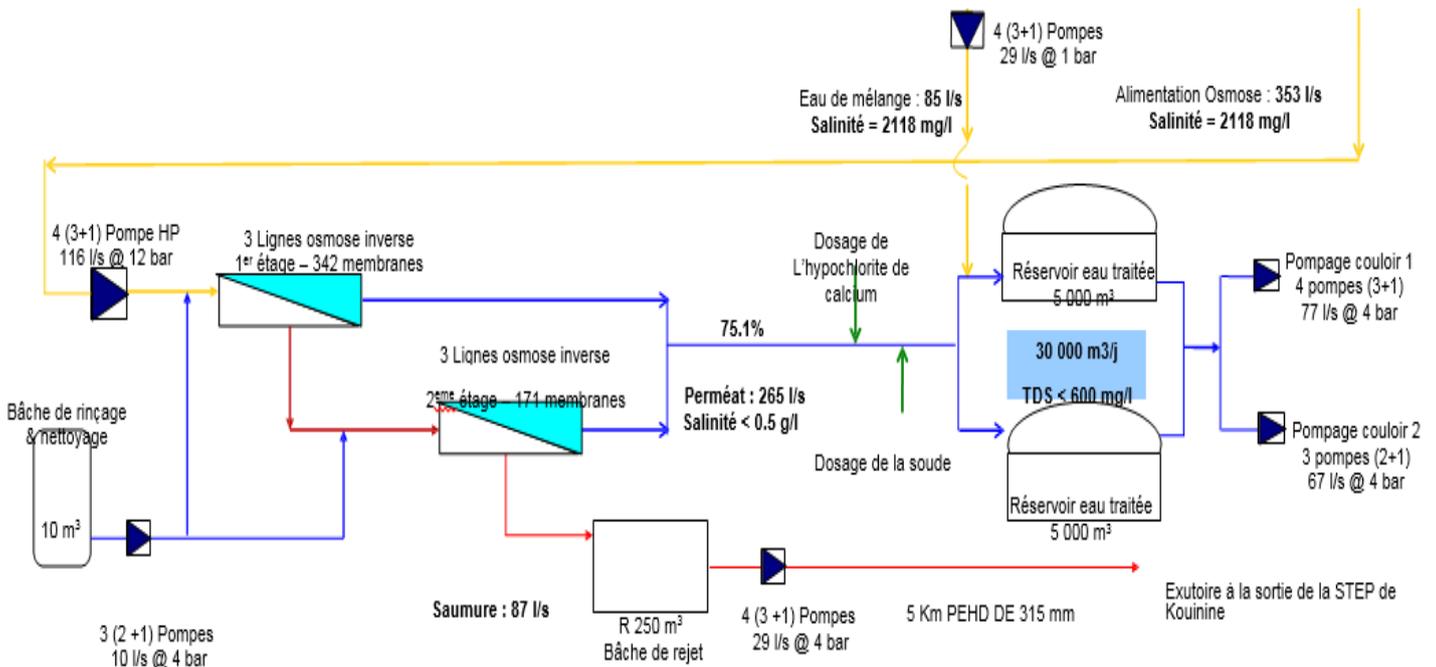


Figure IV.5 : Schéma de l'unité d'osmose inverse et du post-traitement de la station de déminéralisation d'El Oued

II.5 Limitations de l'osmose inverse

Le principal problème rencontré en osmose inverse est le colmatage et ses caractéristiques sont définies comme suit :

II.5.1 Définition du colmatage :

Le colmatage appelé aussi "fouling" est l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, se produisant à l'interface membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité.

En d'autres mots, le colmatage est défini comme le dépôt de particules, de colloïdes, de macromolécules, de sels retenus à la surface ou dans la membrane, qui provoque la décroissance continue et progressive du flux en quelques secondes ou en quelques mois.

Le type de séparation et le type de membrane déterminent l'étendue du colmatage.

En l'absence de colmatage, le débit volumique de perméat s'écrit :

$$J_1 = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu \cdot R_m} \dots \dots \dots (IV.19)$$

Avec :

J1 : en (m3.s-1.m-2).

μ (Pa.s) : viscosité dynamique du perméat.

R_m (m-1) : résistance hydraulique de la membrane.

Lorsque la membrane se colmate, une résistance supplémentaire R_s s'ajoute à la résistance de la membrane R_m , et on écrit :

$$J_1 = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu \cdot (R_m + R_s)} \quad (\text{IV.20})$$

R_s : inclut les résistances dues à l'adsorption R_a , au dépôt réversible et irréversible R_d et à la couche limite de polarisation R_{lim} .

$$R_s = R_a + R_d + R_{lim} \dots \dots \dots (\text{IV.21})$$

II.5.2 Origine du colmatage

La cause peut être un précipité organique ou minéral, ou encore le dépôt de bactéries appelé aussi "Biofouling". L'origine de colmatage peut être variée :

- Paramètres chimiques : concentration trop élevée (soit la concentration moyenne, soit les surconcentrations locales dues aux phénomènes de polarisation), la température, le pH, la force ionique des solvants et des composés.
- présence de matières en suspension qui se déposent sur les membranes par suite de conditions hydrodynamiques favorables (vitesses faibles).
- réaction d'adsorption entre certaines molécules et le matériau membranaire.

Ce serait un non-sens de vouloir supprimer complètement le colmatage puisqu'il est inhérent à la conception des procédés à membranes, mais il est possible de le prévoir et de le réduire.

II.5.3 Les conséquences du colmatage

La conséquence la plus problématique du colmatage est une diminution, parfois extrêmement accentuée, du flux de perméation dans le temps. D'autres conséquences directes ou indirectes du colmatage sont une diminution de la vie active des membranes, des lavages plus fréquents, et des dépenses supplémentaires d'énergie pour compenser la baisse de perméabilité de la membrane causée par le colmatage. (*Ciobanu. G et al, 2006*)

II.5.4 Les types de colmatage

Dans le cas de l'OI, le phénomène de colmatage peut être classifié en 4 catégories suivantes :

- **Colmatage par entartrage** : L'entartrage sur une membrane est principalement causé par le dépassement de la limite de solubilité des composants inorganiques, c'est-à-dire qu'il y a une sursaturation et l'augmentation rapide de la vitesse de déposition. Des sels sursaturés vont précipiter sur la surface de la membrane et former une couche fine qui bloque le transfert de matières à travers la membrane. Les dépôts de tartre rencontrés le plus fréquemment dans la déminéralisation comportent du carbonate de calcium, du sulfate de calcium, de l'hydroxyde de magnésium et des dépôts de silice

- **Colmatage par dépôt** : Le colmatage d'une membrane peut résulter soit de l'obstruction des pores à l'intérieur même de la membrane (blocage des pores), soit d'un dépôt de matières en surface de la membrane par convection.
 - **Le blocage des pores** : Il s'agit de la pénétration et du blocage, partiel ou total, des pores de la membrane par des particules sur lesquelles des composés peuvent être adsorbés.
 - **Colmatage par dépôt de matières par convection** : La présence de particules dans les fluides peut conduire au simple dépôt de ces particules à la surface de la membrane, pour peu que leur taille soit supérieure ou égale à la taille des pores de la membrane.
- **Colmatage par adsorption** : L'adsorption est un phénomène irréversible dû aux interactions physico-chimiques entre le soluté et la membrane. Elle se traduit par la formation d'une ou de plusieurs couches moléculaires à la surface de la membrane et/ ou à l'intérieur des pores. Il s'agit d'un type de colmatage irréversible c'est-à-dire que son élimination nécessite un lavage chimique adapté.
- **Le bio-colmatage** : Toutes les eaux de mer contiennent des microorganismes tels que des bactéries, des algues, des virus, etc. Ces microorganismes excrètent des substances polymériques extracellulaires qui adhèrent à la surface de la membrane et provoquent la formation d'un biofilm.

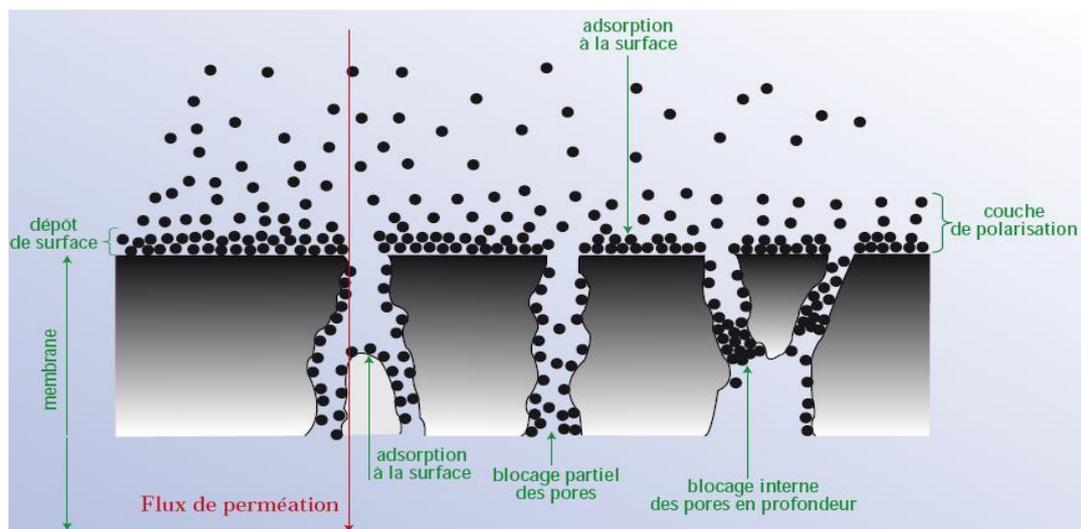


Figure IV.6 : Mécanismes de colmatage (Vignevin, 2006)

II.5.5 Estimation du potentiel de colmatage par SDI (Silt Density Index)

Pour caractériser le colmatage des membranes d'OI, différentes méthodes d'évaluation du potentiel de colmatage d'une eau ont été développées. La plus utilisée est le Silt Density.

Le SDI est considéré comme un paramètre représentatif du potentiel de colmatage d'une eau saline d'alimentation dans un procédé d'osmose inverse. Il dépend de la quantité de particules mais également des autres composants colloïdaux.

Un essai de SDI consiste en la filtration d'un échantillon d'eau à travers une membrane de $0,45 \mu\text{m}$ (microfiltration) de surface filtrante $1,73 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ à une pression transmembranaire constante de 2,07 bar.

Le SDI est déterminé par une comparaison des temps de filtration, t_1 et t_2 , nécessaires pour obtenir un volume de filtration fixe respectivement au temps 0 et après un temps t .

$$SDI_t = (1 - t_1/t_2) * 100/t \dots \dots \dots (IV.22)$$

Avec :

SDI: Silt Density Index (% min-1)

t₁ : Temps initial pour filtrer un échantillon de 500mL (sec)

t : Temps après le départ de la mesure (min)

t₂ : Temps pour filtrer un échantillon de 500mL après le temps T (sec).
Le SDI₁₅ (t = 15 minutes) est défini comme le temps nécessaire pour des essais précis et normalisés.

Le SDI doit être inférieur à 5 pour l'OI. L'utilisation du SDI est largement répandue dans la déminéralisation. Cependant, cet indice présente plusieurs limitations : il n'utilise pas une membrane d'osmose mais une membrane de microfiltration, la pression utilisée pour ce test est très inférieure aux pressions appliquées en OI et les essais sont effectués en mode frontal et non tangentiel comme en OI.

II.6 Le nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes. Les trois différentes techniques de nettoyage sont de façon générale pratiquées :

- a) **Les rétrolavages** : Les rétrolavages consistent à inverser le sens d'écoulement au travers de la membrane et le gradient de pression de façon à envoyer le perméat au travers de la membrane et ainsi permettre l'évacuation du dépôt et des particules participant au blocage de pores.

Le succès d'une opération de filtration passe par une bonne efficacité des rétrolavages de façon à maintenir une productivité élevée. Ainsi, si les rétrolavages sont généralement réalisés à l'aide du perméat, il est aussi proposé d'utiliser de l'air et du perméat ou encore uniquement de l'air.

Les rétro lavages, quel que soit leur mode de mise en œuvre, ne permettent généralement pas d'assurer la restauration intégrale à long terme de la perméabilité des membranes.

- b) **Les nettoyages chimiques** : Le nettoyage chimique est presque toujours nécessaire si l'on veut que l'installation fonctionne suivant ses performances nominales.

La décision d'effectuer un nettoyage chimique d'un module d'osmose inverse peut être liée :

- Soit à une valeur de la perte de charge que l'on s'impose comme maximum à ne pas dépasser ;
- Soit à une valeur du débit de perméat lorsque la diminution atteint 20 à 25% par rapport au débit nominale ;
- Soit à un programme de nettoyage systématique prédéterminé. Ceci est utilisé lorsque l'on a une installation importante qui comporte un nombre élevé de modules. On peut ainsi avoir une partie des modules en nettoyage tandis que le reste assure la production.

La fréquence des nettoyages dépend de la nature de l'eau, il est conseillé de laver les membranes une fois tous les 6 mois avec une solution pour le nettoyage.

- c) **Nettoyage enzymatique** : Ce type de nettoyage constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans les cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes requièrent des temps de traitement plus longs que les traitements chimiques et sont aussi plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont peu souvent adoptés.

Bien entendu, ces nettoyages présentent plusieurs inconvénients de taille :

- Arrêt de la production pour réaliser le nettoyage,
- Consommation élevée en eau pour rincer l'installation,
- Utilisation de produits chimiques néfastes pour l'environnement,
- Traitement nécessaire des effluents de nettoyage,
- Dégradation des propriétés mécaniques des membranes.

Dans notre cas on utilisera une bache d'eau de rinçage et de nettoyage avec 10 m³ de capacité pour le nettoyage des membranes d'osmose inverse. L'eau sera pompée et injectée à l'entrée des modules à partir de cette bache grâce à 3 (2 + 1) pompes, avec un débit de 10 l/s et une pression de 4 bars.

II.7 Prévention du colmatage

La stratégie générale de prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes :

- Préfiltration ;
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;
- Ajustement de pH (acidification) pour déplacer les équilibres de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de fer, de manganèse, de calcium, de baryum...) ;
- Ajout d'un agent antitartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes
- Coagulation de la Matière Organique Naturelle. En effet, l'effet colmatant des floes est, a priori, moins fort que celui des colloïdes ;
- Enlèvement du fer (Fe²⁺) qui pourrait précipiter.

L'autre stratégie de prévention du colmatage consiste à limiter l'accumulation des agents colmatants à la surface de la membrane. La réduction de la vitesse de filtration (ou vitesse de perméation) réduit les risques de colmatage et amène à opérer les systèmes membranaires à plus faible pression transmembranaire. Cela implique d'augmenter la surface de la membrane utilisée.

On peut aussi imiter l'accumulation des agents colmatants à la surface de la membrane en d'augmentant le rétro transport des agents colmatants vers le cœur de l'écoulement. Le colmatage biologique peut être limité en faisant des désinfections régulières du système.

Le choix des solutions désinfectantes est alors limité par la nature du matériau membranaire. Les stratégies de prévention du colmatage peuvent être combinées.

Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous avons pu mettre au point le dimensionnement de la station de déminéralisation de notre étude en suivant des étapes de calculs bien précises. Avec une capacité de production de 30 000 m³/j, alimentant les réservoirs de voisinage avec une eau destinée à une utilisation domestique exclusive, notre station sera principalement équipée d'une chaîne de traitement composée de :

- Des postes de prétraitement chimique.
- Des postes de prétraitement physique comportant :
 - 6 filtres à sable horizontaux monocouches
 - 3 filtres à cartouches constitués chacun par 115 cartouches
- Une unité d'osmose inverse à deux étages et à trois lignes composée en tout de 512 modules.
- Un poste de reminéralisation.

Bien sûr sans oublier de citer l'ensemble des systèmes de pompage utilisés, les réservoirs et les bâches d'eau de différentes capacités ainsi que le refroidisseur qui a un rôle primordial dans cette chaîne de traitement.

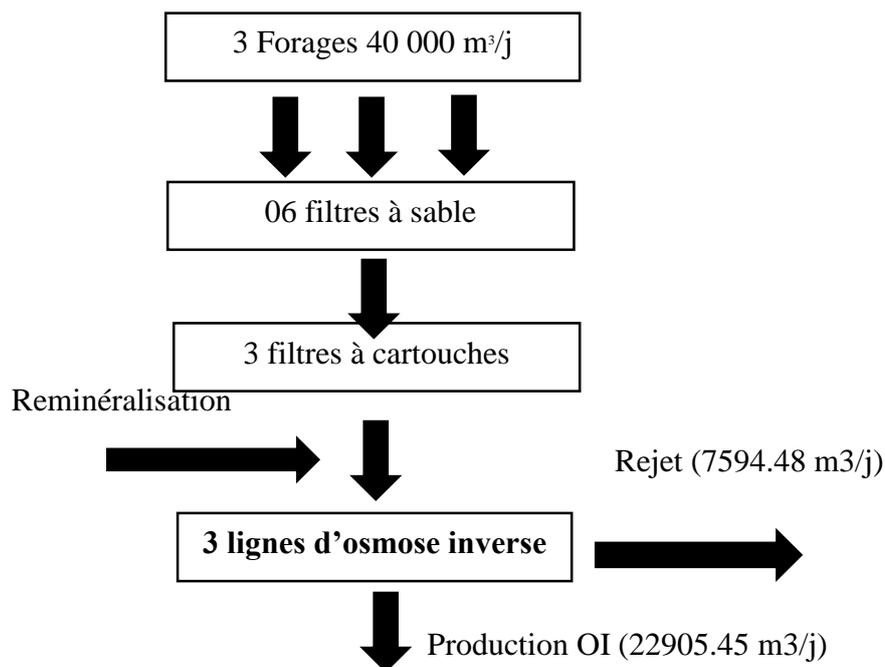
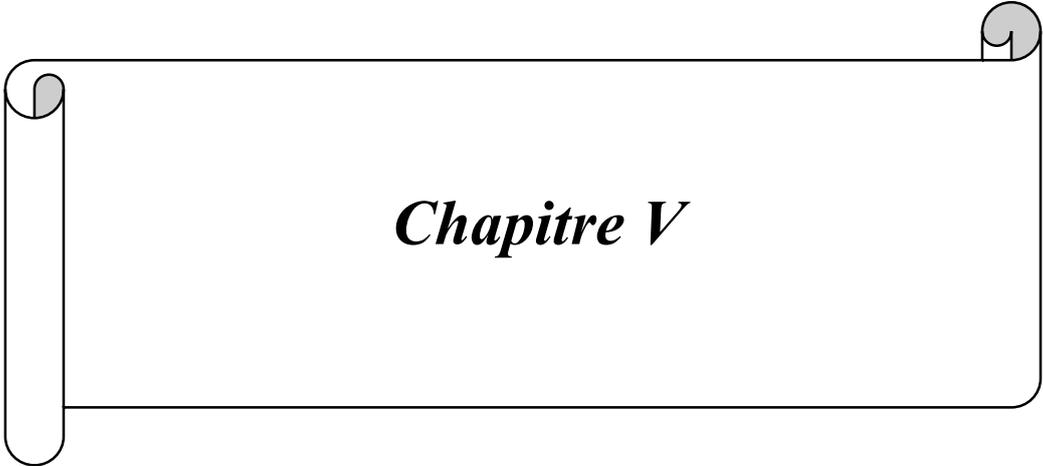


Figure IV.7 : Schéma explicatif de la chaîne de déminéralisation de la station d'El Oued



Chapitre V

***Devis estimatif de la station de
déminéralisation d'EL OUED***

CHAPITRE V

Devis estimatif de la station de déminéralisation d'El Oued

Introduction

À l'issue de cette étude de dimensionnement d'une station de déminéralisation par osmose inverse, on a pu constater que cette technique est très intéressante pour résoudre le problème de manque d'eau, et est une solution adéquate pour l'approvisionnement en eau potable dans la région d'El Oued, qui est connue pour avoir une salinité d'eaux plutôt élevée qui dépasse les normes de potabilité, en étant aussi une des régions qui souffrent de pénurie d'eau douce.

Globalement on peut dire que l'osmose inverse est une technique qui donne une bonne qualité de l'eau et le prix de revient est acceptable ; mais cette technique a l'inconvénient de produire de l'eau à la sortie trop déminéralisée, car l'eau brute n'est pas trop salée, ainsi l'eau traitée nécessite une reminéralisation.

D'autres problèmes d'osmose inverse parmi les plus fréquemment rencontrés sont des problèmes d'encrassement des membranes, soit par la précipitation chimique en raison d'une erreur d'exploitation par une mauvaise concentration de réactif, soit par prolifération bactérienne à cause des erreurs de traitement.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un devis estimatif de notre station d'études, en prenant en compte tous les paramètres possibles, ce qui nous permettra d'avoir une estimation approximative du prix du mètre cube d'eau produite.

Dans de ce contexte, l'évaluation des coûts de production des unités de dessalement et de déminéralisation d'eau doit tenir compte de facteurs influents comme suit :

- Taux de salinité de l'eau.
- Taille de l'installation.
- Qualité requise pour l'eau produite
- Conditions spécifiques du site.
- Choix du procédé.
- Durée de construction.
- Durée de vie de l'unité.
- Coût de l'énergie : Purement mécanique dans le cas de l'osmose inverse
- Destination de l'eau dessalée.

De ces conditions, il en résulte une large gamme de prix de revient du mètre cube de l'eau dessalée.

I. Calcul économique

Le calcul économique désigne l'estimation du montant final total qui ne peut se faire sans l'estimation quantitative en attribuant des chiffres à tous les aspects pris en compte.

I.1 L'investissement

L'investissement est l'acte par lequel une entreprise dépense de l'argent pour en gagner plus. Au contraire d'une charge qui est la résultante de l'exploitation, l'investissement est un engagement de l'entreprise et de ses actionnaires. Il peut par exemple consister en l'achat de machines plus performantes, ou en l'ouverture de nouveaux points de vente. Une société peut effectuer plusieurs investissements en même temps.

Le cout d'investissement donné par la relation suivante ;

$$C_{Inv} = C1 + C2 + C3 + C4 \dots \dots (V.1)$$

Avec :

C_{inv} : Coût d'investissement

C1 : Coût de prise d'eau

C2 : Coût des membranes

C3 : Coût de système d'énergie

C4 : Coût de génie civil

En d'autres mots l'investissement total comprend le cout de la construction de l'unité et le cout de l'équipement principal et auxiliaire

I.1.1 Coût de la construction de l'unité

La construction concerne tous ce qui est bâtie (bâtiment, réservoir, conduites ...) en d'autres mots la partie génie civile y compris les charges relatives (main d'œuvre transport ...), plus les travaux de la prise d'eau.

- **Coût de Prise d'Eau** : Dans notre cas la prise d'eau concerne le système de forage et d'adduction des eaux brutes jusqu'au réservoir.
Le tableau suivant donne le montant de la mise en place de cette partie de la station

Tableau V.1 : Montant du système de forage et d'adduction d'eau brute

| Nature des ouvrages | Unité | Quantité | Prix unitaire (DA) | Prix total (DA) |
|------------------------------------|----------------|----------|--------------------|--------------------|
| Forage | M | 250 | 50 000 | 12 500 000 |
| Conduite en fonte de 400 mm | m/l | 10 000 | 15 474,02 | 154 740 200 |
| Réservoir de stockage | m ³ | 1 000 | 18 000 000 | 18 000 000 |
| Refroidisseur | m ³ | 1 000 | 210 000 | 210 000 |
| | | | | 185 450 200 |

- **Coût de la partie génie civil :** Ce coût comprend la construction de toutes les infrastructures de la station.

Dans notre cas on a les bâtiments suivants :

- Bâtiment d'osmose inverse
- Local électrique
- Atelier
- Local de stockage des réactifs
- Salle de contrôle
- Bâtiment d'exploitation
- Logement de service
- Loge du gardien
- Bâtiment électrique
- Administration et base de vie

On a aussi les bâches d'eaux :

- Bâche d'eau filtrée de 300 m³
- Bâche de rejet 250 m³
- 2 réservoirs d'eaux traitées de 5000 m³
- Bâche de rinçage et de nettoyage 10 m³

Le montant total de l'intégralité de ces ouvrages est estimé à :

$$C_{\text{génie civil}} = C_{\text{bâtiments}} + C_{\text{réservoirs}}$$

$$C_{\text{génie civil}} = 8\,000\,000 + 28\,080\,000$$

$$C_{\text{génie civil}} = \mathbf{36\,080\,000\,DA}$$

- **Coût de l'ensemble de la tuyauterie et des accessoires**

Tout est récapitulé dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Montant de l'ensemble de la tuyauterie et des accessoires

| | Service | Matériel | Quantité | Prix unitaire (da) | Prix total (da) |
|---------------------------|---|----------------|-----------|--------------------|-----------------|
| Tuyauterie enterré | Du réservoir d'eau brute aux filtres à sable | PEHD DN 180 mm | 1 000 ml | 5 394,09 | 5 394 090 |
| | Du réservoir d'eau prétraitée vers les filtres à cartouches. | | | | |
| | Des filtres à cartouches vers le système d'osmose | | | | |
| | De l'osmose inverse aux réservoirs d'eau traitée et à la bâche de rejet | | | | |
| | Des réservoirs d'eau traitée aux châteaux | | | | |
| | Du pompage de rejet à l'exutoire | PEHD DN 315 mm | 15 000 ml | 16 442,24 | 246 633 600 |

| | | | | | |
|--|---|--|--------|-----------|--------------------|
| Tuyauterie aérienne | Haute Pression alimentation osmoseur | Acier inoxydable AISI316L avec soudure | 100 ml | 14,15 | 1 415 |
| | Haute Pression rejet | Acier inoxydable AISI304L avec soudure | 25 ml | 10,77 | 269.25 |
| | Réactifs | Polypropylène PPH DN 75 mm | 8 ml | 364,24 | 2 913.92 |
| | Nettoyage chimique des membranes | Polypropylène PPH DN 75 mm | 3 ml | 364,24 | 1 092.72 |
| | Groupe moto-soufflant | Acier inoxydable AISI304L avec soudure | 1U | 1 936.48 | 1 936.48 |
| | Groupe moto-soufflant | Acier galvanisé | 1U | 1364,24 | 1 346.24 |
| Vannes à papillon | Basse Pression | / | 8U | 1 289 | 10 312 |
| | Haute Pression | / | 2U | 650 | 1 300 |
| Vannes anti-retour double battant | Basse pression | Fonte | 4U | 29.303,77 | 117 215,08 |
| Vannes à opercule | Basse Pression | Fonte | 3U | 20 308 ,9 | 60 926,7 |
| Joint de démontage | Basse Pression | Acier inox. | 15U | 2 581,97 | 38 729,55 |
| Manomètre | / | / | 20 | 1 365.58 | 27 311,6 |
| Débitmètre | / | / | 15 | 765 961,9 | 11 489 428,5 |
| | | | | | 263 781 887 |

En additionnant les trois montants calculés on aura le prix total de la construction de notre station

$$C_{\text{construction}} = C_{\text{pise d'eau}} + C_{\text{génie civil}} + C_{\text{tuyauterie}}$$

$$C_{\text{construction}} = 185\,450\,200 + 36\,080\,000 + 263\,781\,887$$

$$C_{\text{construction}} = \mathbf{485\,312\,087\,DA}$$

I.I.2 Cout de l'équipement principal et auxiliaire

Ce coût regroupe le prix des membranes d'osmose inverse et le prix du système d'énergie et de pompage

- **Coût des Membranes** : Il comprend le prix d'achat des membranes, leur transport et leur mise en place.

Le cout des membranes estimé par la relation suivante :

$$C2 = Pu. Nu..... (V.2)$$

Avec :

Pu : Prix unitaire de la membrane en (1 289 700 DA/module).

Nt : Nombre total des unités membranaires (512 modules).

$$C_2 = 512 \times 1\,289\,700$$

$$C_2 = 660\,326\,400 \text{ DA}$$

Les frais de transport et d'installation sont estimés à 5% du montant d'achat des membranes, donc on a :

$$C_{\text{membranes}} = 1.05 \cdot C_2$$

$$C_{\text{membranes}} = 693\,342\,720 \text{ DA}$$

- **Coût de Système d'Énergie** : le tableau suivant résume le nombre et le type des pompes ainsi que leur coût

Tableau V.3 : Montant de l'ensemble du système énergétique et de pompage

| Nature de l'ouvrage | Nombre | Prix unitaire | Prix total |
|---------------------|--------|---------------|------------------|
| Groupe électrogène | 1 | 3 200 000 | 3 200 000 |
| Pompe immergée | 1 | 200 000 | 200 000 |
| Pompe centrifuge | 28 | 50 000 | 1 400 000 |
| Pompes HP | 4 | 90 000 | 360 000 |
| Pompe doseuse | 3 | 35 000 | 105 000 |
| | | | 5 265 000 |

Donc la valeur de l'équipement principal et auxiliaire est de :

$$C_{\text{equipement}} = C_{\text{membranes}} + C_{\text{sys énergétique}}$$

$$C_{\text{equipement}} = 693\,342\,720 + 5\,265\,000$$

$$C_{\text{equipement}} = 698\,607\,720 \text{ DA}$$

Donc le coût total d'investissement est donné comme suit :

$$C_{\text{inv}} = 485\,312\,087 + 698\,382\,720$$

$$C_{\text{inv}} = 1\,183\,919\,807 \text{ DA}$$

1.2 Coût d'Exploitation

Le coût d'exploitation comprend le coût de consommation d'énergie, le coût du personnel et d'entretien, le coût de la consommation des produits chimiques, ainsi que le coût de changement des membranes.

1.2.1 Coût de Consommation d'Énergie :

Le coût de consommation d'énergie calculé par la relation suivante :

$$C_{\text{en}} = Q_{\text{pt}} \times 365 \times d \times f_u \times [(P_{\text{fon}} / P_e \times M_e \times Y_t) \times T_e (1/Y_t - 1)] \times P_{\text{en}} / 3600 \dots \dots \dots (V.3)$$

Avec :

Cen: Coût de consommation d'énergie.

Qpt: Débit de production en m³/j.

d: Densité d'alimentation du système.

Fu: Coefficient d'utilisation du centre de dessalement en %.

P_{fon}: Pression de fonctionnement en Kpas.

P_e: Rendement de fonctionnement des pompes en %.

M_e: Rendement de fonctionnement des moteurs %.

Y_t: Coefficient d'écoulement en %.

T_e: Rendement de générateur en %.

Pen: Coût unitaire d'énergie en DA/KWh.

On prend :

Pen = 7.74 DA/KWh

P_{fon} = 6 500 Kpas.

P_e = 0,8

M_e = 0,8

T_e = 0,8

Y_t = 60%.

d = 0.8

f_u = 0.8

$$C_{en} = 30\,249.45 \times 365 \times 0.8 \times 0.8 \times [(6500/0.8 \times 0.8 \times 0.6) \times 0.8 \times (1/0.6 - 1)] \times 7.74 / 3600$$

C_{en} = 136 297 152.6 DA/an

I.2.3 Charge du personnel

C'est le total des salaires de tout le personnel pendant une année entière

Tableau V.4 : Montant de l'ensemble des salaires annuels

| Fonction | Nombre | Durée (mois) | Salaire par personne par mois (DA) | Salaire total (DA) |
|-------------------|--------|--------------|------------------------------------|--------------------|
| Ingénieur | 6 | 12 | 65000 | 4 680 000 |
| Technicien | 9 | 12 | 45000 | 4 860 000 |
| Ouvrier | 12 | 12 | 30000 | 4 320 000 |
| Agent de sécurité | 2 | 12 | 25000 | 600 000 |
| | | | | 14 460 000 |

I.2.4 Coût d'Entretien

Le cout d'entretien annuel de l'ensemble de la station revient à 5% du prix d'investissement

C_{ent} = 0, 05 × C_{inv}

C_{ent} = 0.05 × 1 183 919 807

C_{ent} = 59 195 990.35 DA

I.2.5 Coût de Consommation des produits chimique

Le prix unitaire de consommation chimique est de : 5.16 DA/m³

$$C_c = Q_{pt} \times P_u$$

$$C_c = 22\,905.45 \times 12 \times 5.16$$

$$C_c = 1\,418\,305.464 \text{ DA}$$

I.2.6 Coût de Changement des Membranes

La durée de vie de la membrane est de trois ans environ pour notre cas, et le prix unitaire est de 1 289 700 DA/unité.

$$C_{cm} = P_u \times N \times N_{années}$$

$$C_{cm} = 1\,289\,700 \times 512$$

$$C_{cm} = 660\,326\,400 \text{ DA}$$

Ce qui revient pour une année à : $C'_{cm} = 220\,108\,800 \text{ DA}$

Donc le coût total d'exploitation donne comme suit :

$$C_{exp} = C_{en} + C_{charge} + C_{entretien} + C_c + C'_{cm}$$

$$C_{exp} = 136\,297\,152.6 + 14\,460\,000 + 59\,195\,990.35 + 1\,418\,305.464 + 220\,108\,800$$

$$C_{exp} = 431\,480\,248.4 \text{ DA}$$

I.3 Coût Global de la station :

$$C_T = C_{investissement} + C_{exploitation}$$

$$C_T = 1\,183\,919\,807 + 431\,480\,248.4$$

$$C_T = 1\,615\,400\,055 \text{ DA}$$

I.4 Montant total avec la TVA :

Taux de la TVA = 19%

$$\text{Montant de la TVA} = 0.19 \times C_T = 306\,926\,010.5 \text{ DA}$$

$$TTC = 1\,615\,400\,055 + 306\,926\,010.5$$

$$TTC = 1\,922\,326\,066 \text{ DA}$$

I.5 Prix Unitaire du Mètre Cube d'Eau Traité :

$$Pr = TTC / Q_t \times N \times b \dots \dots \dots (V.4)$$

Avec :

Pr : Prix unitaire d'un mètre cube d'eau traité.

Q_{pt} : Débit journalier produit en m³/j.

TTC: Coût global de la station de dessalement toutes taxes comprises.

N : Nombre des jours d'année (365 jours).

b : Duré de vie de la station (20 ans).

Donc :

$$Pr = 1\,922\,326\,066 / 30\,249.45 \times 365 \times 20 = 9 \text{ DA/m}^3$$

$$Pr = 9 \text{ DA/m}^3$$

Conclusion

D'après cette étude, le prix du mètre cube d'eau déminéralisé produit par notre station est de la valeur de **9 DA/m³**, nous remarquons bien que ce prix n'est pas très élevé par rapport au prix du mètre cube d'eau potable normale.

Cela revient à la basse consommation en énergie par le système d'osmose inverse, donc c'est un pari gagné pour nous car ça prouve qu'on a fait le bon choix en sélectionnant cette méthode de déminéralisation.

Dans ce contexte nous pouvons aussi donner un devis estimatif total approximatif de la réalisation et l'exploitation de notre station, ce qui revient à un montant de **1 922 326 066 DA** avec taxes comprises.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La vallée de Souf située au Sud-Est algérien, occupe une superficie de 54 573 km², est divisée en 30 communes et englobe un nombre de populations de 791 000 habitants.

Le relief d'El-oued est caractérisé par trois principales formes : une région sableuse, une forme de plateau rocheux et une zone de dépression.

Du point de vue topographique l'altitude diminue du Sud vers le Nord, et de l'Ouest vers l'Est pour atteindre des valeurs négatives au niveau des chotts.

La région du Souf fait partie du Sahara Septentrional, et est caractérisée par une activité économique basée principalement par le commerce et la culture de palmiers dattiers, et dernièrement de pomme de terre.

La région est caractérisée par un climat saharien aride avec un été très chaud et un hiver relativement froid avec une pluviométrie très faible de l'ordre de 292.54mm en 2019.

Le climat saharien est marqué par une température élevée, d'une évaporation importante et d'un rayonnement solaire excessif.

L'analyse lithostratigraphique montre que le système hydrogéologique de la région possède une potentialité hydrique très importante, présentée sous forme de trois nappes souterraines qui sont les seules ressources hydriques de la région. On a : la nappe du Complexe Terminal (CT), la nappe du Continental intercalaire et la nappe phréatique (libre).

Du point de vue des analyses physico-chimiques de ces eaux, elles sont caractérisées par un pH proche de la neutralité à légèrement alcalin, avec une conductivité élevée dans les eaux de CT et la nappe phréatique. Avec une grande concentration de quelques éléments chimiques tels que : (Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄⁻ et HCO₃⁻), et des valeurs de dureté et de TH élevées supérieures aux valeurs guides de l'OMS ; ces excès sont dus à la dissolution des formations géologiques et à la forte évaporation des eaux surtout dans les Ghouts.

L'utilisation de ces eaux pour l'AEP (notamment en ce qui concerne les nappes les plus exploitées (CT et CI) sans traitement préalable sont déconseillées, cette situation a conduit les habitants de la région d'Oued Souf à acheter les eaux des citernes (eaux traitées ou provenant des régions voisines) pour leur propre consommation et n'utiliser les eaux de robinet (de CT) que pour le lavage et l'arrosage des espaces verts et des jardins. Ainsi, la dotation journalière devient très élevée (dépassant les 200litres/jour/habitants), ce qui a pour conséquence une mauvaise gestion de cette ressource rare et vulnérable.

Par conséquent, cela a dû exiger de rigoureux critères pour améliorer la qualité chimique de l'eau, en créant des stations de déminéralisation avec des procédés universelles avant de mobiliser ces eaux aux consommateurs.

Donc, l'objectif principal de cette étude est le dimensionnement d'une station de déminéralisation des eaux saumâtres dans cette région afin d'améliorer la qualité de l'eau potable. Et cela, après avoir procédé à une étude comparative sur l'échelle technique et économique des différentes techniques existantes, et avoir fait le choix de la technique la plus satisfaisante et la plus adéquate pour remédier à notre problématique.

Les techniques de déminéralisation des eaux saumâtres destinées à la consommation humaine sont différentes on a :

- Les procédés chimiques ;
- Les procédés par distillation ;
- Les procédés membranaires.

Le choix d'une technique dépend essentiellement de :

- La caractéristique de l'eau brute (salinité de l'eau).
- Conditions techniques.
- Conditions économiques.

Dans notre cas, on a bien vu que les procédés membranaires (l'osmose inverse et l'électrodialyse) sont les techniques les plus adaptés au traitement des eaux saumâtres. Toutefois, pour des raisons économiques et pour des installations de grandes capacités, on a préféré d'adopter la déminéralisation par osmose inverse. Ce procédé reste le plus rentable car il est moins coûteux que la distillation ou que l'électrodialyse, et il permet de traiter une plus grande quantité d'eau.

Cependant, cette technique a les inconvénients suivants :

- la qualité d'eau à la sortie est trop déminéralisée car l'eau brute n'est pas trop salée donc, l'eau traitée nécessite une reminéralisation.
- le prétraitement de l'eau de mer avant l'osmose inverse est absolument nécessaire et indispensable, car il a pour objectif d'augmenter la durée de vie des membranes, d'améliorer la qualité de l'eau produite, le maintien des performances de l'osmose inverse et la réduction du colmatage des membranes.

La chaîne de prétraitement qu'on a adopté pour notre cas se compose en principe de filtres à sables et de filtres à cartouches, sans oublier de mentionner le prétraitement chimique.

A l'issue de cette étude, nous avons pu constater l'efficacité de la technique de l'osmose inverse dans la déminéralisation des eaux saumâtres, d'où les valeurs faibles en salinité, et une minéralisation inférieure qui correspondent aux normes de l'OMS à la sortie de station. Donc on peut confirmer que notre choix est amplement satisfaisant.

Référence bibliographique

Références bibliographiques

1. Rapport sur un séminaire de l’OMS, 1980. « La technologie appropriée de déminéralisation de l’eau potable ». Bureau régionale de l’Europe Copenhague.
2. KARABI Narimane, GUENNOUN Kaouther, mémoire en vue de l’obtention du titre de MASTER, Etude comparative entre deux techniques de déminéralisation des eaux « Osmose inverse et électrodialyse » Dans la région de Ouargla, Université Kasdi Merbah Ouargla, Juin 2019.
3. MOUDJEB Miloud, MEMOIRE DE MAGISTER en Rhéologie et Transport des Fluides Complexes, Etude de la station de dessalement de Mostaganem, USTO, Décembre 2015.
4. OUIS Abderraouf, Mémoire pour l’obtention du diplôme Master en hydraulique urbaine, Dimensionnement d’une station de déminéralisation des eaux souterraines de la ville de Souk Naàmane par différentes méthodes « OI et ED », Université Larbi Ben M’hidi, OUM EL BOUAGHI, 2013.
5. DEGAA Ali et TERCHA Hocine, mémoire de master en ouvrages, étude de la déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse dans le Sud-Est Algérien cas de la station d’El Meghaier. Université d’El-Oued, 2019.
6. BESSER Djamel et BENINE Yahia. mémoire de master professionnel en Hydraulique, étude comparative de la qualité des eaux des différentes nappes de la région d’El Oued (Souf). Université d’El Oued, 2016.
7. KHECHANA Salim et DERRADJI El-Fadel, qualité des eaux destinées à la consommation humaine et à l’utilisation agricole (Cas des eaux souterraines d’Oued-Souf, SE algérien). Laboratoire de Géologie, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2014.
8. Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, DOCUMENT TECHNIQUE sur les procédés membranaires pour le traitement de l’eau. Direction de l’Espace Rural et de la Forêt, 2002.
9. Office Internationale de l’Eau, synthèse technique d’une étude comparative des membranes utilisées en production d’eau potable : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. Centre de Montpellier, 2005.
10. Hubert Cabana, La filtration sur sable, Conception d’une usine de traitement des eaux potables, 2009.

Annexes

Annexes :

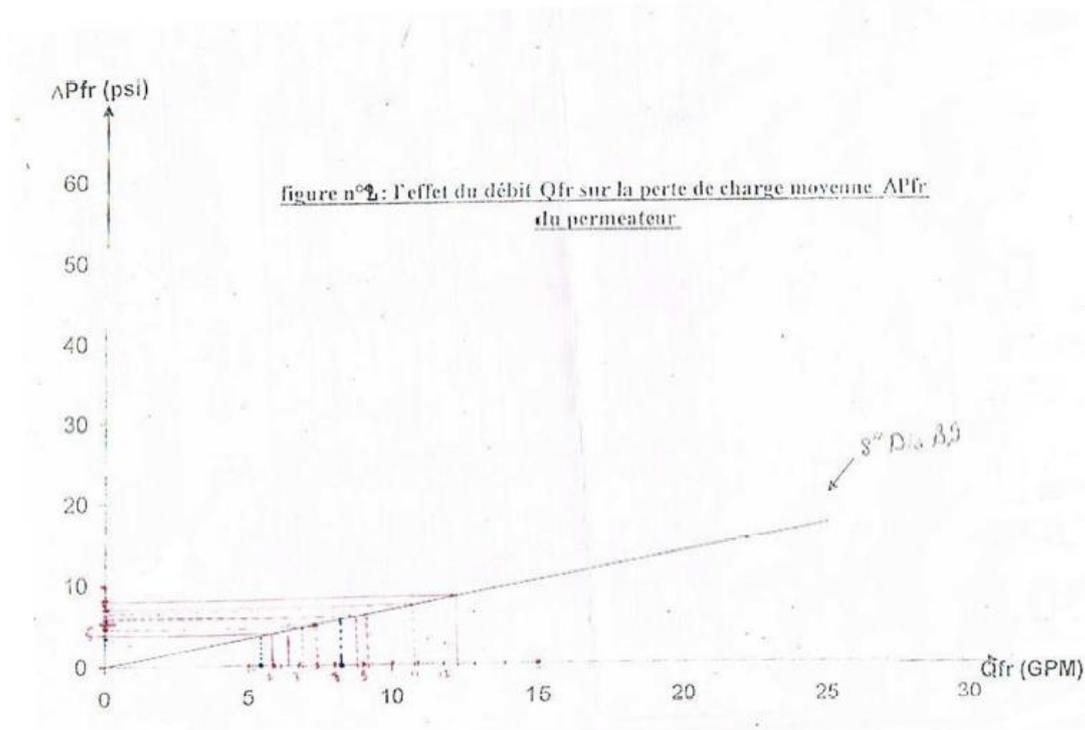


Figure 01 : L'effet du débit Q_{fr} sur la perte de charge moyenne ΔP_{fr}

Tableau I : Facture de correction du flux de rétention de la membrane en fonction de la Pression, de la température et du temps

| Pression (P sig) | Température (C°) | Capacité initial | Rétention | |
|------------------|------------------|------------------|------------|------------|
| | | | 1ere année | 2eme année |
| 400 | 5 | 0.55 | 0.914 | 0.900 |
| | 10 | 0.64 | 0.907 | 0.890 |
| | 15 | 0.74 | 0.891 | 0.872 |
| | 20 | 0.86 | 0.68 | 0.845 |
| | 2 | 1.00 | 0.828 | 0.800 |
| | 30 | 1.16 | 0.767 | 0.730 |
| | 35 | 1.34 | 0.675 | 0.629 |
| 300 | 5 | 0.40 | 0.936 | 0.92 |
| | 10 | 0.46 | 0.929 | 0.917 |
| | 15 | 0.54 | 0.919 | 0.905 |
| | 20 | 0.62 | 0.901 | 0.883 |
| | 25 | 0.72 | 0.868 | 0.845 |
| | 30 | 0.83 | 0.817 | 0.787 |
| | 35 | 0.97 | 0.736 | 0.695 |

| | | | | |
|------------|----|------|-------|-------|
| 200 | 5 | 0.24 | 0.956 | 0.52 |
| | 10 | 0.28 | 0.953 | 0.947 |
| | 15 | 0.32 | 0.946 | 0.37 |
| | 20 | 0.7 | 0.934 | 0.923 |
| | 25 | 0.43 | 0.910 | 0.894 |
| | 30 | 0.50 | 0.871 | 0.848 |
| | 35 | 0.58 | 0.807 | 0.776 |