

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Centre Universitaire BELHADJ Bouchaïb d'Ain-Temouchent



Institut des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie de l'eau et de l'environnement

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Hydraulique

Spécialité : science de l'eau et de l'environnement

**Dessalement d'eau de mer par osmose inverse, fonctionnement et effets des paramètres sur le rendement**

**Réalisé par :**

M<sup>elle</sup> Mostefaoui Leïla

**Devant les jurys composé de :**

|                  |                                 |            |
|------------------|---------------------------------|------------|
| <b>Président</b> | <b>M<sup>r</sup> BELAHCEN.M</b> | <b>Pr</b>  |
| <b>Examineur</b> | <b>M<sup>r</sup> GUEMOU.B</b>   | <b>MCA</b> |
| <b>Examineur</b> | <b>M<sup>r</sup> BENAICHA.M</b> | <b>MAA</b> |
| <b>Encadreur</b> | <b>M<sup>r</sup> NEHARI.A</b>   | <b>MAA</b> |

**Année universitaire 2015/2016**

# Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon encadreur **M<sup>r</sup> Nehari Abderrahmane** pour son aide, son encouragement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*J'aimerais exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir bien voulu donner de leur temps pour lire ce travail et faire partie des examinateurs. Leurs critiques et commentaires seront bénéfiques pour enrichir nos connaissances dans ce domaine.*

*Je remercie l'ensemble du personnel de la BWC, à leur tête **M<sup>r</sup> Zoheiri Abderrahmane** pour m'avoir donné la chance de faire mon stage au sein de la station et je tiens à remercier **M<sup>r</sup> Bouzzada Cheikh** pour ses conseils et orientations qui m'ont aidé à rédiger mon mémoire.*

*Je suis très reconnaissante à **M<sup>me</sup> Lahcen Bencherif Amina**, ingénieur et responsable du laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement pour son aide durant mes expériences.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à tous mes professeurs pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable pour ma formation et mon enseignement durant toutes ces années d'études.*

*Touts mes remerciements vont à mes deux amies et sœurs **Zoubida** et **Wissem** pour leurs aides, encouragements et patience, j'en suis très reconnaissante, merci.*

*Enfin, je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

***Leïla Mostefaoui***

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon père, école de mon enfance, mon professeur de toujours qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.*

*A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse et de force, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma mère ...*

*Que dieu les gardes et les protèges.*

*A ma grande mère qui m'a toujours soutenu et encouragé à voire loin et ne jamais perdre espoir...*

*A mes deux grands frères : Ibrahim et Mohamed Salah dine,*

*A ma seule et unique sœur : Fatima Zohra,*

*A mon beau frère : Réda,*

*A ma belle sœur : Nadjela,*

*A ma chère et adorable nièce : Badra Nihel,*

*A tous mes oncles et tantes, cousins et cousines,*

*A tous mes amis, en particulier : Zoubida, Wissem, Fatima Zohra, Fadjera, Salima, Sara, Narimène...*

*A tous mes camarades de la classe,*

*A tous ceux qui me connaissent.*

*Leïla Mostefaoui*

**Résumé**

AU XXI<sup>e</sup> siècle, l'eau devient un enjeu mondial lié étroitement à l'évolution de l'humanité et la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement en eau demeure exigée.

L'Algérie à l'instar d'autres pays est confrontée à la pénurie d'eau et a eu recours au dessalement d'eau de mer pour répondre aux besoins de sa population.

Notre projet de fin d'études présente une lecture des différents procédés de dessalement et met le point sur le fonctionnement de la station de dessalement de Béni Saf.

L'étude envisagée a pour but de calculer la perméabilité de la membrane et mettre en évidence l'influence de certains paramètres (pression et débit) sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse (à savoir la densité de flux du perméat et le taux de rétention).

**Mots clés :** dessalement, osmose inverse, perméabilité, densité de flux, taux de rétention.

## المخلص

اصبحت المياه في القرن الحادي والعشرين، قضية عالمية مرتبطة ارتباطا وثيقا بتطور الإنسانية والبحث عن مصادر مياه جديدة بات اجباري.

تواجه الجزائر مثل بلدان أخرى ندرة المياه و قد لجأت إلى تحلية مياه البحر لتلبية احتياجات سكانها. يقدم لنا مشروع التخرج قراءة لعمليات تحلية المياه المختلفة، ويوفر معلومات مستكملة عن طريقة عمل محطة بني صاف لتحلية مياه البحر.

تهدف الدراسة المقترحة حساب نفاذية الغشاء و تسليط الضوء على تأثير بعض الاعدادات (الضغط والتدفق) على أداء نظام التناضح العكسي لتحلية المياه (كثافة التدفق ومعدل الاحتفاظ).

**الكلمات المفتاحية :** تحلية المياه، التناضح العكسي، النفاذية، كثافة التدفق، معدل الاحتفاظ

**ABSTRACT**

In the XXI century, water is becoming a global issue closely linked to the evolution of humanity and the search for new water supply sources is required. Algeria like other countries is facing water scarcity and resorted to desalination of sea water to meet the needs of its population.

Our project graduation presents a reading of the various desalination processes and provides an update on the operation of the desalination plant of Beni Saf.

The proposed study aims to calculate the permeability of the membrane and highlight the influence of certain parameters (pressure and flow) on the performance of a reverse osmosis desalination system (the permeate flux density and the retention rate).

**Keywords:** desalination, reverse osmosis, permeability, flux density, retention rate.

---

# Table des matières

## **TABLE DES MATIERES**

Liste des tableaux  
 Liste des figures  
 Liste des photos  
 Liste des abréviations

### **Introduction générale..... 1**

#### **Chapitre 01: l'eau, un enjeu pour demain**

|         |   |    |
|---------|---|----|
| I.      | Introduction .....  | 3  |
| II.     | L'eau dans le monde.....  | 3  |
| II.1    | Répartition de l'eau sur la planète.....  | 3  |
| II.1.1  | Les précipitations et les écoulements terrestres .....  | 4  |
| II.1.2  | Les pays riches et les pays pauvres en eau .....  | 4  |
| II.2    | La pénurie d'eau.....   | 5  |
| II.3    | L'eau source de conflits entre les pays .....   | 6  |
| III.    | L'eau en Algérie .....  | 9  |
| III.1   | Eléments de géographie et d'hydrographie de l'Algérie : un cadre physique défavorable.....            | 9  |
| III.2   | L'Algérie face au défi de l'eau .....   | 11 |
| III.2.1 | Des ressources insuffisantes exploitées dans un cadre institutionnel et opérationnel inadéquat .....  | 11 |
| III.2.2 | Des investissements peu performants mais en amélioration face à une demande émergente importante..... | 13 |
| III.3   | Le dessalement d'eau de mer en Algérie .....  | 15 |
| IV.     | Conclusion .....  | 18 |

#### **Chapitre 02: le dessalement d'eau de mer**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| I.  | Introduction .....   | 19 |
| II. | Les caractéristiques des eaux de mer et des eaux saumâtres ..... | 19 |



|           |  |    |
|-----------|--|----|
| II.1      | Les eaux marines.....  | 19 |
| II.2      | Les eaux saumâtres .....   | 20 |
| III.      | Les principales techniques de dessalement .....  | 20 |
| III.1     | Les procédés thermiques.....   | 21 |
| III.1.1   | Distillation à multiples effets (MED) .....  | 21 |
| III.1.2   | Distillation par multi-stage-flash (MSF) .....   | 22 |
| III.1.3   | Distillation par compression de vapeur .....   | 23 |
| III.2     | Les procédés membranaires .....  | 23 |
| III.2.1   | L'électrodialyse.....  | 23 |
| III.2.1.1 | L'électrodialyse dite conventionnelle .....  | 24 |
| III.2.1.2 | L'électrodialyse à membrane bipolaire.....   | 24 |
| III.2.1.3 | L'électrolyse à membranes .....  | 24 |
| III.2.2   | L'osmose inverse.....  | 24 |
| III.3     | Autres procédés.....   | 25 |
| III.3.1   | La Congélation .....   | 25 |
| III.3.2   | La distillation solaire à effet de serre .....   | 26 |
| III.3.3   | L'échange d'ions .....   | 26 |
| IV.       | Comparaison entre les procédés de dessalement.....   | 27 |
| IV.1      | Les avantages et les inconvénients des deux procédés ; l'osmose inverse et la distillation thermique ..... | 27 |
| IV.2      | Comparaison entre l'osmose inverse (OI) et les différents procédés de distillation... ..                   | 28 |
| IV.3      | Comparaison du coût de l'eau produite selon la technique, à une capacité donnée... ..                      | 29 |
| V.        | Les membranes .....  | 30 |
| V.1       | Définition .....   | 30 |
| V.2       | Nature des membranes .....   | 31 |
| V.2.1     | Les membranes organiques .....   | 31 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| V.2.2 | Les membranes minérales ou inorganiques .....              | 31 |
| V.2.3 | Les membranes composites .....                             | 31 |
| V.3   | Les types de membranes .....                               | 32 |
| V.3.1 | Les membranes tubulaires .....                             | 32 |
| V.3.2 | Les membranes Planes.....                                  | 32 |
| V.3.3 | Les membranes fibres creuses .....                         | 33 |
| V.3.4 | Les membranes en spirale.....                              | 34 |
| VI.   | Osmose inverse.....  | 35 |
| VI.1  | Définition de l'osmose inverse .....                       | 35 |
| VI.2  | Principe de l'osmose inverse .....                         | 35 |
| VI.3  | La pression osmotique .....                                | 36 |
| VI.4  | Taux de conversion .....                                   | 36 |
| VI.5  | Perméabilité de la membrane (l/h.m <sup>2</sup> .bar)..... | 36 |
| VI.6  | Sélectivité.....   | 36 |
| VI.7  | Débit spécifique ou densité du flux volumique .....        | 37 |
| VI.8  | Mécanisme de transfert .....                               | 37 |
| VII.  | Conclusion .....   | 38 |

### **Chapitre 03: la description de la station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| I.        | Introduction .....  | 39 |
| II.       | présentation de l'usine de dessalement.....                                   | 39 |
| III.      | Description du fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer ..... | 42 |
| III.1     | Captage d'eau de mer.....   | 42 |
| III.2     | La station de pompage .....   | 43 |
| III.3     | Prétraitement de l'eau de mer .....   | 44 |
| III.3.1   | La filtration sur sable .....   | 44 |
| III.3.1.1 | Caractéristiques des filtres .....  | 45 |
| III.3.2   | Filtrage à anthracite .....   | 45 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| III.3.3   | Filtration par cartouches .....                       | 46 |
| III.3.3.1 | Description .....                                     | 46 |
| III.3.3.2 | Caractéristiques des filtres .....                    | 47 |
| III.3.3.3 | Caractéristiques des cartouches .....                 | 47 |
| III.3.3.4 | Fonctionnement.....                                   | 47 |
| III.3.4   | Description du prétraitement chimique.....            | 47 |
| III.4     | Post d’osmose inverse.....                            | 48 |
| III.4.1   | Membranes .....                                       | 50 |
| III.4.2   | Description du récupérateur d’énergie .....           | 50 |
| III.5     | Le post traitement .....                              | 51 |
| III.6     | Le stockage et le refoulement d’eau au le client..... | 52 |
| IV.       | EQUIPEMENT DE NETTOYAGE .....                         | 52 |
| IV.1      | Nettoyage des filtres .....                           | 52 |
| IV.2      | Nettoyage des membranes .....                         | 53 |
| V.        | Bâtiment de saumure .....                             | 53 |
| VI.       | Le laboratoire.....                                   | 54 |
| VII.      | Salle de contrôle .....                               | 55 |
| VIII.     | Autres composants de la station .....                 | 55 |
| IX.       | Conclusion.....                                       | 56 |

**Chapitre 04: l'effet de la pression et le débit sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse**

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | Introduction .....   | 57 |
| II.  | Description du fonctionnement du pilote « ROUC» .....              | 57 |
| III. | Les principales caractéristiques de l’unité ROUC.....              | 58 |
| IV.  | La perméabilité de la membrane .....                               | 62 |
| IV.1 | Détermination de la perméabilité de la membrane .....              | 62 |
| IV.2 | L’effet de la température sur la perméabilité de la membrane ..... | 63 |
| V.   | La filtration sur sable à lit profond .....                        | 65 |

|        |  |           |
|--------|--|-----------|
| V.1    | Les caractéristiques de l'eau de mer avant la filtration.....                              | 65        |
| V.2    | Mode opératoire .....  | 65        |
| V.3    | Les caractéristiques de l'eau de mer après filtration.....                                 | 66        |
| VI.    | Influence des paramètres opératoires sur les performances du système d'osmose inverse..... | 66        |
| VI.1   | Effet de la pression d'attaque sur le flux de perméat $J_p$ et sa qualité .....            | 67        |
| VI.1.1 | L'effet sur la densité du flux de perméat .....  | 67        |
| VI.1.2 | L'effet sur la qualité du perméat.....   | 69        |
| VI.2   | Effet du débit d'alimentation sur le flux de perméat $J_p$ et sa qualité.....              | 69        |
| VII.   | Evolution de la consommation énergétique.....  | 71        |
| VIII.  | Conclusion .....   | 73        |
|        | <b>Conclusion générale .....</b>   | <b>74</b> |

**Bibliographie****Les annexes**

---

# Liste des tableaux

---

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre 01

|   |    |
|---|----|
| « Tableau I.1 » : variation de la lame d'eau [7].   | 11 |
| « Tableau I.2 » : potentialités en eaux de surface [7].   | 11 |
| « Tableau I.3 » : les ressources globales en eaux du pays [7].  | 12 |
| « Tableau I.4 » : projets d'adduction pour les nouveaux barrages [7].                                 | 13 |
| « Tableau I.5 » : projets d'adduction pour les barrages en cours d'achèvement ou de construction [7]. | 14 |
| « Tableau I.6 » : les 13 mégas stations de dessalement en Algérie [9].                                | 15 |
| « Tableau I.7 » : les stations de dessalement d'eau de mer en Algérie [10].                           | 17 |

### Chapitre 02

|   |    |
|---|----|
| « Tableau II.1 » : taux de salinité des mers fermées [15].  | 19 |
| « Tableau II.2 » : avantages et inconvénients de l'OI et la distillation thermique [22].                | 27 |
| « Tableau II.3 » : comparaison entre l'OI, MSF, MED, MVC [22].  | 28 |
| « Tableau II.4 » : comparaison économique des différents procédés selon la capacité de production [23]. | 29 |
| « Tableau II.5 » : Comparaison des modules d'osmose inverse selon la membrane utilisée [14].            | 34 |

### Chapitre 03

|  |    |
|--|----|
| « Tableau III.1 » : fiche technique de la SDEM de Béni Saf       | 41 |
| « Tableau III.2 » : dates historiques de la SDEM de Béni Saf     | 42 |
| « Tableau III.3 » : contrôle de qualité de l'eau commercialisée. | 55 |

### Chapitre 04

|  |    |
|--|----|
| « Tableau IV.1 » : Valeurs des densités de flux de perméat $J_p$ à 21°C.                                     | 62 |
| « Tableau IV.2 » : Evolution de la perméabilité au solvant de la membrane en fonction de la température.     | 64 |
| « Tableau IV.3 » : les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote. | 67 |
| « Tableau IV.4 » : Valeurs de $J_p$ pour les deux pressions testées.   | 68 |
| « Tableau IV.5 » : Valeurs du facteur de séparation pour les deux pressions testées                          | 69 |
| « Tableau IV.6 » : valeurs du $J_p$ et du facteur de séparation $F_s$ pour les deux débits testés            | 70 |
| « Tableau IV.7 » : valeurs de l'indice de performance spécifique pour les 4 expériences menées.              | 72 |

---

# Liste des figures

---

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre 01**

|   |   |
|---|---|
| « Figure I.1 » : répartition en % des 2.8% d'eau douce du globe .....   | 3 |
| « Figure I.2 »: Disponibilité en eau douce dans le monde [2] .....  | 5 |
| « Figure I.3 » : les barrages en fonction et en cours de construction en travers les deux fleuves<br>l'Euphrate et le Tigre [4] ..... | 7 |
| « Figure I.4 » : les régions hydro-conflictuelles dans le monde [6]. .....  | 8 |

### **Chapitre 02**

|   |    |
|---|----|
| « Figure II.1 » : les principaux procédés de dessalement [17] .....                                   | 20 |
| « Figure II.2 » : Schéma d'un système de distillation à multiples effets (MED) [19]. .....            | 22 |
| « Figure II.3 » : Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF)<br>[19]..... | 22 |
| «Figure II.4» : Schéma d'une unité de distillation avec compression de vapeur [19]. .....             | 23 |
| « Figure II.5» : Schéma d'une unité de dessalement par électrodialyse [20].....                       | 23 |
| « Figure II.6» : principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse [18]. .....                     | 25 |
| « Figure II.7 » : Système de distillation solaire [14]. .....   | 26 |
| « Figure II.8»: Membranes tubulaires [14].....  | 32 |
| « Figure II.9»: Membranes planes [14]. .....  | 33 |
| « Figure II.10 » : membranes à fibre s creuses [27].....  | 33 |
| « Figure II.11 »: membranes en spirale [29]. .....  | 34 |
| « Figure II.12 » : le principe d'osmose inverse [14].....   | 35 |

### **Chapitre 03**

|  |    |
|--|----|
| « Figure III.1 » : site géographique de la SDEM de Béni Saf .....        | 39 |
| « Figure III.2 » : les différents collaborateurs de la station BWC ..... | 40 |
| « Figure III.3 » : présentation de la station de BWC .....               | 41 |
| « Figure III.4 » : les composants d'un ERI.....                          | 51 |

### **Chapitre 04**

|   |    |
|---|----|
| «Figure IV.1 » : Schéma descriptif du fonctionnement de l'installation pilote .....                               | 58 |
| « Figure IV.2 »: boîtier d'interface de contrôle .....  | 61 |
| « Figure IV.3 »: Evolution de la densité de flux du perméat (Jp) en fonction de la pression (P)<br>à T=21°C ..... | 63 |



---

|  |    |
|--|----|
| « Figure IV.4 »: Evolution de la perméabilité au solvant de la membrane en fonction de la température..... | 64 |
| « Figure IV.5 » : Evolution du $J_p$ en fonction du temps pour les deux pressions appliquées..             | 68 |
| « Figure IV.6 » : évolution du $J_p$ en fonction du temps pour les deux débits testés.....                 | 70 |

---

# Liste des photos

---

**LISTE DES PHOTOS****Chapitre 03**

|   |    |
|---|----|
| « Photo III.1 » : la conduite de captage en période de la construction.....             | 43 |
| « Photo III.2 » : filtres rotatifs .....  | 43 |
| « Photo III.3 » : pompes de pompage et bassin de stockage .....                         | 44 |
| « Photo III.4 » : zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf ..... | 46 |
| « Photo III.5 » : les filtres à cartouches de la SDEM de Béni Saf .....                 | 46 |
| « Photo III.6 » : la zone de production de la SDEM de Béni Saf.....                     | 49 |
| « Photo III.7 » : les récupérateurs d'énergie (ERI) d'un module d'OI de le SDEM.....    | 51 |
| « Photo III.8 » : le réservoir de traitement de l'eau dessalée .....                    | 52 |
| « Photo III.9 » l'eau après le post traitement.....                                     | 52 |
| « Photo III.10 » : bâtiment de lavage des filtres .....                                 | 53 |
| « Photo III.11 » : le bassin de saumure de la SDEM de Béni Saf.....                     | 54 |
| « Photo III.12 » : le laboratoire de la SDEM de Béni Saf .....                          | 54 |
| « Photo III.13 » : la salle de contrôle de la SDEM de Béni saf .....                    | 55 |
| « Photo III.14 » : la salle d'électricité de la SDEM de Béni Saf.....                   | 56 |
| « Photo III.15 » : Le réseau électrique de la SDEM de Béni Saf.....                     | 56 |

**Chapitre 04**

|  |    |
|--|----|
| « Photo IV.1 » : l'installation pilote ROUC (laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement).....   | 60 |
| « Photo IV.2 » : filtre à sable à lit profond (laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement)..... | 66 |

---

# Liste des abréviations

---

**LISTE DES ABREVIATIONS**

| <b><u>ABREVIATIONS</u></b> | <b><u>SIGNIFICATIONS</u></b>                              |
|----------------------------|---|
| A                          | Perméabilité de la membrane                               |
| ADE                        | Algérienne des eaux                                       |
| AEC                        | Algerian energy company                                   |
| AEP                        | Alimentation en eau potable                               |
| BWC                        | Béni Saf water company                                    |
| Ca                         | Concentration de l'alimentation                           |
| Cp                         | Concentration du perméat                                  |
| Cr                         | Concentration du retentât                                 |
| DA                         | Dinar algérien  |
| Fc                         | Taux de conversion  |
| Fs                         | Facteur de séparation                                     |
| Jp                         | Densité de flux du perméat                                |
| Jpsp                       | Densité de flux spécifique                                |
| MED                        | distillation à multiples effets                           |
| MED-TVC                    | distillation à multiples effets par compression de vapeur |
| MSF                        | distillation Flash par détentes successives               |
| MVC                        | distillation à simple effet par compression de vapeur     |
| OI                         | Osmose inverse  |
| OMS                        | Organisation Mondial de la Santé                          |
| ONU                        | Organisation des nations unies                            |
| PEHD                       | polyéthylène haute densité                                |
| PNUE                       | Programme des nations unies pour l'environnement          |
| PX                         | Pressure exchanger  |
| Qa                         | Débit d'alimentation                                      |
| Qp                         | Débit du permét   |
| ROUC                       | Computer controlled reverse osmosis/ ultrafiltration      |
| SDEM                       | Station de dessalement d'eau de mer                       |
| SEAAL                      | Société de l'eau et de l'assainissement d'Alger           |
| Vp                         | Volume de l'échantillon                                   |
| Ysp                        | Indice de performance spécifique                          |

---

# **Introduction Générale**

---

## **Introduction générale**

L'eau, l'or bleu, l'élixir de vie est tout simplement omniprésente, elle est l'élément vital pour tout organisme vivant.

La terre, surnommée planète bleu, donne l'impression d'une ressource renouvelable et inépuisable, puisque 72% de sa surface est recouverte d'eau. Toutefois, 97,2% de cette eau est salée et il n'en reste que 2,8% d'eau douce dont la majeure partie se trouve dans les calottes polaires, les glaciers et dans des aquifères inatteignables, ce qui nous laisse avec un faible pourcentage d'eau douce accessible à l'homme.

Cependant, l'eau douce accessible sur terre n'est pas répartie de manière homogène entre les pays et provoque même des tensions entre des états ayant des ressources en eau en commun, à cela s'ajoutent la croissance démographique, les activités humaines, les aléas pluviométriques qui ensemble pèsent sur la disponibilité de ce précieux élément qui est l'eau.

L'accroissement rapide des demandes en eau exige la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement et la mise en œuvre de nouvelles stratégies pour une meilleure gestion de l'eau.

Le recours au dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres semble une solution prometteuse pour faire face à cette crise.

Parmi les différents procédés de dessalement, l'osmose inverse est une technologie fiable dont les performances ont été attestées. En effet, elle fait partie en plus de la distillation des procédés les plus répondus sur le marché mondial. En Algérie au regard du manque d'eau, le dessalement d'eau de mer est en plein essor et arrive à satisfaire les besoins en eau du pays.

Le présent travail a pour but d'évaluer les effets de certains paramètres (à noter la pression et le débit d'alimentation) sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse, plus précisément sur la densité de flux du perméat, la qualité du perméat et la consommation énergétique. Pour répondre à ces attentes, ce document est réparti de la façon suivante :

- Un premier chapitre visera à faire le point sur l'enjeu de l'eau dans le monde et notamment en Algérie ;
- Un deuxième chapitre sera consacré à présenter les différents procédés du dessalement dont une partie sera consacrée à l'osmose inverse ;
- Un troisième chapitre sera entièrement livré à la présentation de la station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf qui utilise le procédé d'osmose inverse ;

- Le dernier chapitre concernera la description de l'installation pilote d'osmose inverse et les différentes expériences menées pour réaliser cette étude. Les résultats obtenus et leurs discussions y seront exposés.



---

# **Chapitre 01 :** **L'eau, un enjeu pour** **demain**

---

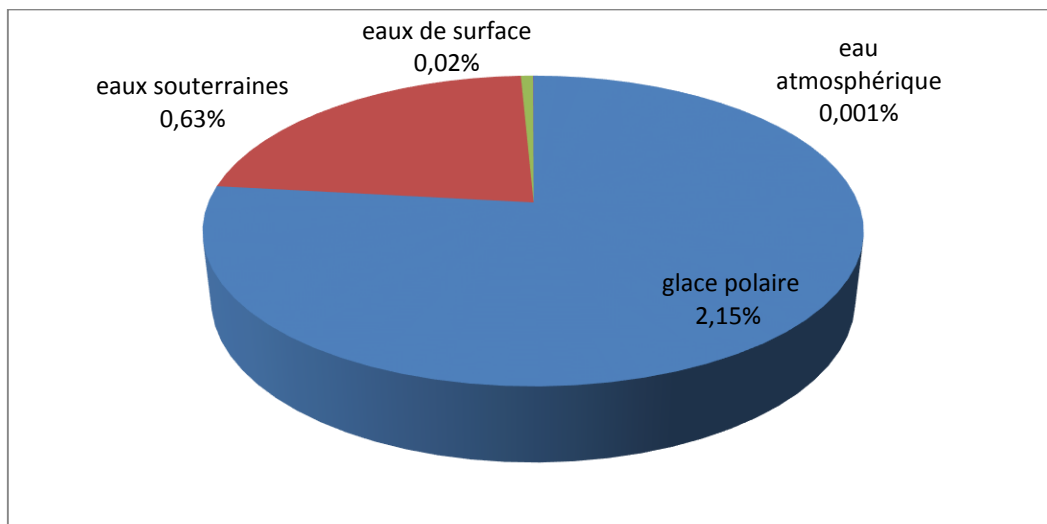
## I. Introduction

Essentielle pour la vie, l'eau douce n'est pas accessible à tous et se trouve en quantité limitée sur terre. Les pressions qui pèsent sur les ressources en eau s'intensifient à mesure que la population augmente, les activités humaines consomment l'eau en grandes quantités et le niveau de vie s'accroît. A ce stade, la rareté de l'eau se fait de plus en plus sentir et devient sans doute l'un des enjeux majeurs de ce siècle.

## II. L'eau dans le monde

### II.1 Répartition de l'eau sur la planète

On surnomme la terre la planète bleue, puisque 72% de sa surface est recouverte d'eau, 97.2% de cette eau est salée et se trouve dans les océans, les mers intérieures, mais aussi dans certaines nappes souterraines. L'eau douce représente 2,8% de l'eau totale du globe [1].



« Figure I.1 » : répartition en % des 2.8% d'eau douce du globe

La majorité de l'eau douce est sous forme de glace polaire (figure I.1) qui est inutilisable. Il ne reste donc que environ 1/4 de l'eau douce pour que tous les habitants de la planète bleue puissent assouvir leurs besoins, c'est donc très peu [1].

Au cours des siècles passés, les utilisations humaines de l'eau n'ont eu aucune incidence sur la disponibilité en eau. Mais, avec le monde moderne, le développement industriel, la croissance démographique, les ressources en eaux deviennent insuffisantes pour satisfaire les besoins de la population.

Bien entendu, la répartition géographique réelle de l'eau sur la Terre montre une réalité bien éloignée de ces moyennes, avec une surface océanique nettement plus importante au Sud qu'au Nord. Une calotte épaisse de glace couvre tout le continent Antarctique, alors qu'au Nord, il n'y a, en plus de la calotte du Groenland, que la glace qui flotte sur l'océan Arctique. Ces contrastes dans la répartition de l'eau liquide et solide renforcent les disparités dans la répartition de l'eau atmosphérique. Il existe en effet de grandes différences régionales du Nord au Sud liées aux variations de rayonnement solaire, qui ont une incidence entre les pôles et l'Equateur, et d'Est en Ouest selon les circulations atmosphériques et les barrières de reliefs [2].

Au final, l'homme ne peut utiliser que moins d'1 % du volume total d'eau douce présent sur Terre, soit environ 0,028 % de l'hydrosphère. Ceci englobe les cours d'eau, les réservoirs naturels ou artificiels (lacs, barrages...) et les nappes souterraines [2].

### **II.1.1 Les précipitations et les écoulements terrestres**

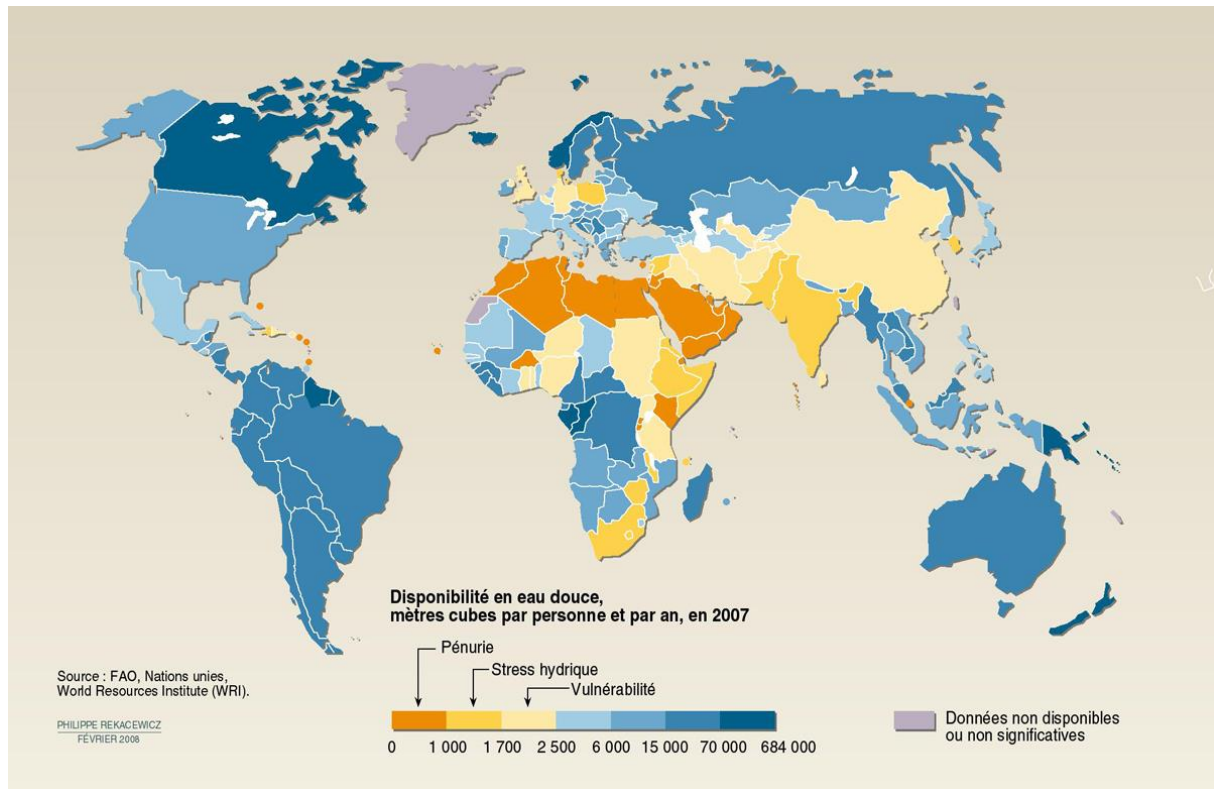
Les ressources de chaque pays dépendent du climat. Les niveaux de précipitations, extrêmement variables dans le monde, vont de moins de 10 000 m<sup>3</sup> à 10 000 000 m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup>. Cette variabilité se répercute sur les flux d'écoulement annuels moyens qui vont de quelques milliers à plusieurs millions de m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup> et par an. D'une autre part, les précipitations et les écoulements, au delà des variations géographiques, sont soumis à des évolutions plus ou moins marquées dans le temps et de manière générale, un afflux relativement constant sera plus facile à gérer que de fortes variations saisonnières [2].

### **II.1.2 Les pays riches et les pays pauvres en eau**

Les cycles climatiques passés et actuels ont façonné la géographie des ressources en eau. Celles-ci sont inégalement réparties entre les pays. Un tiers de la population mondiale est privé d'eau potable. 1,1 milliard de personnes réparties dans 80 pays, n'ont pas accès à une eau salubre. Dans certains pays, moins de 40 % de la population a accès à l'eau potable. C'est le cas du Cambodge, du Tchad, de l'Ethiopie, de la Mauritanie, de l'Afghanistan et d'Oman.

Neuf pays "géants" de l'eau se partagent près de 60 % des ressources naturelles renouvelables d'eau douce du monde. Leurs richesses se calculent en milliers de milliards de m<sup>3</sup> par an ou km<sup>3</sup> par an. Il s'agit du Brésil, de la Fédération Russe, de l'Indonésie, de la Chine, du Canada, des Etats-Unis, de la Colombie, du Pérou et de l'Inde.

A l'autre extrémité, un certain nombre de pays disposent de ressources extrêmement faibles, voire quasi nulles dont le niveau ne s'exprime qu'en millions de m<sup>3</sup> : Koweït, Bahreïn, Emirats Arabes Unis, Malte, Libye, Singapour, Jordanie, Chypre [2], (figure I.2).



« Figure I.2 »: Disponibilité en eau douce dans le monde [2].

## II.2 La pénurie d'eau

1,7 milliard de personnes dans le monde vivent dans des régions où les nappes souterraines sont surexploitées (le nombre de personne vivant en zones de stress hydrique étant bien supérieur).

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) considère qu'il y a stress hydrique lorsqu'un être humain dispose de moins de 1 700 m<sup>3</sup> d'eau par an et pénurie lorsqu'il dispose de moins de 1000 m<sup>3</sup> par an. 1.4 milliards de personnes vivent avec moins de 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an [2].

La situation d'un pays au regard des ressources en eau peut être évaluée par l'indice d'exploitation, le volume par habitant et le degré d'indépendance. L'indice d'exploitation est la part de l'eau prélevée pour l'ensemble des besoins d'un pays, par rapport au volume annuel moyen des apports naturels. Il peut aller de 1 % au Venezuela à

plus de 100 % en Arabie Saoudite et en Libye. Le volume des ressources naturelles va de moins de 500 m<sup>3</sup>/habitant/an en Malte, à plus de 80 000 m<sup>3</sup>/habitant/an (Norvège, Gabon, Canada...). La France, comme l'Allemagne, la Turquie ou le Mexique, est considérée comme bien pourvue puisqu'elle se situe dans la fourchette de 2000 à 5000 m<sup>3</sup>/habitant/an [1].

L'Egypte, les Pays-Bas ou l'Irak, par exemple, dépendent fortement des ressources en eau d'origine externe, respectivement 99 %, 89 % et 65 %, [3].

### **II.3 L'eau source de conflits entre les pays**

La croissance démographique dans des pays en développement connaissant des difficultés dans la gestion de l'eau de l'eau suffit à appréhender les risques à venir de tensions accrues sur les ressources d'eau [3].

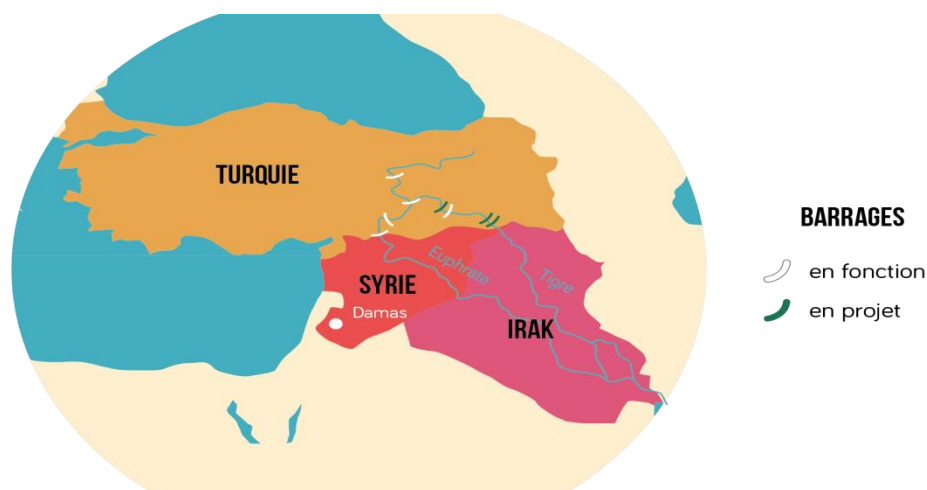
Il est à craindre que des situations conflictuelles se multiplient au sein même des Etats, avec des conflits prévisibles entre catégories d'utilisateurs et, pour l'essentiel entre agriculture et alimentation en eau des populations. La réduction de la part de l'usage agricole est une tendance qui tend à s'imposer dans les pays développés : celle-ci doit devenir de plus en plus économe [3].

Un certain nombre de désaccords entre Etats a pour origine l'usage des ressources transfrontalières. Les tensions existantes pourraient s'intensifier à mesure que les contraintes hydriques se feront plus fortes. L'ONU évalue à plus de 300 le nombre de rivières transfrontalières pouvant constituer un enjeu conflictuel dans un avenir proche [3].

Deux personnes sur cinq dans le monde vivent dans des bassins hydrologiques internationaux partagés par plusieurs pays. Ainsi pour 39 pays, au moins la moitié des ressources en eau trouvent leur origine au-delà de leurs frontières [3].

- Le cas du Proche et Moyen-Orient est d'autant plus inquiétant qu'il s'agit d'une région où les rivalités sont déjà très vives. De surcroît, c'est une des zones du monde où les problèmes de pénurie d'eau devraient se faire le plus durement sentir à brève échéance. Actuellement, Le contrôle des ressources du Tigre et de l'Euphrate oppose de plus en plus ouvertement les trois grands pays riverains : Turquie, Syrie et Irak, qui se partagent l'eau d'un même fleuve, l'Euphrate. Celui-ci prend source en Turquie et débouche en Irak. De grands aménagements hydrauliques ont lieu en amont pas très

loin de la frontière avec la Syrie : Le grand projet anatolien (Projet d'Anatolie du Sud-est) entre autres celui du Birecik, qui constitue un grand barrage (figure I.3) avec un lac de retenue. Lors de la constitution des barrages dans le cadre du grand projet anatolien, les pays se trouvant en aval de ces deux fleuves subiront une perte de 70% du débit naturel de l'Euphrate et une perte de 50% de celui du Tigre. Cette situation crée des tensions entre les pays en amont et ceux en aval particulièrement entre la Turquie et la Syrie. Cette situation touche aux affaires politiques les plus sensibles. Plus de 15 milliards de mètres cubes d'eau de l'Euphrate passent à travers les frontières, cette quantité d'eau est ensuite partagée entre la Syrie et l'Irak, celui-ci en prend 58%, alors que la Syrie 42%. Le barrage de Birecik assure aux paysans anatoliens très pauvres un accroissement de leurs produits de blé (104%), de coton (390%) et de tomates (500%). Ces retombées économiques permettent la création de plusieurs emplois et font augmenter le niveau de vie des habitants en attirant les investissements dans le tourisme [3].



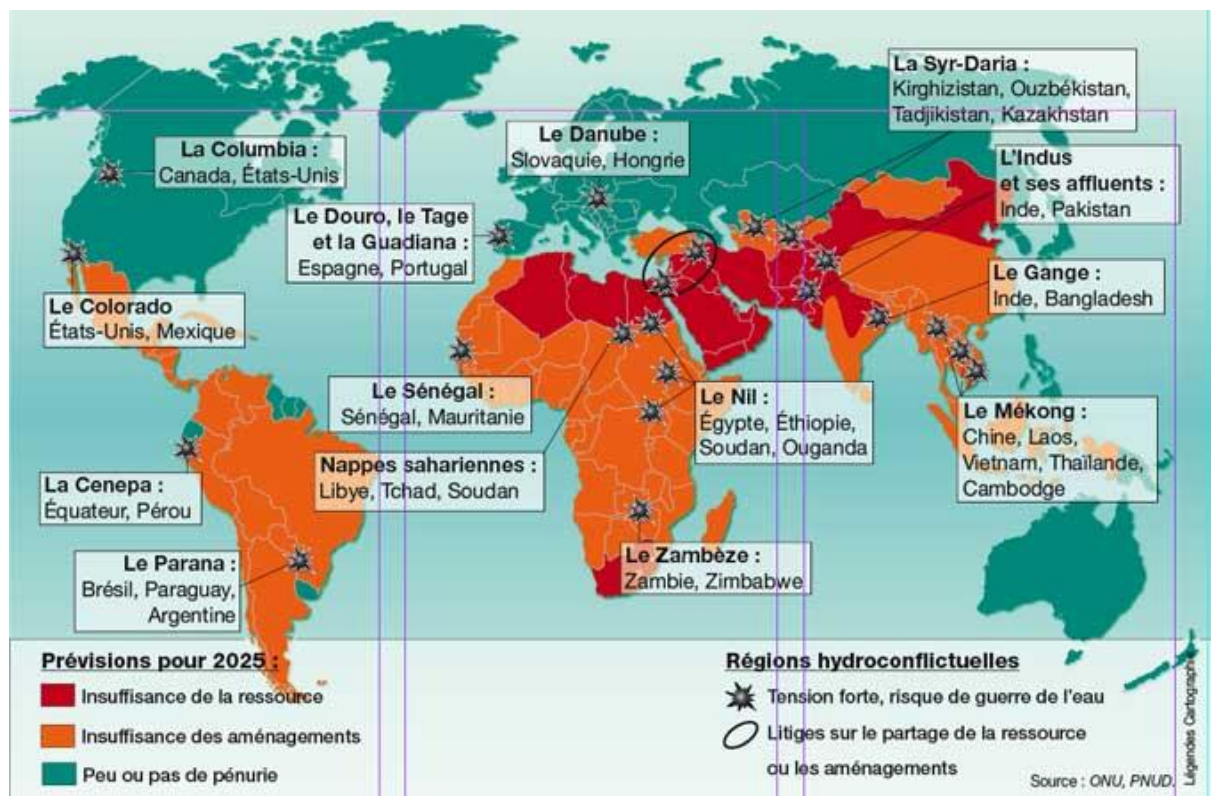
« Figure I.3 » : les barrages en fonction et en cours de construction en travers les deux fleuves l'Euphrate et le Tigre [4].

Des situations analogues existent dans d'autres régions du monde, (figure I.4).

- Le Nil, avec les rapports plus ou moins tendus qu'entretiennent les trois pays riverains les plus en aval (Egypte, Soudan et Ethiopie), dans une zone aride ou aucune agriculture ne serait envisageable sans le fleuve.
- Plusieurs litiges perdurent dans le sous-continent indien pour le contrôle du débit des fleuves : l'Indus entre l'Inde et le Pakistan, le Gange et le Brahmapoutre entre l'Inde, le

Bengladesh et le Népal. Le tout, bien sûr, sur fond de crises persistantes entre ces différents pays.

- L'éclatement du bloc communiste a généré un certain nombre de litiges hydriques, les destins des états (parfois nouvellement créés) n'étant plus liés comme par le passé et le réveil des nationalismes nourrissant souvent ces revendications. C'est le cas entre la Hongrie et la Slovaquie, en Asie mineure ex soviétique et en ex Yougoslavie [5].



« Figure I.4 » : les régions hydro-confliktuelles dans le monde [6].

L'eau devient de plus en plus rare et est, dès lors, de plus en plus convoitée. Elle constitue un enjeu politique et économique important. Si, dans les années à venir, la répartition de la ressource et sa gestion ne s'améliorent pas, le manque d'eau pourrait devenir une préoccupation importante pour les 2/3 de la population.

Deux préoccupations essentielles apparaissent quant on analyse la répartition de la ressource. D'une part, la plupart des pays les plus touchés par le manque d'eau sont des pays en voie de développement qui ne savent généralement pas faire face aux contraintes financières d'une gestion correcte de l'eau (de la production à l'assainissement). Pour certains pays, la pénurie d'eau constitue donc un frein au développement. D'autre part, les conflits

risquent de se multiplier. Dans les pays où l'eau est une denrée rare, il faudra établir la répartition la plus judicieuse entre l'eau réservée à l'agriculture et celle utilisée par les habitants. Des conflits pour l'eau à la frontière entre deux pays risquent également de devenir problématique [3].

### **III. L'eau en Algérie**

#### **III.1 Eléments de géographie et d'hydrographie de l'Algérie : un cadre physique défavorable**

Pour bien saisir la question de l'eau en Algérie, il convient de rappeler de quelques éléments de sa géographie et de son hydrographie. L'Algérie est un pays très vaste (2 381 741 Km<sup>2</sup>) qui représente du nord au sud sur 1 800 Km une succession de zones contrastées. La partie septentrionale forme une lisière large de 200 Km seulement en bordure de la mer Méditerranée. C'est cette zone qui forme l'Algérie « utile », occupée par la majeure partie de la population. Elle est soulevée par les barres parallèles des Atlas tellien et saharien qui enserrant la région des Hauts-plateaux. Au sud de cette lisière, s'étale l'immense désert du Sahara sur 1 600 Km de profondeur, surélevé au sud-est par le massif du Hoggar. Le littoral méditerranéen s'étire sur 1 200 Km ; il est bordé de montagnes parmi lesquelles la chaîne de Kabylie qui culmine à 2308m au Djurdjura. Dans le prolongement oriental de l'Atlas saharien, le massif de l'Aurès, culmine quant à lui à 2328m au Djebel Chelia [7].

A l'arrière de ces reliefs se trouve un chapelet d'étroites plaines alluviales isolées les unes des autres, il s'agit, d'est en ouest, de la plaine d'Annaba, la Mitidja dans l'Algérois, la plaine de la vallée du Chlef, celle du Sig dans l'Oranie. Plus à l'intérieur on trouve les plaines de Mascara, de Bel-Abbès et de Tlemcen. Au sud de ces plaines, l'Atlas tellien déploie, à l'ouest des hautes plaines semi-désertiques et à l'est les hautes plaines constantinoises. Au-delà, s'étend les reliefs primaires du Sahara, succession de larges plaines parsemées de dunes appelées ergs (grand Erg occidental, grand Erg oriental, Erg Chech), de dépressions recouvertes de sel – les sebkhas de Hamadas (plateaux recouverts de rocaïlle, tels le plateau du Tademaït ou le Tassili des Ajjer et le Hoggar, et enfin de hautes montagnes (massifs volcaniques du Hoggar qui culmine à 2908m au mont Tahat) [7].

En Algérie, autant la large disponibilité de l'énergie est un facteur favorable au développement durable, autant le déficit structurel en eau en constitue une contrainte majeure dont l'ampleur du défi a été longtemps sous-estimée, en particulier au lendemain de l'indépendance [7].



Le pays est sorti, il y a quelques années, d'un cycle de sécheresse qui a duré près d'un quart de siècle avec toutes les conséquences sur l'assèchement de son régime d'écoulement des eaux et tous les effets nocifs sur les nappes aquifères. A titre d'exemples, il avait plu les trois dernières années de ce cycle moins de 50% que la moyenne des 50 dernières années [7].

Le déficit en eau potable pour alimenter Alger avait été tel qu'il a eu comme conséquence l'arrêt de l'irrigation sur la plaine de la Mitidja à partir des barrages (Hamiz, Safsaf).

La ville d'Oran a vu sa population consommer de l'eau saumâtre pendant plusieurs années.

L'Algérie, avec 500m<sup>3</sup> d'eau par habitants en 2003, se situe parmi les pays les moins dotés de la planète, en dessous du seuil de rareté fixé par la banque mondiale à 1000m<sup>3</sup> par habitant et par an. Depuis l'indépendance, la situation n'a fait que se dégrader puisqu'elle passe de 1500m<sup>3</sup> en 1962 à 720m<sup>3</sup> en 1990, 680m<sup>3</sup> en 1995 et 630m<sup>3</sup> en 1998. Les projections pour 2020, en scénario tendanciel, affichent 430m<sup>3</sup> par an et par habitant [7].

Cette situation caractérisée par des ressources insuffisantes, aggravée par des longs cycles de sécheresse dont le dernier s'est achevé en automne 2002, implique des conflits importants entre les différents utilisateurs qui nécessitent des arbitrages délicats et difficiles pour les pouvoirs publics. La faible pluviométrie de l'hiver 2007-2008 est là pour le rappeler [7].

Les marges de manœuvre vont d'autant plus se rétrécir que les besoins en alimentation en eau potable (AEP) seront multipliés par 2.5 les 25 prochaines années. Quelques éléments significatifs traduisent cette situation de crise permanente :

- Tensions fréquentes dans les grandes villes du fait de la disponibilité insuffisante de l'eau ;
- Diminution importante de la superficie irriguée qui passe de 13ha en 1962 à 5ha pour 1 000 habitants en 2001 ;
- Disparition de certains vergers traditionnels du fait des prélèvements opérés du profit de l'AEP sur les eaux d'irrigation ;
- Une population estimée à près de 8 millions d'habitants n'est pas encore raccordée au réseau de distribution d'eau potable.

L'érosion qui affecte les plaines septentrionales diminue non seulement le potentiel agricole mais affecte également les capacités de mobilisation des ressources en eau. Ajoutées à cela, les diverses pollutions des eaux et les pertes dans les réseaux de distribution d'eau potable et d'irrigation aggravent la situation en matière de disponibilité d'eau. A titre

d'illustration les pertes totales dans les réseaux de distribution d'eau potable dans les villes sont estimées à 50% des volumes prélevés et à 40% pour les réseaux d'irrigation.

### III.2 L'Algérie face au défi de l'eau

#### III.2.1 Des ressources insuffisantes exploitées dans un cadre institutionnel et opérationnel inadéquat

Les évaluations de la ressource indiquent d'une part que les quantités sont insuffisantes et que d'autres part elles sont faiblement mobilisées et mal exploitées conduisant souvent au gaspillage de cette ressource rare.

Il faut savoir que le territoire algérien qui couvre une superficie de 2,4 millions de Km<sup>2</sup>, est constitué à 90% d'un désert où les précipitations sont exceptionnelles. La répartition des ressources hydriques à travers le pays est fortement liée à la distribution pluviométrique qui se caractérise par une très forte variation du gradient pluviométrique du Nord au Sud mais aussi, à un degré moindre, d'Est en Ouest. Ainsi la pluviométrie varie de 250mm par an sur les hautes plaines à 1 400mm par an sur les reliefs de l'Atlas tellien. Le tableau suivant illustre cette situation [7].

« Tableau I.1 » : variation de la lame d'eau [7].

| Pluviométrie mm/an | Région Ouest | Région Centre | Région Est |
|--------------------|--------------|---------------|------------|
| Littoral           | 400          | 700           | 900        |
| Atlas tellien      | 600          | 700- 1000     | 800- 1400  |
| Hautes plaines     | 250          | 250           | 400        |
| Atlas saharien     | 150          | 200           | 300- 400   |
| Sahara             | 20- 150      | 20- 150       | 20- 150    |

Les ressources en eau superficielles décroissent du Nord au Sud, ainsi les écoulements superficiels concernent essentiellement les cours d'eau drainant l'Atlas tellien et le Sahel (90%). L'inventaire systématique des ressources hydrauliques montre qu'à la zone tellienne correspondent des eaux de surface. Au niveau des Hautes plaines et du Sahara, pauvres en eaux de surface, correspondent des ressources souterraines qui ont l'inconvénient de ne pas être renouvelables au Sahara. Le tableau I.2 nous renseigne sur les potentialités du pays en eau de surface [7].

« Tableau I.2 » : potentialités en eaux de surface [7].

| Zone hydrographique    | Potentialités (millions m <sup>3</sup> /an)<br>Année 1986 | Potentialités (millions m <sup>3</sup> /an)<br>Année 1998 | Déficit en % |
|------------------------|---|---|--------------|
| Bassins Méditerranéens | 11 105  | 8820  | 21           |
| Hautes plaines         | 985   | 718   | 27           |
| Sahara                 | 320   | 200   | 38           |
| TOTAL                  | 12 410  | 9738  | 22           |

S'agissant des ressources en eaux souterraines les études de prospection géophysiques sur 130 000 Km<sup>2</sup>, les études hydrogéologiques ainsi que les résultats des forages de reconnaissance ont permis de répertorier :

- Pour le nord : 147 aquifères, 9 000 sources, 23 000 forages et 60 000 puits avec un potentiel de 2 milliards de m<sup>3</sup>/an et une exploitation de 1,8 milliards de m<sup>3</sup>/an ;
- Pour le sud : les grandes nappes du Sahara septentrional disposent d'un potentiel de 6 milliards de m<sup>3</sup>/an.

Ce qui donne un potentiel total des ressources en eaux souterraines de 8 milliards m<sup>3</sup>/an pour l'Algérien soit près de 22 millions de m<sup>3</sup>/jour [7].

« Tableau I.3 » : les ressources globales en eaux du pays [7].

|                     | Année moyenne (milliard de m <sup>3</sup> /an) | Année sèche (milliard de m <sup>3</sup> /an) |
|---------------------|--|--|
| Eaux superficielles | 12,4   | 9,5  |
| Eaux souterraines   | 8,0  | 8,0  |
| TOTAL               | 20,4   | 17,5   |

### III.2.2 Des investissements peu performants mais en amélioration face à une demande émergente importante

L'insuffisance des ressources hydriques est aggravée par des conduites d'investissement inefficaces et des méthodes d'exploitation médiocres.

De nombreux programmes d'investissements n'ont pas produit les effets attendus en matière d'alimentation en eau potable et industrielle ou en matière d'irrigation. Un certain nombre de barrages et de forages ont été réalisés sans que les ouvrages de transfert et les périmètres d'irrigation soient disponibles. Bien plus grave des stations de traitement des eaux usées sont achevées et n'ont jamais été exploitées. A titre d'illustration, sur 13 barrages d'une capacité de 2,5 milliards de m<sup>3</sup>, seuls 3 peuvent être utilisés dès leur achèvement. Au manque de rigueur dans la conduite des investissements, s'ajoute une démarche qui occulte complètement le processus d'exploitation ne sont couverts ni par le budget de fonctionnement de l'administration ni par la tarification de l'eau.

Le résultat est que l'infrastructure devient obsolète très rapidement. Au mieux, des communes ou des offices de périmètres irrigués se retrouvent concessionnaires sans disposer des ressources humaines, techniques et financières requises. A l'exception des barrages dont les coûts d'exploitation sont couverts par le budget de fonctionnement de l'état, les autres infrastructures sont supposées être prises en charges par les organismes de gestion concessionnaires avec les maigres recettes de la vente de l'eau. En fait, l'insuffisance des ressources financières ne leur permet pas d'assurer leur exploitation et maintenance adéquates. De ce point de vue les pertes d'eau dans les réseaux de distribution et les volumes non facturés s'élèvent à plus de 50% des volumes produits. Le recours plus tard à la gestion déléguée par des entreprises internationales professionnelles a nettement amélioré la situation dans les grandes villes comme c'est le cas aujourd'hui pour la SEAAL à Alger et à Oran [6].

Pour mobiliser et distribuer les ressources hydriques requises de façon économique, il faudra encore réaliser un certain nombre d'infrastructures et d'ouvrages supplémentaires de mobilisation, de transfert, de traitement, d'adduction et de distribution d'eau. Le portefeuille non définitif de projets à lancer sur financement public est relatif à :

- L'adduction et le traitement de 250 millions de m<sup>3</sup> à partir des barrages récemment achevés conformément au tableau ci-dessous.

« Tableau I.4 »: projets d'adduction pour les nouveaux barrages [7].

| Barrages         | Centres desservies       |
|------------------|--------------------------|
| Gargar           | Couloir Arzew-Oran       |
| Hammam boughrara | Témouchent-oran          |
| Sidi Abdeli      | Wilaya de Sidi Bel-Abbes |
| Sly              | Couloir Chlef-Tenes      |
| Boukourdane      | Tipaza-Cherchell         |
| Beni zid         | Collo                    |
| Hammah debbagh   | Guelma                   |
| mexa             | Couloir El Tarf-Annaba   |

A cela il faut ajouter les nouveaux projets d'adduction et le traitement de 600 millions de m<sup>3</sup>, à partir de barrages en cours de construction ou en voie d'achèvement, identifiés dans le tableau I.5.

Le tableau ci-dessous spécifie les projets déjà en portefeuille dont la réalisation est incontournable.

« Tableau I.5 » : projets d'adduction pour les barrages en cours d'achèvement ou de construction [7].

| Barrages        | Zones desservies                           |
|-----------------|--|
| El Agrem        | Jijel                                      |
| Koudiat         | Alger, Médéa, M'sila, Tizi Ouzou et Bouira |
| Acerdoune       | Alger, Tizi Ouzou Bouira Batna, Khenchela  |
| Taksebt         | Oum el Bouaghi, Batna, Khenchela           |
| Tilesdit        | Jijel                                      |
| Koudiat médaour | Mila, Constantine, Jijel, Batna            |
| Béni haroun     | Mila, Constantine, Jijel, Batna            |

Enfin si l'on s'inscrit dans un horizon à plus long terme (2015-2020), il faudrait envisager des prévisions de mobilisation, d'adduction, de traitement et de distribution de l'ordre de 1,350 millions de m<sup>3</sup> pour couvrir les besoins avec comme hypothèse le raccordement total de la population.

Mais tous ces investissements et moyens d'approvisionnement en eau restent insuffisants pour couvrir et satisfaire tous les besoins de la population, c'est pour cela qu'une nouvelle source d'alimentation en eau « le dessalement d'eau de mer » a été prise en compte et mise en œuvre afin de pallier ce manque d'eau.

### III.3 Le dessalement d'eau de mer en Algérie

Les premières réflexions sur les projets de dessalement d'eau de mer initiées par la Sonatrach et le secteur de l'énergie, remontent à la décennie 80 lorsqu'il apparaissait clairement que les besoins en eau pour la zone industrielle d'Arzew étaient couverts par de l'eau censée alimenter la ville d'Oran à partir du barrage de Fergoug. La crise économique et financière des décennies 80 et 90 a fait reporter ce type de projets qui était à l'ordre du jour. La fenêtre de tir pour lancer ces projets ne s'est présentée qu'à partir de 2003 au moment où des excédents financiers apparaissent d'une part et devant la forte pression sociale due au retard et à la faiblesse de la mobilisation des sources traditionnelles.

Il a fallu du temps, également, pour faire les choix technologiques optimaux entre le procédé multi-flash moins coûteux mais plus rigide et le procédé à osmose inverse plus flexible en cas de cogénération, c'est-à-dire de production simultanée d'eau et d'électricité mais à coût d'exploitation plus élevé du fait en particulier du coût des membranes consommables à remplacer régulièrement. Enfin il a fallu trouver les montages d'affaires appropriés par la création de la filiale AEC entre la Sonatrach et la Sonelgaz, filiale chargée de la promotion et de la mise en œuvre sous forme de partenariats du programme national de dessalement d'eau de mer. Il a fallu enfin asseoir les projets d'une part sur un prix compétitif d'un élément essentiel des charges d'exploitation le gaz naturel et d'autre part sur un prix attractif de vente de l'eau. C'est ce qui a été fait [7].

En 1964, trois petites unités de 8m<sup>3</sup>/j chacune ont été installées dans le complexe de gaz liquéfié d'Arzew, suivies en 1969 d'une unité monobloc de 4560 m<sup>3</sup>/j [8].

En 2001, les pouvoirs publics décident de placer l'alimentation en eau par le recours à l'eau de mer, en tête des priorités du plan de relance économique, doté alors de 7 milliards de dollars, en faveur notamment de la région de l'Oranie qui accuse un déficit alarmant [9].

A l'horizon 2019, le programme national prévoit la réalisation de 43 stations de dessalement, lancé en 2005, ce plan détaillé porte sur 30 stations monobloc et 13 méga stations dans le nord du pays en vue de produire 2,26 millions de m<sup>3</sup>/j d'eau dessalée [9].

Les 13 méga-stations (tableau I.6), sont conçues sur le modèle "Build, Own and Operate" (construire, posséder et exploiter), sont alors détenues à 49 % par AEC et à 51 % par l'investisseur qui exploitera cette usine pendant 25 ans [9].

« Tableau I.6 » : les 13 mégas stations de dessalement en Algérie [9].

| N° | Localisation           | Capacité m <sup>3</sup> /j |
|----|------------------------|----------------------------|
| 01 | Kahrama (Arzew)        | 90 000                     |
| 02 | Hamma (Alger)          | 200 000                    |
| 03 | Skikda                 | 100 000                    |
| 04 | BeniSaf (A.Temouchent) | 200 000                    |
| 05 | Mostaganem             | 200 000                    |
| 06 | Douaouda (Alger Ouest) | 120 000                    |
| 07 | Cap Djenet (Alger Est) | 100 000                    |
| 08 | Souk Tleta (Tlemcen)   | 200 000                    |
| 09 | Honaine (Tlemcen)      | 200 000                    |
| 10 | Mactaa (Oran)          | 500 000                    |
| 11 | El Tarf                | 50 000                     |
| 12 | Ténès                  | 200 000                    |
| 13 | Oued Sebt (Tipaza)     | 100 000                    |

« Tableau I.7 » : les stations de dessalement d'eau de mer en Algérie [10].

| Région        | Localisation             | Capacité<br>(m <sup>3</sup> /j) | populations | Mise en service | partenaire  |
|---------------|--------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|---|
| <b>Ouest</b>  | -Arzew/Oran              | 90.000                          | 540.000     | 12-11-2005      | -Black *Veatch* « Afrique du sud » ; 50%                      |
|               | -Souk Telata/Tlemcen     | 200.000                         | 133.320     | 13-04-2011      | -Tdic * Hyflux/Malafokoff * « Singapour » ; 51%               |
|               | -Honaine/Tlemcen         | 200.000                         | 133.320     | 03-07-2012      | -Geida *Befesa/Sadyt « Espagne » ; 51%                        |
|               | -Mostaganem              | 200.000                         | 133.320     | 28-04-2011      | -Inima *Aqualia* « Espagne » ; 51% ;                          |
|               | -Béni-Saf/Ain Temouchent | 200.00                          | 133.320     | 15-11-2009      | -Cobra*Espagne* ; 51%   |
|               | -Magtaa/Oran             | 500.000                         | 133.320     | 27-06-2014      | -Hyflux*Singapour ; 47%, ADE ; 10%                            |
| <b>Centre</b> | -Hama/Alger              | 200.000                         | Algérois    | 12-02-2008      | -Geionics*Etats-Unis* ; 70%                                   |
|               | -Capdjinet/ Boumerdès    | 100.000                         | 666.60      | 28-09-2011      | -Inima*Aqualia *« Espagne » ; 51%                             |
|               | -Fouka/Tipaza            | 120.000                         | 666.60      | 30-07-2011      | -AWI*SNC Iova lin « Accina » ; 51%                            |
|               | -Ouedsebt/Tipaza         | 100.000                         | -----       | Etude projet    | -En cours de développement.                                   |
|               | -Ténès/Chleff            | 200.000                         | 999.990     | Aout2014        | -Befesa*Espagne* ; 51%  |
| <b>Est</b>    | -Echat/Taraf             | 100.000                         | 333.330     | Etude projet    | -En cours de développement.                                   |
|               | -Skikda                  | 100.00                          | 666.600     | 04-09-2009      | -Geida  |
|               | -Bejaia                  | 100.000                         | -----       | Etude projet    | -Befesa/Sadyt « Espagne » ; 51%<br>En cours de développement. |



Ces projets (tableau I.7) sont réalisés en partenariat avec notamment des firmes espagnoles (Befesa, Inima Aqualia, Geida), Sud-Africaines (Black and watch), Malaisiennes (Malakof), Singapourienne (Hyflux), et Américaine (Ge Ionics) [9].

L'Algérie peut également s'enorgueillir d'abriter à la fois la plus importante station de dessalement d'eau de mer d'Afrique qui est l'unité d'El Hamma et la plus grande unité de dessalement par osmose inverse au monde, à Magtaa (Oran) [8].

Cette dernière d'envergure mondiale, réalisée en partenariat avec la firme indonésienne Hyflux, est entrée en service au cours de cette année [9].

Grâce aux progrès réalisés, la consommation moyenne de l'eau en Algérie est passée à 185 litres/jour/habitant actuellement, alors qu'elle était de 90 litres par jour en 2000 [10].

Toutefois, la situation de stress hydrique qui ne semble pas être appelée à s'atténuer en raison des aléas climatiques, fait du dessalement un atout majeur, offrant une large marge de manœuvre dans la politique du gouvernement en ce qui concerne le secteur hydraulique [9].

Les experts estiment que son avantage est de permettre à la fois la mise à disposition d'une eau d'une pureté recherchée et d'assurer la sécurité d'approvisionnement [11].

Les prévisions du centre de recherche de dessalement au Moyen Orient révèlent que l'Algérie devrait se classer derrière l'Arabie saoudite, les Emirats Arabes unis et les USA en termes de production d'eau potable à partir de l'eau de mer [11].

#### **IV. Conclusion**

Le dessalement d'eau de mer est l'une des solutions les plus efficaces pour pallier le manque d'eau dans certains pays. L'expérience algérienne dans ce domaine et durant ces dernières années la situe parmi les leaders du dessalement et la station de Magtaa ; la plus grande station de dessalement par osmose inverse dans le monde avec une capacité de production de 500 000m<sup>3</sup>/jour en est la preuve.

---

# **Chapitre 02 :**

## **Le dessalement d'eau de mer**

---

## I. Introduction

L'idée de dessaler l'eau de mer ou les eaux saumâtres remonte à des centaines et des milliers d'années. Le fait que, par ébullition ou évaporation, l'eau pouvait être séparée du sel, constituait le fondement de la technologie des premières installations de dessalement qui apparurent dans les années 50 et 60 [12].

## II. Les caractéristiques des eaux de mer et des eaux saumâtres

La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globales en sels, d'après l'OMS une eau est considérée comme potable si sa salinité est comprise entre 100 et 1000 mg/l, soit 0,1 et 1g/l. la salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 400 mg/l [14].

### II.1 Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g/l (27,2 g/l de Na Cl, 3,8 g/l de MgCl<sub>2</sub>, 1,7 g/l MgSO<sub>4</sub>, 1,26 g/l CaSO<sub>4</sub>, 0,86 g/l K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [14].

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées « Tableau II.1 ».

« Tableau II.1 » : taux de salinité des mers fermées [15].

| Mers             | Salinité en (mg/l) |
|------------------|--------------------|
| Mer Baltique     | 7 000              |
| Mer Caspienne    | 13 500             |
| Mer Noire        | 13 000             |
| Mer Adriatique   | 25 000             |
| Océan Pacifique  | 33 000             |
| Océan Indien     | 33 800             |
| Océan Atlantique | 36 000             |

|                  |         |
|------------------|---------|
| Mer Méditerranée | 39 400  |
| Golf Arabe       | 43 000  |
| Mer Rouge        | 43 000  |
| Mer Morte        | 270 000 |

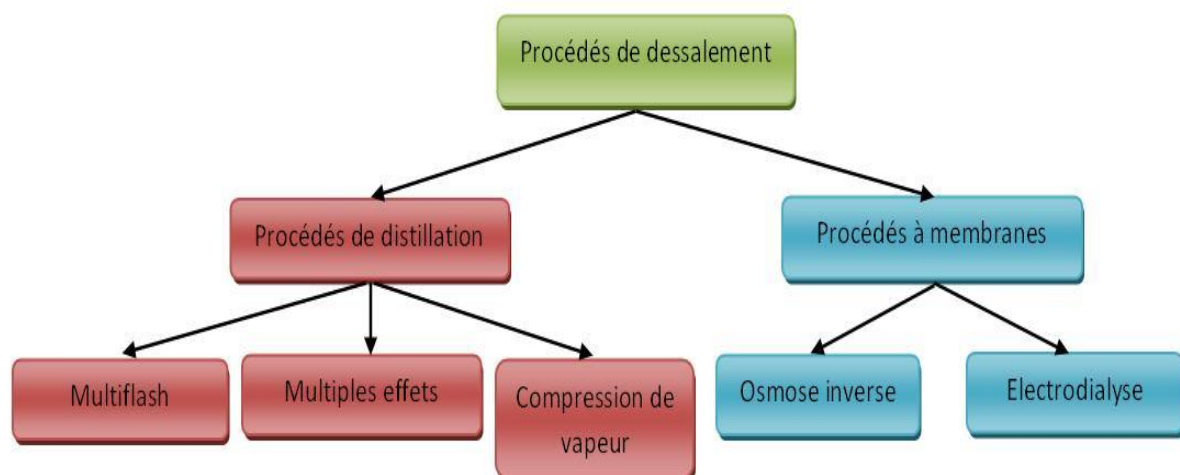
Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique [14].

## II.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  $\text{CaCO}_3$ , le  $\text{CaSO}_4$ , le  $\text{MgCO}_3$  et le  $\text{NaCl}$  [16].

## III. Les principales techniques de dessalement

Les principaux procédés de dessalement des eaux sont schématisés dans la figure suivante:



« Figure II.1 » : les principaux procédés de dessalement [17].

- Les procédés de distillation thermiques :

Multi Stage Flache (MSF) ; Effets Multiples (EF) ; compression de vapeur (VC)

- Les procédés membranaires :

L'électrodialyse ; l'osmose inverse.

- Autres procédés :

Congélation sur parois froides ; distillation à effets de serre, l'échange d'ions.

Quel que soit le procédé de séparation choisi, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- une prise d'eau de mer ;
- un post prétraitement ;
- le procédé de dessalement lui-même ;
- le post-traitement.

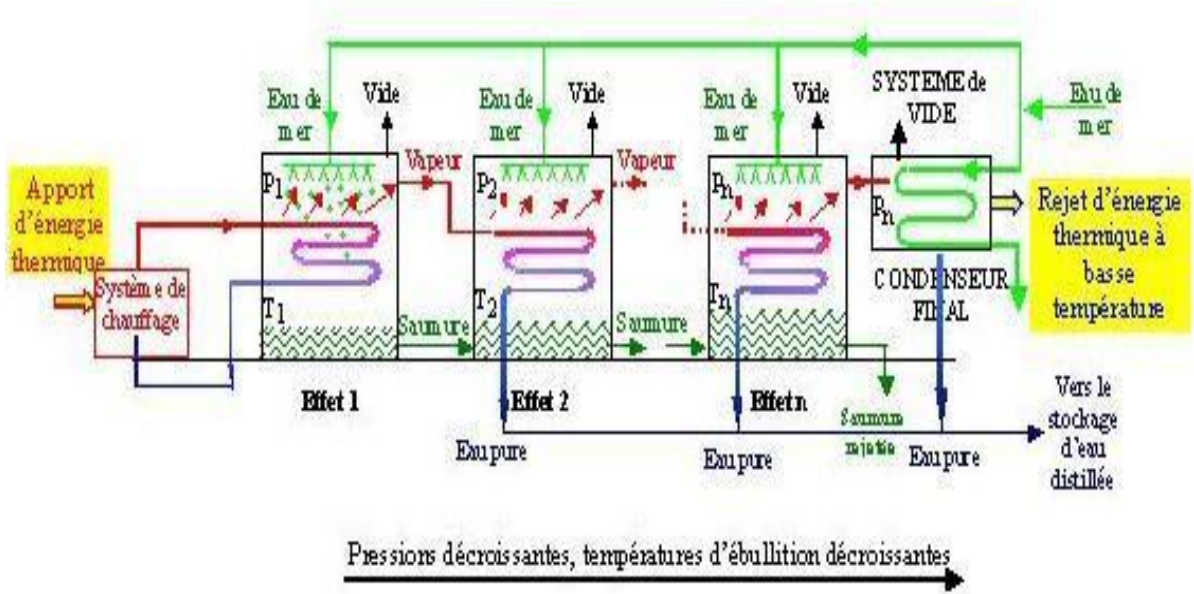
A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre [21].

### III.1 Les procédés thermiques

Dans les procédés de distillation, on fait chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide [18].

#### III.1.1 Distillation à multiples effets (MED)

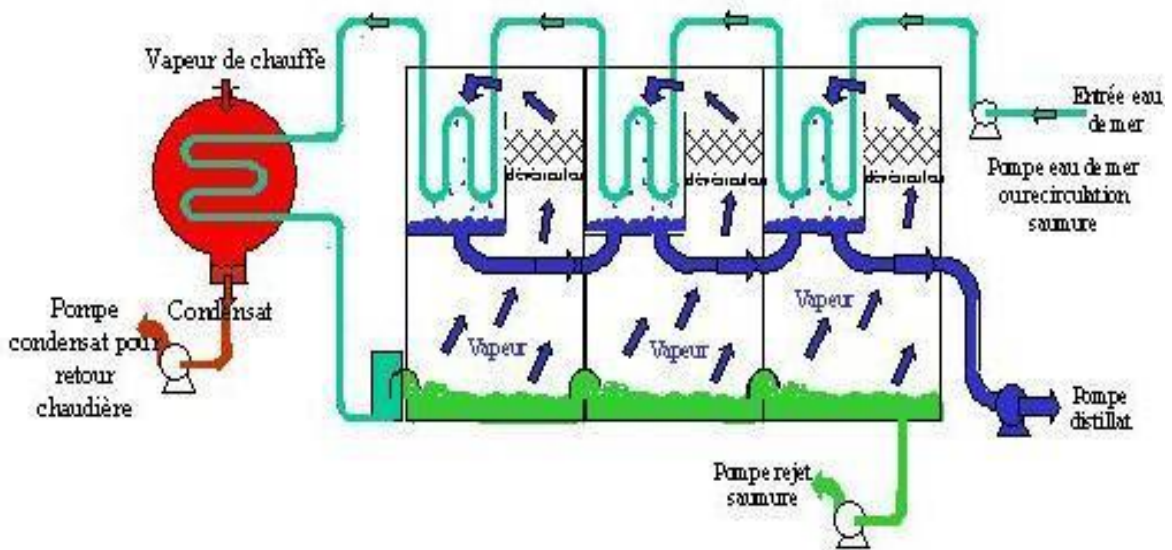
Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par de l'eau de mer froide. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième soutire l'eau de mer concentrée (figure II.2), Il s'agit en fait de reproduire le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations [18].



« Figure II.2 » : Schéma d'un système de distillation à multiples effets (MED) [19].

### III.1.2 Distillation par multi-stage-flash (MSF)

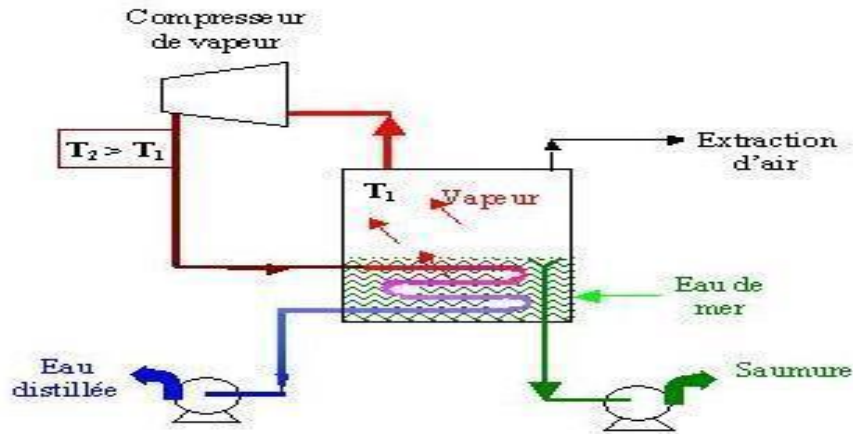
Son objectif est d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur, simple effet. On sait que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression. On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faible et ainsi de suite (figure II.3) [18].



« Figure II.3 » : Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) [19].

### III.1.3 Distillation par compression 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 thermo compression. La compression par éjecteur nécessite par ailleurs une vapeur motrice (Figure II.4), [18].



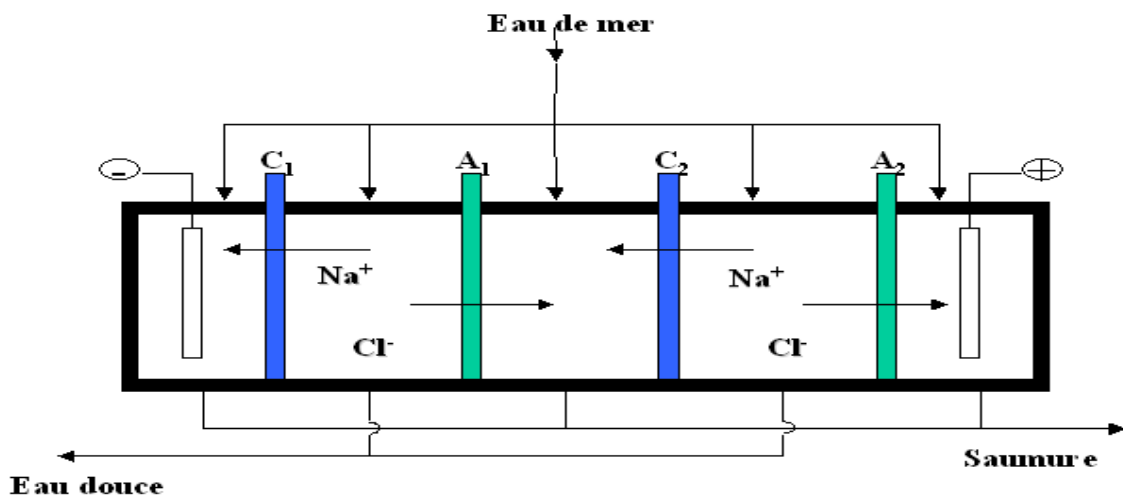
«Figure II.4» : Schéma d'une unité de distillation avec compression de vapeur [19].

## III.2 Les procédés membranaires

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives [18].

### III.2.1 L'électrodialyse

L'électrodialyse fonctionne sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques de l'électrodialyse sont : la dialyse et l'électro-dé ionisation, (Figure II.5) [18].



« Figure II.5 » : Schéma d'une unité de dessalement par électrodialyse [20].

On distingue trois types d'électrodialyse :

- L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
- L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
- L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

### **III.2.1.1 L'électrodialyse dite conventionnelle**

Le terme dialyse désigne la diffusion d'une solution à travers une membrane qui lui est perméable. L'électrodialyse désigne le transfert d'ions à travers une membrane qui leur est perméable sous l'effet d'un champ électrique [18].

### **III.2.1.2 L'électrodialyse à membrane bipolaire**

Les membranes bipolaires sont constituées d'une face perméable aux anions et d'une face perméable aux cations. Sous l'effet d'un champ électrique, l'eau présente au cœur de la membrane est dissociée en ions  $H^+$  et  $OH^-$  générés respectivement par les faces cationiques et anioniques [18].

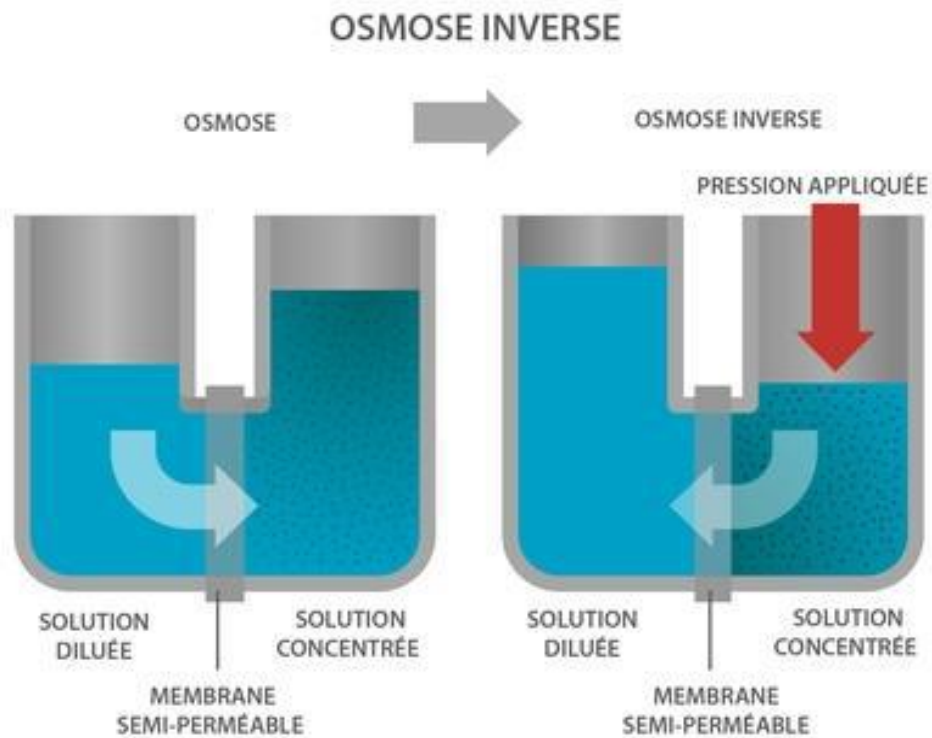
### **III.2.1.3 L'électrolyse à membranes**

L'électrolyse à membranes est la technique électro-membranaire dans laquelle on couple les effets d'une électrodialyse (migration d'ions au travers d'une membrane semi-perméable) à ceux d'une électrolyse (réaction aux électrodes) [18].

## **III.2.2 L'osmose inverse**

Le procédé d'osmose inverse (figure II.6) utilise une membrane semi-perméable afin de séparer les solides dissous, la matière organique, les virus et bactéries de l'eau. Le procédé est dit « inverse » car il nécessite une pression suffisante pour 'forcer' l'eau pure à passer à travers la membrane. Ce procédé abouti à de très bons résultats, car il peut éliminer de 95 à 99% des particules solides dissoutes et 99% des micro-organismes [21].





« Figure II.6 » : principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse [18].

### III.3 Autres procédés

#### III.3.1 La Congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce.

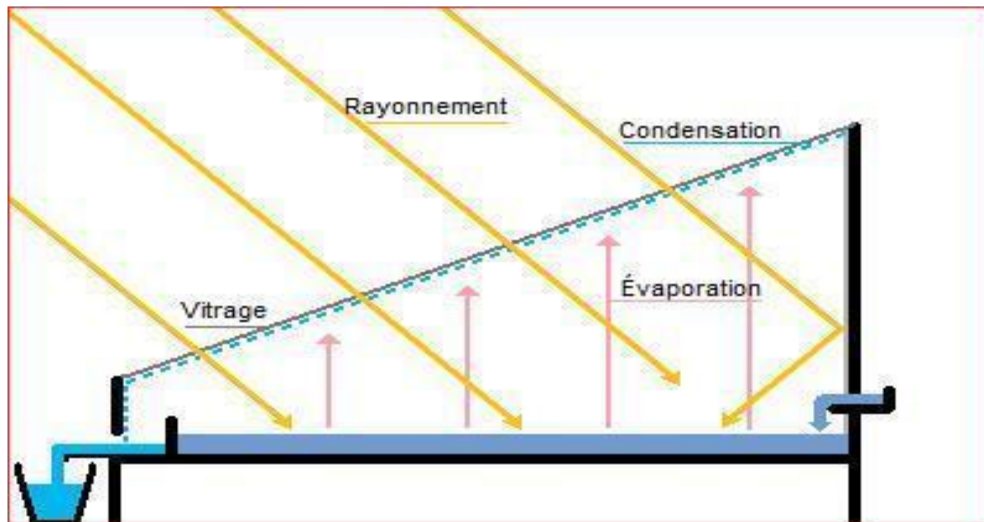
Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

1. le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide),
2. la formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage),
3. le lavage et/ou ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite),
4. la fusion des cristaux de glace [14].

### III.3.2 La distillation solaire à effet de serre

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières.

Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible. (Figure II.7) [14].



« Figure II.7 » : Système de distillation solaire [14].

### III.3.3 L'échange d'ions

Les atomes et molécules électriquement chargés sont des ions. Le traitement connu sous le nom d'échange d'ions emploie des résines spéciales pour éliminer les contaminants minéraux tels que l'arsenic, le chrome, le calcium, le radium, l'uranium et des anions tels que les nitrates et les fluorures excédentaires de l'eau.

Ce traitement fonctionne au mieux dans une eau débarrassée des particules en suspension qui peuvent s'agglutiner sur la résine et limiter son efficacité.

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  $\text{CaCO}_3$  par gramme ou par litre d'échangeur. La capacité totale d'échange n'est en pratique jamais atteinte [14].

## IV. Comparaison entre les procédés de dessalement

Le choix d'un système de dessalement dépend de la nature des ressources en eau, entre autres ; le degré de salinité de l'eau et les ressources énergétiques que possèdent le pays [22].

### IV.1 Les avantages et les inconvénients des deux procédés ; l'osmose inverse et la distillation thermique

Le tableau suivant résume les avantages et inconvénients des deux procédés de dessalement les plus répandus à savoir l'osmose inverse et la distillation thermique.

« Tableau II.2 » : avantages et inconvénients de l'OI et la distillation thermique [22].

| Le procédé    | Osmose inverse  | Distillation thermique   |
|---------------|---|--|
| Avantages     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible consommation énergétique en comparaison avec les procédés de distillation. Depuis 1970, la consommation d'électricité du dessalement par osmose inverse a été divisée par 4.</li> <li>-Le coût du dessalement par osmose inverse a chuté ces dernières décennies, notamment grâce aux récents progrès techniques.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Procédé rentable notamment si l'unité de distillation se trouve près d'une source d'énergie bon marché.</li> </ul>   |
| inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Les membranes ont une durée de vie limitée (fragilité et perte de résistance mécanique).</li> <li>-Le colmatage des membranes (dépôt de matières qui entraîne la formation d'une couche à la surface de la membrane) réduit le débit de filtration,</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Consommation énergétique élevée.</li> <li>-Nécessité d'évacuer les gaz incondensables (ne pouvant donc pas se transformer en liquide à une pression et une température données) lors des prétraitements (notamment une chloration et un traitement antitartre).</li> </ul> |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | provoque une baisse de la perméabilité, modifie la sélectivité et peut être responsable du vieillissement des membranes. |  |
|--|--|--|

#### IV.2 Comparaison entre l'osmose inverse (OI) et les différents procédés de distillation

Le tableau suivant permet de faire une comparaison entre l'OI et les procédés de distillation à savoir ; La distillation Flash par décharges successives (MSF), la distillation à multiples effets (MED) et la distillation à simple effet par compression de vapeur (MVC) [11].

« Tableau II.3 » : comparaison entre l'OI, MSF, MED, MVC [22].

|   | MSF                     | MED                     | MVC                         | OI                          |
|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Température de fonctionnement (°C)            | < 120                   | < 70                    | < 70                        | < 45                        |
| Principale source d'énergie                   | Thermique et électrique | Thermique et électrique | Mécanique (via électricité) | Mécanique (via électricité) |
| Consommation thermique (kWh/m <sup>3</sup> )  | 12                      | 6                       | Pas applicable              | Pas applicable              |
| Consommation électrique (kWh/m <sup>3</sup> ) | 3,5                     | 1,5                     | 8 à 14                      | 4 à 7                       |
| Salinité de l'eau brute (g/l)                 | 30 à 100                | 30 à 100                | 30 à 50                     | 1 à 45                      |

|                                  |                              |                              |                              |            |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------|
| Salinité de l'eau traitée (mg/l) | <10                          | <10                          | <10                          | < 500      |
| Avantages                        | Technique éprouvée           | 20 % moins cher que le MSF   | Simplicité de fonctionnement | Modularité |
| Inconvénients                    | Investissement, consommation | Capacité plus faible que MSF | Capacité limitée             | Fragilité  |

Chaque procédé a un avantage technique qui le fera adopter dans un cas plutôt que dans l'autre, ainsi on peut dire que les procédés thermiques sont les mieux adaptés aux fortes salinités et aux hautes températures, tandis que les techniques membranaires sont les plus fiables dans les conditions de salinité moyenne et une température autour de 25°C [22].

#### IV.3 Comparaison du coût de l'eau produite selon la technique, à une capacité donnée

Les tableaux suivants représentent les coûts de l'eau produite pour des unités de dessalement d'eau de mer et d'eau saumâtre avec des capacités et techniques de production différentes.

«Tableau II.4» : comparaison économique des différents procédés selon la capacité de production [23].

| Pour une capacité de 10000 m <sup>3</sup> /jour |                   |                 |      |      |
|---|-------------------|-----------------|------|------|
| Technologie                                     | OI (eau saumâtre) | OI (eau de mer) | MSF  | MED  |
| Investissement (€/m <sup>3</sup> /jour)         | 575               | 1427            | 3408 | 2023 |
| Coût de l'eau (€/m <sup>3</sup> )               | 0,27              | 0,67            | 1,40 | 0,83 |

| Pour une capacité de 50000 m <sup>3</sup> /jour |                   |                 |      |      |
|---|-------------------|-----------------|------|------|
| Technologie                                     | OI (eau saumâtre) | OI (eau de mer) | MSF  | MED  |
| Investissement (€/m <sup>3</sup> /jour)         | 376               | 1050            | 2122 | 1539 |

|                                   |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Coût de l'eau (€/m <sup>3</sup> ) | 0.18 | 0.50 | 0.87 | 0.63 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|

| Pour une capacité de 275000 m <sup>3</sup> /jour |                   |                 |      |      |
|--|-------------------|-----------------|------|------|
| Technologie                                      | OI (eau saumâtre) | OI (eau de mer) | MSF  | MED  |
| Investissement (€/m <sup>3</sup> /jour)          | 241               | 756             | 1286 | 1153 |
| Coût de l'eau (€/m <sup>3</sup> )                | 0.11              | 0.36            | 0.53 | 0.48 |

| Pour une capacité de 500000 m <sup>3</sup> /jour |                   |                 |      |      |
|--|-------------------|-----------------|------|------|
| Technologie                                      | OI (eau saumâtre) | OI (eau de mer) | MSF  | MED  |
| Investissement (€/m <sup>3</sup> /jour)          | 206               | 676             | 1078 | 1042 |
| Coût de l'eau (€/m <sup>3</sup> )                | 0.10              | 0.32            | 0.44 | 0.43 |

- Le coût de dessalement des eaux saumâtres est nettement inférieur à celui du dessalement de l'eau de mer, la différence est plus de 40%
- Le coût de l'eau dessalée diminue en fonction de la capacité de production de l'unité, plus la capacité est importante plus le coût est minime, d'où l'intérêt de construire des installations à grande capacité [23].

Chaque année, la capacité mondiale de production d'eau dessalée augmente de 10% et ce potentiel continuera de croître au vu de l'amélioration constante des technologies utilisées. Les filières, plus économes en énergie comme celle de l'osmose inverse, sont désormais fiables et s'imposent de plus en plus dans plusieurs pays. Même si le procédé historique par distillation thermique est encore le plus répandu dans plusieurs régions du monde, notamment au Moyen-Orient, cette situation est en train de changer rapidement [24].

Conscientes de l'évolution de ce marché, les grandes sociétés de l'eau ne cessent d'optimiser leurs procédés membranaires pour gagner des parts de marché et imposer définitivement cette technologie [24].

## V. Les membranes

### V.1 Définition

La membrane est une mince paroi permettant une séparation sélective d'espèces chimiques, ioniques, moléculaires ou biologiques : un « nano filtre ». Les pores d'une membrane sont de l'ordre de grandeur du nanomètre et varient de 1 à 100 suivant l'emploi que l'on destine à ces membranes [14].

Deux types de membranes sont utilisés en traitement de l'eau ;

- Les membranes symétriques (ou isotropes), qui possèdent des propriétés identiques sur toute leur épaisseur ;
- Les membranes asymétriques (ou anisotropes), dont la structure composite varie de la surface de la membrane vers l'intérieur.

Ces membranes sont généralement supportées, c'est-à-dire fixées sur un support de manière à leur conférer une bonne stabilité mécanique [30].

## **V.2 Nature des membranes**

Les membranes symétriques, asymétriques et supportées sont classées selon la nature des matériaux qui les composent :

### **V.2.1 Les membranes organiques**

La plupart des membranes organiques sont fabriquées à partir de polymères : acétate de cellulose, polysulfone, polyamide, PVDF, etc. les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptation aux différentes applications. Les dérivés de cellulose sont utilisés pour la fabrication des membranes asymétriques d'ultrafiltration, de nano filtration et d'osmose inverse [30].

### **V.2.2 Les membranes minérales ou inorganiques**

Ces membranes sont constituées de céramiques poreuses déposées sur un support fritté. Leur développement a permis de travailler dans des conditions extrêmes de températures et d'agression chimique, ce qui a favorisé les possibilités de répondre à des applications plus larges (cas de solutions acides). Elles sont utilisées pour la production d'eau ultra pure, dans le traitement des eaux usées et dans les bioréacteurs à membranes industriels [30].

### **V.2.3 Les membranes composites**

Apparues au début des années 1990, elles présentent deux caractéristiques structurelles : Leur couche filtrante est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques ;

Elles sont constituées d'une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique [30].

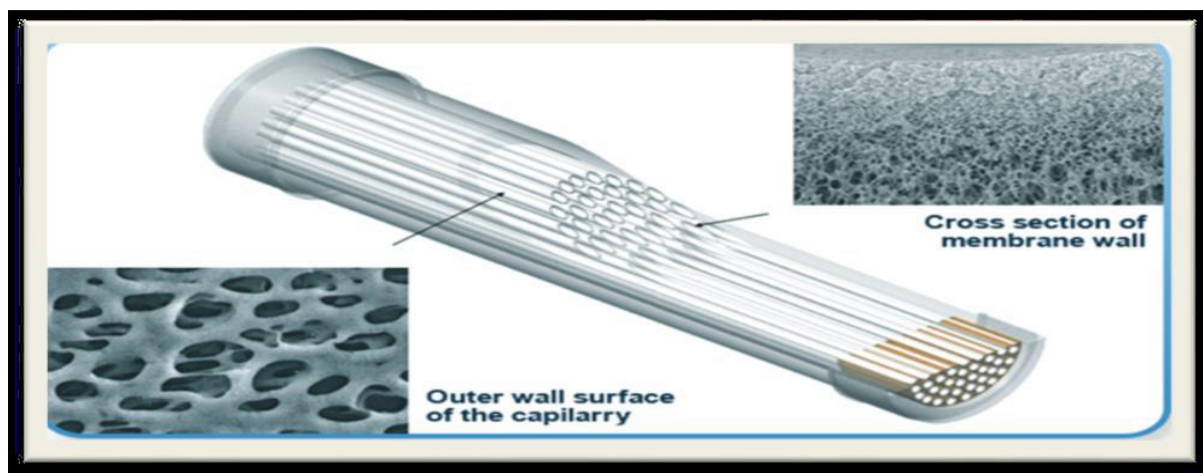
### V.3 Les types de membranes

Les principaux types de membranes utilisées sont :

#### V.3.1 Les membranes tubulaires

Les membranes tubulaires (Figure II.8) ne sont pas des membranes autosupportées. Elles sont placées à l'intérieur d'un tube, fait avec un type spécial de matériau. Ce matériau est la couche support de la membrane. L'attachement de la membrane à la couche support est assez faible.

Les membranes tubulaires ont un diamètre d'environ 5 à 15 mm. Du fait de la taille de la surface de la membrane, l'obstruction de la membrane est peu probable. Un inconvénient des membranes tubulaires est une densité du conditionnement faible et par conséquent un prix par module élevé [26].



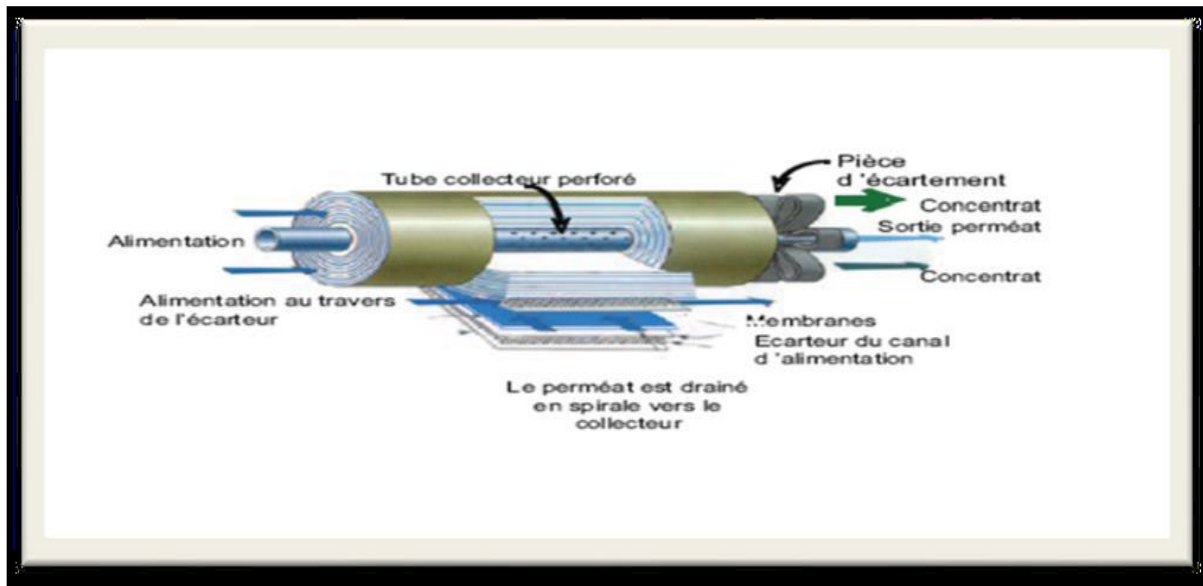
« Figure II.8 »: Membranes tubulaires [14].

#### V.3.2 Les membranes Planes

Les membranes sous formes de plaque plate sont appelées membranes pillow-shaped, (Figure II.9). Ce nom provient du fait que lorsque deux membranes sont assemblées dans une unité on obtient une forme d'oreiller.

A l'intérieur du module, plusieurs "pillow" sont placés avec une certaine distance entre eux, qui dépend de la quantité du solide dissout dans l'eau [14].

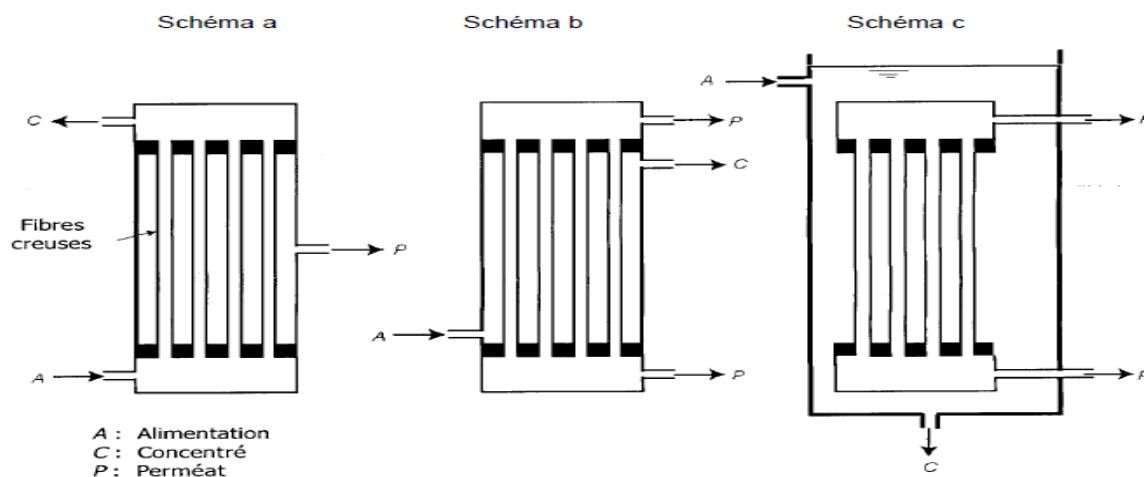




« Figure II.9»: Membranes planes [14].

### V.3.3 Les membranes fibres creuses

Les membranes fibres creuses (figure II.10) sont des membranes avec un diamètre inférieur à 0.1  $\mu\text{m}$ . Par conséquent les risques d'obstruction sont très élevés. Les membranes ne peuvent être utilisées que pour le traitement d'eau avec peu de solide en suspension. La densité de conditionnement est très élevée. Les fibres creuses sont presque toujours utilisées simplement pour la nano-filtration et l'osmose inverse [26].

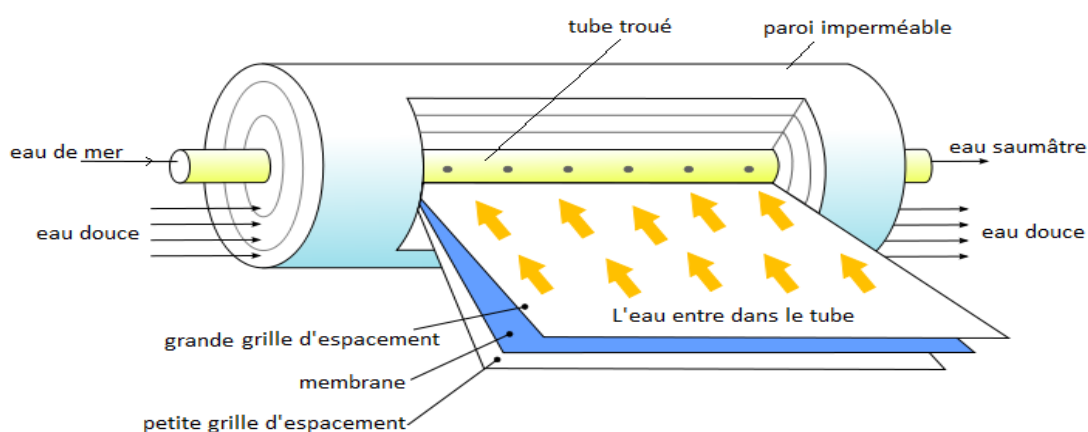


« Figure II.10 » : membranes à fibres creuses [27].

### V.3.4 Les membranes en spirale

Les membranes en spirale (figure II.11) sont constituées de deux couches de membranes. Ces membranes sont enroulées autour d'un drain central permettant de récupérer le perméat. De ce fait la densité de l'ensemble est plus élevée.

Les membranes spiralées sont uniquement utilisées pour les applications de nano filtration et d'osmose inverse [28].



« Figure II.11 »: membranes en spirale [29].

Le tableau suivant nous permet de faire une comparaison entre les différents modèles de membranes

« Tableau II.5 » : Comparaison des modules d'osmose inverse selon la membrane utilisée [14].

| module                      | tubulaire | plane  | spirale | Fibre creuse |
|-----------------------------|-----------|--------|---------|--------------|
| Débit (L/h/m <sup>2</sup> ) | 30        | 30     | 30      | 3            |
| Capacité de production      | 9         | 9      | 30      | 45           |
| prétraitement               | simple    | simple | moyen   | Elevé        |
| colmatage                   | faible    | faible | moyen   | élevé        |

D'après les données mentionnées dans le tableau précédant, on peut choisir le type de membrane à utiliser et en général le modèle spirale est le plus favorable vu qu'il plus

rentable question de capacité de production et le taux de colmatage est faible ce qui augmente la durée de vie des membranes.

## VI. Osmose inverse

### VI.1 Définition de l'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression [25].

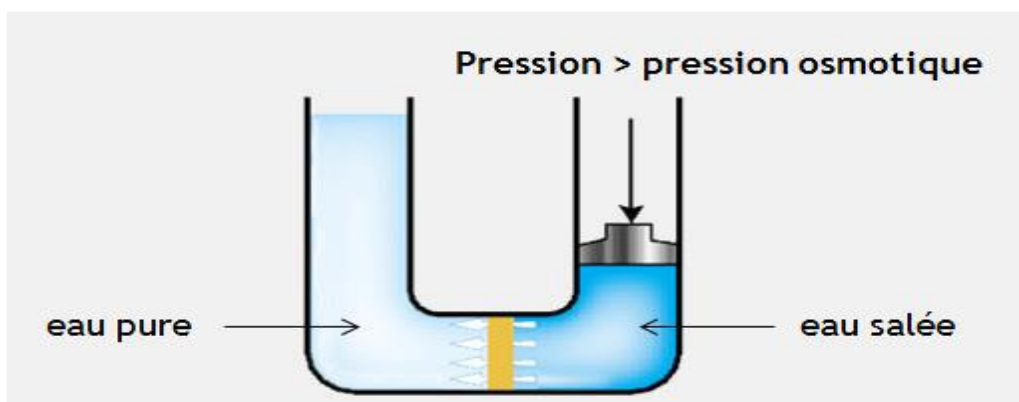
L'écoulement s'effectue en continu, une partie de la solution à traiter (débit  $Q_0$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes :

- une partie (débit  $Q_p$ ) passe à travers la membrane (perméat) ;
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat) [25].

### VI.2 Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler : cette pression est nommée la pression osmotique  $P$  (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique : c'est le phénomène d'osmose inverse [14].



« Figure 13 » : le principe d'osmose inverse [14].

### VI.3 La pression osmotique

La pression osmotique d'une solution saline dépend de la nature des sels dissous et de concentration. Elle est donnée par la relation suivante:

|                 |      |
|-----------------|------|
| $\Pi = i.C.R.T$ | [14] |
|-----------------|------|

Avec :

i: est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté ;

C : la concentration molaire du soluté (mol/m<sup>3</sup>) ;

T : la température (K) ;

R : la constante des gaz parfaits (8,31 J/mol.K) ;

$\Pi$ : est exprimée en pascals [14].

### VI.4 Taux de conversion

Le taux de conversion(Y) est, par définition, la fraction du débit de liquide qui travers la membrane [14] :

|               |      |
|---------------|------|
| $Y=Q_P / Q_0$ | [14] |
|---------------|------|

$Q_P$ : débit de permeat ;

$Q_0$  : la solution à traiter.

### VI.5 Perméabilité de la membrane (l/h.m<sup>2</sup>.bar)

Il s'agit du débit (ou flux) rapporté à la pression, elle est déterminée comme la pente de la droite du flux de perméation  $J_p$  en fonction de la pression P.

### VI.6 Sélectivité

La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rejet (rétention) de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir :

Le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium (Na Cl), compte tenu du fait que la déminéralisation des eaux est l'application la plus importante de l'osmose inverse. On trouve ainsi couramment des membranes qui ont été développés soit pour le dessalement de l'eau de mer et qui ont un taux de rejet au Na Cl de 99% environ, soit pour le dessalement des eaux saumâtres et qui ont un taux de rejet au Na Cl de 96% et ceci pour des conditions opératoires déterminées (pression, température, taux de conversion...) [14].

|                       |      |
|-----------------------|------|
| $T_R = 1 - (C_p/C_0)$ | [14] |
|-----------------------|------|

Avec :

$T_R$  : taux de rétention ;

$C_0$  : concentration de l'espèce à retenir dans la solution ;

$C_p$ : concentration de cette même espèce dans le perméat.

### VI.7 Débit spécifique ou densité du flux volumique

La densité de flux de perméat ou densité de flux volumique :  $J_p$  (m/s ou plus communément L/h.m<sup>2</sup>) permet de connaître la productivité du perméat par rapport à la surface membranaire installée.

|                 |      |
|-----------------|------|
| $J_p = Q_p / S$ | [14] |
|-----------------|------|

Avec :

$Q_p$  : volume du perméat.

$S$  : surface de la membrane.

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité par flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement [14].

### VI.8 Mécanisme de transfert

Dans le cas de l'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 (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.

Les flux de solvant et de soluté à travers la membrane sont donnés par les deux relations suivantes [14] :

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| $J_1 = A (\Delta P - \Delta \pi)$ | [14] |
|-----------------------------------|------|

Avec :

$J_1$  (kgm<sup>2</sup>.s) : flux d'eau à travers la membrane ;

$A$  (kg/s.Pa.m<sup>2</sup>) : perméabilité de la membrane à l'eau ;

$\Delta P$ (Pa) : différence de pression de part et d'autre de la membrane ;

$\Delta\pi$  (Pa) : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

|                    |      |
|--------------------|------|
| $J_2 = B \Delta C$ | [14] |
|--------------------|------|

Avec :

$J_2$  (kg/m<sup>2</sup>.s) : flux de sel à travers la membrane ;

B (m/s) : perméabilité de la membrane au sel ;

$\Delta C$  (kg/m<sup>3</sup>) : différence de concentration en sel de part et d'autre de la membrane.

## VII. Conclusion

Chaque procédé de dessalement d'eau de mer est très intéressant et performant à mesure que les conditions de son utilisation soient favorables, mais l'amélioration de la qualité des membranes et la réduction de la consommation électrique font imposer de plus en plus l'osmose inverse dans plusieurs pays du monde.

---

**Chapitre 03 :**  
**La description de la station**  
**de dessalement d'eau de**  
**mer de Béni Saf (BWC)**

---

## I. Introduction

A l'ouest du pays, les incertitudes de la météo s'ajoutent à la pression démographique et aux perturbations prévisibles liées au réchauffement climatique pour peser sur la disponibilité de l'eau. Devant cette situation de fait, la volonté de l'état s'est appuyée sur les ressources de la science en faisant appel à la technologie du dessalement de l'eau de mer, qui se profile aujourd'hui comme une alternative crédible.

Le gouvernement a lancé un chapelet de projets de dessalement d'eau de mer intégrant des usines de différentes capacités tout au long des côtes algériennes, au Nord-Ouest Algérien, la Wilaya d'Ain-Temouchent a fait l'objet de l'installation d'une station de dessalement d'eau de mer d'une capacité de production de 200.000.m<sup>3</sup>/j, assurant l'approvisionnement en eau potable des Wilayas d'Ain-Temouchent et d'Oran.

## II. présentation de l'usine de dessalement

Le site de la SDEM de Béni Saf (figure III.1) est localisé sur la côte méditerranéenne d'Algérie dans la Wilaya d'Ain-Temouchent commune d'Ouled El Kihel au niveau de la plage de Chatt El Hillal, sur une superficie de 65 700 m<sup>2</sup>.



« Figure III.1 » : site géographique de la SDEM de Béni Saf

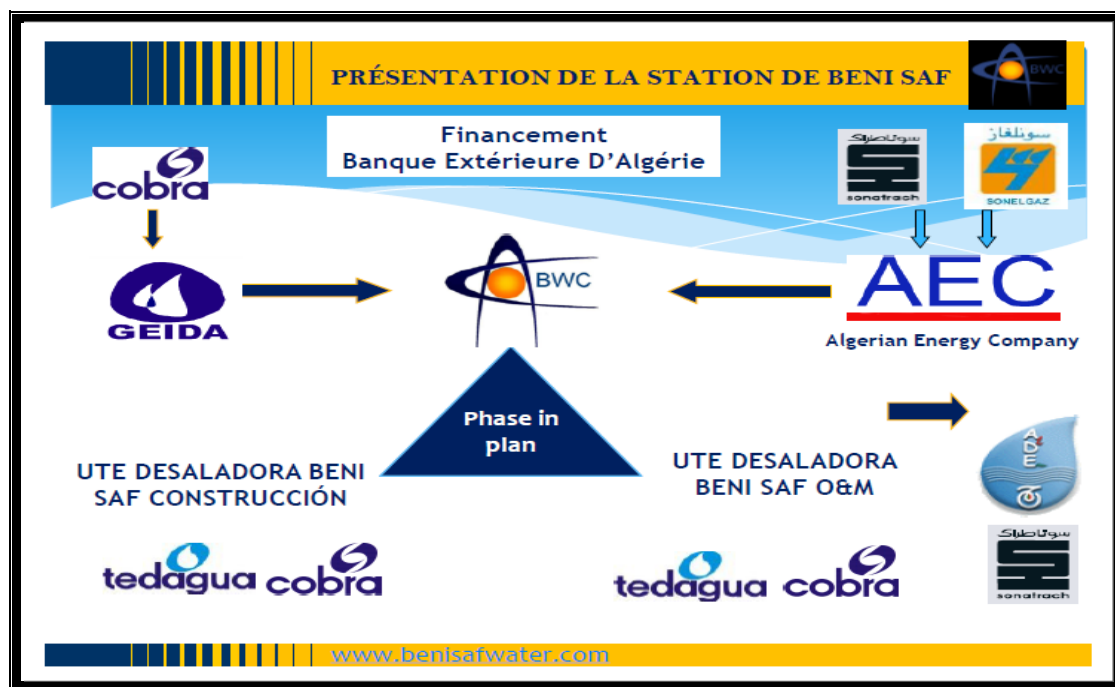


L'usine a été réalisée par une société de projet « Beni saf Water Company Spa » constituée à partir du consortium GEIDA, de l'ADE et de l'AEC, (figure III.2)

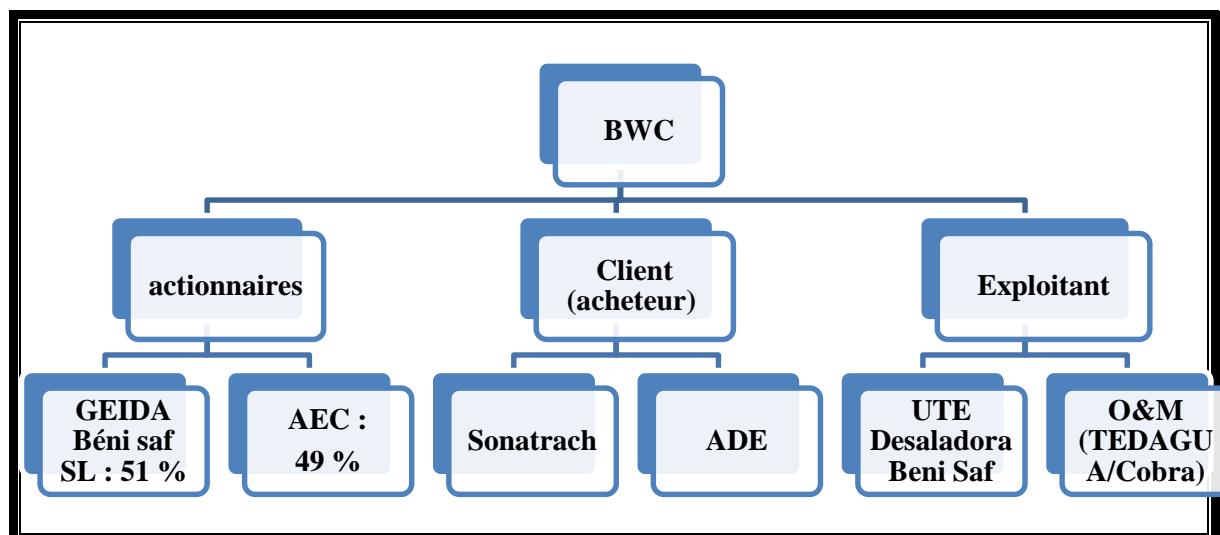
Le groupe GEIDA est un consortium qui a été constitué au début de l'année 2003 à partir de quatre importantes compagnies espagnoles d'études, de construction et d'experts spécialisées dans le développement des infrastructures dans le domaine d'énergie et de l'eau :

- COBRA ;
- BEFESA ;
- CODESA ;
- SADYT.

Sonatrach, la société nationale de pétrole et de gaz d'Algérie et Sonelgaz, la régie de production et de distribution de gaz et d'électricité de l'état algérien ont été incorporées dans l'AEC en mai 2001, chacune détient 50% du capital-actions d'AEC, (figure III.3)



« Figure III.2 » : les différents collaborateurs de la station BWC



« Figure III.3 » : présentation de la station de BWC

Le tableau suivant nous permet d'avoir une idée générale sur les principales caractéristiques de la station et ses différentes phases de traitement.

« Tableau III.1 » : fiche technique de la SDEM de Béni Saf

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Lieu d'implantation                   | Chatt El Hilal, Béni Saf, Wilaya d'Ain- Temouchent, Algérie                                    |
| Superficie du terrain                 | 65 700 m <sup>2</sup> (concession sur 25 ans)  |
| Capacité de production d'eau dessalée | 200.000 m <sup>3</sup> /jour   |
| Nombre de modules                     | 10 unités de 20.000 M <sup>3</sup> /j chacune  |
| Technologie de dessalement            | Osmose Inverse   |
| Consommation électrique               | ≤ 4,15 kWh/m <sup>3</sup>  |
| Type de prise d'eau de mer et rejet   | Émissaire sous-marin DN 2400 mm /1800mm  |
| Prétraitements                        | Pré filtration, Filtres à sable et anthracite, Filtres à cartouche                             |
| Prétraitements chimiques              | Hypochlorite sodique, Chlorure ferrique, Acide sulfurique, Méta Bisulfite Sodique, Dispersant. |

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
|                                   |   |
| Système de récupération d'énergie | Chambres isobariques (ERI) 95%              |
| Poste traitement du produit       | Carbonate de calcium - Hypochlorite sodique |
| Montant de l'investissement       | 240 M\$                                     |
| Prix de l'eau                     | 0.6994 \$                                   |

Le tableau suivant représente quelques dates importantes de la station de dessalement de Béni Saf :

« Tableau III.2 » : dates historiques de la SDEM de Béni Saf

| Evénement   | Date             |
|---|------------------|
| Production du 1 <sup>er</sup> m <sup>3</sup> d'eau dessalée | 09 Novembre 2009 |
| Début d'exploitation  | Mars 2010        |
| Début production à 100% de sa capacité                      | 27 Juin 2010     |
| Réception provisoire  | 01 Octobre 2010  |
| Réception définitive  | 12 Octobre 2012  |

### III. Description du fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer

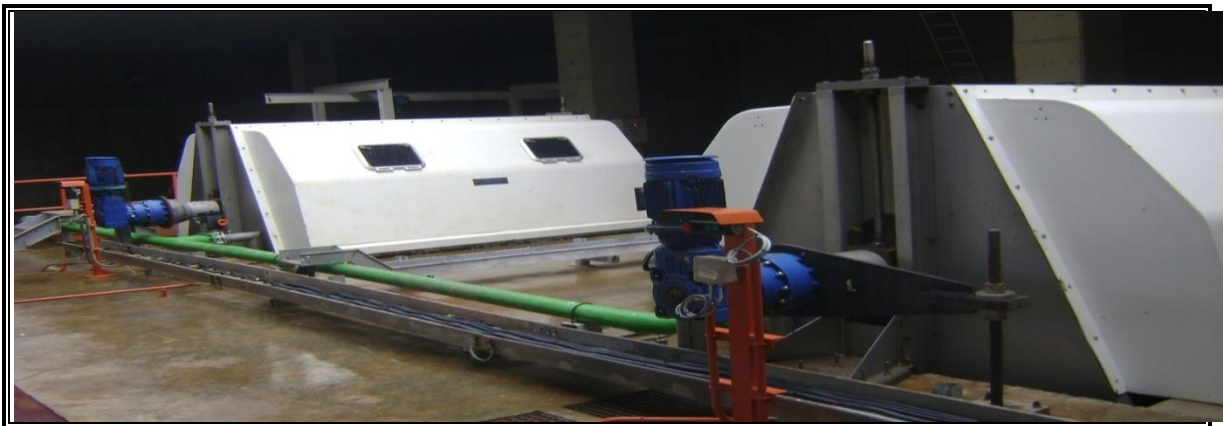
#### III.1 Captage d'eau de mer

Le système de captage (photo III.1) est ouvert, l'eau de mer est captée à partir d'un (1km) de la côte grâce à un émissaire en PEHD DN 2400 mm. A l'extrémité de l'émissaire, une tour de 10m de hauteur est érigée sur un fond à 18m pour capter une eau plus ou moins propre. L'eau est véhiculée à l'intérieur de la conduite par gravité avec une vitesse d'écoulement inférieure à 1m/s.



« Photo III.1 » : la conduite de captage en période de la construction.

Après une première filtration brute, l'eau de mer est tamisée à l'aide de filtres rotatifs (photo III.2) avant d'être pompée à partir du bassin de captage vers le prétraitement, sur une distance de 900 mètres.



« Photo III.2 » : filtres rotatifs

### III.2 La station de pompage

La station de pompage d'eau de mer située dans la zone de captage représente l'épine dorsale de la SDEM. Elle est composée de :

- 11 pompes centrifuges horizontales (Sulzer), (photo III.3) ;
- 10 pompes en marche, 01 pompe en stand by ;
- 01 système d'amorçage des pompes à vide composé de 02 compresseurs d'air ;

- Le système d'amortisseurs de chocs hydrauliques (anti-bélier) composé de 2 réservoirs identiques.



« Photo III.3 » : pompes de pompage et bassin de stockage

### III.3 Prétraitement de l'eau de mer

Avant de faire passer l'eau de mer dans les modules d'osmose inverse, elle passe par des unités prétraitement :

#### III.3.1 La filtration sur sable

Le filtrage à sable consiste à retenir les solides en suspension présents dans l'eau de mer et les floccs formés à l'étape de coagulation.

Le système de filtrage (photo III.4) est constitué de deux trains de filtrage identiques, ayant chacun la capacité de filtrer 50% de l'eau nécessaire. Chaque train de filtrage est constitué de 24 filtres regroupés en 12 modules ou paires de filtres.

Chaque module est constitué de 2 filtres identiques fonctionnant comme une unité filtrante, avec collecteurs et vannes communes.

Le filtrage est un processus suffisamment connu, au cours duquel l'eau traverse un milieu filtrant poreux, qui retient mécaniquement les solides en suspension. Dans ce cas, le milieu filtrant utilisé est le sable de silice de deux grosseurs (bicouche).

Une couche de sable grossier (couche support) est située en bas des filtres et une couche de sable plus fin (couche filtrante) la recouvre et retient les particules les plus fines.

En amont des filtres à sable (système de captage et pompage), on trouve un mélangeur statique prévu pour faciliter le mélange de l'eau et des produits chimiques dosés au préalable et favoriser la floculation des MES.

Le pupitre de l'analyseur de turbidité de chaque train comprend un dispositif de prélèvement d'échantillon destiné à mesurer le taux de matières SDI. Cette mesure est importante pour le contrôle de la qualité de l'eau qui passe à l'étape suivante. Il s'agit d'un bon indicateur du fonctionnement du filtre.

A l'entrée et à la sortie de chaque train de filtrage, est monté un manomètre destiné à vérifier les variations de pression entre les collecteurs d'entrée et de sortie, appartenant au système de captage et de pompage.

### **III.3.1.1 Caractéristiques des filtres**

48 filtres à pression horizontale et à fond bombé sont installés en parallèle, afin que le volume d'eau soit uniformément réparti entre tous ces filtres en fonctionnement normal.

Les filtres sont disposés en deux trains, constitué chacun de 12 modules de 2 filtres. Au niveau fonctionnel, un module constitue l'unité minimale de filtrage.

Le collecteur supérieur est celui d'entrée d'eau de mer et le collecteur inférieur, celui de sortie de l'eau filtrée. L'eau tombe sur le lit sableux, est filtrée puis passe à la cavité inférieure.

### **III.3.2 Filtrage à anthracite**

Le système de filtrage à anthracite (photo III.4) a pour fonction de retenir les agents résiduels et cancérigènes, la matière organique et, en général, les composés causant des problèmes de mauvaises odeurs et de mauvais goût dans l'eau. L'eau est ainsi prête à passer par les filtres à cartouches, d'où elle est envoyée aux appareils d'OI.



« Photo III.4 » : zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf

### III.3.3 Filtration par cartouches

Le système de filtration par cartouches est conçu pour retenir les particules de plus petite taille (jusqu'à 5 microns absolus) qui n'ont pas été retenues par les filtres à sable et à anthracite et qui pourraient endommager les installations des modules d'OI.

#### III.3.3.1 Description

Le système de filtration par cartouches (photo III.5) se situe à l'intérieur du bâtiment de production, il est constitué de 2 lignes de filtration formées de 10 filtres chacune. Par conséquent, le système dispose en tout de 20 filtres.



« Photo III.5 » : les filtres à cartouches de la SDEM de Béni Saf

La filtration est un procédé suffisamment connu. On fait passer l'eau à travers un milieu filtrant poreux où sont retenus les solides en suspension, par le biais d'une action mécanique.

Le milieu filtrant utilisé ici consiste en des cartouches logées à l'intérieur des corps des filtres. Leur seule mission est d'accueillir les cartouches filtrantes.

Pour protéger aussi bien le groupe haute pression que les membranes d'OI, une filtration de sécurité est installée dans le but de retenir les particules de plus petite taille pouvant endommager les appareils du système. La filtration par cartouches est la technique de filtration la plus conseillée pour les applications dont les exigences quant à la qualité et à la sécurité sont très élevées.

En règle générale, les filtres doivent retenir des particules solides d'une taille microscopique et il est nécessaire pour l'installation d'OI qu'il n'existe pas de solides supérieurs à 5 $\mu$ m nominaux.

Les cartouches ont une capacité limitée de rétention et, une fois que celle-ci a été atteinte, les cartouches doivent être remplacées.

### **III.3.3.2 Caractéristiques des filtres**

20 filtres verticaux à cartouche sont installés en parallèle, de façon à ce que le débit d'eau soit réparti entre tous les filtres pendant le processus normal de fonctionnement. Les filtres sont disposés dans deux lignes, chacune comprenant 10 filtres.

### **III.3.3.3 Caractéristiques des cartouches**

Une cartouche est un élément filtrant aux dimensions standards, habituellement fongible, avec une forme cylindrique. Les cartouches sont généralement composées d'un tube ou âme support intérieur recouvert de l'élément filtrant.

### **III.3.3.4 Fonctionnement**

Dans des conditions normales, les filtres fonctionnent en opération normale de filtration. Au moment où les cartouches sont colmatées, ce qui est détecté par le faible débit d'entrée, le processus de filtration s'arrête et l'on procède au remplacement des cartouches à l'aide du palan.

## **III.3.4 Description du prétraitement chimique**

Les dosages chimiques ont pour fonctions :

- Conditionner l'eau de mer en vue du dessalement par osmose inverse ;
- Conditionner l'eau dessalée produite pour la rendre potable ;



- Neutraliser les effluents de lavage des membranes.

Le système de dosage chimique est constitué des sous-systèmes suivants :

Sous-système de dosage d'hypochlorite de Sodium dans l'eau de mer : installé dans le bâtiment de captage, il aide à éliminer les matières organiques.

Sous-système de dosage d'hypochlorite de Sodium dans l'eau produite : situé à coté du réservoir d'eau dessalée, il a pour principale fonction la stérilisation de l'eau produite.

Sous-système de dosage d'acide sulfurique dans l'eau de mer : traitement effectué en amont des filtres à sable pour :

- Fixer le pH et éviter la précipitation de carbonates et de bicarbonates sur les membranes ;
- Dégager suffisamment de CO<sub>2</sub> pour reminéraliser l'eau produite dans les tours de calcites.

Sous-système de dosage du chlorure ferrique dans l'eau de mer : traitement effectué avant les filtres à sable pour la coagulation des colloïdes et des matières en suspension, afin que ces substances soient retenues lors du filtrage.

Sous-système de dosage de bisulfite de sodium dans l'eau de mer : traitement effectué après les filtres à cartouche, afin d'éliminer le chlore résiduel et de prévenir l'oxydation des membranes.

Sous-système de dosage des anti-incrustants : Traitement effectué avant les filtres cartouches pour éviter les incrustations sur les membranes.

Sous-système de dosage d'acide sulfurique pour neutralisation : sa fonction principale est de neutraliser les effluents de lavage des membranes.

Sous-systèmes de dosage de Sodium pour neutralisation : Sa fonction principale est de neutraliser les effluents de lavage des membranes.

#### III.4 Post d'osmose inverse

Le système d'osmose inverse est composé de :

- 10 unités de production de 20 000 m<sup>3</sup>/j chacune ;
- 256 tubes à pression par unité ;
- 1792 membranes dans chaque unité, soit 7 membranes dans chaque tube à pression ;
- 01 pompe centrifuge de haute pression par unité ;
- 01 pompe de recirculation par unité ;

- 22 récupérateurs d'énergie par unité.

Ce système a pour fonctions :

- Dessaler l'eau de mer pour produire de l'eau potable ;
- Evacuer la saumure de rejet à pression au système de récupération d'énergie

Le processus de dessalement s'effectue par le passage de l'eau de mer d'alimentation à travers des modules de membranes semi-perméables disposés en série à l'intérieur de chaque tuyau de pression et en parallèle dans chaque module.

Pour que le courant d'entrée au châssis d'osmose inverse traverse la membrane, il est nécessaire que la pression exercée sur celle-ci soit supérieure à sa pression osmotique. De cette manière, à partir du courant d'eau de mer qui a une plus grande concentration saline, il se produit un courant d'eau produit ayant une concentration plus faible, le perméat, et un autre courant de rejet, la saumure, avec une teneur en sels bien supérieure à celle que possédait initialement le courant d'eau d'alimentation.



« Photo III.6 » : la zone de production de la SDEM de Béni Saf

Le système d'OI se trouve à l'intérieur du bâtiment de production et est organisé en trois sous-systèmes différenciés essentiellement par la nature du fluide qu'ils acheminent. Chaque sous-système dispose de ses propres collecteurs principaux, de ses instruments et de ses vannes associées.

Il y a les sous-systèmes suivants :

Sous-système d'eau d'alimentation : le fluide circulant est l'eau de mer d'entrée au traitement d'OI. L'eau de mer d'alimentation aux membranes doit être préalablement conditionnée dans les conditions requises par celles-ci. Ce conditionnement est essentiellement basé sur un

contrôle de la matière en suspension et sur un dosage chimique pour éviter la croissance biologique et la précipitation d'incrustations dans les membranes.

Sous-système d'eau dessalée : le fluide de circulation est l'eau qui a traversé les éléments de la membrane (7 membranes par tube de pression). Ce courant est caractérisé par le fait qu'il possède une plus faible concentration saline que celle de l'eau de mer.

Sous-système d'eau de rejet : le courant de saumure circule dans ce sous-système. Il ne traverse pas les éléments de membrane et c'est le courant ayant la concentration saline la plus élevée.

### III.4.1 Membranes

Les membranes utilisées dans la SDEM de Beni Saf sont de chez Hydranautics. Les membranes d'OI sont constituées de films de polyamide à enroulement en spirale avec une feuille de séparation entre deux membranes. Cette feuille se comporte comme un canal dans lequel circule l'eau d'alimentation/saumure qui alimente l'élément suivant de membrane à l'intérieur du tube de pression.

Le modèle des membranes sélectionné est le SWC5 qui est approprié lorsque le courant d'eau d'alimentation est de l'eau de mer. Son pourcentage de rejet des sels est supérieur à 99,7%.

### III.4.2 Description du récupérateur d'énergie

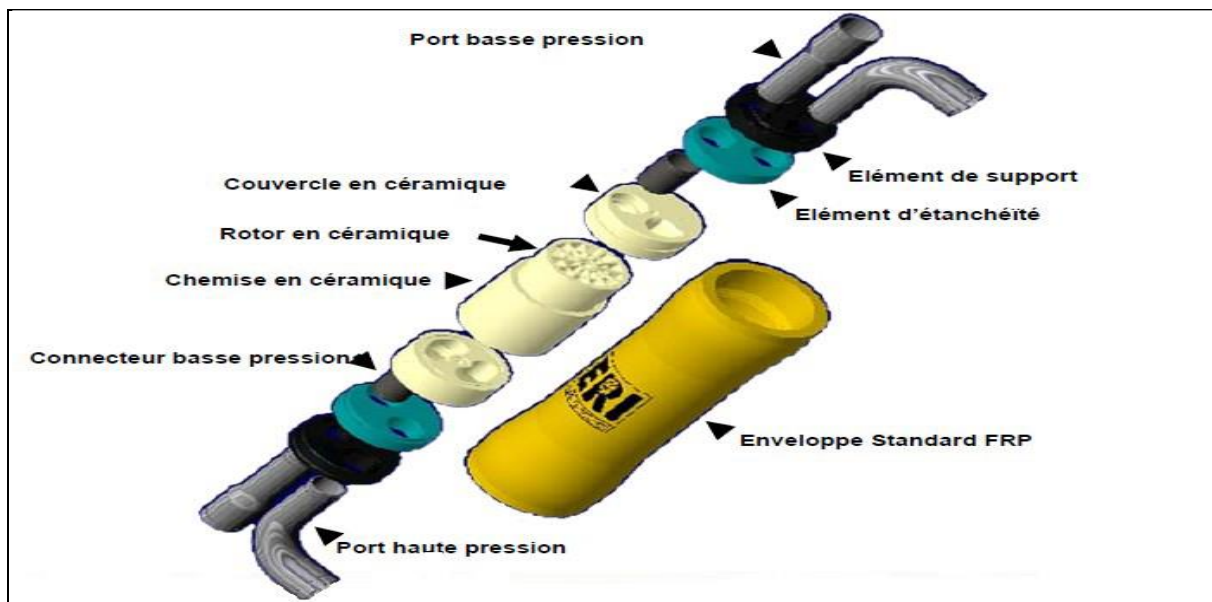
Le rejet des membranes est dirigé vers le PX (the pressure Exchanger), qui transfère la pression du rejet à l'eau d'alimentation, et la renvoie vers les membranes. Le PX fournit donc en eau de mer prétraitée, la quantité de concentrat qu'il reçoit.

Le travail du rotor peut être vu comme deux longueurs de tuyaux en rotation. L'eau d'alimentation à basse pression entre dans un tuyau, puis est transférée sur le côté haute pression du PX, grâce à la rotation du rotor. En même temps, le rejet de la membrane à haute pression entre dans l'autre tuyau puis est transférée vers le côté basse pression.

Du fait que la totalité du rotor soit composé de ces tuyaux, il existe en permanence un débit entre les côtés basse pression et haute pression du PX.



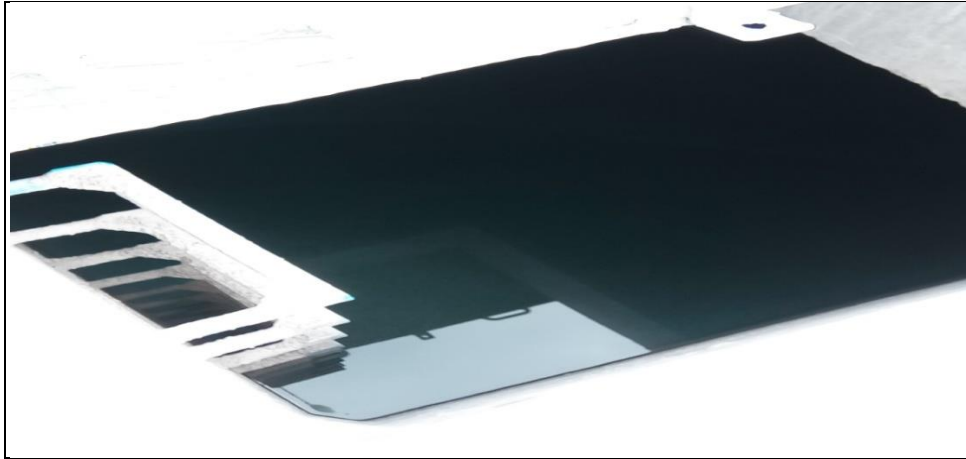
« Photo III.7 » : les récupérateurs d'énergie (ERI) d'un module d'OI de le SDEM



« Figure III.4 » : les composants d'un ERI

### III.5 Le post traitement

L'eau produite est stockée dans deux (02) réservoirs de capacité de 2500m<sup>3</sup> chacun et est traitée avec de la calcite afin de la reminéralisée, suivi d'une injection d'hypochlorite de Sodium pour la stérilisation.



« Photo III.8 » : le réservoir de traitement de l'eau dessalée

### III.6 Le stockage et le refoulement d'eau au le client

Le système de refoulement d'eau est composé comme suit :

- 10 pompes en service.
- 01 pompe en stand-by.

Après le post traitement, l'eau sera conservée dans un réservoir d'une capacité de 5000m<sup>3</sup> qui sert de réservoir d'attente pour prévoir un temps de contact nécessaire à la désinfection avant le pompage de l'eau vers le réseau de distribution.



« Photo III.9 » l'eau après le post traitement

## IV. EQUIPEMENT DE NETTOYAGE

### IV.1 Nettoyage des filtres

Le lavage des filtres à sable et à anthracite s'effectue avec de l'eau de mer au moyen d'une pompe de lavage et d'une autre en réserve.

L'incorporation du groupe soufflant permet d'assurer un lavage effectif, ainsi qu'une économie appréciable des eaux de lavage, le groupe soufflant est pourvu de son filtre d'air.



« Photo III.10 » : bâtiment de lavage des filtres

#### **IV.2 Nettoyage des membranes**

Le nettoyage des membranes est un processus nécessaire dans le cas d'encrassement appréciable des membranes, détecté par le manomètre. Le nettoyage s'effectue par une solution de réactif avec de l'eau produite qui est préparée dans un réservoir. Cette solution aspirée par deux pompes à travers la ligne d'alimentation, traversera les filtres à cartouches à travers les tubes de pression puis sortira vers le réservoir de nettoyage pour la neutralisation par la soude avant son déversement dans la mer. Enfin, les modules sont rincés à l'eau dessalée. L'eau de rejet sortira par la tuyauterie de saumure vers le drainage générale de l'installation.

#### **V. Bâtiment de saumure**

L'eau de rejet de saumure et les eaux usées provenant des nettoyages sont collectées avant d'être déversées à la mer par le biais d'une canalisation DN 1800 mm à 500 mètre de la côte, ce lieu de déversement a été déterminé par les résultats de l'étude marine afin d'atténuer les impacts.



«Photo III.11 » : le bassin de saumure de la SDEM de Béni Saf

## VI. Le laboratoire

Le laboratoire est équipé des instruments nécessaires à la supervision et au contrôle corrects du procédé.



« Photo III.12 » : le laboratoire de la SDEM de Béni Saf

Des analyses journalières sont faites afin d'assurer la qualité de l'eau et répondre aux exigences du client (tableau III.3).

« Tableau III.3 » : contrôle de qualité de l'eau commercialisée

| Analyse effectuée   | unité                 | Qualité garantie |
|---------------------|-----------------------|------------------|
| pH                  |                       | 8 à 8.5          |
| Alcalinité          | Ppm CaCO <sub>3</sub> | 65               |
| Dureté              | Ppm CaCO <sub>3</sub> | 50 à 65          |
| Indice de Langelier |                       | 0 à 0.4          |
| Chlore résiduel     | ppm                   | 0.5              |

## VII. Salle de contrôle

Avec un système de contrôle digital (DCS) YOKOGAWA, tous les équipements de la station sont contrôlables à partir de la salle de commande.



« Photo III.13 » : la salle de contrôle de la SDEM de Béni saf

## VIII. Autres composants de la station

- Les salles électriques ;
- Les salles des automates ;
- SNCC: système numérique de contrôle et de commande ;
- Station électrique conçue pour le fonctionnement de la totalité de la SDEM. (deux lignes électrique de 220000KV) ;
- Deux bâtiments administratifs de R+1 ;
- Un poste d'entrée à la station ;



- Un poste de sécurité ;
- Un post contre incendies ;
- Ateliers de maintenances et réparation mécaniques, électriques et d'instrumentation.



« Photo III.14 » : la salle d'électricité de la SDEM de Béni Saf



« Photo III.15 » : le réseau électrique de la SDEM de Béni Saf

## IX. Conclusion

Qualifiée comme meilleur élève du dessalement en Algérie et avec un chiffre remarquable de zéro accident depuis le démarrage de l'usine, la SDEM de Béni-Saf a soulagé les pressions qui pesaient sur l'approvisionnement en eau pour les wilayas d'Ain-Temouchent et Oran.

---

**Chapitre 04 :**  
**L'effet de la pression et le**  
**débit sur les performances**  
**d'un système de dessalement**  
**par osmose inverse**

---

## **I. Introduction**

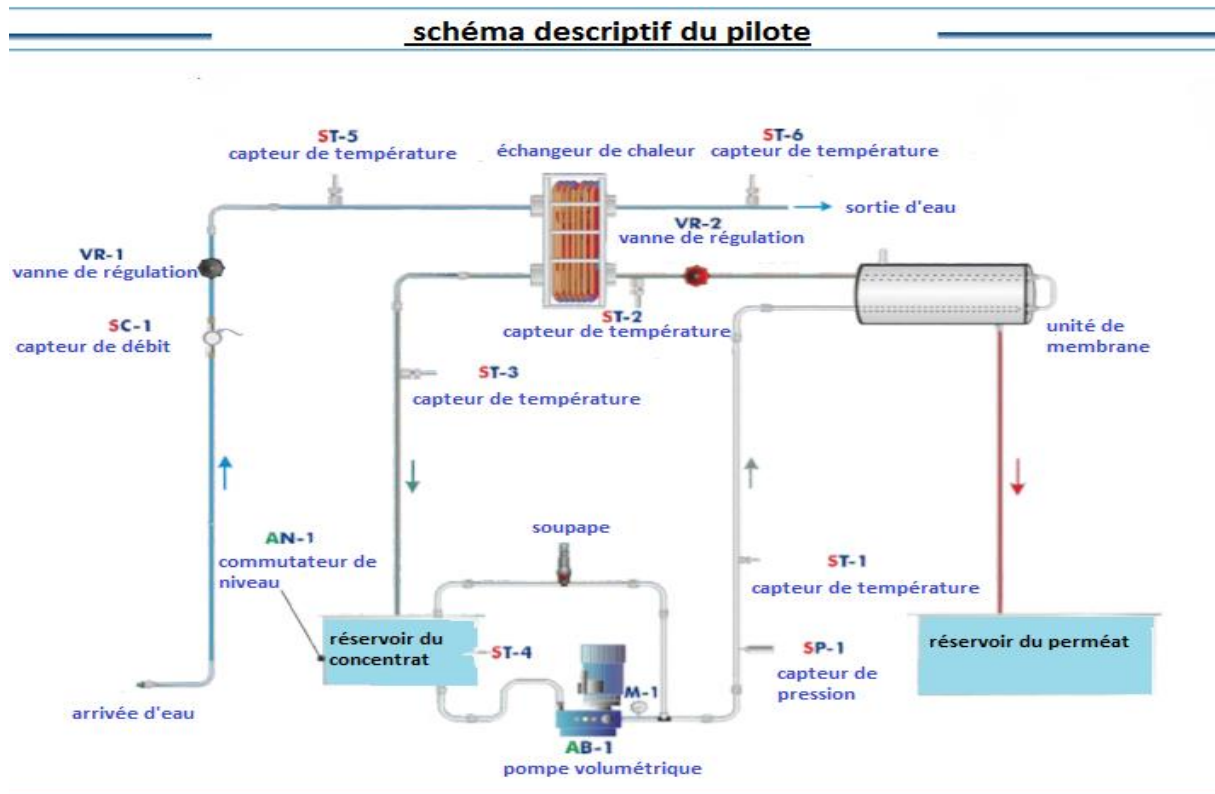
On a mené notre étude expérimentale au niveau du laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement du centre universitaire *Belhadj Bouchaïb*, sur un pilote d'osmose inverse.

Cette étude met en évidence l'influence de la pression et le débit d'alimentation sur les performances du dessalement par osmose inverse, les résultats et les discussions de chaque expérience sont mentionnés dans ce chapitre.

## **II. Description du fonctionnement du pilote « ROUC »**

L'unité ROUC se compose d'une pompe à trois pistons à déplacement positif. Le moteur de la pompe de pression est alimenté par un variateur de fréquence qui permet d'obtenir des débits différents en fonction du procédé de séparation nécessaire. Parce que c'est une pompe volumétrique, le débit obtenu est proportionnel à la vitesse du moteur. Par conséquent, la pompe alimente l'effluent à deux membranes tubulaires reliées en série placées dans le module à membrane. Cette solution continue de se déplacer dans la partie intérieure du tube, le flux de perméat de la partie intérieure du tube en direction de l'enveloppe extérieure et le concentrât est obtenu à l'extrême finale des tubes. L'unité ROUC effectue un processus de filtration par écoulement transversal, ce qui évite l'apparition d'impuretés qui réduit la capacité du système. L'effluent déplacé par la pompe reçoit un peu de chaleur à partir de la pompe de manière à ce que sa température augmente. Le perméat est stocké dans un réservoir de produit final. Le concentrât remonte au réservoir initial afin d'être utilisé à nouveau comme un affluent, mais, en raison de l'augmentation de sa température, ce concentrât passe à travers un échangeur de chaleur à plaque dans un courant inverse.

Le contrôle de la pression de l'unité à membrane est effectué par la vanne de régulation rouge.



«Figure IV.1 » : Schéma descriptif du fonctionnement de l'installation pilote

### III. Les principales caractéristiques de l'unité ROUC

- Réservoir en acier inoxydable d'alimentation (avec une capacité maximale de 15 L) ;
- Réservoir du perméat en acier inoxydable (avec une capacité maximale de 15 L) ;
- Pompe d'alimentation volumétrique à trois pistons ;
  - Débit maximal : 38 L/min ;
  - Pression maximale : 150 bars ;
  - Pression de fonctionnement maximale : 55 bars ;
  - La pompe comporte une soupape de sûreté pour protéger l'unité ;
  - Un variateur de fréquence qui commande le moteur de la pompe.
- Soupape de commande ;
- Soupape de limitation de pression ;
- Echangeur de chaleur pour le concentrât ;
- Module à membranes :
  - Deux membranes tubulaires reliées en série ;
  - Diamètre de la membrane : 12.5mm ;

- Surface de la membrane : 0.000122m<sup>2</sup> ;
- Pression de fonctionnement maximale : 55bars.
- 6 membranes de chaque modèle des éléments suivant sont fournies :
  - RO01 : rétention caractère (99% de Na Cl), processus : osmose inverse, Pression Max (45 bars) ;
  - UF02 : rétention caractère (20 000 Da), processus, ultrafiltration, Pression Max (10 bars) ;
  - UF03 : rétention caractère (200 000 Da), processus : ultrafiltration, Pression Max (15 bars).
- Deux vannes de régulation pour contrôler le débit d'eau et le débit de l'effluent ;
- 6 capteurs de température, de type "J" ;
- Capteur de pression (0-100 bars) ;
- Capteur de débit (entrée d'eau), plage : 0.25 à 6.5 l/min.
- 1 Commutateur de niveau ;
- Les dimensions de l'unité :
  - Hauteur : 1000mm ;
  - Largeur : 800mm ;
  - Longueur : 800mm.
- l'unité requiert :
  - Une tension triphasée ;
  - Un approvisionnement en eau domestique pour l'échangeur ;
  - Un drainage ou une évacuation de l'eau.



« Photo IV.1 » : l'installation pilote ROUC (laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement).

Avec :

1: module à membrane ;

2 : vanne de régulation de pression ;

3 : réservoir du perméat ;

4 : échangeur de chaleur ;

5 : réservoir du concentrât ;

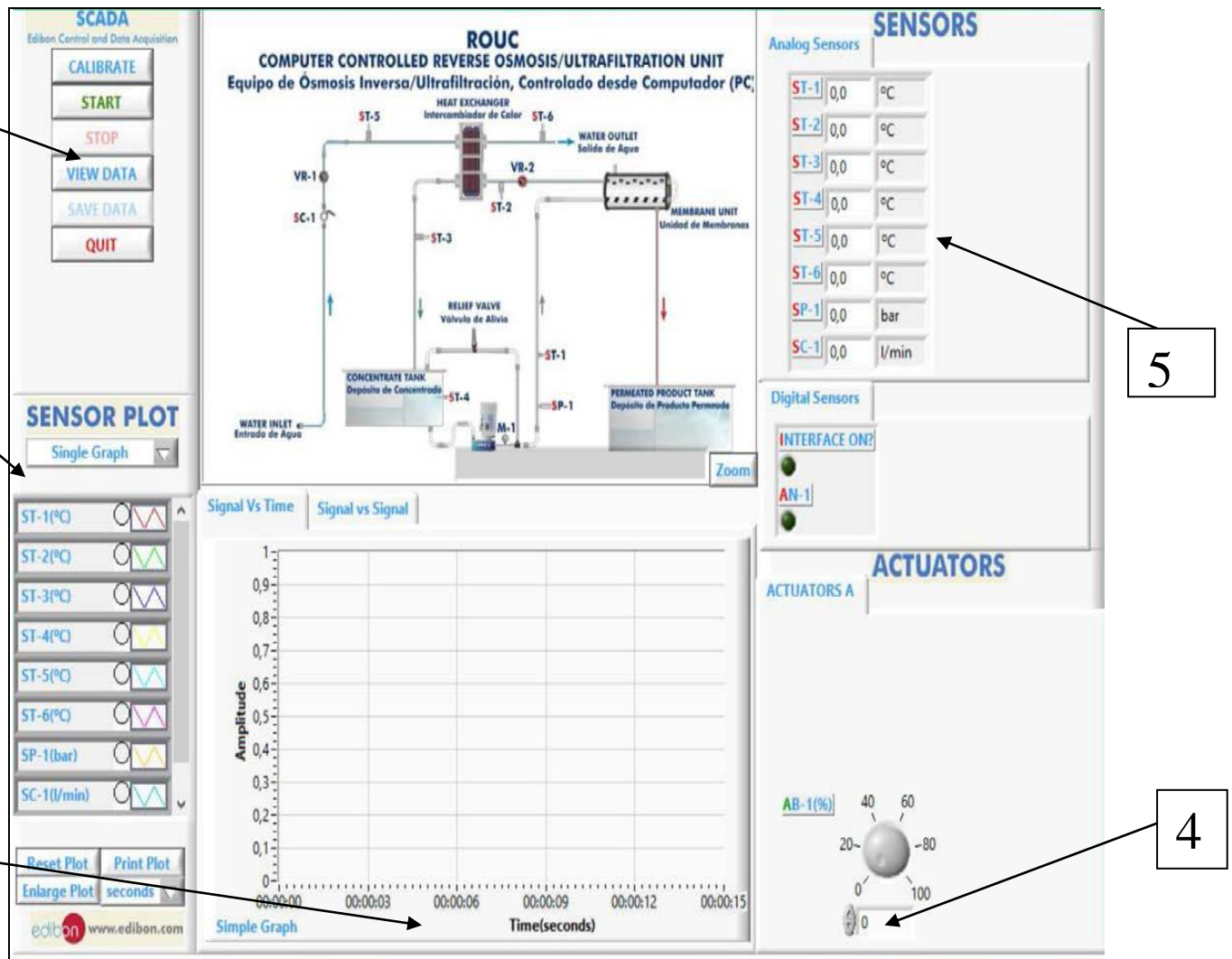
6 : commutateur de niveau ;

7 : pompe à trois pistons ;

8 : variateur de fréquence.

- Le boîtier d'interface de contrôle fait partie du système SCADA. Boîte d'interface de commande connectée à un ordinateur permet comme montré dans la figure de :

- Visualiser simultanément tous les paramètres impliqués dans le processus ;
- Calibrer tous les capteurs impliqués dans le processus ;
- Voir une représentation réelle des courbes en fonction du temps ;
- Stocker toutes les données du processus et les résultats dans un fichier.



« Figure IV.2 »: boîtier d'interface de contrôle

Avec :

- 1 : Principales possibilités d'exploitation du logiciel ;
- 2 : La sélection des canaux et d'autres paramètres de tracé ;
- 3 : l'affichage graphique en réel temps ;

4 : contrôles Actionneurs. Actionneurs: AB = pompe. AN = Commutateur de niveau ;

5 : Capteurs d'affichage des valeurs en temps réel, et les paramètres de sortie supplémentaires, avec :

- ST = Capteur de température ;
- SP = Capteur de pression ;
- SC = capteur de débit.

## IV. La perméabilité de la membrane

### IV.1 Détermination de la perméabilité de la membrane

On a caractérisé la membrane du pilote en déterminant sa perméabilité, pour cela une série de quatre (04) expériences, en utilisant de l'eau distillée a été menée comme suit :

Dans une première partie, on a calculé la densité de flux du perméat  $J_p$  de la manière suivante :

$$J_p = \frac{V_p}{t * S}$$

Avec :

**V<sub>p</sub>** : volume de l'échantillon de perméat

**t** : durée de la prise de l'échantillon (10 s)

**S** : surface effective de la membrane.

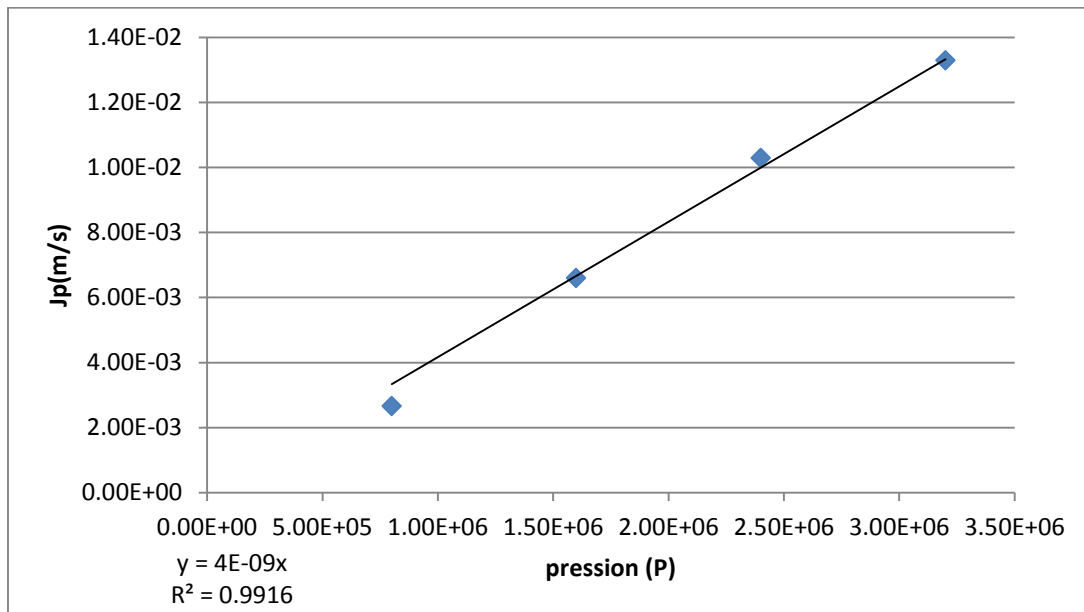
Les valeurs des densités des flux de perméat  $J_p$  qui ont servi pour la détermination de la perméabilité sont représentées dans le tableau suivant :

« Tableau IV.1 »: Valeurs des densités de flux de perméat  $J_p$  à 21°C.

| Pression<br>(10 <sup>5</sup> Pa) | V <sub>p</sub> (ml) | t (s) | T (°C) | J <sub>p</sub> (L/h.m <sup>2</sup> ) | J <sub>p</sub> (m/s) |
|----------------------------------|---------------------|-------|--------|--------------------------------------|----------------------|
| 8                                | 3                   | 10    | 21     | 9642.85                              | 2.67 <sup>e-3</sup>  |
| 16                               | 7.4                 | 10    | 21     | 23785.7                              | 6.60 <sup>e-3</sup>  |
| 24                               | 11.6                | 10    | 21     | 37285.7                              | 1.03 <sup>e-2</sup>  |
| 32                               | 15                  | 10    | 21     | 48214.2                              | 1.33 <sup>e-2</sup>  |



A partir de ces valeurs nous avons pu représenter une régression linéaire simple liant  $J_p$  à la pression  $P$ . Le coefficient directeur de cette droite de régression est la valeur de la perméabilité «  $A$  » de la membrane à  $T= 21^\circ\text{C}$ . Elle prend la valeur de  $4 \cdot 10^{-9} \text{m/s.Pa}$ .



« Figure IV.3 »: Evolution de la densité de flux du perméat ( $J_p$ ) en fonction de la pression ( $P$ ) à  $T=21^\circ\text{C}$

#### IV.2 L'effet de la température sur la perméabilité de la membrane

En utilisant un facteur de correction on a pu déterminer les valeurs de la perméabilité de la membrane à différentes températures :

- Facteur de correction  $K_T$ :

$$K_T = e^{(-0,0239 (T(x)-25))}$$

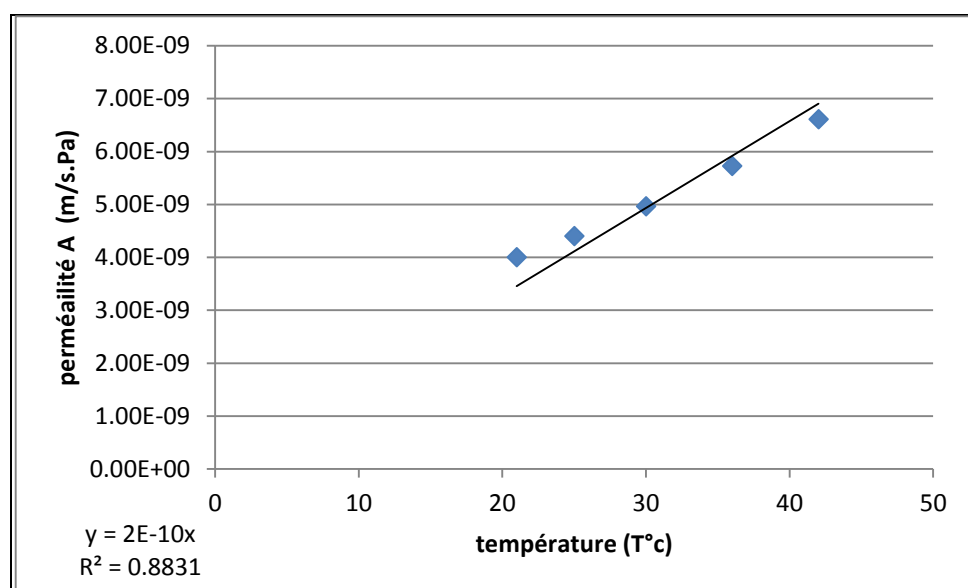
- Valeur de la perméabilité corrigée

$$A_{(21^\circ\text{C})} = A_{(x)} \cdot K_T$$

Les valeurs de la perméabilité à différentes températures sont représentées dans le tableau suivant :

« Tableau IV.2 » : Evolution de la perméabilité au solvant de la membrane en fonction de la température

| T(x) température (°c) | $K_T$  | $A_{(x)}$ (m/s.Pa)    |
|-----------------------|--------|-----------------------|
| 25                    | 0.9088 | $4.401 \cdot 10^{-9}$ |
| 30                    | 0.8064 | $4.959 \cdot 10^{-9}$ |
| 36                    | 0.6987 | $5.581 \cdot 10^{-9}$ |
| 42                    | 0.6053 | $6.607 \cdot 10^{-9}$ |



« Figure IV.4 »: Evolution de la perméabilité au solvant de la membrane en fonction de la température

Nous pouvons constater que la perméabilité de la membrane est proportionnelle à la température, et ceci est lié à la viscosité de l'eau vu que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité et dilate les pores de la membrane qui facilite la perméabilité de la membrane et l'améliore.

**Remarque :**

Pour notre étude nous nous sommes partis sur le fait que nous allons travailler avec de l'eau de mer prétraitée provenant de la station BWC, mais pour des raisons administratifs nous n'avons pas pu se la procuré, et c'est pour cela qu'on a eu recours à l'eau de mer brute que nous avons essayé de la prétraitée avec les moyens du laboratoire et aussi pendant le peu de temps qu'on a eu.

## **V. La filtration sur sable à lit profond**

Les filtres à sable ont pour objectif principal d'éliminer les particules en suspension, qui peuvent avoir une origine différente : (sédiments, précipités, caillots, etc.).

### **V.1 Les caractéristiques de l'eau de mer avant la filtration**

| pH   | T°C  | Turbidité NTU | Salinité g/L |
|------|------|---------------|--------------|
| 7.61 | 21.5 | 3.28          | 35           |

Notre filtre (photo IV.2) est remplis avec du sable de silice dont la taille des particules va de 0.8 à 1.0mm.

### **V.2 Mode opératoire**

Pour un bon déroulement de l'expérience on doit :

- Remplir le réservoir D1 ou D2 d'eau de mer ;
- Ouvrir la vanne V2 ou V4 selon que le réservoir d'alimentation soit respectivement le D1 ou le D2 ;
- Ouvrir la vanne V9 ;
- Ouvrir la vanne de recirculation V3 ou V6 selon que le réservoir d'alimentation soit respectivement le D1 ou le D2 ;
- Fermer les vannes V1, V5, V8, V11, V12, V13 et V14 ;
- Pour récupérer l'eau filtrée sans l'envoyer à un système d'évacuation, il faut introduire le tuyau d'évacuation raccordé à la vanne V9 dans le réservoir qui n'est pas utilisé comme réservoir d'alimentation ;
- Allumer la pompe G1 et régler le débit à l'entrée de la colonne avec la vanne V7 ;
- A la fin de l'expérience, éteindre la pompe G1.



« Photo IV.2 » : filtre à sable à lit profond (laboratoire du génie de l'eau et de l'environnement)

### V.3 Les caractéristiques de l'eau de mer après filtration

| pH   | T°C  | Turbidité NTU | Salinité g/L |
|------|------|---------------|--------------|
| 7.61 | 21.6 | 0.42          | 35           |

On peut clairement remarquer que la turbidité a diminué, ce qui signifie qu'on a fait une filtration assez fiable pour éliminer certaines matières en suspension.

## VI. Influence des paramètres opératoires sur les performances du système d'osmose inverse

Une série de quatre expériences (tableau IV.3) a été menée dans le but de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires (à noter la pression, le débit d'alimentation) sur les performances du système de dessalement par osmose inverse. Pendant chaque expérience de quarante minutes (40 min), quatre prises ont été faites avec une fréquence de dix (10) minutes.

Pendant chaque prise, on a mesuré le volume du perméat  $V_p$ , la concentration du perméat, la concentration de la saumure).

« Tableau IV.3 » : les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote

| Expérience | Concentration en NaCl (g/l) | Débit d'alimentation (l/h) | Pression (bar) |
|------------|-----------------------------|----------------------------|----------------|
| 1          | 35                          | 450                        | 12             |
| 2          | 35                          | 450                        | 22             |
| 3          | 35                          | 450                        | 10             |
| 4          | 35                          | 1125                       | 10             |

Les performances du système d'osmose inverse sont déterminées grâce aux indices suivants:

- Le taux (facteur) de conversion :  $FC = (Q_p/Q_a) * 100$  avec :
  - $Q_p$  : débit du perméat ;
  - $Q_a$  : débit d'alimentation.

$Q_p$  et  $J_p$  (L/h.m<sup>2</sup>) sont calculés de la même façon que précédemment ( $Q_p = V_p/t$  et  $J = Q_p/s$ ).

- Le facteur de séparation (ou taux de rétention) :  $FS = 1 - \left( \frac{C_p}{\frac{C_a + C_r}{2}} \right) * 100$  avec
  - $C_p$  : concentration du perméat ;
  - $C_a$  : concentration de l'alimentation ;
  - $C_r$  : concentration du retentât.

- La densité de flux spécifique (L/KWh) :  $J_{psp} = J_p / (E \cdot FC)$

Avec : E(KWh) : l'énergie consommée par heure.

- L'indice de performance :  $Y = J * FS$  en L/ (h.m<sup>2</sup>) ;
- L'indice de performance spécifique :  $Y_{sp} = J_{psp} * FS$  en (L/KWh).

## VI.1 Effet de la pression d'attaque sur le flux de perméat $J_p$ et sa qualité

### VI.1.1 L'effet sur la densité du flux de perméat

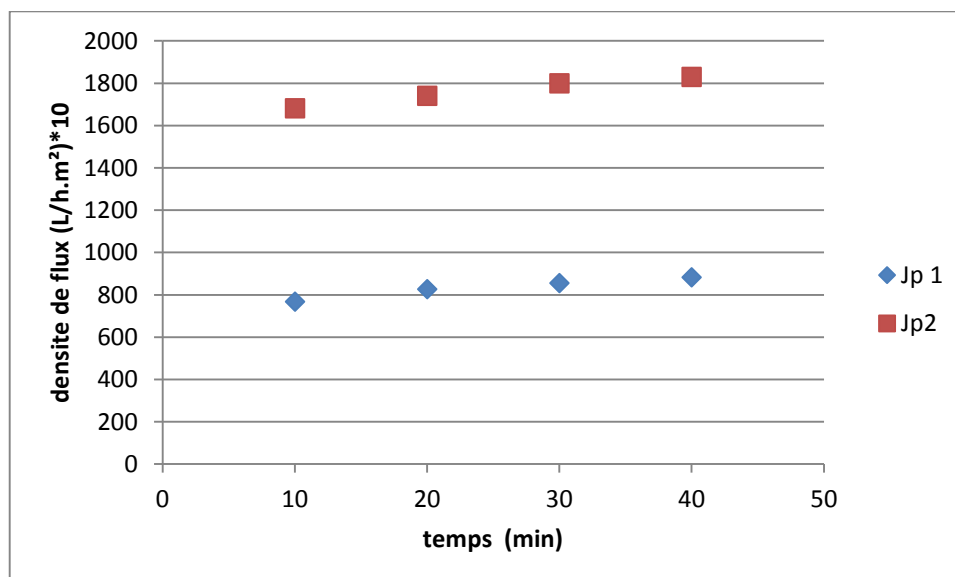
Pour étudier l'effet de la pression sur la densité de flux de perméat  $J_p$ , deux expériences ont été réalisées durant lesquelles on a maintenu le débit constant et on a varié la pression.

« Tableau IV.4 » : Valeurs de Jp pour les deux pressions testées

| Expérience    |                                | Temps en minutes |                |                |                |
|---------------|--------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
|               |                                | 10               | 20             | 30             | 40             |
| 1 (P=12 bars) | Vp (ml)                        | 2.6              | 2.8            | 2.9            | 2.99           |
|               | <b>Jp1 (L/h.m<sup>2</sup>)</b> | <b>7672.13</b>   | <b>8262.29</b> | <b>8557.37</b> | <b>8822.95</b> |
| 2 (P=22 bars) | Vp (ml)                        | 5.7              | 5.9            | 6.1            | 6.2            |
|               | <b>Jp2 (L/h.m<sup>2</sup>)</b> | <b>16819</b>     | <b>17409</b>   | <b>18000</b>   | <b>18295</b>   |

On peut expliquer l'évolution de la densité de flux pendant les 40 minutes de l'essai et pour la même pression par l'augmentation de la température, qui comme on a vu lors des essais de la perméabilité a une influence sur les pores de la membrane qui se dilatent.

La courbe suivante montre l'évolution de la densité de flux de perméat avec la pression. En effet, la densité de flux Jp augmente avec la pression transmembranaire. Par exemple, à t= 10 min, Jp passe de 7672 à 16819 (L/h.m<sup>2</sup>) lorsque la pression passe de 12 à 22 bars, soit une augmentation de 4573 (l/h.m<sup>2</sup>)/bar. A t= 40 min la densité de flux est de 8822(l/h.m<sup>2</sup>) lorsque la pression est à 12 bars et elle augmente jusqu'à 18295 (l/h.m<sup>2</sup>) quand la pression arrive à 22bars, donc l'augmentation dans ce cas est de 4736 (L/h.m<sup>2</sup>)/bar.



« Figure IV.5 » : Evolution du Jp en fonction du temps pour les deux pressions appliquées

On peut dire que le flux de solvant est directement proportionnel à la pression, plus cette dernière est élevée, plus le flux de perméat est important.

### VI.1.2 L'effet sur la qualité du perméat

Pour constater l'effet de la pression sur la qualité du perméat, nous avons mesuré la concentration du perméat et du rejet (la saumure) pendant chaque prise d'une durée de 10s (intervalle de 10 min entre les différentes prises), les résultats obtenus des concentrations et les calculs du facteur de séparation de la membrane sont mentionnés dans le tableau suivant :

« Tableau IV.5 » : Valeurs du facteur de séparation pour les deux pressions testées

| Expérience    |               | Temps en minutes |             |             |             |
|---------------|---------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
|               |               | 10               | 20          | 30          | 40          |
| 1 (P=12 bars) | Cp (mg/l)     | 31               | 31          | 31          | 32          |
|               | Cr (mg/l)     | 33               | 32          | 33          | 33          |
|               | <b>Fs (%)</b> | <b>4.61</b>      | <b>3.12</b> | <b>3.10</b> | <b>3.03</b> |
| 2 (P=22 bars) | Cp (mg/l)     | 31               | 32          | 30          | 31          |
|               | Cr (mg/l)     | 33               | 33          | 31          | 34          |
|               | <b>Fs (%)</b> | <b>6.06</b>      | <b>6.10</b> | <b>6.25</b> | <b>7.46</b> |

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté une augmentation du facteur de séparation de la membrane (Fs) lorsqu'on a augmenté la pression de 12 à 22 bars.

Certains auteurs ont expliqué l'augmentation de la sélectivité de la membrane par le fait que lorsque la pression augmente, le flux de solvant augmente proportionnellement tandis que le flux de solutés augmente moins rapidement puisqu'il est indépendant de la pression. La concentration en soluté dans le perméat s'en trouve diminuée (perméat dilué) et par conséquent le taux de rétention augmenté [30].

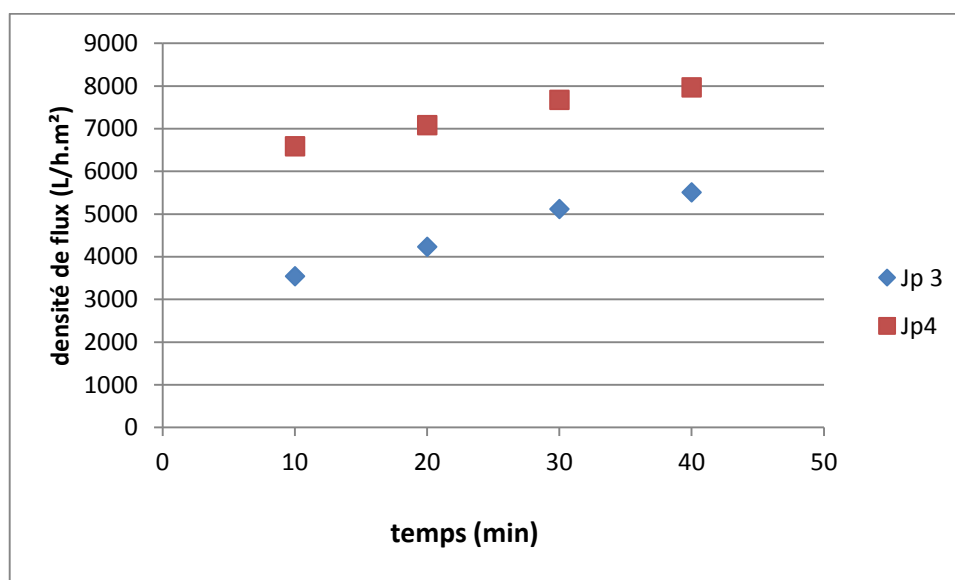
### VI.2 Effet du débit d'alimentation sur le flux de perméat Jp et sa qualité

Pour tester l'influence du débit d'alimentation sur la performance de l'installation pilote, on a procédé à une séparation membranaire avec deux débits différents (450 l/h et 1125 l/h), tout en maintenant la pression constante à 10 bars, la durée de prise de l'échantillon est de 30s. Les résultats obtenus pour les deux paramètres à savoir la densité de flux et le facteur de séparation sont résumés dans le tableau suivant :

« Tableau IV.6 » : valeurs du Jp et du facteur de séparation Fs pour les deux débits testés

| Expérience                     |          | Temps en minutes |                |                |               |
|--------------------------------|----------|------------------|----------------|----------------|---------------|
|                                |          | 10               | 20             | 30             | 40            |
| 3 (Q=450 L/h)                  | Vp (ml)  | 3.6              | 4.3            | 5.2            | 5.6           |
|                                | Cp (g/l) | 32               | 31             | 32             | 32            |
|                                | Cr (g/l) | 33               | 32             | 32             | 33            |
| <b>Jp3 (L/h.m<sup>2</sup>)</b> |          | <b>3540.9</b>    | <b>4229.5</b>  | <b>5114.7</b>  | <b>5508.1</b> |
| <b>Fs3 (%)</b>                 |          | <b>5.88</b>      | <b>7.46</b>    | <b>4.47</b>    | <b>5.89</b>   |
| 4 (Q=1125 L/h)                 | Vp (ml)  | 6.7              | 7.2            | 7.8            | 8.1           |
|                                | Cp (g/l) | 32               | 32             | 33             | 32            |
|                                | Cr (g/l) | 33               | 33             | 35             | 34            |
| <b>Jp4 (L/h.m<sup>2</sup>)</b> |          | <b>6590.16</b>   | <b>7081.96</b> | <b>7672.13</b> | <b>7967.2</b> |
| <b>Fs4 (%)</b>                 |          | <b>5.90</b>      | <b>7.50</b>    | <b>5.71</b>    | <b>7.24</b>   |

D'après l'analyse des résultats obtenus, on peut dire que le débit a un effet sur la densité de flux du perméat (figure IV.6), vu que ce dernier a augmenté en augmentant le débit de 450 à 1125 L/h, mais il n'a pas d'effet direct sur le facteur de séparation puisqu'une légère augmentation a été remarquée.



« Figure IV.6 » : évolution du Jp en fonction du temps pour les deux débits testés.



## **VII. Evolution de la consommation énergétique**

Le procédé d'osmose inverse doit consommer moins d'énergie par rapport à la distillation et aux autres procédés faisant appel à un changement de phase. Pour notre installation pilote aucun système de récupération d'énergie n'a été installé, dans ce cas, l'énergie dépensée en osmose inverse correspond à celle consommée par la pompe du pilote.

Nous avons noté la puissance de la pompe (KW) pendant chaque expérience menée, dans le but de calculer l'énergie consommée par l'installation.

L'énergie est proportionnelle à la pression, en effet, pour les expériences avec les pressions 10, 12, 22 bars et pendant 40 minutes de fonctionnement, nous avons noté une consommation d'énergie de 0.28, 0.30, 0.39 KWh respectivement.

L'indice de performance spécifique  $Y_{sp}$ , exprimé en L/KWh ( $Y_{sp} = J_{psp} * FS$ ) est un indice utilisé en osmose inverse et qui traduit la performance générale de ce procédé de dessalement. Il tient compte en effet aussi bien de la densité de flux de perméat spécifique (qui tient compte de l'énergie consommée) que de la sélectivité de la membrane (les deux paramètres les plus souvent exigés dans tout système de dessalement membranaire). Les valeurs de cet indice, relativement aux expériences décrites dans le « Tableau IV.3 », sont exprimées dans le tableau suivant :

« Tableau IV.7 » : valeurs de l'indice de performance spécifique pour les 4 expériences menées

| expérience |                       | Temps en minutes |                 |                  |                  | L'indice de performance spécifique moyen (Ysp moy) |
|------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|--|
|            |                       | 10               | 20              | 30               | 40               |  |
| 1          | E1 (KWh)              | 0.0766           | 0.153           | 0.230            | 0.306            | <b>9616.35</b>                                     |
|            | Fc 1                  | 0.208            | 0.224           | 0.232            | 0.2392           |  |
|            | E1 * Fc1              | 0.0159           | 0.034           | 0.0533           | 0.073            |  |
|            | <b>JpSp1 (L/KWh)</b>  | <b>482523.8</b>  | <b>243008.5</b> | <b>160551.03</b> | <b>120862.32</b> |  |
|            | <b>Ysp1 (L/KWh)</b>   | <b>22244.34</b>  | <b>7581.86</b>  | <b>4977.08</b>   | <b>3662.12</b>   |  |
| 2          | E2 (KWh)              | 0.098            | 0.1966          | 0.295            | 0.393            | <b>12135.5</b>                                     |
|            | Fc 2                  | 0.456            | 0.472           | 0.488            | 0.496            |  |
|            | E2 * Fc2              | 0.0446           | 0.0972          | 0.1439           | 0.1949           |  |
|            | <b>JpSp2 (L/KWh)</b>  | <b>377107.6</b>  | <b>179104.9</b> | <b>125086.8</b>  | <b>93868.6</b>   |  |
|            | <b>Ysp2 (L/KWh)</b>   | <b>22852.7</b>   | <b>10925.3</b>  | <b>7817.9</b>    | <b>6946.2</b>    |  |
| 3          | E3 (KWh)              | 0.07             | 0.14            | 0.21             | 0.28             | <b>16614.4</b>                                     |
|            | Fc 3                  | 0.096            | 0.114           | 0.138            | 0.149            |  |
|            | E3 * Fc3              | 0.00672          | 0.0159          | 0.0289           | 0.0417           |  |
|            | <b>JpSp 3 (L/KWh)</b> | <b>526919.6</b>  | <b>266006.2</b> | <b>176979.2</b>  | <b>132088.7</b>  |  |
|            | <b>Ysp 3 (L/KWh)</b>  | <b>30982.8</b>   | <b>19844.0</b>  | <b>7910.9</b>    | <b>7720.0</b>    |  |
| 4          | 0.086                 | 0.173            | 0.26            | 0.346            | 0.86             | <b>36353.9</b>                                     |
|            | 0.07                  | 0.076            | 0.083           | 0.086            | 0.07             |  |
|            | 0.00602               | 0.0131           | 0.021           | 0.0297           | 0.00602          |  |
|            | <b>1094710.9</b>      | <b>540607.6</b>  | <b>365339.5</b> | <b>268255.8</b>  | <b>1094710.9</b> |  |
|            | <b>64587.9</b>        | <b>40545.5</b>   | <b>20860.8</b>  | <b>19421.7</b>   | <b>64587.9</b>   |  |

Ces résultats nous permettent de comparer les quatre expériences conduites sur l'installation d'OI pour déterminer la plus adéquate entre elles, en termes de production et de consommation énergétique. L'idéal est d'avoir un  $Y_{sp}$  le plus élevé que possible. En effet, le but recherché est de produire la plus grande quantité de perméat possible par KWh.

Les conditions opératoire de la quatrième expérience semblent les plus favorables puisqu'elles ont permis d'avoir la valeur la plus élevée de l'indice de performance ( $Y_{sp} = 36353.9L/KWh$ ).

## **VIII. Conclusion**

Dans notre étude nous avons pu arriver à notre but qui est de déterminer la perméabilité de la membrane et étudier l'effet de la température sur son évolution, on a aussi évalué les effets de la pression et du débit sur les performances d'un système de dessalement et on a estimé la consommation énergétique de notre pilote ce qui nous a permis de calculer l'indice de performance de l'installation.

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

Le dessalement d'eau de mer est devenu un enjeu important pour pallier le manque d'eau dans certaines régions du monde où la ressource en eau devient rare et avec le développement technologique l'osmose inverse prend de l'avance sur les autres techniques de dessalement à savoir la distillation thermique.

Dans la station de dessalement de Béni Saf, les étapes de pré-traitement utilisées garantissent le bon entretien des équipements de l'usine, une longue durée de vie des membranes et une production d'eau douce en quantité et qualité remarquables.

Notre étude, bien que limitée dans le temps, nous a permis d'aboutir à nos buts et d'évaluer l'influence des paramètres (pression et débit) sur les performances du procédé de dessalement par osmose inverse, plus précisément la densité de flux du perméat et sa qualité.

On a pu déterminer la perméabilité de la membrane et analyser son évolution en fonction de la température.

Une influence positive de la température sur la perméabilité de la membrane a été estimée et ceci est lié à la viscosité de l'eau qui diminue en augmentant la température.

La pression d'attaque, d'après nos résultats, semble avoir une influence notable sur la densité de flux du perméat et sur la qualité du perméat.

Le débit, semble avoir une influence significative sur la densité du flux du perméat, par contre il n'a pas un grand effet sur le facteur de séparation.

Pour la détermination des performances du pilote d'osmose inverse, l'estimation de la consommation énergétique du procédé est essentielle, c'est pour cela que nous avons consacré une partie de notre étude à déterminer la densité de flux spécifique  $J_{sp}$  et l'indice de performance spécifique  $Y_{sp}$  dans le but de connaître les conditions de fonctionnement idéales permettant d'avoir la plus grande production de perméat en (L/KWh).

En final, cette étude peut ne pas s'arrêter sur ces points vu qu'ils existent d'autres paramètres (à souligner la concentration d'eau d'alimentation et sa température) ayant aussi des effets sur les performances d'un système de dessalement d'eau de mer par osmose inverse.

---

# **Bibliographie**

---

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **Société publique de gestion de l'eau**, « *l'eau sous différentes formes* », page consultée le 1<sup>er</sup> février 2016.
- [2] **Le centre d'information sur l'eau**, « *les ressources en eau dans le monde* », page consultée le 02 février 2016.
- [3] **Le centre d'information sur l'eau**, « *Les défis mondiaux d'aujourd'hui et de demain* », page consultée le 02 février 2016.
- [4] **l'eau ressource essentielle**, « *l'inégale répartition de l'eau sur la terre* », page consultée le 20 février 2016.
- [5] « *l'eau dans le monde* », page consultée le 01 février 2016.
- [6] **l'eau potable et la sante**, page consultée le 02 février 2016.
- [7] **Mekideche, M**, « *l'économie algérienne à la croisée des chemins* », Alger, 2008, 283p.
- [8] **Kehal, S**, « *rétrospectives et perspectives du dessalement en Algérie* », Alger, 2000.
- [9] **Portail Algérien des énergies renouvelables**, « *le dessalement d'eau de mer pour contrer la pénurie d'eau en Algérie* », page consultée le 1<sup>er</sup> février 2016.
- [10] **Ben Ahmed, Boudia, M, I**, « *étude bibliographique sur le dessalement de l'eau de mer, cas de la station de Béni-Saf* », Oran, 2014.
- [11] **Environnement et écologie en Algérie**, « *le dessalement d'eau de mer pour lutter contre la pénurie d'eau* », page consultée le 03 février 2016.
- [12] **Hadjlali, Y**, « *impact des stations de dessalement de l'eau de mer sur le littoral cas de la station plage el Hilel* », Tlemcen, 2012, 91p.
- [13] **Abada, D**, « *étude comparative de la production d'eau distillée de deux distillateurs solaires, à effet de serre et à film capillaire* », Constantine, p3.
- [14] « *l'influence de la force ionique sur le dessalement des eaux faiblement saumâtres* ». Département d'Hydraulique, Tlemcen, 2014, 171p.
- [15] **Maurel, A**, « *dessalination of sea water and brackish water* », St Paul Lez Durance, 1990, 14p.
- [16] **Tata Ducru, F**, « *Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes* », Paris, 2009, 15p.
- [17] **Procédés de dessalement**, <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g04/procedes-dessalement>, page consultée le 18 mars 2016.

- [18] **Attalah, A**, « *procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine* », Tlemcen, 2014, 99p.
- [19] **Viviane Renaudain**, « *le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres* », page consultée le 18 mars 2016.
- [20] **Techniques de dessalement**, « *les procédés membranaires* », page consultée le 16 mars 2016.
- [21] **Noureddine, N**, « *étude d'impact des rejets des eaux de la station de déminéralisation de Brédéah sur l'environnement* », Oran, Janvier 2008, 151p.
- [22] **le dessalement est-il une solution de l'avenir ?**, « *comparatif des techniques* », page consultée le 22 mars 2016.
- [23] **Morsli, M, S**, « *impact des arrêts techniques de l'usine de dessalement de l'eau de mer sur l'entreprise et l'environnement* », Management, Oran, 2013, 227p.
- [24] **hydroplus**, « *l'osmose inverse s'impose et s'améliore* », Victoires-éditions, Paris, mai 2010, p28.
- [25] **l'osmose inverse**,  
[http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen\\_chim/triboulet/rtf/osmose\\_inverse.pdf](http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf) , page consultée le 16 mars 2016.
- [26] **Lenntech**, « *les membranes* », page consultée le 20 mars 2016.
- [27] **Les membranes fibres creuses**, page consultée le 25 mars 2016.
- [28] **Technologies des membranes**, « *membranes planes et en spirale*», page consultée le 25 mars 2016.
- [29] **Metaiche, M**, « *optimisation des systèmes de dessalement par osmose inverse : conception, paramètres de fonctionnement et simulation numérique* », Alger, 2006, 229p.
- [30] **Permo**, « *techniques du traitement de l'eau dans les bâtiments* », 3<sup>ème</sup> édition, juillet 2009, Espagne.
- [31] **Fathalli, B**, « *influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse* », Tunisie, 2011, 45p.



---

# **Les annexes**

---

## ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DES EAUX AU NIVEAU DE LA STATION

### 1. PH

Le pH représente la mesure du degré d'acidité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse. Il est mesuré par un pH-mètre.

- ✓ L'appareil doit être calibré sur trois valeurs de pH (4.01, 7.00 et 9.21) ;
- ✓ Introduire un aimant dans le récipient contenant l'échantillon ;
- ✓ Placer l'échantillon sur l'agitateur, introduire l'électrode et appuyer sur PH ;
- ✓ Lorsque la valeur de pH est stable, l'agitateur s'arrête et la valeur de lecteur est affichée.

### 2. TEMPERATURE

Pour mesurer la température, il faut introduire le thermomètre dans l'échantillon, l'agiter et quand la température est stabilisée, effectuer la lecture.

### 3. CONDUCTIVITE

La conductivité d'une solution est la mesure de sa capacité à conduire le courant électrique. Elle s'exprime en mS/cm ou  $\mu\text{S/cm}$ . Les ions chargés positivement ou négativement conduisent le courant et la quantité conduite dépendra du nombre des ions présents.

Pour mesurer la conductivité, il faut mettre l'appareil sous tension, placer la sonde dans la solution à mesurer (plonger la sonde entièrement), et la secouer légèrement.

- ✓ Taper sur **Mode** pour rentrer dans le mode de mesure. Le message 'rang' (échelle) peut apparaître brièvement pour indiquer le calibrage automatique de l'unité, ce qui est normale.
- ✓ Laisser la température se stabiliser avant d'effectuer des mesures.

### 4. TURBIDITE

La turbidité de l'eau est liée à sa transparence. Elle donne une idée sur la teneur en matière en suspension.

Détermination de la turbidité par le turbidimètre de type Turbo 550IR :

- ✓ Allumer le turbidimètre et attendre environ 30 minutes que l'appareil chauffe ;
- ✓ Rincer deux fois la cuvette de mesure avec l'eau à analyser ;

- ✓ Verser l'échantillon dans la cuvette, fermé, s'assurer qu'il n'y ait plus de bulles et que l'extérieur soit bien propre.
- ✓ Introduire la cuvette dans l'appareil et l'aligner, quand il sera stabilisé, faire la lecture. La valeur sera donnée en (NTU).

### **5. S.D.I. (INDICE D'ENCRASSEMENT)**

L'indice d'encrassement ou de colmatage, est un paramètre permettant l'estimation du degré de blocage des membranes dû à la contamination par des particules colloïdales.

Un SDI inférieur ou égale à 5 pour l'eau d'entrée à l'usine et un SDI inférieur ou égale à 3 pour l'eau d'entrée aux modules d'osmose, sont considérés comme acceptables.

#### ***Procédure :***

- ✓ Utiliser un système de mesure et mettre en place le régulateur de pression à 2.1 bar ;
- ✓ Ouvrir le porte-filtre et placer sur sa plaque-support une membrane filtrante avec une sélectivité de 0.45µm et un diamètre de 47mm ;
- ✓ Ouvrir le robinet-vanne d'eau et réaliser la première mesure. Simultanément, avec un chronomètre mesurer le temps nécessaire pour recueillir dans l'éprouvette un volume de 500 ml.
- ✓ 15 minutes après avoir commencé l'essai, mesurer de nouveau le temps nécessaire pour recueillir le volume de 500 ml.

### **6. ALCALINITE, CARBONATES ET BICARBONATES**

L'alcalinité d'une eau est sa capacité à neutraliser les acides et constitue la somme de toutes les bases. L'alcalinité de nombreuses eaux de surface dépend essentiellement de leur teneur en carbonates, bicarbonates et hydroxydes.

Les carbonates et bicarbonates se trouvent dans toutes les eaux, et parfois, en proportion très élevées.

L'eau de mer contient des ions bicarbonates qui sont en équilibre avec des ions carbonates et hydrophile et qui provoquent les risques de précipitation sur les membranes.

#### ***Procédure :***

- ✓ Placer 5 ml d'échantillon dans un matras d'Erlenmeyer de 100 ml ;
- ✓ Ajouter 3 gouttes de phénolphtaléine à 0.25% ;

- ✓ S'il apparaît une couleur rose, titrer avec HCl 0.01N jusqu'à un virage incolore, coïncidant avec la valeur de PH 8.3. Si la couleur rose n'apparaît pas, inscrire carbonates égale à zéro.
- ✓ Ajouter 3 gouttes de bleu de bromophénol à 0.04% au même matras et une couleur bleue apparaîtra.
- ✓ Continuer à titrer avec de l'HCl 0.01N jusqu'à l'apparition d'une couleur verte. Le point de virage du titrage coïncidera avec des valeurs de pH entre 4.3 et 4.7

## **7. DURETE TOTALE (D.T)**

Le mot dureté fait référence à la quantité de composés de calcium et magnésium dissous dans l'eau. Ces minéraux ont leur origine dans les formations rocheuses calcaires.

### ***Procédure :***

- ✓ Mesurer 5 ml d'échantillon ;
- ✓ Ajouter 1 ml de buffer PH 10 et 1 ou 2 gouttes de solution indicatrice noir d'Eriochrome T ;
- ✓ Evaluer à l'aide d'une burette remplie à ras de la solution évaluée avec l'EDTA 0.02N (0.01M) ;
- ✓ Le point final de l'évaluation correspondra au moment du passage de la coloration de pourpre à bleu.

## **8. CALCIUM ET MAGNESIUM**

- ✓ Mesurer 5 ml d'échantillon ;
- ✓ Ajouter 5 gouttes de la solution NaOH 4N, ou une quantité suffisante pour atteindre une valeur de PH de l'échantillon entre 12 et 13 ce qui produit la précipitation du magnésium sous forme de  $Mg(OH)_2$  ;
- ✓ Ajouter une « pointe de spatule » de l'indicateur Murexide 0.2% dans le NaCl qui donne la couleur rose avec l'ion calcium ;
- ✓ Evaluer immédiatement à l'aide d'une burette arasée de la solution évaluée avec de l'EDTA 0.02N. Le point final de l'évaluation correspondra au moment de passage de la coloration de rose à pourpre.

## 9. CHLORE LIBRE

- Le chlore libre est le paramètre indicateur de la concentration en désinfectant (biocide) nécessaire pour maintenir l'eau sans micro-organismes pathogènes.
- Le chlore résiduel total présent dans l'eau correspondra à la somme du chlore résiduel et du chlore combiné résiduel.
- Le chlore combiné résiduel est la part du chlore résiduel total combiné à des composés azotés, provenant de la matière organique.

### *Procédure :*

- ✓ Le pH de l'échantillon doit être compris entre 4 et 8 ;
- ✓ Pipeter dans une cuvette 5 ml d'échantillon ;
- ✓ Ajouter une micro-cuillère arasée de réactif (Cl<sub>2</sub>- 1) ;
- ✓ Laisser reposer 3 minutes ;
- ✓ Mesurer avec le photomètre : résultat A (Chlore libre) (Photo 17) ;
- ✓ Dans la même cuvette, ajouter 2 gouttes de réactif (Cl<sub>2</sub>- 2). Fermer la cuvette et mélanger ;
- ✓ Mesurer l'échantillon sur le photomètre : résultat B (Chlore total).

Calcul du chlore combiné :

**mg/l de chlore combiné= résultat B (mg/l de chlore totale) – résultat A (mg/l de chlore libre)**

## 10. SALINITE

La salinité est définie comme étant la masse de sels dissous dans une masse donnée de solution. Elle est donnée par la relation :

$$\text{Salinité (mg/l)} = \text{Conductivité (}\mu\text{S/cm)} \times 0.56$$

**RESULTATS DES ANALYSES DE L'EAU PRODUITE POUR LA PERIODE  
DU 07/02/2016 AU 11/02/2016**

| <b>Les dates</b>                                       | <b>07/02/2016</b> | <b>08/02/2016</b> | <b>09/02/2016</b> | <b>10/02/2016</b> | <b>11/02/2016</b> |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>analyses</b>  |                   |                   |                   |                   |                   |
| <b>pH</b>  | 8.44              | 8.54              | 8.53              | 8.44              | 8.45              |
| <b>Température (°C)</b>                                | 20.4              | 19.9              | 19.8              | 20.2              | 20.1              |
| <b>Conductivité (µS/cm)</b>                            | 575               | 570               | 513               | 599               | 504               |
| <b>Taux de salinité</b>                                | 322               | 309               | 287               | 335               | 282               |
| <b>Turbidité (NTU)</b>                                 | 0.11              | 0.12              | 0.09              | 0.13              | 0.11              |
| <b>Alcalinité (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>              | 65.06             | 60.05             | 60.05             | 65.06             | 65.06             |
| <b>Carbonates (mg CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>/l)</b>   | 00                | 00                | 00                | 00                | 00                |
| <b>Bicarbonates (mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l)</b> | 79.32             | 73.22             | 73.22             | 79.32             | 79.32             |
| <b>Calcium (Ca<sup>2+</sup>)</b>                       | 24.85             | 23.25             | 24.05             | 25.25             | 24.85             |
| <b>Dureté totale (mg/l CaCO<sub>3</sub>)</b>           | 62.05             | 58.05             | 60.05             | 63.06             | 62.05             |
| <b>Indice de langelier</b>                             | 0.02              | 0.04              | 0.05              | 0.02              | 0.03              |
| <b>Chlore libre (mg/l)</b>                             | 0.56              | 0.55              | 0.56              | 0.58              | 0.59              |