

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Option : Hydraulique Urbaine & Technique des eaux

Présenté par : MAAFA AIDA

Thème : Dessalement de L'eau de mer

Sous la direction de : MAIZI NAZIHA

septembre 2020

REMERCIEMENTS

*Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir
accordé le courage, la volonté et la patience pour
l'accomplissement de ce modeste travail.*

Mes remerciements les plus distingués sont à :

*- Mon encadreur, Mme MAIZI.N, pour sa direction, ses
orientations sa patience, sa disponibilité et, surtout, ses conseils
judicieux.*

-. Monsieur BELAABED le responsable de département de

GENIE CIVILE ET HYDRAULYQUE

- Aux membres du jury pour avoir accepté mon travail.

*- Mes enseignants pour leur attitude positive et encourageante
envers nous tout au long de notre période d'étude.*

*- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de
ce mémoire.*

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers :

*A ma vie et mon bonheur **maman** que j'adore et celle qui se sacrifie toujours pour me voir réussir, la source et la lumière de mes jours. Que Dieu te garde et te protège*

A l'âme de mon père.

A mon grand père

*A ma sœur **ANFEL** et mes frères*

A mon mari, mes beaux-parents, mes beaux frères et mes belles-sœurs

A mes tantes et mes oncles

A mes cousins et cousines

A tous ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à achever mon mémoire.

Liste des tableaux

Tableau I.1: Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre

Tableau I.2: Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l

Tableau I.3: Classification des eaux selon la salinité

Tableau I.4: Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l

Tableau I.5: Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables

Tableau I.6: Norme de potabilité décrite par l'OMS sur les sels

Tableau I.7: Norme de potabilité définie par l'Algérie sur les sels

Tableau II.1 : Les produits utilisés pour le nettoyage des membranes

Tableau III.1: Résumé des phases de pré et post traitement au cours de la production d'eau potable par dessalement

Tableau II.2: La composition chimique de la saumure rejetée par rapport à celle de l'eau de mer d'alimentation dans le cas des unités de dessalement utilisant le procédé d'osmose inverse

Tableau III.3: Les impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement

Tableau III.4: Limites des Emissions de Bruit de la Réglementation Algérienne

Tableau III.5: Décret 93-160 Article 4: Tolérances de rejet des effluents industriels algériens

Tableau III.6: Valeurs limites et objectifs de qualité de l'air

Tableau III.7: Seuils d'information et d'alerte

Tableau III.8: Directives sur la qualité de l'air ambiant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Liste des figures

Figure I.1: Le réfractomètre

Figure I.2: Refractomètre standard et pro refractomètre

Figure I.3: L'hydromètre flottant

Figure II.1: Les différents procédés de dessalement

Figure II.2: Schéma général d'une station de dessalement

Figure II.3: Distillation à simple effet

Figure II.4: Schéma de principe d'un système Distillation à multiples effets (MED)

Figure II.5: principe de fonctionnement d'un système (MSF)

Figure II.6: Principe de distillation à compression de vapeur

Figure II.7: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse

Figure II.8: Principe de fonctionnement de la membrane

Figure II.9: Représentation d'un module spirale

Figure II.10: Principe de l'osmose inverse

Figure II.11: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse (Lattemann, 2010)

Figure II.12: récupération de l'énergie du concentrât par turbin Pelton

Figure II.13: Récupération de l'énergie par des échangeurs de pression

Table de matière

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DES EAUX SALINES ET DES EAUX SAUMATRES

I.1. Introduction

I.2. Sources d'eau

I.2.1. Eaux douces de surface

I.2.2. Eaux souterraines

I.2.3. Eau de mer

I.3. Composition de l'eau de mer

I.4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer

I.5. Paramètres organoleptiques

I.6. Paramètres microbiologiques

I.7. Les eaux saumâtres

I.8. Norme de potabilité sur les sels

I.9. Conclusion

CHAPITRE II : DIFFERENTS PROCEDES DE DESSALEMENT

II.1. Introduction

II.2. Les principales technologies de dessalement des eaux de mer

II.2.1. Procédés par distillation

II.2.2. Les procédés membranaires

II.2.3. Autres procédés

II.3. Les ajouts chimiques dans une station de dessalement

II.3.1. Les Coagulants

II.3.2. Agents antitartres

II.3.3. Agents antisalissure

II.3.4. Agents anti mousses

II.4. Qualité de l'eau produite

II.4.1. Par distillation

II.4.2. Par les procédés à membranes

II.5. Les coûts du dessalement

II.6. Conclusion

CHAPITRE III : LES IMPACTS DU DESSALEMENT DE L'EAU DE MER SUR L'ENVIRONNEMENT

III.1. Introduction

III.2. Conséquences environnementales et problèmes techniques liées au dessalement de l'eau de mer

III.2.1 contraintes environnementales

III.2.2 Impacts sur l'environnement

III.2.3 Les problèmes techniques rencontrés en dessalement

III.3: Cadre Législatif régissant la protection de l'environnement

III.3.1-Législation, conventions et protocoles internationaux Convention-cadre sur les changements climatiques (FCCC)

III.3.2 Législation relative à l'Impact sur l'Environnement en Algérie

III.4. Réticence des fournisseurs au transfert de la technologie et de la formation

III.5. Conclusion

Conclusion Général

Références Bibliographiques

Résumé :

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ce qui a incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Le dessalement de l'eau de mer en Algérie revêt un caractère stratégique : il remplacera les ressources naturelles dans la majorité des villes du nord algérien. Quel que soit le procédé utilisé, toutes les stations de dessalement produisent d'importantes quantités de saumure. Les statistiques parlent de centaines de milliers de tonnes de saumure qui sont rejetées quotidiennement dans la mer depuis des stations de dessalement. Les techniques de dessalement pour peuvent présenter un risque environnemental : les rejets de saumure, d'eau chaude, de produits chimiques ne doivent pas contaminer l'écosystème. Le plus urgent est la gestion de ces impacts vu les montants d'investissements pour ces projets. Les stations de dessalement doivent désormais inclure les couts des traitements de ces rejets en amont.

Les mots-clés: Dessalement, Saumure, Environnement, Traitement.

ملخص :

عاشت الجزائر أكثر من عقد من الجفاف، ولم تكن موارد المياه التقليدية كافية لتلبية احتياجات السكان، مما دفع السلطات الجزائرية إلى البحث عن موارد أخرى لضمان توفير مياه الشرب للشرب. و الحل الأنسب، الذي لا يعتمد على المخاطر المناخية، هو تحلية مياه البحر، وتحلية مياه البحر في الجزائر استراتيجية: ستحل محل الموارد الطبيعية في غالبية مدن الشمال. بغض النظر عن العملية المستخدمة، تنتج جميع محطات تحلية المياه كميات كبيرة من المحلول الملحي. تتحدث الإحصائيات عن مئات الآلاف من الأطنان من المحلول الملحي التي يتم إطلاقها في البحر يوميًا من محطات تحلية المياه. قد تشكل تقنيات تحلية المياه مخاطر بيئية: يجب ألا تلوث تصريف المياه المالحة والمياه الساخنة والمواد الكيميائية النظام البيئي. الأمر الأكثر إلحاحًا هو إدارة هذه الآثار بالنظر إلى حجم الاستثمار لهذه المشاريع. يجب أن تتضمن محطات تحلية المياه الآن تكاليف معالجة هذه التصريفات في المنبع.

الكلمات المفتاحية: تحلية، محلول ملحي، بيئة، معالجة.

Abstract :

Algeria has lived through more than a decade of drought; conventional water resources were insufficient to meet the needs of the population, which prompted the Algerian authorities to seek other resources to guarantee the supply of drinking water to this population. The most suitable solution, which does not depend on climatic hazards, was the desalination of sea water. The desalination of sea water in Algeria is strategic: it will replace natural resources in the majority of cities in the north Algerian. Regardless of the process used, all desalination plants produce large amounts of brine. Statistics speak of hundreds of thousands of tons of brine that are released into the sea daily from desalination plants. Desalination techniques may present an environmental risk: the discharges of brine, hot water, chemicals must not contaminate the ecosystem. The most urgent is the management of these impacts given the amounts of investment for these projects. Desalination plants must now include the costs of treating these discharges upstream.

Key words: Desalination, Brines, Environment, Remediation.

Introduction Générale

L'eau, en tant que bien commun, est indispensable à la vie. C'est l'élément primordial à fixer en un lieu où vit toute une population.

La croissance démographique dans le monde s'accompagne d'une augmentation de la demande d'eau potable tandis que l'industrialisation, l'irrigation des sols et l'élévation des niveaux de vie se traduisent par un accroissement supplémentaire de la consommation d'eau douce par habitant.

Cependant, les populations ont un accès très inégal à ces ressources. En effet, seule une faible quantité de l'eau totale mondiale est de l'eau douce disponible ce qui implique que 2/3 de la population sera en situation de stress hydrique d'ici 2025. On estime en outre que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.

Pour faire face à cette pénurie d'eau, le dessalement d'eau de mer est présenté comme une alternative quand les ressources conventionnelles (cours d'eau, nappes phréatiques) viennent à être insuffisantes.

L'Algérie a lancé ces dernières années un programme ambitieux d'installations de stations de dessalement pour faire face à des problèmes d'alimentation en eau qui s'accroissent par l'explosion démographique.

Le dessalement d'eau de mer est un processus qui permet de retirer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour la rendre potable ou l'utiliser dans l'irrigation. Mais cette solution, selon WWF (Fond mondial pour la nature), peut avoir un impact négatif sur l'environnement à cause de la composition des rejets engendrés par ce processus, qui peut modifier les paramètres de la mer et influencer négativement sur la faune et la flore sous-marines.

Le rejet généré par l'usine de dessalement se présente généralement sous la forme d'une saumure contenant divers sels, et composés organiques. Cette saumure est deux à trois fois plus salée (entre 50 et 80 g/L) que l'eau de mer habituelle.

Le mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre comporte des caractéristiques des eaux salines et des eaux saumâtres.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents procédés des dessalements.

Le troisième chapitre, les impacts des dessalements de l'eau de mer sur l'environnement.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

I.1. Introduction :

L'eau recouvre 72% de la surface du globe pour un volume total estimé à 1400 millions de Km³. Au cours des siècles passés, l'homme n'a pas endommagé la disponibilité en eau. Mais, dans le monde moderne, les aménagements et la maîtrise de l'eau disponible dans la nature ont transformé le régime des eaux et perturbé leurs fonctions naturelles. Où en sommes-nous à date ? Faisons ici le point.

L'eau sur terre se compose de 97,5 % d'eau salée, contenue dans les océans et de 2,5 % d'eau douce, contenue dans les lacs, rivières, glaciers, nappes phréatiques, etc. Et l'utilisation de l'eau douce par l'homme n'est possible qu'à hauteur de 0,7 % de la totalité des réserves d'eau.

En 4,6 milliards d'années, il a été estimé que la quantité d'eau perdue correspond à une hauteur de 3 m sur la totalité de la surface de la terre. On peut en déduire une bonne constance des volumes. Pour en savoir plus sur la nature de ces eaux, il faut s'intéresser aux mers intérieures, aux océans, mais aussi à certaines nappes souterraines qui représentent 97,2 % du volume. Notre planète bleue est ainsi, avant tout, la planète de l'eau salée. L'ensemble des eaux douces représente donc 2,8% du volume global. Dans ce faible pourcentage, les glaces et les neiges permanentes représentent 2,1% et l'eau douce disponible 0,7%. La moitié de ces 0,7% est constituée d'eaux souterraines.

Au final, l'homme ne peut utiliser que moins de 1% du volume total d'eau présent sur Terre, soit environ 0,028 % de l'hydrosphère. Ceci englobe les cours d'eau, les réservoirs naturels ou artificiels (baies côtières, lacs, fleuves, cours d'eau, barrages...) et les nappes d'eau souterraine (aquifères) dont la faible profondeur permet l'exploitation à des coûts abordables [1].

I.2. Sources d'eau :

Les sources d'eau naturelles se subdivisent en trois groupes :

I.2.1. Eaux douces de surface :

Leur volume total est très faible : il représente 0,18 millions de km³, soit 0,013 % de l'hydrosphère. Elles sont présentes dans les cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves) et les lacs. Elles sont très vulnérables à la pollution car elles reçoivent directement les eaux de ruissellement, c'est-à-dire les eaux de pluie ruisselant sur le sol, qui s'infiltrent dans le sol ou dans le sous-sol, ou qui rejoignent un cours d'eau [2].

a) Rivières et fleuves :

En très haute montagne, les cours d'eau naissent de la fonte des glaciers. La glace qui fond donne naissance à des ruisseaux ou à des torrents qui glissent sous les glaciers et émergent à leur pied : c'est le régime glaciaire. Les autres cours d'eau proviennent du ruissellement des pluies excédentaires et/ou de l'émergence, sous la forme de sources, de nappes d'eaux souterraines : ce type de régime est dit pluvial.

Tous les cours d'eau descendent le long des pentes, se rejoignent pour former des rivières de plus en plus imposantes qui finissent par se jeter dans un océan ou une mer intérieure. Tout au long de leur périple, les cours d'eau sont aussi alimentés par les eaux de ruissellement et parfois par des eaux souterraines [2].

b) Lacs :

Les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression ainsi créée, formant des étendues parfois immenses, à tel point que certains grands lacs sont appelés des mers (par exemple, la mer Caspienne : 371 000 kilomètres carrés de superficie).

Les lacs sont alimentés par un cours d'eau ou par des eaux de ruissellement et dans certains cas par des eaux souterraines [2].

I.2.2. Eaux souterraines :

Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches constituant le sous-sol, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable.

Là, les eaux s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé nappe. La roche plus ou moins poreuse et donc plus ou moins perméable contenant cette eau est appelée aquifère.

Les eaux souterraines constituant la nappe cheminent en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois sur des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau nommés exutoires. Les nappes souterraines fournissent presque le tiers du débit total des cours d'eau de la planète, soit environ 12000 kilomètres cubes d'eau par an.

Les aquifères représentent un réservoir d'eaux souterraines correspondant à un volume d'environ 8 millions de km³, soit 0,6 % de l'hydrosphère, Elles constituent notre principale ressource en eau douce [2].

I.2.3. Eau de mer :

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction [3]. Le tableau I.1 représente la répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur terre

Tableau I.1 : Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre [4].

	Volume (10 ³ km ³)	Pourcentage de l'eau totale (%)	Pourcentage de l'eau douce (%)
Eau totale	1,386 millions	100	-
Eau douce totale	35 000	2,53	100
Océans mondiaux	1,340 millions	96,5	-
Eau salée souterraine	13 000	1	-
Eau douce souterraine	10 500	0,76	30
Glaciers antarctiques	21 600	1,56	61,7
Glaciers du Groenland	2 340	0,17	6,7
Îles arctiques	84	0,006	0,24
Glaciers montagneux	40,6	0,003	0,12
Pergélisol et glace souterraine	300	0,022	0,86
Lacs salins	85,4	0,006	-
Lacs d'eau douce	91	0,007	0,26
Humidité du sol	16,5	0,0012	0,047
Tourbières	11,5	0,0008	0,03
Rivières (flux moyen)	2,12	0,0002	0,006
Dans la matière biologique	1,12	0,0001	0,0003
Dans l'atmosphère (en moyenne)	12,9	0,0001	0,04

I.3. Composition de l'eau de mer :

I.3.1. Composition minérale de l'eau de mer :

L'eau de mer est composée d'eau et de sels, ainsi que de diverses substances en faible quantité. Si plus des deux tiers des 92 éléments chimiques naturels sont présents dans l'eau de mer, la plupart le sont en faible quantité et difficilement décelables. La salinité est un des paramètres les plus importants de l'eau de mer, et désigne la teneur en sels dissous. La salinité moyenne des océans est de 35 g/l, et reste généralement comprise entre 30 g/l (Atlantique nord) et 40 g/l (mer Rouge). Les mers intérieures ou assimilées ont une salinité supérieure, parce que l'évaporation y concentre le sel. Les exceptions concernent donc des mers fermées ou semi-fermées, comme pour les valeurs extrêmes de 6 g/l dans les eaux de surface de la mer Baltique et 275 g/l dans la mer Morte. La mer ouverte la plus salée est la mer Rouge.

La grande particularité de l'eau de mer est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes ; (c'est-à-dire indépendantes de la salinité) ; cette propriété a été établie par le chimiste allemand William Dittmar. Elle permet de considérer l'eau de mer comme une solution de onze constituants majeurs dans de l'eau pure, à savoir, par ordre décroissant d'importance, le chlorure, l'ion sodium, le sulfate, l'ion magnésium, l'ion calcium, l'ion potassium, le bicarbonate, le bromure, l'acide borique, le carbonate et

le fluorure. Le tableau I.2 représente les principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l.

La loi de Dittmar permet ainsi de déterminer la salinité de l'eau de mer par une seule mesure : de la concentration d'un de ces constituants (par exemple, Cl^-) ou d'une des propriétés physiques de l'eau de mer à une température donnée (comme la densité relative, l'indice de réfraction ou la conductivité). Les deux principaux ions sont Na^+ et Cl^- , qui en s'associant forment le chlorure de sodium principal constituant du « sel marin », que l'on extrait dans les marais salants pour obtenir du sel alimentaire.

L'« odeur de mer » est due, selon Andrew Johnston (université d'East Anglia), au sulfure de diméthyle (DMS). Il serait plus précis de dire que le DMS est un composant de l'odeur de la mer, un autre étant les phéromones (Dictyoptérènes) de certaines algues [5].

Tableau I.2 : Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l [2].

Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l		
Anions	g/kg	mol/kg
Chlorure (Cl^-)	19,3524	0,54586
Sulfate (SO_4^{2-})	2,7123	0,02824
Hydrogénocarbonate (HCO_3^-)	0,1080	0,001770
Bromure (Br^-)	0,0673	0,000842
Carbonate (CO_3^{2-})	0,0156	0,000260
Fluorure (F^-)	0,0013	$6,84\text{E}^{-5}$
Hydroxyde (HO^-)	0,0002	$1,2\text{E}^{-5}$
Cations	g/kg	mol/kg
Ion sodium (Na^+)	10,7837	0,46907
Ion magnésium (Mg^{2+})	1,2837	0,05282
Ion calcium (Ca^{2+})	0,4121	0,01028
Ion potassium (K^+)	0,3991	0,01021
Ion strontium (Sr^{2+})	0,0079	$9,02\text{E}^{-5}$
Ion lithium (Li^+)	$1,73\text{E}^{-4}$	$2,49\text{E}^{-5}$
Ion rubidium (Rb^+)	$1,20\text{E}^{-4}$	$1,404\text{E}^{-6}$
Ion baryum (Ba^{2+})	$2,0\text{E}^{-5}$	$1,46\text{E}^{-7}$
Ions poly atomiques dont molybdène	$1,0\text{E}^{-5}$	$1,04\text{E}^{-7}$

Ions poly atomiques dont uranium	3,3E ⁻⁶	1,39E ⁻⁸
Ions poly atomiques dont vanadium	1,9E ⁻⁶	3,73E ⁻⁸
Ion fer (Fe ²⁺ ; Fe ³⁺)	1,3E ⁻⁶	2,33E ⁻⁸
Ions poly atomiques dont titane	1,0E ⁻⁶	2,09E ⁻⁸
Ion aluminium (Al ³⁺)	1,0E ⁻⁶	3,71E ⁻⁸
Autres espèces	g/kg	mol/kg
Eau (H ₂ O)	965	53,57
Acide borique (B(OH) ₃)	0,0198	0,000320
Tétra hydroxy borate (B(OH) ₄ ⁻)	0,0079	0,000100
Dioxyde de carbone (CO ₂)	4,0E ⁻⁴	9,09E ⁻⁶

1.3.2. Composition en gaz dissous de l'eau de mer :

Les gaz dissous comprennent principalement : 64 % d'azote, 34 % d'oxygène, 1,8 % de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre) [5].

1.3.3. Composition organique de l'eau de mer :

L'océan est le plus gros réservoir de carbone organique sur Terre avec environ 700 Gt de carbone. La majeure partie du carbone organique se trouve sous forme dissoute (COD : Carbone Organique Dissous) à plus de 92 % tandis que la fraction particulaire (COP : Carbone Organique Particulaire), définie comme la fraction retenue sur un filtre de taille de pores entre (0,2 et 1) µm, représente entre 2 (pour les eaux profondes) et 8 % (pour les eaux de surface) du carbone organique total (COT) présent dans l'océan soit une moyenne de 3 %.

La fraction vivante du COP ne représente qu'au maximum 5 % du COP. Pour les océans ouverts, le COT et le COD sont souvent équivalents [6].

➤ *Matière organique particulaire :*

L'eau de mer contient de la matière organique particulaire (MOP) dont les constituants possèdent des tailles variées. Le phytoplancton, les levures, les bactéries et les petits

organismes hétérotrophes comme le micro-zooplancton ont des tailles comprises entre 0,45 et 300 μm .

La production primaire des organismes autotrophes détermine la distribution du COP et de l'azote organique particulaire (NOP). La concentration en COP est généralement de 0,05 mg. l^{-1} à 1,00 mg. l^{-1} pour les eaux côtières, de 0,15 mg. l^{-1} en moyenne pour les eaux de surface et est quasi nulle pour les eaux profondes. La concentration en NOP est de 0,029 mg.l^{-1} pour les eaux de surface et de 0,013 mg. l^{-1} pour les eaux profondes. Le rapport entre le carbone et l'azote dans la MOP est compris entre 6,6 et 7 ce qui correspond aux proportions stœchiométrique dans les cellules planctonique.

Les bactéries hétérotrophes constituent la majeure partie de la MOP de dimension comprise entre 0,2 et 2 μm . Leur concentration est d'environ 1×10^6 cellules par ml. En raison du milieu marin pauvre en nutriments, la plus part de ces bactéries sont dans un état de latence.

Le phytoplancton constitue l'essentiel de la biomasse vivante présente dans les océans. Sa morphologie et sa taille (de 0,2 à 200 μm) peuvent être très variables mais sa composition chimique varie peu d'une espèce à l'autre de ces micro-algues. Le phytoplancton est majoritairement constitué de protéines (50 %), de sucres (30 %), de corps gras (10 %) et d'acides nucléiques (5 %) ce qui conduit à une formule brute moyenne $\text{C}_{4,32}\text{H}_{7,10}\text{O}_{1,99}\text{N}_{0,65}$ avec un rapport entre le carbone et l'azote de 7. Certains autres éléments comme le phosphore et le soufre peuvent également être présents dans le phytoplancton. Il est à noter que les zones côtières jouent un rôle primordial dans la production biologique de l'océan. Elles ne représentent que 8 % de l'océan mais fournissent 25 à 50 % du carbone organique marin.

➤ *Chlorophylles :*

Les chlorophylles sont des récepteurs primaires et secondaires de la lumière dans le mécanisme de la photosynthèse du phytoplancton marin. Ces molécules servent à transférer l'énergie lumineuse lors de la photo réaction et à la convertir en énergie chimique de réduction ou d'oxydation. Les chlorophylles sont des tétra-pyrroles contenant un atome de magnésium central. Les deux formes de chlorophylles a et b diffèrent par certains substituant des cycles aromatiques. La chlorophylle-a est présente dans tous les phytoplanctons et la chlorophylle-b dans les algues vertes. La concentration en

chlorophylle-a est comprise entre 0,05 $\mu\text{g. l}^{-1}$ dans les eaux côtières tropicales et 30 $\mu\text{g. l}^{-1}$ dans les eaux côtières du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord [6].

➤ *Matière organique dissoute :*

La matière organique dissoute (MOD) de l'eau de mer a pour origine l'activité biologique planctonique (production primaire et secondaire), les apports continentaux par les fleuves et l'activité humaine (qui peuvent être importants en zones côtières) et les apports atmosphériques. Ils sont respectivement de 2 à 3 x 10¹⁴ mol de C par an pour les apports continentaux et environ 1,7 x 10¹⁴ mol de C par an pour les apports atmosphériques. La production primaire s'élève à 33 x 10¹⁴ mol de C par an dont 85 % est assuré par le phytoplancton.

La concentration en COD est comprise entre 0,5 et 4 mg. l⁻¹ en eau de mer de surface mais peut atteindre 20 mg. l⁻¹ pour les eaux côtières. Pour les océans ouverts, la concentration ont souvent voisine de 1 mg. l⁻¹ [6].

1.4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer :

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer sont présentées Comme suit :

1.4.1. Salinité :

1.4.1.1. Notion de salinité :

C'est le caractère essentiel de l'eau de mer. L'océan contient en moyenne 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer. Si on considère le volume total de l'océan (1370 millions de km³) cela représente 48 millions de milliards de tonnes de sel, soit 95 tonnes par m² sur le globe entier.

La présence de sel dans l'eau modifie certaines de ses propriétés telles que la densité, la compressibilité, le point de congélation, la température du maximum de densité, alors que d'autres comme la viscosité, l'absorption de la lumière ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

Le chlorure de sodium (Na Cl) n'est qu'un des très nombreux sels composant l'eau de mer. On a décelé plusieurs corps simples existant à l'état naturel dans

cette dernière. Certains n'ont peut-être pas encore été découverts, car ils existeraient en trop faible quantité [7].

1.4.1.2. Définitions de la salinité :

Il n'existe pas une mais plusieurs définitions de la salinité : une définition purement théorique et plusieurs définitions pratiques, liées aux méthodes de mesure [7].

Définition théorique :

La salinité est la quantité totale des résidus solides (en grammes) contenu dans 1 kg d'eau de mer. Quand tous les carbonates ont été transformés en oxydes, le brome et l'iode remplacé par le chlore et que toute la matière organique a été oxydée.

Il est très difficile d'estimer la salinité par analyse chimique directe (séchage et pesée du résidu solide), car certains corps présents, notamment les chlorures, s'échappent au cours du dernier stade de séchage.

On utilise le fait que, dans l'eau de mer, les proportions relatives des principaux constituants sont pratiquement constantes. Le dosage de l'un d'entre eux est donc susceptible de donner la teneur de tous les autres, ainsi que la salinité. Les ions ; chlore, brome et iode peuvent aisément être dosés, avec précision, par titrage au nitrate d'argent [7].

1.4.1.3 .Mesure de la salinité :

La salinité est difficilement estimable (elle n'est pas à proprement parler mesurable puisqu'il n'y a pas d'étalon auquel on puisse comparer un échantillon) par analyse chimique directe, c'est-à-dire par séchage, à température élevée, et pesée du résidu solide, car certains composés présents comme les ions carbonate s'évaporent en fin de séchage. Sachant que les proportions des constituants principaux de l'eau de mer sont quasiment constantes, le seul dosage de l'un d'entre eux permet de déduire la teneur de tous les autres, et une évaluation de la salinité.

Les ions ;chlorure, bromure et iodure sont facilement dosables, par exemple par précipitation permettant un titrage au nitrate d'argent. Ils suffisent aux analyses. Ceci ne vaut pas pour les zones situées à proximité des pôles ou des estuaires, en aval d'usines de dessalement, de sources marines d'eau douce ou de remontées d'eaux salines d'origine

volcanique parce que la proportion des différents ions y est modifiée par rapport à celle de l'eau de mer « normale ».

La salinité est depuis 1978 officiellement mesurée à partir de la conductivité électrique de l'eau à une certaine température et pression. La salinité (S) d'un échantillon d'eau est donnée par le rapport K de la conductivité électrique de cet échantillon d'eau de mer à 15 C et à la pression atmosphérique normale, avec la conductivité d'une solution de chlorure de potassium (KCl) dans laquelle la fraction en masse de KCl est 0,0324356, à la même température et même pression. Si ce rapport K est égal à 1 on dit que la salinité est de 35. La salinité n'est plus présentée comme un rapport de masse. Elle s'exprime sans unité, comme le pH, mais on trouve encore des salinités exprimées en ‰, en g/kg ou en *psu* (*practical salinity unit*).

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la salinité. A titre d'exemple, on citera la réfractométrie.

Il s'agit d'utiliser un appareil qui mesure l'indice de réfraction d'une gouttelette d'eau posée sur sa vitre [8].

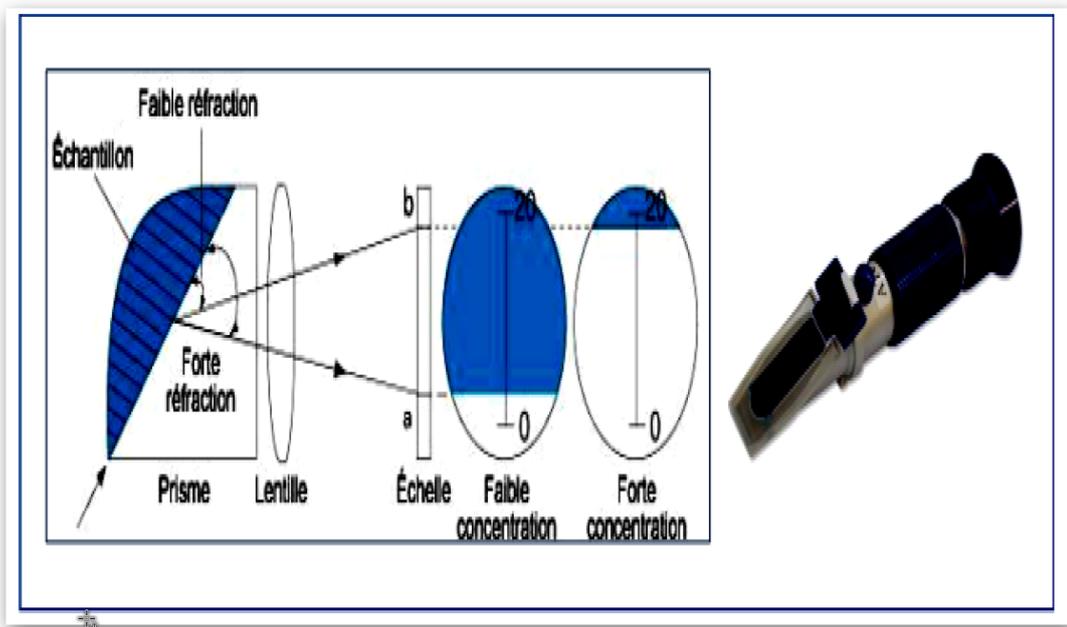


Figure I.1: Le réfractomètre [8].

Puisque l'indice de réfraction dépend de la température, la plupart des appareils dédiés à l'aquariophilie effectuent une correction dite ATC qui, dans une plage de l'ordre de 20 à 30°C permet d'afficher directement la salinité en ppt ou en ‰ (pour mille) [8].

La plupart d'entre eux affiche aussi la densité qu'aurait l'échantillon à une certaine température, souvent à 20°C comme l'indique l'exemple ci-dessous à gauche, ou précise S.G à 20°C comme à droite. Puisque la densité dépend de la température ; par exemple sur l'image de gauche la densité = 1,0145 à 20°C ; à 25°C elle atteindrait 1,0188 ; on voit que cette différence est négligeable.

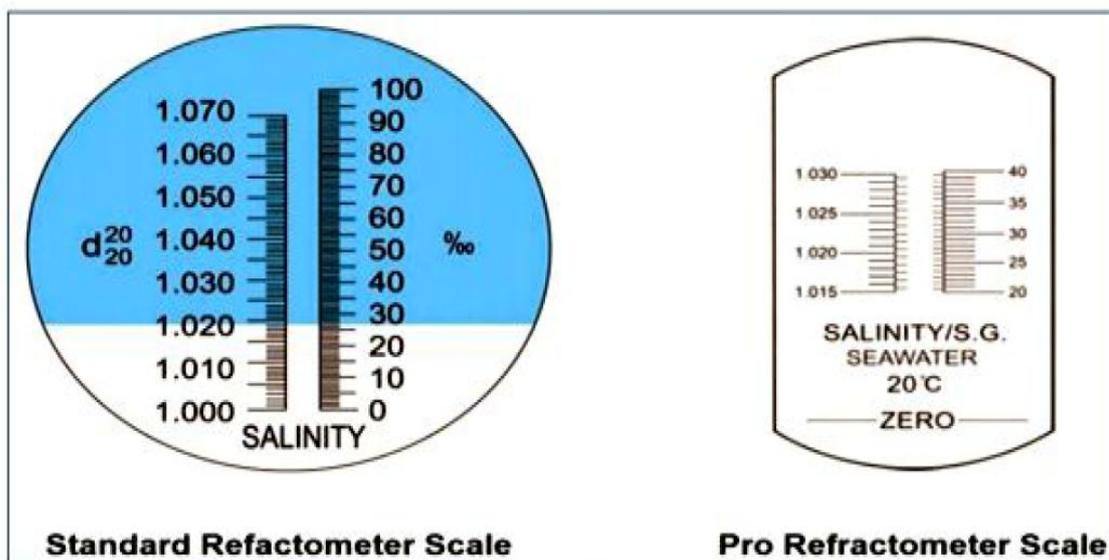


Figure I.2 : Refractomètre standard et pro refractomètre [8].

1.4.1.4. Origine du sel de l'eau de mer :

Les premières théories scientifiques sur l'origine du sel de la mer datent d'Edmond Halley qui propose en 1715 que le sel et les autres minéraux y sont amenés par les rivières: l'écoulement de l'eau en surface (eau de pluie) et dans les rivières dissout des ions par dissolution des roches. Les eaux douces souterraines et de surface sont donc très légèrement « salées » à cause de ces ions ; ceux-ci sont entraînés jusqu'à l'océan, où ils restent tandis que l'évaporation entraîne leur concentration (voir le cycle de l'eau). Halley note que les quelques lacs qui ne débouchent pas sur un océan (comme la mer Morte et la mer Caspienne, voir Endoréisme) ont en général une salinité très élevée, ce qu'il appelle la « météorisation continentale » (continental weathering).

La théorie de Halley est en grande partie correcte. En plus du phénomène décrit ci-dessus, le sodium a été arraché au plancher océanique lors de la formation initiale des océans. La présence de l'autre ion dominant du sel, l'ion chlorure, provient du «dégazage» du chlorure d'hydrogène (sous la forme d'acide chlorhydrique) ainsi que d'autres gaz de l'intérieur de la Terre, via les volcans et les monts hydrothermaux. Les ions sodium et chlorure sont ensuite devenus les constituants majeurs du sel de mer.

La salinité moyenne des océans est stable depuis plusieurs milliards d'années, le plus probablement grâce à un processus tectonique et chimique qui enlève autant de sel qu'il en arrive par les rivières. Les ions chlorure et sodium sont ainsi enlevés par les dépôts d'évaporite (les « roches salines »), la « grésification » (le dépôt de sels dans l'eau interstitielle) et les réactions chimiques avec le basalte des fonds marins. Depuis la création des océans, le sodium n'est plus arraché au fond des océans, mais capturé dans les couches de sédiments couvrant les fonds marins. D'autres théories affirment que la tectonique des plaques entraîne une partie du sel sous les masses continentales, où il remonte lentement à la surface [9].

1.4.1.5. Effet de la salinité sur la densité :

La densité de l'eau salée est une fonction non-linéaire de la température et de la salinité. Au premier ordre, la densité peut être évaluée par :

$$d = 1 - \alpha T + \beta S \quad (I.1)$$

Où α et β sont des constantes positives, donc la densité diminue quand la température T augmente et elle augmente quand la salinité S augmente.

L'amplitude des variations relatives de température étant sur la majeure partie des mers du globe supérieures à celles de salinité, l'effet de la salinité est souvent moindre que celui de la température. La salinité ne joue alors un rôle que quand ses variations sont assez fortes, souvent à cause d'un fort apport d'eau douce, ou que les variations de température sont faibles, souvent à cause de la proximité du point de congélation de l'eau de mer. Le premier cas se rencontre localement dans les mers tropicales, proche de l'embouchure de grands fleuves comme l'Amazone ou en Afrique équatoriale mais également en Mer Noire.

Le deuxième cas se rencontre dans les mers polaires arctiques et antarctiques, quand la fonte de la banquise et des calottes polaire induit un apport d'eaux fraîches (peu salées) en surface tandis que les eaux plus profondes sont plus salées et plus chaudes.

La stratification des océans liée à une densité d'eau variable dans la colonne d'eau amène à la formation de pycnocline, c'est-à-dire un gradient fort des isopycnes, les lignes d'iso-densité. Lorsque cette pycnocline est contrôlée par la salinité, on parle d'haliocline, tandis que lorsqu'elle est contrôlée par la température, on parle de thermocline. Dans les régions polaires, l'halocline peut être si marquée qu'elle peut être le support d'ondes internes, pouvant mener à un phénomène dit « d'eaux mortes ». Dans les mers tropicales, l'apport d'eaux douces peut former une légère halocline en sub-surface sous la couche mélangée de surface, et on parle alors de « barrière de sel ». L'halocline en Mer Noire est également très forte.

L'effet de la salinité sur la densité de l'eau de mer joue également un rôle très important dans la circulation thermohaline globale, en faisant plonger aux hautes latitudes les eaux plus salées apportée depuis les latitudes moyennes, lorsque celles-ci se refroidissent. On forme ainsi aux hautes latitudes les eaux profondes qui remplissent ensuite tous les bassins abyssaux de la planète. Ce mécanisme forme un des puits de carbone de la circulation en stockant en profondeur des eaux initialement en surface.

Ce mécanisme peut être accentuée par l'augmentation de la concentration en sel lors de la formation de banquise de mer : le sel étant rejeté dans l'eau encore libre, celle-ci augmente alors de densité. C'est ainsi que les eaux de fond d'origine antarctique figurent parmi les eaux les plus denses de la planète, atteignant des températures potentielles négative et une densité potentielle de 1,046.

Enfin certains courants même aux latitudes tempérées ou tropicales sont contrôlées par des variations de densité dues à la salinité, principalement à cause de forte évaporation. Un exemple connu est le courant de Leeuwen sur la côte Ouest de l'Australie [10].

1.4.1.6. Propriétés de l'eau de mer :

La présence de sels dans l'eau modifie fortement certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, coefficient d'activité) tandis que d'autres sont moins

influencées (viscosité, absorption de la lumière). D'autres propriétés dépendent essentiellement de la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

Les différentes propriétés de l'eau de mer dépendent de sa température, de sa salinité et de sa pression (liée à la profondeur). Elles peuvent être fortement variables d'un endroit à l'autre en raison des fortes variations de salinité, de température et de profondeur [3].

Tableau I.3: Classification des eaux selon la salinité.

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 – 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 – 15 000
Eau très saumâtre	15 000 – 35 000
Eau de mer	35 000 – 42 000

1.4.2.Densité :

Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1,035 à 1,036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression. La densité est mesurée par le densimètre ou hydromètre à flotteur. [8] Il en existe deux types :

➤ *L'hydromètre à aiguille :*

Présente l'avantage d'être bon marché et facile à utiliser mais a la mauvaise réputation d'être peu précis à cause des frottements des paliers de l'aiguille notamment en raison des concrétions de sel dont ils peuvent faire l'objet Il comporte souvent une échelle de densité (Specific Gravity) et en ppt à une température donnée [8].

➤ *L'hydromètre flottant :*

Consiste en un cylindre creux, lesté et gradué, qui s'enfonce plus ou moins dans le liquide à mesurer selon sa densité.

Il comporte aussi parfois un thermomètre comme sur l'image ci-contre On lit directement la densité du liquide dans lequel il est plongé sur la graduation présente à la surface libre, valable uniquement à la température généralement t indiquée sur l'appareil.

Il faut lire l'échelle au niveau de la surface de l'eau, et pas au niveau du ménisque qui peut monter ou descendre sur le tube en verre [8].

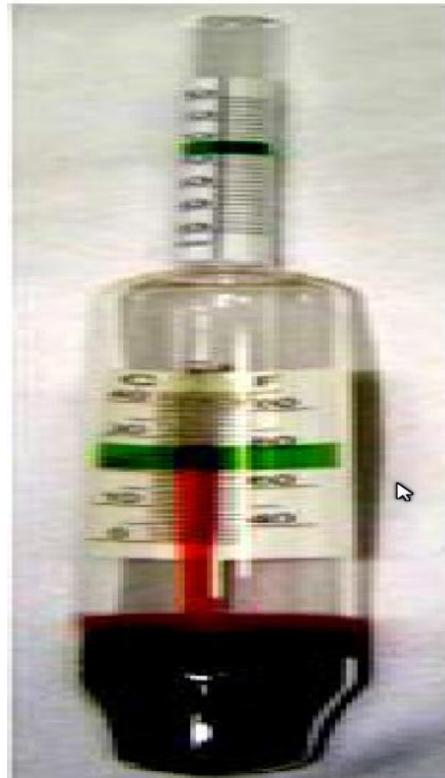


Figure I.3: L'hydromètre flottant [8].

I.4.3. Solubilité :

La solubilité d'un composé ionique ou moléculaire, appelé soluté, est la quantité maximale de moles de ce composé que l'on peut dissoudre ou dissocier, à une température donnée, dans un litre de solvant. La solution ainsi obtenue est saturée.

Tableau I.4 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l [11].

Elément	Na	Ca	Mg	K	Ba	Sr
Cl	360	730	560	330	370	510
SO ₄	170	2	350	0,002	0,002	0,11
NO ₃	840	1220	740	90	90	70
CO ₃	190	0,013	1	0,02	0,02	0,011
F	45	0,013	0,076	1,6	1,6	0,1

- Les sels de Sodium Cl, SO₄, NO₃, et F sont très bien solubles.

- Les Nitrates Na, Ca, Mg, K, Ba et Sr sont très bien solubles.
- Les sels de Calcium et Strontium SO_4 , CO_3 , et du F ont une solubilité très limitée.
- Les carbonates ont aussi une solubilité très limitée pour les Ca, Mg, K, Sr.
- Les sels ayant une solubilité basse peuvent causer l'entartrage dans les stations d'osmose inverse provoquée par la précipitation [12].

1.4.4. Température :

1.4.4.1 Température des eaux salées : Ainsi, par exemple :

- *la température de la Méditerranée* est de 13 degrés en profondeur et quand l'eau de surface devient plus froide, elle plonge, ce qui provoque un mélange des eaux.

- *la température du lac Léman* est de 6 degrés en profondeur et si l'hiver est assez froid toute l'eau du lac se retrouve à cette température ce qui permet un brassage complet de l'eau.

- *dans le nord de l'Atlantique* l'eau se refroidit et finit par plonger, c'est ce qui se passe au large de la Norvège avec l'eau chaude de ce qui reste du Gulf Stream et ce phénomène est le moteur de la circulation océanique.

La répartition de la salinité en surface est moins zonale que celle de la température. Le caractère zonal de la distribution de la température est dû à l'ensoleillement, donc à la latitude. Le premier facteur qui détermine la salinité est le bilan évaporation-précipitation qui est moins zonal que l'ensoleillement (forte influence des climats continentaux). Ainsi, la très forte évaporation au niveau des anticyclones subtropicaux (Açores) apparaît nettement dans la distribution de salinité de surface [13].

L'eau de mer est, en général, plus ou moins froide suivant la latitude. Chaude à l'Équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures l'été), froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan Indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique. A la même latitude dans un même océan les températures sont différentes.

Dans l'hémisphère Sud le phénomène est inverse : ce sont les façades Ouest des continents qui sont plus froides que les côtes Est. Les différences de température sont également importantes suivant les profondeurs.

Les couches superficielles de la mer peuvent être réchauffées ou refroidies par l'air ambiant. Dans les régions polaires, la température des eaux est plus basse au pôle Sud qu'au pôle Nord.

Les échanges thermiques entre la surface de l'eau de mer et l'atmosphère sont très importants : le climat est influencé par la température de l'eau de mer. Les océans se réchauffent moins vite et se refroidissent moins vite également que la terre. Pour cette raison, les régions qui bordent l'océan jouissent d'un climat océanique, plus tempéré (doux et humide) [11].

1.4.5. PH :

L'eau de mer faiblement alcaline et son PH moyen est de 8,2 avec des variations entre 7 et 8,4.

Les variations de PH ont une certaine analogie avec celle de l'oxygène dissous. Ceci s'explique en considérant l'activité synthétique de certains organismes : une forte production d'oxygène s'accompagne d'une diminution de la teneur en CO₂ et par conséquent d'une augmentation du PH ; l'oxydation de la matière organique diminue la tenue en oxygène de l'eau en produisant du CO₂ et par conséquent abaisse le PH.

Dans certaines conditions le PH peut prendre des valeurs particulières. Notamment dans les bassins isolés où il peut y avoir production d'H₂S. Le PH peut approcher des valeurs voisines de 7 ou tomber à des valeurs nettement plus acides.

Le PH des eaux de mer décroît avec une augmentation de température. Pour une eau de chlorinité de 19,5‰ et de pH=8, une élévation de température de 1°C, entre 10°C et 20°C, diminue le pH de 0,0109. De même, une augmentation de pression de 100 bars produit une diminution du pH de l'ordre de 0,02 [14].

1.4.6. Dureté :

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na⁺, K⁺) et H⁺. Elle est souvent due aux ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺. La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO₃ par litre.

Dans l'eau, sont déterminées :

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne ;
- La dureté calcique qui correspond à la teneur globale en sels de calcium ;
- La dureté magnésienne qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium.
- La dureté carbonatée correspond à la teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de calcium et de magnésium [15].

1.4.7. Matières en suspension :

Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, du régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc. Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution [15].

1.4.8. Conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm^2 de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau [15].

1.5. Paramètres organoleptiques :

Les différents paramètres organoleptiques se traduisent comme suit :

1.5.1. Couleur :

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques acides. Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire [16].

1.5.2. Goûts et odeurs :

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur agréable. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère [17].

1.5.3. Turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, la pluviométrie joue un rôle important vis-à-vis de ce paramètre dans les eaux superficielles et souterraines selon leur origine [18].

1.6. Paramètres microbiologiques :

Le risque microbiologique d'origine hydrique (ou risque infectieux) correspond à la présence dans l'eau de microorganismes pathogènes, ou potentiellement pathogènes (opportunistes) et ce en quantité supérieure au seuil d'infection fixé par l'OMS. Parmi ces microorganismes, on distingue les virus, les bactéries et les protozoaires.

Le risque microbiologique provient donc du pouvoir pathogène de ces germes qui est conditionné par les propriétés de l'agent infectieux. Il convient de préciser que la mise en œuvre de procédés élémentaires de désinfection telle que la chloration de l'eau, permet d'éradiquer totalement les fléaux tels que le choléra, la dysenterie bacillaire ou les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes.

Tableau I.5 : Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables [19].

Origine	Maladies	Agents pathogènes
Parasitaire	Dysenterie amibienne	Gastro-entérites
	Gastro-enterites	Giardia lamblia Cryptosporidium parvum
Bactérienne	Fievrestyphoïde et paratyphoïde	Salmonella typhi Salmonella paratyphi A et B
	Dysenterie bacillaire	Shigella
	Cholera	Vibrio cholerae
	Gastro-enterites	Escherichia coli enterotoxinogène Campylobacter jejuni Yersinia enterocolitica
Virale	Hépatites A et E	Virus hépatite A et E
	Poliomyélite	Virus polio myé litique
	Gastro-entérites	Rota virus Entérovirus Calicivirus Adenovirus...

I.7. Les eaux saumâtres :**I.7.1. Définition :**

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 [20].

I.7.2. Salinité des eaux saumâtres :

La composition chimique des eaux saumâtres varie énormément d'une région à l'autre et pour une même région d'une saison à l'autre. Ces variations de composition chimique dépendent de plusieurs paramètres : l'eau qui pénètre dans le sol dissout les sels qui composent l'écorce terrestre.

Les principaux sels qui peuvent être dissous en assez grandes quantités sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le Na Cl . Indépendamment de la composition chimique et de la structure physique des roches, d'autres facteurs interviennent également parmi lesquels nous citerons :

- La vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact ;
- Les matières déjà dissoutes (la solubilité variant avec la force ionique) : ainsi des eaux chlorurées et gypseuses peuvent contenir en solution des quantités de sulfate de calcium supérieures à la solubilité du sulfate de calcium dans l'eau pure. Le phénomène d'évaporation (évaporation directe ou évapotranspiration), paramètre principalement lié aux conditions climatiques mais aussi à la profondeur du niveau piézométrique des nappes souterraines (influence des irrigations) [21].

I.8. Norme de potabilité sur les sels :

Les normes de potabilité d'une eau diffèrent selon la législation des pays. Le Tableau I.6 : ci-dessous présente les normes définies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (l'Organisation mondiale de la santé 2008) concernant la salinité totale et les différents sels présents dans l'eau [6].

Tableau I.6 : Norme de potabilité décrite par l'OMS sur les sels

Paramètres	Normes
Turbidité (NTU)	< 1
pH	6,5 _ 9.5
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	180 1000 à 20°C
Dureté totale ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ CaCO_3)	200
Calcium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	-
Magnésium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,4
Sodium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	200
Chlore ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	250
Aluminium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,2
Fer ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,3
Cuivre ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1,0
Zinc ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	3,0
Manganèse ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,1
chlorite résiduel ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,6-1,0
Sulfates ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	250
Bore ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,5

Le tableau I.7 ci-dessous présente les normes définies par l'Algérie concernant la salinité totale et les différents sels présents dans l'eau.

Tableau I.7 : Norme de potabilité définie par l'Algérie sur les sels.

Paramètres	Normes
Turbidité (NTU)	1-2
Ph	6,5-8.5
Conductivité ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	2800 à 25°C
Dureté totale ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ CaCO_3)	200
Calcium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	75-200
Magnésium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,4
Sodium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	200
Chlore ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	200-500
Aluminium ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,2

Fer (mg.l ⁻¹)	0,3
Cuivre (mg.l ⁻¹)	0,05-1,5
Zinc (mg.l ⁻¹)	1-5
Manganèse (mg.l ⁻¹)	0,5
Chlorite résiduel (mg.l ⁻¹)	-
Sulfates (mg.l ⁻¹)	200- 400
Bore (mg.l ⁻¹)	0,3

I.9. Conclusion :

Le recours au dessalement de l'eau de mer constitue une solution urgente pour satisfaire l'alimentation en eau des villes côtières surpeuplées. Ces dernières années la consommation en eau est toujours croissante, pour pallier à cette demande en ressources hydriques engendrée par la situation de sécheresse répétée qu'a connue le monde pendant les dix dernières années. Le choix de réaliser des stations de dessalement d'eau de mer pour alimenter les populations des villes côtières en eau potable est une solution judicieuse.

II.1. Introduction :

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalements moins chers, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement [22].

La désalinisation peut être effectuée selon plusieurs principes physiques : la distillation qui repose sur un changement de phase eau-vapeur, une séparation sel-eau faisant appel à des membranes semi-perméables où le moteur est soit la pression (osmose inverse), soit un champ électrique (électrodialyse) [23].

II.2. Les principales technologies de dessalement des eaux de mer :

Les différents procédés peuvent être classés en trois grandes familles :

- 1) les procédés faisant intervenir un changement de phase :
 - évaporation ;
 - congélation.
- 2) les procédés de perméation sélective à travers une membrane :
 - transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse) ou d'un gradient de pression (piezodialyse) ;
 - transfert d'eau sous l'action d'un gradient de pression (osmose inverse) ou sous l'action d'un gradient de température (thermo-osmose).
- 3) les procédés chimiques :
 - échange d'ions ;
 - extraction par solvant.

En fait, la totalité des installations actuellement en service fait appel à deux grandes familles de procédés : les procédés par évaporation et les procédés de séparation par membranes qui sont plus récents [24].

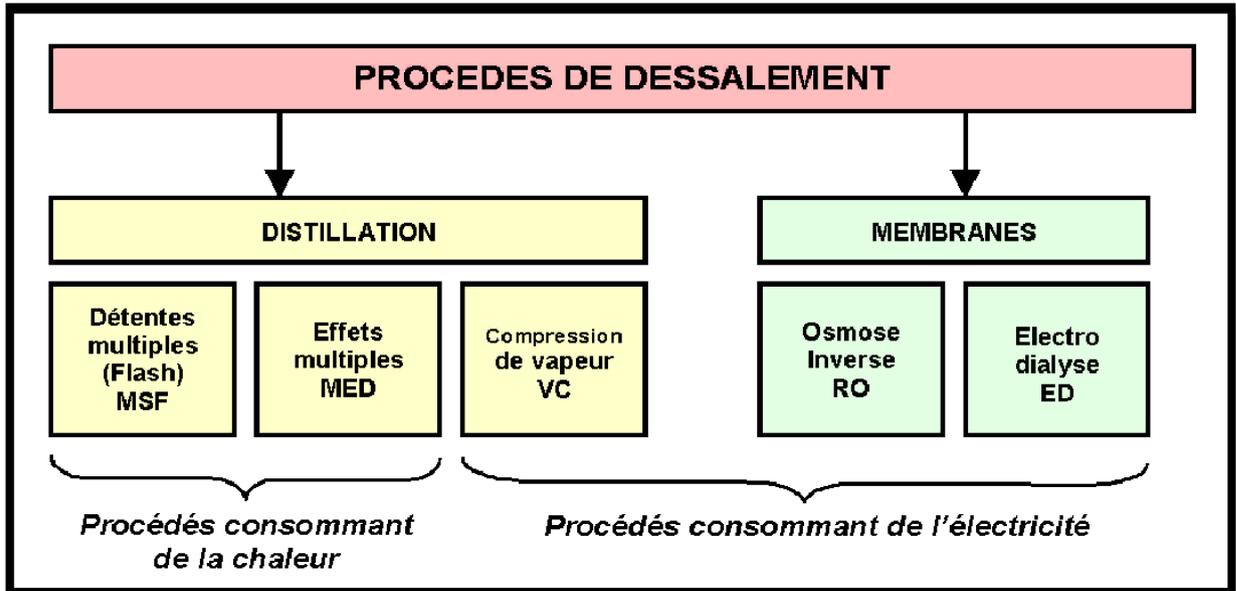


Figure II.1: Les différents procédés de dessalement [25].

Une installation de dessalement peut être schématiquement subdivisée en 4 postes : une prise d'eau, un prétraitement, l'installation de dessalement et post-traitement.

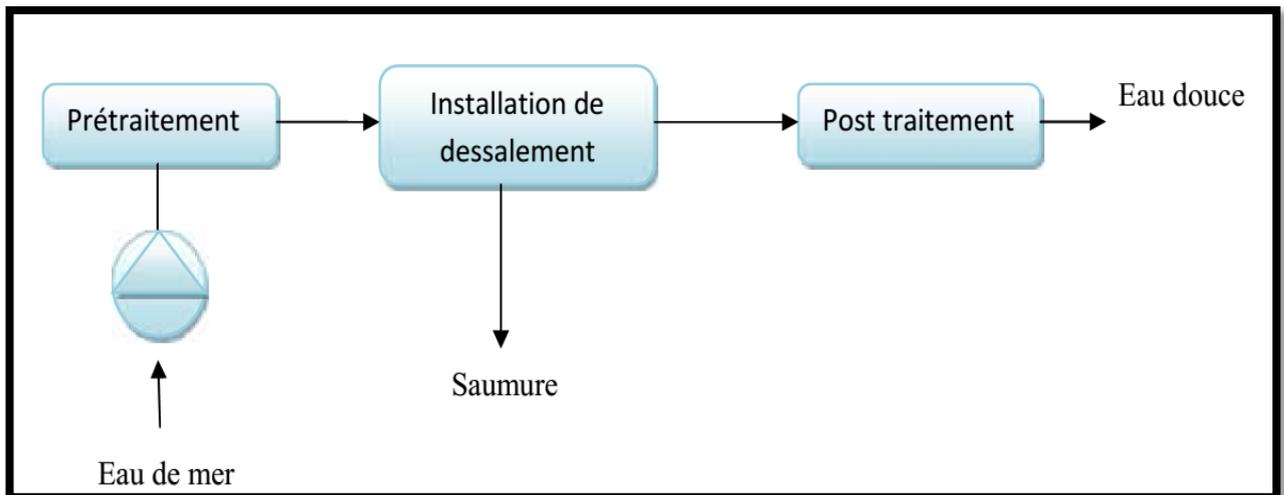


Figure II.2: Schéma général d'une station de dessalement

II.2.1. Procédés par distillation :

II.2.1.1. Distillation à simple effet :

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau.

- 1) Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
- 2) La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.

3) Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure [26].

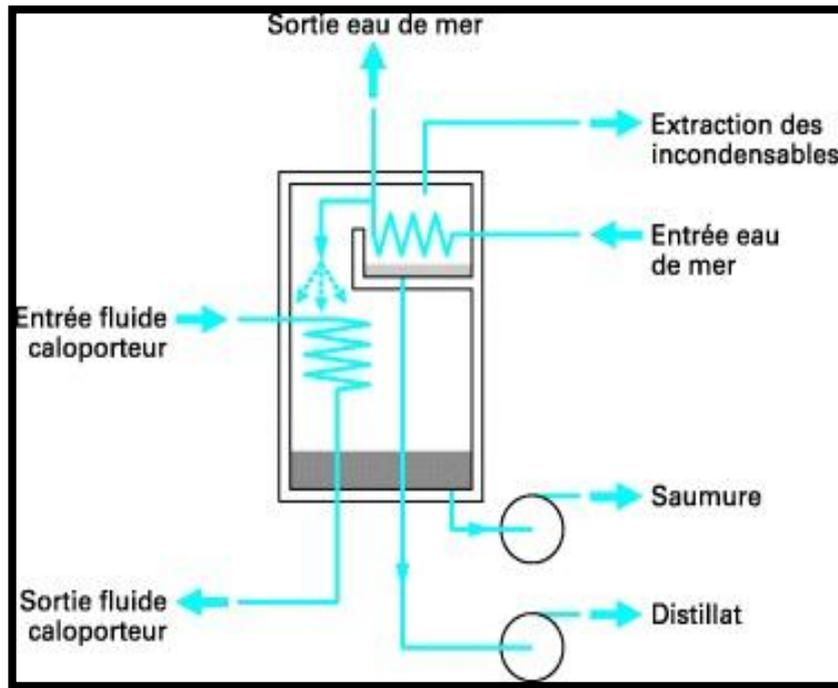


Figure II.3: Distillation à simple effet

II.2.1.2. Distillation à multiples effets (MED) :

Ce procédé est basé sur le principe d'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite (voir figure II.4).

Ainsi, seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³d'eau douce produite) [27].

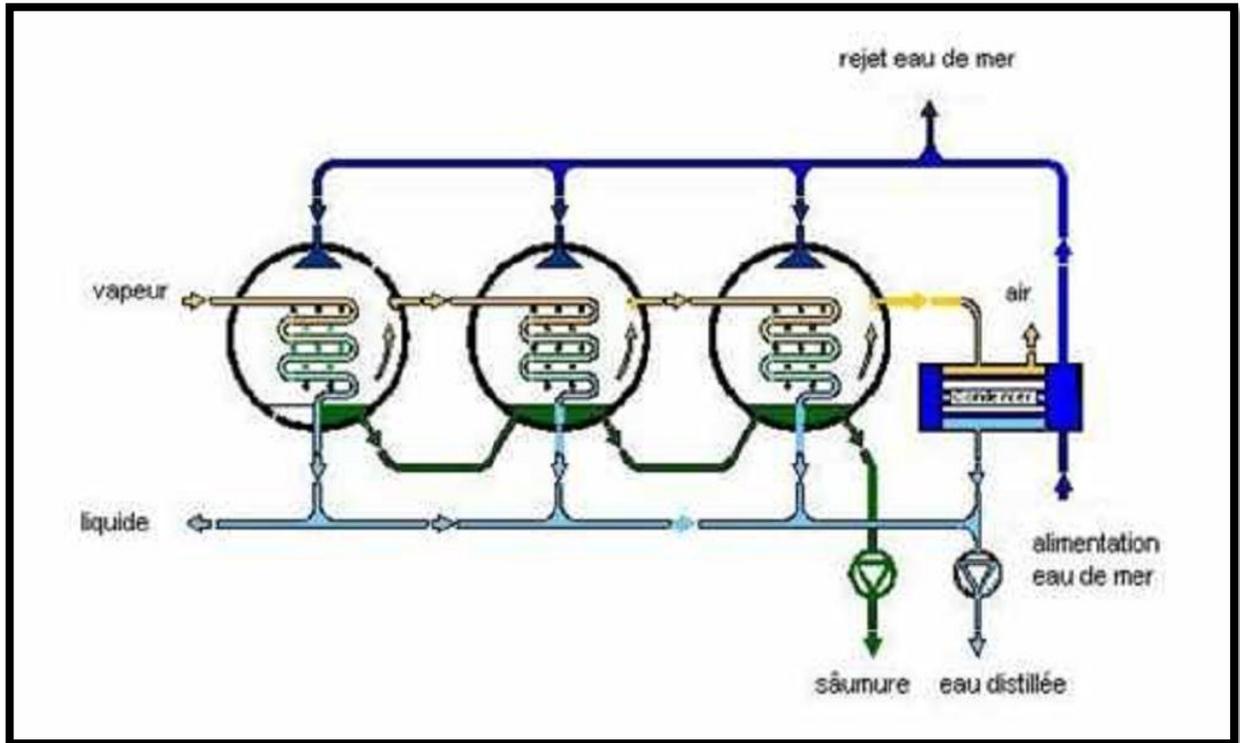


Figure II.4: Schéma de principe d'un système Distillation à multiples effets (MED) [27].

II.2.1.3. Distillation à détente étagées ou multi flash (MSF) :

Ce procédé dit flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte(ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée flash. Une fraction de l'eau s'évapore (figure II.5) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle [28].

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière. Cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur à basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

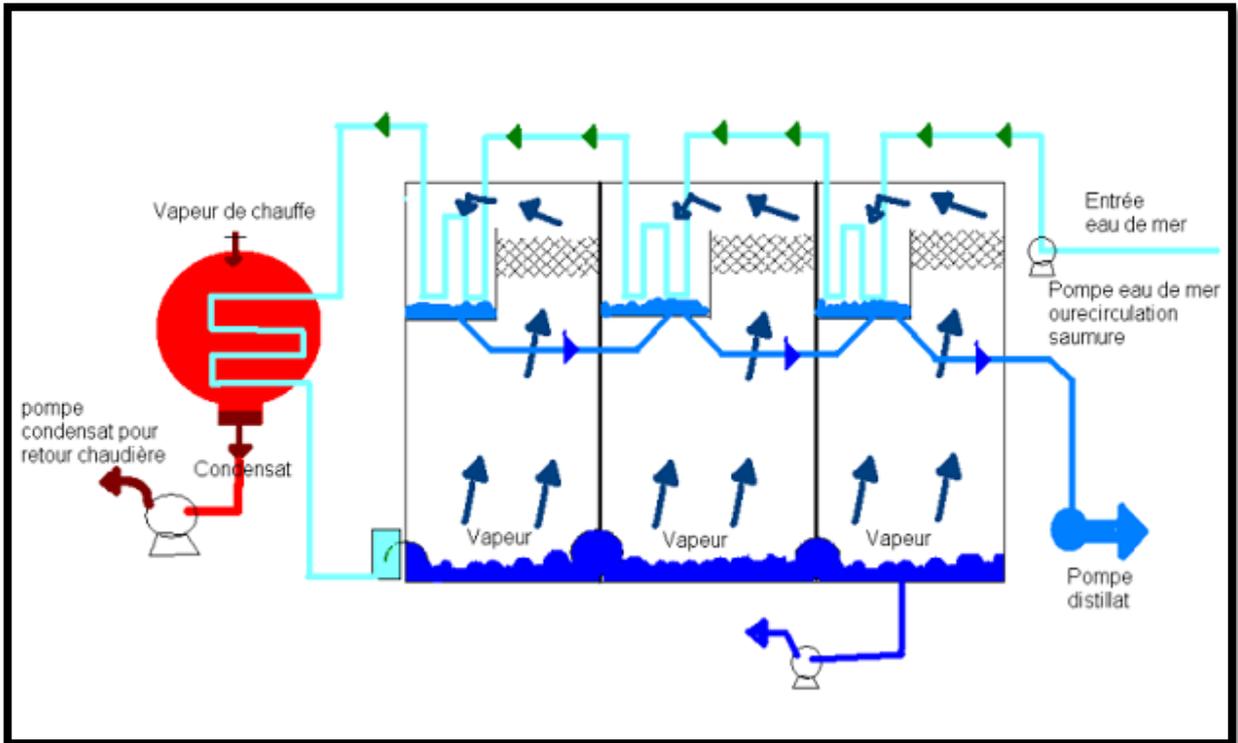


Figure II.5 : principe de fonctionnement d'un système (MSF)

II.2.1.4. Distillations par compression de vapeur :

L'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermique isolée (figure II.6), La vapeur produite est aspirée par le compresseur qui élève sa température de saturation.

Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense provoquant l'ébullition de l'eau salée [29].

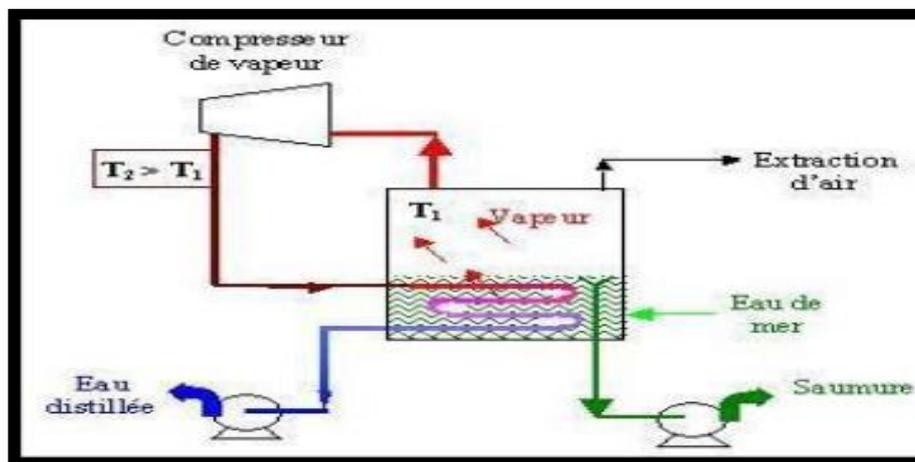


Figure II.6: Principe de distillation à compression de vapeur

II.2.2. 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. Deux procédés utilisant de telles membranes sont actuellement commercialisés. Ce sont l’électrodialyse et l’osmose inverse.

II.2.2.1. L’électrodialyse :

Le principe de l’électrodialyse est bien connu. Les ions d’un sel dissous dans l’eau, comme le chlorure de sodium par exemple, déplacent sous l’action d’un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide.

Les ions positifs, ou cations (par Na^+), sont attirés par l’électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l’électrode positive.

Dans l’électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit perméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d’autres à faible concentration.

L’électrodialyse est bien adaptée aux eaux saumâtres dont la salinité est assez faible, inférieure à celle de l’eau de mer .Les membranes utilisées en électrodialyse laissent passer les ions mais sont imperméables à l’eau. C’est exactement l’inverse pour les membranes utilisées en osmose inverse [23].

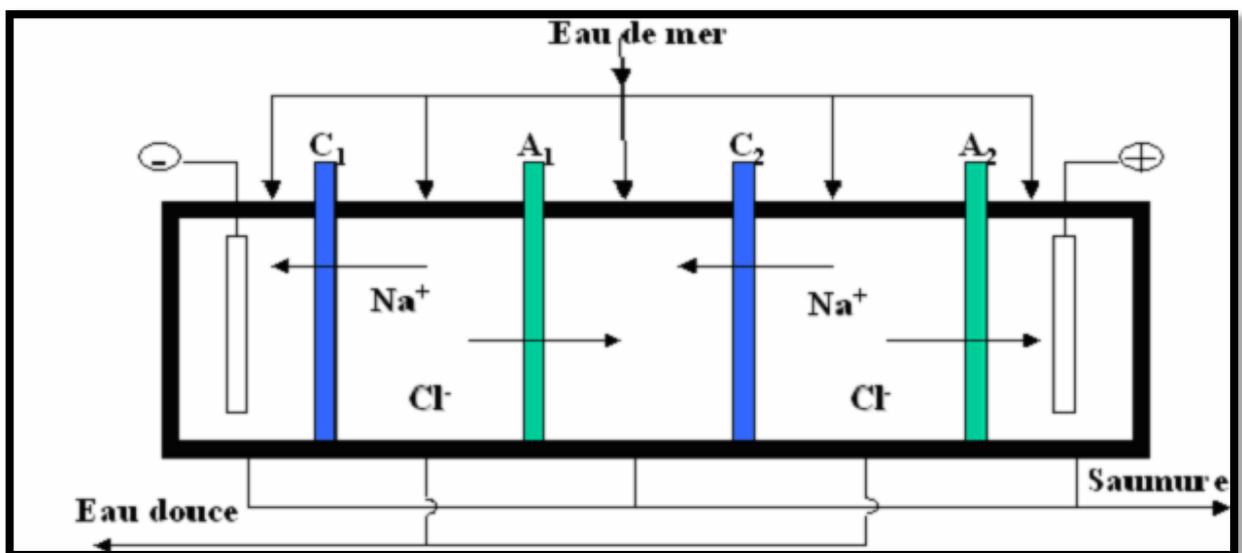


Figure II.7 :Principe de fonctionnement de l’électrodialyse [30].

II.2.2.2. Procédé d'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille.

➤ Membrane d'osmose inverse :

Les membranes d'osmose inverse sont des membranes artificielles poreuses. Les matériaux utilisés pour leur fabrication sont de nature organique (polymères de deux classes, à savoir les acétates de cellulose et les polyamides) ou minérale. Généralement, ces membranes sont constituées d'une couche mince, ou couche active, ou encore peau, de faible épaisseur, comprise entre 0,1 et 1,5 μm comportant des micropores : c'est la partie sélective de la membrane. Cette couche active est supportée par une ou plusieurs couches, à la fois plus poreuses et mécaniquement plus résistantes.

Du fait de leur nature organique, les membranes doivent être utilisées dans des conditions assez restreintes (pH entre 2 et 11, température maximale de 50°C).

Pratiquement, les membranes sont assemblées sous forme de modules regroupant généralement plusieurs membranes. En osmose inverse, les modules spiralés sont majoritairement employés ainsi que les fibres creuses [31].

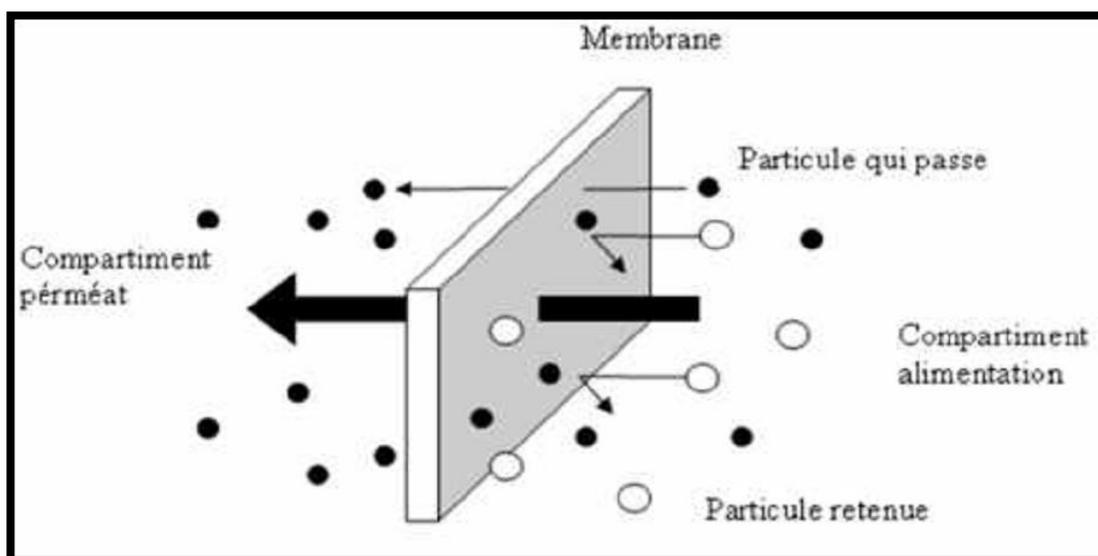


Figure II.8: Principe de fonctionnement de la membrane.

➤ Différents modules des membranes : [30]

Il y a quatre différents types de modules d'osmose inverse, qui sont utilisés pour les procédés d'osmose inverse, principalement des procédés de Dessalement :

a) Module tubulaire :

Les membranes tubulaires 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.

b) Module capillaire :

Dans les membranes capillaires, les membranes servent de barrières spécifiques, suffisamment fortes pour résister aux pressions de filtration. Le diamètre des membranes capillaires est beaucoup plus petit que celui des membranes tubulaires, à savoir entre 0.5 et 5 mm. Du fait du diamètre plus petit les risques d'obstruction sont beaucoup plus élevés. Un avantage est que la densité de conditionnement est plus élevée.

c) Module à fibre creuse :

Les membranes fibres creuses sont des membranes avec un diamètre inférieur à 0.1 µm. 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 pour la nano-filtration et l'osmose inverse.

d) Module spirale :

Les membranes en spirale sont constituées de deux couches de membranes. Ces membranes sont enroulées autour d'un drain central permettant de récupérer le permeate (voir le dessin ci-dessous).

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.

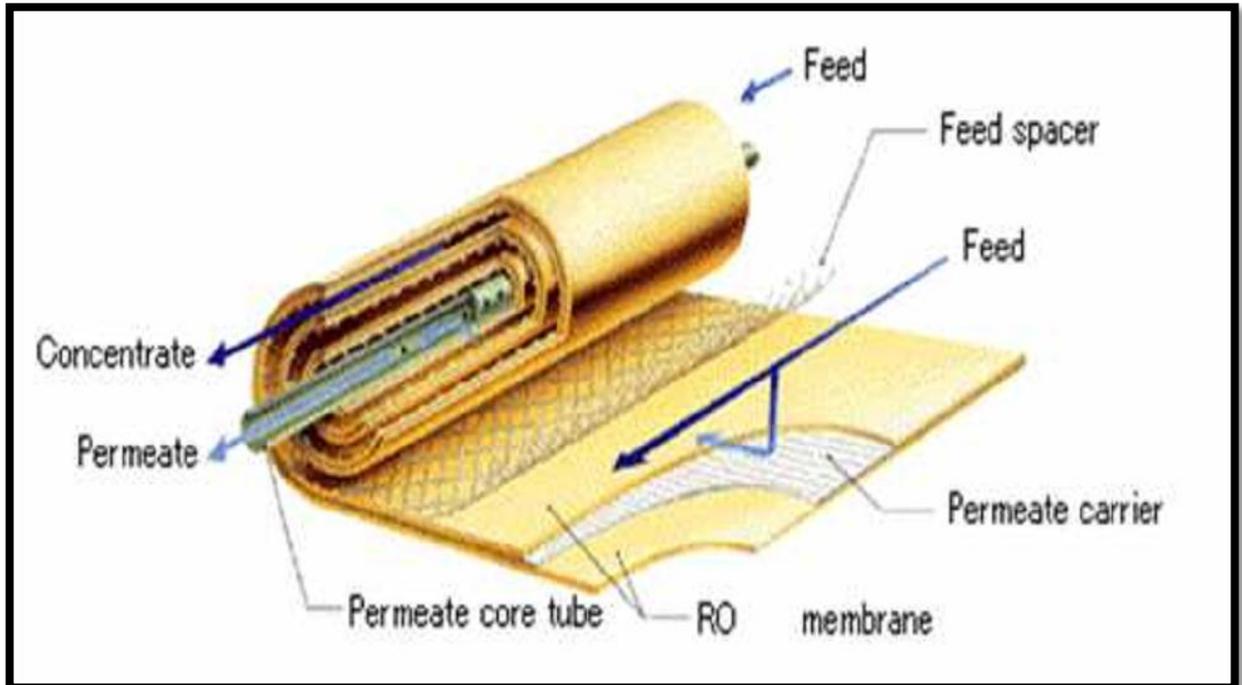


Figure II.9: Représentation d'un module spirale.

- *Principe de l'osmose inverse:*

L'osmose est un mécanisme naturel d'échange présent dans tous les organismes vivants au niveau des cellules. Sous l'effet d'un écart de concentration, les molécules diffusent des régions les plus concentrées vers les moins concentrées, y compris à travers de fines membranes, comme celles des cellules, si leur nature physico-chimique le permet. Si ce n'est pas le cas, c'est l'eau qui va migrer à travers la membrane pour diluer la zone concentrée et équilibrer les concentrations. A l'équilibre, la différence de pression est appelée pression osmotique. (Figure II.10)

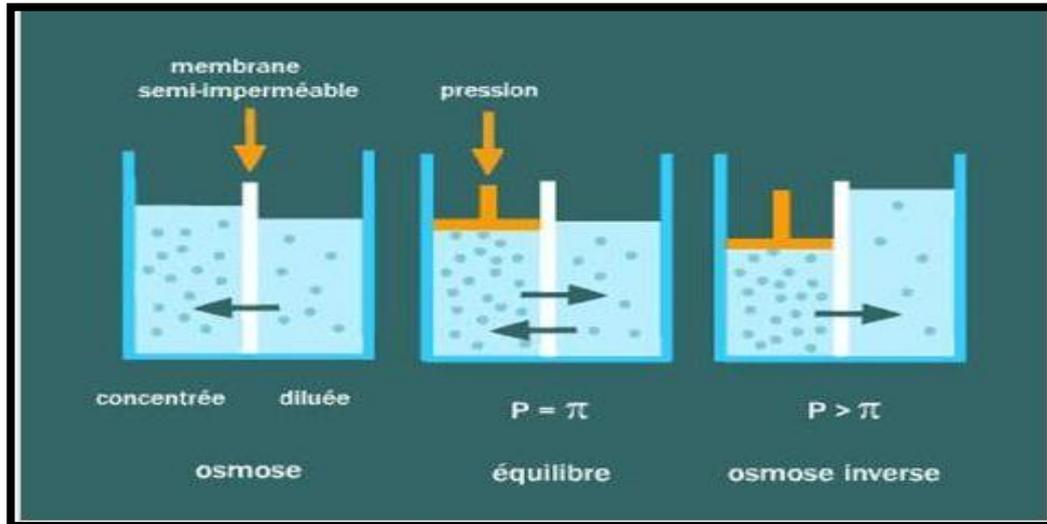


Figure II.10: Principe de l'osmose inverse.

L'osmose inverse, qui est au contraire un procédé de séparation, est exactement le phénomène inverse : en appliquant une pression suffisante, on force l'eau à quitter la zone concentrée pour rejoindre la zone à faible concentration.

La membrane séparatrice doit bien évidemment avoir la capacité de laisser passer les molécules d'eau tout en arrêtant le sel. La pression à exercer dépend de la concentration en sel et sert à empêcher l'eau pure de retourner diluer l'eau salée...par phénomène d'osmose. On comprend aisément que la pression minimale à appliquer est au moins égale à la pression osmotique, qui correspond juste à l'état d'équilibre. Si on considère l'eau de mer, la valeur de la pression osmotique est environ $29 \cdot 10^5$ Pascals (Pa), soit près de 30 fois la pression atmosphérique. Pratiquement, pour obtenir un flux significatif et vaincre la pression osmotique qui augmente au fur et à mesure que l'eau est extraite, la pression de travail varie entre 60 et $70 \cdot 10^5$ Pa [32].

- *La pression osmotique :*

En première approximation, la pression osmotique peut être calculée en assimilant le comportement des molécules du soluté à celles des molécules gazeuses. Dans le cas d'une solution diluée, on peut appliquer la loi des gaz parfaits.

La loi de Van'tHoff exprime que la pression osmotique exercée par le soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercée dans l'état gazeux parfait dans le même volume V et à la même température T . Si le soluté est dissocié en i ions la pression osmotique sera i fois supérieure. La pression osmotique d'une solution est directement proportionnelle à la concentration en soluté [33] :

$$\pi = iCR T \tag{2.1}$$

π : pression osmotique en bar ;

i : nombre d'ions dissocié dans le cas d'un électrolyte ;

C : concentration molaire en mol/l ;

R : constante des gaz parfait ($0.082 \text{ l.bar.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ; ($8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

T : température absolue en K ;

• Schéma général d'une installation d'osmose inverse:

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- les membranes proprement dites
- les modules
- la pompe HP
- éventuellement un système de récupération d'énergie
- un système de prétraitement
- un système de post-traitement

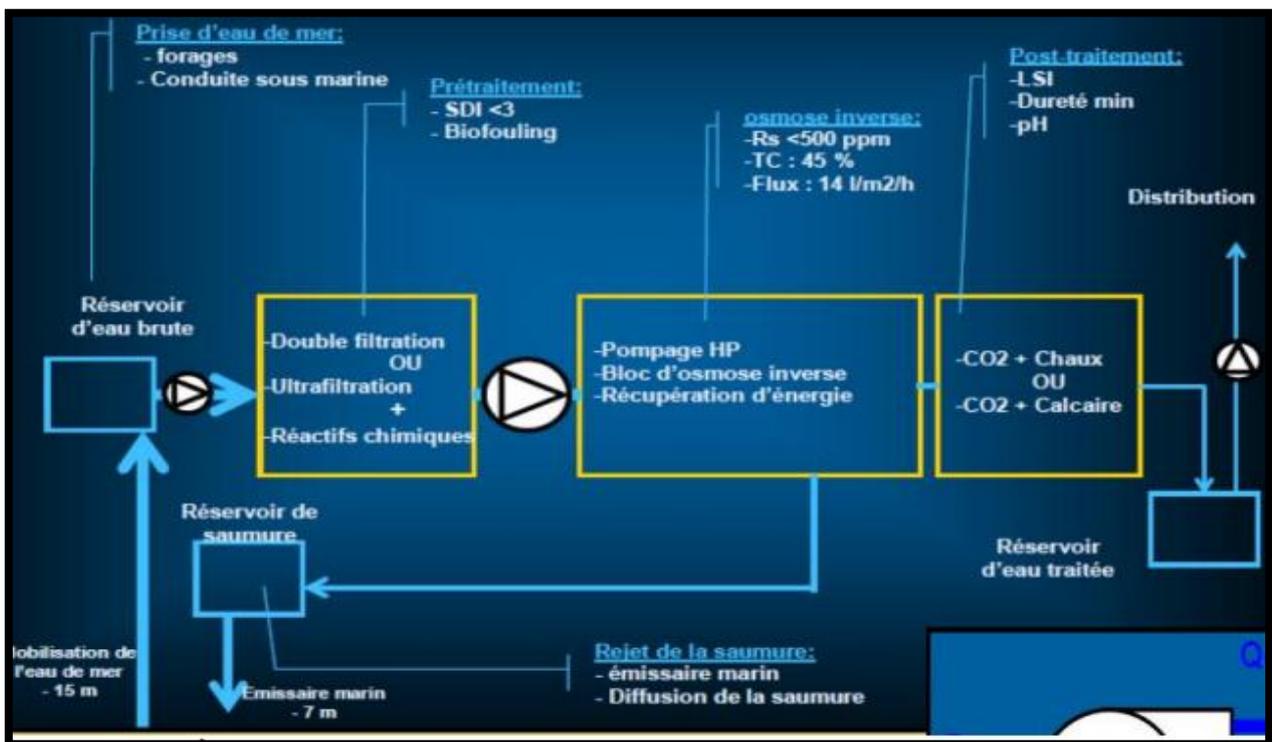


Figure II.11: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse (Lattemann, 2010)

- Paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse: [34]

a) Taux de conversion :

Le taux de conversion d'un système d'OI est le rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation :

$$y = Q_p / Q_0 \quad (2.2)$$

b) La sélectivité :

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

$$TR = \frac{C_0 - C_p}{C_0} \quad (2.3)$$

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

C_p : concentration de la même espèce dans le perméat

c) Le débit spécifique :

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité de 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.

Le débit spécifique s'exprime le plus souvent en $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ [33]

$$j_e = \frac{Q_p}{S} \quad (2.4)$$

j_e : Densité de flux volumique ($L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$).

Q_p : le débit de perméat.

S : la surface de la membrane.

- Système de prétraitement :

Le rôle principal du prétraitement de l'eau dessalée est de limiter l'encrassement et l'entartrage, afin de maximiser la durée de fonctionnement des membranes, Cela concerne principalement la teneur en chlore, le pouvoir encrassant (colmatage) et les précipitations de sels en sursaturation.

Ce poste représente environ 10% de l'investissement total et 10% du prix final de l'eau. Il nécessite une surveillance très stricte au risque de détruire irrémédiablement les membranes [32].

➤ *Chloration :*

La chloration a pour objectif l'inactivation des micro-organismes (bactéries principalement) mais aussi micro-algues, champignons, qui, outre le fait que certains peuvent être pathogènes, sont à l'origine d'un colmatage important des membranes appelés bio fouling.

La prolifération des organismes vivants est bloquée par un procédé de désinfection. Sinon, cela peut conduire à l'obstruction des canalisations ou au colmatage des membranes. Le procédé le plus répandu consiste à injecter du chlore, réactif dont le stockage et la manipulation exigent des précautions strictes. Le chlore dissous dans l'eau libère l'ion hypochloreux (HCIO^-), qui est l'agent actif de la stérilisation. Pour éliminer le danger lié au chlore, on peut lui substituer l'hypochlorite de sodium (eau de Javel) [33].

➤ *Coagulation/Floculation :*

Le but de la coagulation est la neutralisation des charges primaires qui permet d'annuler les forces de répulsion suivie par le piégeage dans les précipités. Cette neutralisation se déroule par l'intermédiaire des composés de deux métaux lourds Al^{+3} et Fe^{+3} .

La floculation consiste à agglomérer sous forme de floes les particules colloïdales neutralisées par coagulation. Les doses optimales des différents produits (coagulants, floculation) sont déterminées par les méthodes de jar test [35].

➤ *Sédimentation :*

Ce type de procédé est utilisé en amont de la filtration (filtre à sable ou membrane) lorsque l'eau brute possède une turbidité supérieure à 30 NTU. L'objectif en sortie du bassin de sédimentation est d'obtenir une eau dont la turbidité serait inférieure à 2 NTU . Pour cela les étapes de coagulation et floculation associées à la sédimentation sont nécessaires. La sédimentation se déroule dans les mêmes bassins que la coagulation/floculation, il est donc normal d'avoir le même nombre de bassins pour ces deux étapes [35].

➤ *La filtration sur sable :*

La filtration sur sable est le procédé de prétraitement le plus souvent utilisé dans les usines de dessalement par osmose inverse. L'étape de coagulation/floculation avant la

filtration est nécessaire car elle permet d'augmenter la taille des particules à filtrer par la formation d'agglomérats, ce qui rend la filtration plus efficace [35].

➤ *Prévention de l'entartrage :*

L'entartrage des équipements doit être évité. La méthode la plus utilisée pour éviter les tartres (CaCO_3 , CaCO_4 ,...) dans les modules d'osmose inverse consiste à injecter dans l'eau brute des inhibiteurs d'entartrage ou antitartres. Les produits utilisés sont:

- *Les poly phosphates* : ces produits sont efficaces et bon marché mais ils peuvent éventuellement former des dépôts d'ortho phosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse.

- *Les polymères carboxyliques* : efficaces sur la plupart des tartres, ces produits ne posent pas de problèmes pour les rejets. Ils présentent l'inconvénient d'être chers. L'acidification de l'eau brute, en provoquant la décomposition des bicarbonates, est aussi un moyen efficace de prévenir les dépôts de CaCO_3 [33].

➤ *La déchloration :*

Compte tenu de la sensibilité des membranes d'osmose inverse en polyamide (membranes les plus utilisés actuellement), il est indispensable d'assurer une déchloration de l'eau de mer avant son entrée dans les modules. Cette de chloration est effectuée par ajouts de réactif chimique : bisulfite de sodium NaHSO_3 [36].

➤ *Filtration de sécurité sur cartouches :*

L'eau passe à travers des cartouches de microfiltration de 5 micromètres, qui retiennent les particules potentiellement nuisibles pour les membranes. Il faudra respecter scrupuleusement la fréquence de changement des cartouches. Celles-ci ne devront pas être nettoyées ni réutilisées [37].

➤ *Moyens d'élimination des dépôts :*

Même avec un prétraitement bien conçu et des conditions opératoires convenablement choisies, on constate dans la plupart des cas un colmatage progressif des membranes au cours du temps. Le nettoyage chimique est presque toujours nécessaire si l'on veut que l'installation fonctionne suivant ses performances nominales.

➤ *Fréquence de nettoyage:*

La fréquence de nettoyage dépend de la qualité des eaux prétraitées .Elle est en générale comprise entre une fois par mois et une fois par an. Cette opération nécessite l’arrêt de l’installation pendant 1 à 2 jours selon le nombre de réactifs utilisés.

La décision d’effectuer un nettoyage chimique d’un module d’osmose inverse peut être liée :

- Soit à une valeur de la perte de charge que l’on s’impose comme maximum à ne pas dépasser ;
- Soit à une valeur de débit de perméat lorsque la diminution atteint 20 à 25% par rapport au débit nominal ;
- Soit à un programme de nettoyage systématique prédéterminé. Ceci est utilisé lorsque l’on a une installation importante qui comporte un nombre élevé de modules. On peut ainsi avoir une partie des modules en nettoyage tandis que le reste assure la production [33].

➤ Solution de nettoyage

Le choix des solutions de nettoyage dépend d’une part de la nature des dépôts qui sont à l’origine du colmatage et d’autre part de la nature des membranes ; il faut en effet dissoudre les dépôts sans détériorer ces dernières .On comprends dans ces condition que chaque fournisseur de membranes préconise pour chaque cas une solution de nettoyage en fonction de la nature de sa membrane et de la nature du dépôt.

Tableau II.1 : Les produits utilisés pour le nettoyage des membranes [33].

Produits de nettoyage	Types des dépôt
Solutions acides (acide citrique, acide chlorhydrique)	Dépôts carbonatés , Hydroxydes
Solutions basiques (soude caustique)	Dépôts organiques
Solutions de détergents (avec ou sans enzymes)	Dépôts organique , protéines
Solutions oxydantes (chlore)	Dépôts biologiques

➤ *Système de récupération d’énergie :*

Dès que l’OI a été appliquée au dessalement de quantités importantes d’eau de mer, on a tout naturellement pensé à récupérer l’énergie hydraulique du concentrât, qui est de l’ordre de 55% de celle nécessaire à la mise en pression des modules d’OI [34].

La décision d'adopter un système de récupération d'énergie doit être prise en comparant le coût des annuités financières dues à cet investissement supplémentaire et le coût de l'énergie récupérée. Elle dépend de : [33]

- de la taille de l'unité.
- du coût de l'énergie.
- de la pression de fonctionnement.
- du taux de conversion.

Du point de vue technologique deux solutions sont actuellement disponibles : les turbines Pelton et les systèmes dits échangeurs de pression.

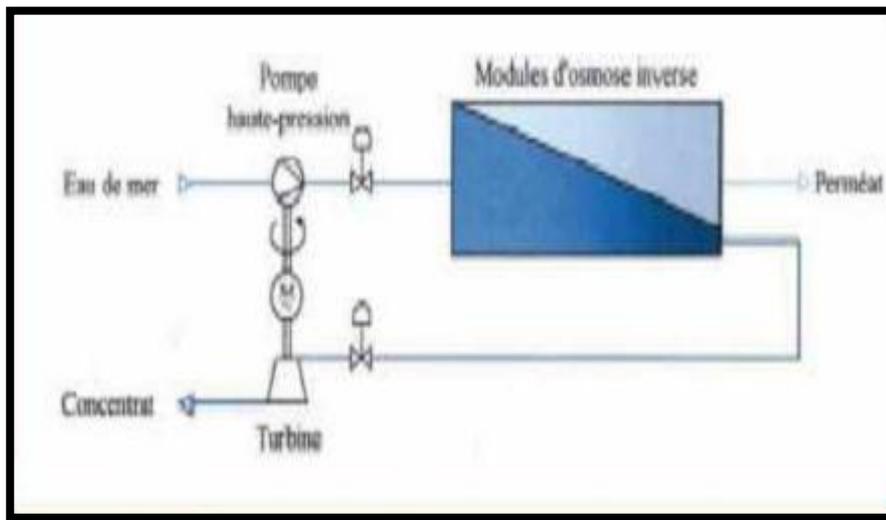


Figure II.12: récupération de l'énergie du concentrat par turbin Pelton

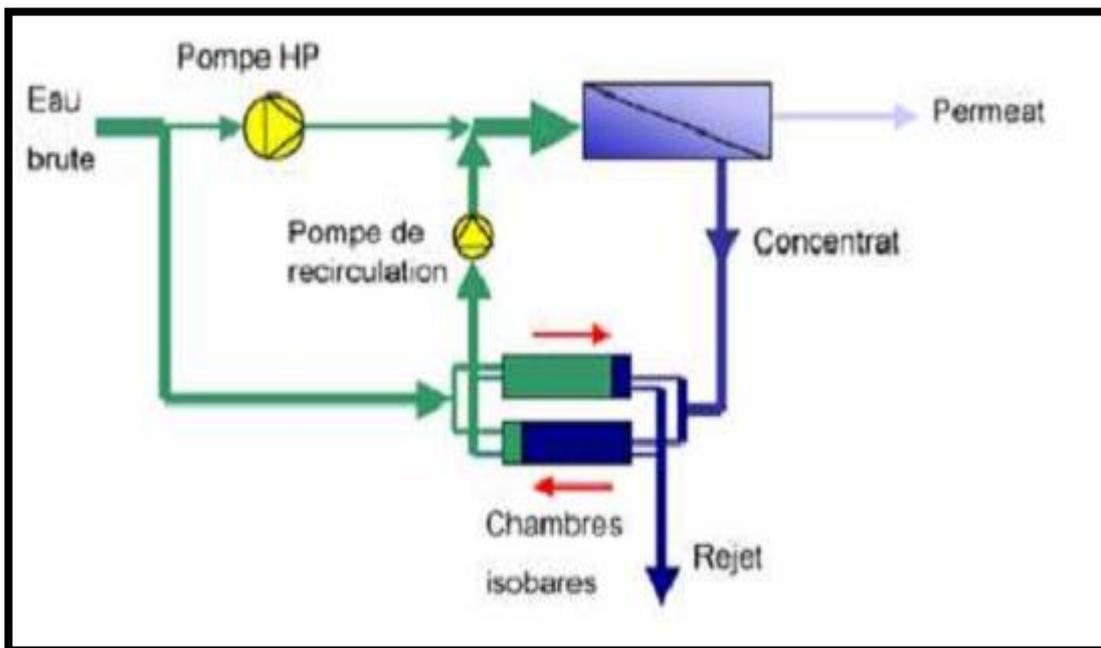


Figure II.13: Récupération de l'énergie par des échangeurs de pression.

Le système de post-traitement concerne la phase d'adaptation de l'eau dessalée à la consommation. Il est nécessaire de dégazer pour éliminer l'acide carbonique (causé par l'acidification en prétraitement) et l'hydrogène (H_2S souvent présent dans les eaux souterraines) qui passe à travers les membranes. Le post-traitement de l'eau dessalée par OI est habituellement nécessaire, il ne dépend pas du dispositif de Dessalement, de l'arrangement ou de la nature chimique des membranes. Le degré et le type de post-traitement souhaité dépendent essentiellement de l'utilisation de cette eau dessalée. Par exemple, l'eau potable destinée à la consommation humaine nécessite une désinfection et un traitement de prévention contre la corrosion des tuyauteries et des différents équipements. Si l'hydrogène sulfurée H_2S est présent : le dégazage est à envisager. Si l'eau dessalée est à utiliser dans les chaudières à HP : on envisage de compléter la déminéralisation pour éviter l'entartrage, et de désoxygéner pour minimiser la corrosion. Si on prévoit de produire de l'eau pure (pour l'industrie haute technologie): le post-traitement doit comprendre une complète déminéralisation, une stérilisation et une élimination des solides en suspension. Le plus souvent, le post-traitement consiste à : compléter la déminéralisation, l'ajustement du pH, traitement de réduction de la corrosivité, la désinfection et le dégazage [34].

➤ *Les avantages et les inconvénients des procédés par osmose inverse :*

a) Les avantages :

- Capacité de séparation élevée.
- Systèmes modulaires ; d'où une grande flexibilité d'utilisation.
- Recyclage du perméat et du concentré possible.
- Température de fonctionnement faible.
- Fonctionnement entièrement automatisé possible.

b) Les inconvénients :

- Risque de colmatage, d'obturation et d'encrassement.
- Compactage en présence d'agents d'adoucissage.
- Pressions élevées requises.
- Flux de perméat faible.

II.2.3. Autres procédés :

Un certain nombre d'autre procédés ont été utilisés pour dessaler les eaux saumâtres ou marines. Ces procédés n'ont pas permis d'obtenir le rendement de la distillation ou de l'osmose inverse, mais ils se sont avérés valables dans certaines circonstances ou appellent encore des perfectionnements.

II.2.3.1. La congélation :

Lors du processus de congélation, les sels dissous sont naturellement éliminés lors de la formation initiale de cristaux. Le refroidissement de l'eau salée pour former des cristaux de glace sous des conditions bien définies est un moyen de dessaler l'eau de mer. Il existe plusieurs procédés de congélation pour dessaler l'eau de mer. et un petit nombre d'usines ont été installées à cet effet au cours des 50 dernières années.

II.2.3.2. Le Dessalement par énergie solaire et éolienne :

Au niveau mondial, environ une centaine d'unités de Dessalement associées aux énergies renouvelables ont été construites ces 20 dernières années. La plupart sont des petites installations expérimentales ou de démonstration (0,5 à 200 m³/j). Plusieurs sont localisées en Méditerranée (Egypte, Algérie, Tunisie, Espagne). Elles fonctionnent avec un stockage d'énergie par batteries, entraînant des coûts élevés et pâtissent du manque de compétence locale en particulier pour la maintenance. Cependant, l'expérience montre que les unités de Dessalement solaire et éolien de petite capacité, bien conçues et exploitées, peuvent permettre d'alimenter en eau de bonne qualité des sites isolés, à des coûts dès aujourd'hui intéressants. Mais si l'on veut éviter des difficultés de fonctionnement dans la durée et assurer une bonne maintenance et durabilité, les installations doivent être les plus simples et les plus fiables possibles [38].

II.3. Les ajouts chimiques dans une station de Dessalement : [39]**II.3.1. Les Coagulants :**

Les usines OI utilisent généralement du chlorure ferrique ou du chlorure d'aluminium pour améliorer le filtrage des matières en suspension présentes dans l'eau d'alimentation. Les additifs de coagulation (substances organiques comme le polyacrylamide) et le contrôle du pH à l'acide sulfurique sont des moyens supplémentaires de renforcer le processus.

II.3.2. Agents antitartres :

Les dépôts de tartre se forment sur les surfaces du matériel de Dessalement. La présence de tartre entraîne inmanquablement des difficultés d'exploitation et/ou de perte de rendement. Les additifs antitartres les plus largement utilisés semblent être des polymères de l'acide maléique, .Ces polymères empêchent les matières dissoutes de précipiter, décanter et former une croûte sur les surfaces.

II.3.3. Agents antisalissure :

Les salissures constituent un processus à phase multiples dans lequel interviennent de nombreux groupes d'organismes. Elles commencent par l'adsorption de substances polymères de l'eau non traitée sur les surfaces solides, ce qui permet la formation d'un film précurseur pour la colonisation par des bactéries. Depuis longtemps, les composés de chlore sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'apport d'eau de mer et l'usine située en amont, afin de prévenir les salissures.

II.3.4. Agents anti mousses :

La mousse produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multi flash est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et la phase vapeur. Les agents anti mousses sont habituellement des poly glycols alkyles, des acides gras et des esters d'acides gras. Les agents sont tension- actifs à l'interface eau- vapeur et empêchent la formation de mousse. La formation de mousse est une fonction des constituants organiques de l'eau de mer qui sont principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques.

II.4. Qualité de l'eau produite :**II.4.1. Par distillation :**

L'eau obtenue par distillation est très peu minéralisée, la teneur en sels dissous est généralement comprise entre 5 et 30 mg/l. Elle n'est donc pas conforme aux normes de potabilité et il est nécessaire de la reminéraliser aux environs de 300 mg/l. Cet apport peut être réalisé en faisant des mélanges d'eaux, eau distillée - eaux saumâtres par exemple ce qui permet d'une part de diminuer les coûts de Dessalement par augmentation de la production et d'autre part de valoriser les eaux saumâtres existantes [40].

II.4.2. Par les procédés à membranes :

- *Electrodialyse*

Par électrodialyse, on produit relativement facilement une eau ayant une teneur en sel de l'ordre de 300 - 400 mg/l. Ce procédé convient donc principalement pour les usages domestiques.

- *Osmose inverse*

La salinité de l'eau produite par osmose inverse dépend principalement de la sélectivité de la membrane. Dans le cas de l'eau de mer, on utilise en général des membranes ayant une sélectivité de l'ordre de 99 % ce qui permet d'obtenir une eau aux environs de 400 mg/l à partir d'une eau de mer à 40 g/l. Dans le cas des eaux saumâtres la sélectivité des membranes utilisées est plutôt d'environ 90 %. On obtient ainsi une eau de salinité comprise entre 100 et 500 mg/l lorsque la salinité de l'eau saumâtre varie entre 1 et 5 g/l, toutefois elles sont souvent agressives et doivent être remises à l'équilibre (neutralisation) [24].

II.5. Les coûts du Dessalement :

Les coûts du Dessalement exprimés en USD/m³ d'eau douce produite dépendent de la technologie, de la taille de l'installation et de la teneur en sel de l'eau traitée. Les technologies membranaires peuvent produire de l'eau de bonne qualité à partir d'eau saumâtre avec un coût de 0,50 USD/m³. Les coûts, toutefois, sont plus élevés pour traiter l'eau de mer, le mètre cube produit à un coût estimé entre 0,5 et 1,1 USD pour l'osmose inverse et entre 0,65 et 1,8 USD pour la distillation. Les technologies thermiques tendent à être plus onéreuses que les technologies membranaires. Actuellement, les coûts des deux technologies affichent une tendance à la baisse. Elles peuvent bénéficier toutes les deux des économies d'échelle mais les coûts des technologies membranaires diminuent aussi en raison de leur développement incessant qui conduit à des gains d'efficacité [38].

II.6. Conclusion :

Toutes les techniques de Dessalement sont très intéressantes au vu de leurs performances et de leur rentabilité. Le Dessalement est une technologie d'avenir mais il faut l'utiliser en dernier recours et quand aucune autre solution n'est possible vu ces effets néfastes qu'elle peut avoir sur l'environnement, c'est ce qui va être développé en chapitre [40].

III.1. Introduction :

Le dessalement de l'eau de mer est parfois présenté comme la solution miracle aux problèmes de rareté de l'eau potable. Outre le fait qu'elle demeure financièrement inaccessible aux pays pauvres (en revenus ou en pétrole), ces technologies demeurent de grosses consommatrices d'énergie et la question de leur impact environnemental est loin d'être résolue. Trop souvent, la mise en place d'installations de dessalement est un moyen de contourner des problèmes criants de gâchis ou de mauvaise gouvernance de l'eau et d'esquiver les réformes nécessaires.

Aujourd'hui, les ressources en eau oscillent entre les extrêmes. D'un côté, cyclones, inondations et autres événements climatiques l'apportent en surabondance. De l'autre côté, les sécheresses et la désertification entraînent des pénuries paralysantes et des conditions de vie misérables pour les populations. Cette opposition entre la pénurie et l'abondance couvre toute la planète, depuis les pays développés jusqu'aux pays en développement [41].

III.2. Conséquences environnementales et problèmes techniques liées au dessalement de l'eau de mer :

Les techniques de dessalement les plus courantes sont la distillation thermique et la technologie des membranes, l'électrodialyse inverse et l'osmose inverse. La distillation thermique permet de transformer l'eau salée en vapeur qui est alors condensée pour obtenir de l'eau dessalée. Avec le procédé d'électrodialyse inverse, les sels sont séparés de l'eau sous l'action d'une charge électrique. L'osmose inverse prévoit quant à elle l'application d'une pression sur l'eau de mer introduite dans le système. Elle est ainsi forcée à travers une membrane semi-perméable qui retient la plupart des sels.

Quelle que soit la technologie utilisée, le dessalement n'est pas exempt d'impact sur l'environnement représenté par: l'émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie des processus industriels, l'impact visuel des usines, le bruit mais surtout l'évacuation de la saumure ou des eaux résiduelles produites par le dessalement, car installées le plus souvent sur les côtes, les usines rejettent ces résidus dans l'océan [42].

III.2.1 contraintes environnementales :

Parmi les conséquences négatives sur l'environnement engendrées par l'installation d'une usine de dessalement, il y a celles qui se limitent à la phase de construction et d'autres qui sont liés à la phase d'exploitation. Les impacts commencent avec la transformation de

l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour s'étendre à des émissions dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur.

Les activités de construction et d'exploitation peuvent se traduire par une série d'impacts sur les zones littorales ,affectant notamment la qualité de l'air ,la qualité de l'eau, la flore et la faune marines, la perturbation d'écosystèmes importants (dunes de sable, herbiers marins et autres habitats vulnérables par suite de l'emplacement choisi pour le trajet des canalisations), le dragage et l'élimination des déblais qui en résultent, le bruit, les entraves l'accès du public et aux loisirs.

Les différents procédés mis au point pour le dessalement de l'eau de mer entre autre l'osmose inverse, la distillation, l'électrodialyse, la congélation sous vide etc...., ont tous pour finalité technique l'élimination de l'eau de mer, la presque totalité des substances minérales qui y sont dissoutes et non pas uniquement les sels. Il en résulte donc, dans tous les cas, un effluent (concentré) qui a une composition chimique similaire à l'eau de mer d'alimentation mais dont la concentration est de 1,2 à 3 fois plus élevée, avec en plus les produits chimiques utilisés au cours des phases de prétraitement et de post-traitement.

Toute une série de produits chimiques et d'additifs servent en effet, lors du dessalement, à prévenir ou combattre l'entartrage ou la prolifération de microorganismes dans les circuits, faute de quoi la bonne marche de l'exploitation serait entravée.

Les constituants présents dans ces eaux résiduaires rejetées par les usines de dessalement dépendent dans une large mesure de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et de la technique de dessalement adoptée. Cependant, les rejets des usines de dessalement ne comprennent pas seulement l'effluent des au mure concentrée, les désinfectants et les agents anti salissures (anti Fuling) mais également des eaux chaudes et des effluents aqueux tels que les distillats et condensats d'éjecteur.

L'autre trait marquant des procédés de dessalement est qu'ils nécessitent un apport d'énergie thermique ou mécanique à fin de réaliser la séparation de l'eau douce et de l'eau salée d'alimentation. Cet apport d'énergie se traduit par une hausse de la température de la saumure éliminée et par des rejets thermiques et des émissions atmosphériques (GES) associées à la production d'électricité [42].

3.2.1.1 Origine et type des émissions et rejets :

Émissions atmosphériques :

➤ La part de l'énergie nécessaire pour l'alimentation des usines de dessalement :

En général, les émissions atmosphériques des usines de dessalement consistent seulement en azote et oxygène provenant d'usines de distillation qui utilisent des procédés de désaération pour réduire la corrosion, en rejets des éjecteurs (usines MSF) ou des dégazeurs (usines osmose inverse).

En outre, la production d'énergie destinée à être utilisée dans les usines de dessalement accroît les émissions atmosphériques. Des augmentations substantielles des émissions atmosphériques peuvent également se produire si une centrale thermique ou une installation de production couplée est construite dans le cadre d'un projet de dessalement [43].

La comparaison des besoins respectifs en énergie des procédés de dessalement montre que l'osmose inverse a une consommation d'équivalente énergie plus réduite que la distillation MSF.

Comme les émissions atmosphériques dues à un procédé de dessalements ont directement en rapport avec ses besoins respectifs en énergie, il va de soi que les émissions dues à l'osmose inverse sont moindres que celles dues à la Multi-Stage Flash distillation (MSF).

Les usines de dessalement sont essentiellement alimentées par des énergies fossiles. Or, les combustibles fossiles et partants, le dessalement présente pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques, notamment du di oxyde de carbone (CO₂), des oxydes de soufre et d'azote et des particules solides. Les émissions autres que celles de CO₂ dépendent du type de centrale électrique alimentant les usines et sont donc difficiles à quantifier globalement, mais celles de CO₂, déterminées par la teneur en carbone du combustible, peuvent en revanche être estimées avec une certaine précision. Le système de production rejetterait ainsi 680 grammes de CO₂ par mètre cube d'eau dessalée. Une capacité de 2,7 millions de mètres cubes par jour se traduirait donc par l'émission dans l'atmosphère de 5476 tonnes de CO₂ par jour, ce qui accroîtrait de 0,6% les émissions de CO₂. Cette contribution à l'effet de serre est loin d'être négligeable dans le contexte actuel de lutte contre le réchauffement climatique [44].

➤ *Rejets chimiques :*

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, anti tartre, anti salissure et anti mousse, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée. La présence de certains

métaux, qui sont des produits de la corrosion du circuit, influent aussi sur la composition de la saumure concentrée.

Ces produits chimiques ne sont pas les mêmes pour les principaux procédés de dessalement, à savoir MSF et l'osmose inverse. Les phases de pré- et de post-traitement des procédés de production d'eau potable sont exposées sur le tableau (III.1).

Les produits chimiques rejetés dans le milieu marin se répartissent entre les catégories suivantes:

a) Produits de la corrosion :

Les usines de dessalement à procédé thermique rejettent du cuivre, du nickel, du fer, du chrome, du zinc et d'autres métaux lourds en fonction des alliages présents dans la filière de production, comme par ex. le titane [45]. En termes de concentrations, celles du cuivre et du fer sont les plus élevées.

Pour la Méditerranée, les niveaux de cuivre dans l'eau de mer couvrent une large gamme de valeurs: l'intervalle des concentrations dans les eaux du large est de 0,04-0,70ppb, alors que pour les eaux côtières l'intervalle est de 0,01-50ppb. Si l'on admet une valeur de 20ppb de cuivre dans l'effluent des au mur d'une usine de dessalement ayant une capacité de 50000 m³ par jour et un taux de conversion de l'eau de 10%, alors plus de 10kg de cuivre seront rejetés sur le site avec les 500 000 m³ de saumure par jour.

Cet aspect est très préoccupant puisque, en Méditerranée, le nombre des usines MF de dessalement d'une capacité de production de 40 000 et 50 000 m³/jour s'accroît rapidement. Les produits de la corrosion ne sont pas si importants dans le procédé d'osmose inverse puisque celui-ci se déroule à des températures ambiantes et que les parties métalliques du système sont sur tout en acier inoxydable [44].

Tableau III.1: Résumé des phases de pré et post traitement au cours de la production d'eau potable par dessalement [46].

Phase de pré et post traitement	Objet	Produits chimiques ajoutés	Devenir des produits
Ajustement du pH à 7	Diminue la concentration de carbonate (et la précipitation de carbonate). Protège la membrane contre l'hydrolyse	Acide (H ₂ SO ₄)	Modifie le pH de l'eau produite et de la saumure concentrée, le sulfate est retenu dans la saumure concentrée
Antitartre	Prévient la formation de tartre sur les membranes	Agents chélateurs et dispersants	Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée
Coagulation-filtration	Prévient les salissures et l'encrassement des membranes	Coagulants-floculants	Les agents floculants formés se séparent par décantation et sont éliminés par filtration
Désinfection	Prévient l'encrassement biologique et l'élimine les microorganismes qui se nourrissent des matières des Membranes	Chlore (ou biocides, UV)	Chlore également réparti dans le perméat et la saumure concentrée
Déchloration	Protège les membranes sensibles au chlore	Bisulfate de sodium ou charbon actif granulaire (CAG)	Réagit avec le chlore pour former du sulfate et du chlorure qui sont retenus dans la saumure concentrée
Élimination des gaz dissous	Élimine les gaz nauséabonds, C, le radon et HS	Aération, Dégazage	Oxyde HS et nH 4 dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Ajustement du pH à 7	Prévient la corrosion du système de distribution, protège la flore et la faune aquatiques en cas de rejet en surface	NaoH, carbonate de sodium anhydre, chaux	Accroît le niveau de sodium dans l'eau produite et dans la saumure concentrée

Désinfection	Prévient la prolifération bactérienne dans le système de distribution, protège la flore et la faune aquatique si nécessaire	Chlore (ou Chlorométrie)	Le chlore est retenu dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Réduction du niveau de chlore	Élimine le chlore et d'autres oxydants	Bisulfite de sodium ou CAGE	Accroît les niveaux de sulfates et de chlorures dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Oxygénation	Accroît l'oxygène dissous à un niveau concourant au développement de la flore et de la faune aquatique	Aération	Accroît l'oxygène dissous dans la saumure concentrée
Élimination d'autres formes chimiques	Diminue tous les polluants susceptibles d'être présents dans l'eau produite et dans la saumure concentrée	Est fonction des formes chimiques	

b) Agents antitartre :

Les dépôts de tartre se forment sur les surfaces du matériel de dessalement industriel. La présence de tartre entraîne inmanquablement des difficultés d'exploitation et/ou une perte de rendement. Dans le procédé par distillation, le tartre réduit le taux de transfert de la chaleur à travers les parois atteintes et réduit le débit de liquide dans les tuyaux.

Différentes méthodes sont appliquées pour prévenir l'entartrage dans les procédés par distillation. Les polyphosphates, qui retardent les dépôts de tartre, sont un agent antitartre précoce, peu onéreux, mais d'une efficacité restreinte et qui a pour inconvénient d'être thermolabile: il est hydrolysé en orthophosphate à des températures supérieures à 90°C. Ces dernières années, l'utilisation de ce produit chimique a été notablement réduite.

Les additifs antitartres les plus largement utilisés semblent être des polymères de l'acide maléique. Ces polymères empêchent les matières dissoutes de précipiter, décanter et former une croûte sur les surfaces et ils entravent la formation de cristaux en altérant la structure réticulaire, permettant ainsi la formation d'une boue molle qui n'adhère pas ou ne se développe pas sur les surfaces métalliques [47].

Bien que le taux d'application de cet acide soit de 1 à 3 ppm, la concentration habituelle dans le rejet est de 0,53 ppm. Dans les usines utilisant le procédé d'osmose inverse, l'acide

sulfurique est utilisé avec des adjuvants polymères pour prévenir la formation de tartre [44].

c) Agents anti salissures :

Les salissures («fouling») constituent un processus à phases multiples dans lequel interviennent de nombreux groupes d'organismes. Elles commencent par l'adsorption de substances polymères de l'eau non traitée sur les surfaces solides, ce qui permet la formation d'un film précurseur pour la colonisation par des bactéries. À ce premier bio film adhèrent des périphytes, puis des micros algues, des protozoaires et des champignons, et enfin des débris, détritiques et particules inorganiques.

Depuis longtemps, les composés de chlores sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'apport d'eau de mer et l'usine située en amont, afin de prévenir les salissures. Habituellement, on ajoute du chlore à raison de 2 ppm. Un procédé bien conduit vise à obtenir une concentration de chlore nulle à l'émissaire [48].

D'autres biocides comme les sels de cuivre ont été essayés avec un succès variable et en de nombreux sites, le rejet de cuivre dans la saumure est très inférieur à 1 m. Cependant, ce niveau est encore peu satisfaisant en raison du dommage qui peut en résulter pour l'environnement par suite de l'accumulation du métal [44].

d) Agents anti mousse :

La mousse produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multi flash est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui ne permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et phase vapeur.

Les agents anti mousses ont habituellement des poly glycols alkyles, des acides gras et des esters d'acides gras. Les agents sont tensio-actifs à l'interface eau-vapeur et empêchent la formation de mousse. On ajoute habituellement ces produits à raison de 0,1ppm, mais on observe fréquemment un surdosage. La formation de mousse est une fonction des constituants organiques de l'eau de mer qui sont principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques. Dans le cas de l'osmose inverse, il est nécessaire d'ajouter des agents anti mousse [48].

➤ *La saumure concentrée :*

Les usines de dessalement rejettent en fait la même charge de constituants de l'eau de mer que celle qu'elles ont reçue, mais dans un volume d'eau moindre. Avec le procédé MSF,

un taux de récupération habituel sur la base de l'eau d'alimentation est de 10% et la salinité de la saumure concentrée est donc 1,1 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation. Le concentré est généralement dilué par deux avec l'eau de refroidissement avant d'être rejeté, et par conséquent le facteur de concentration est de 1,05, ce qui réduit les impacts sur l'environnement.

Avec le procédé osmose inverse, le facteur de conversion varie de 30 à 70%. Dans ce cas, la salinité du concentré est de 1,3 à 1,7 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation.[48] Si l'on admet une salinité type de 39‰ pour la Méditerranée orientale, cela signifie que la saumure issue des usines utilisant le procédé d'osmose inverse varie en moyenne d'environ 51 à 66 ‰. Les études qui ont été menées sur le rendement et les données environnementales d'une usine utilisant le procédé d'osmose inverse démontrent que la concentration de la saumure est significativement plus élevée par comparaison avec une usine MSF.

La composition chimique de la saumure rejetée par rapport à celle de l'eau de mer d'alimentation dans le cas des unités de dessalement utilisant le procédé d'osmose inverse est reproduite sur le tableau III.2. La salinité totale de la saumure est de 63,8, contre 38,95 pour l'eau d'alimentation, soit un rapport saumure /eau alimentation de 1,64. Des progrès récents intervenus dans le procédé d'osmose inverse avec des taux de récupération beaucoup plus élevés se traduisent par des concentrés présentant une salinité très supérieure (dépassant 70 ‰) [44].

Tableau III.2: La composition chimique de la saumure rejetée par rapport à celle de l'eau de mer d'alimentation dans le cas des unités de dessalement utilisant le procédé d'osmose inverse [46].

Analyse	Eau d'alimentation mg/l	Saumure mg/l	Rapport (saumure/eau d'alimentation)
Ca ⁺⁺	962	1.583	1.64
Mg ⁺⁺	1.021	1.09	1.87
Na ⁺	11.781	19.346	1.64
K ⁺	514	830	1.61
NH ₄ ⁺	0.004	0.005	1.25
Hco ₃ ⁻	195	256	1.31

CO ₃ ⁻	Nil	Nil	
SO ₄	3.162	5.548	1.75
Cl ⁻	21.312	43.362	2.03
F ⁻	1.5	1.9	1.26
NO ₃ ⁻	2.6	4	1.54
PO ₄ ⁻	0.08	0.4	5
NO ₂ ⁻	0.03	0.05	1.67
Dureté totale en CaCo₃	6.600	11.800	1.78
Salinité totale	38.951	63.840	1.64
Fe ⁺⁺⁺	0.04	0.05	1.25
Al ⁺⁺⁺	0.001	0.007	7
PH	6.33	6.26	NA
Conductivité	46,200 Is	75,300 Is	NA

➤ *Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI :*

/Dans les usines utilisant le procédé d'osmose inverse, le nettoyage et le stockage des membranes peuvent en genre des eaux potentiellement dangereuses .Les membranes doivent être nettoyées à des intervalles de trois à six mois en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation et du fonctionnement de l'usine. Les formulations utilisées pour le nettoyage des membranes sont habituellement des solutions alcalines ou acides aqueuses. De plus, une solution chimique de préservation (généralement à base de bisulfite de sodium) doit être utilisées illes membranes sont stockées pendant la fermeture de l'usine. Ces produits chimiques sont normalement épurés avant leur rejet dans la mer [49].

III.2.2 Impacts sur l'environnement :

Les divers types de polluants résultant des différents procédés appliqués dans les usines de dessalement (distillation et osmose inverse) ont déjà été identifiés et décrits.

Une grille présentant les impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement est reproduite sur le tableau III.3. Selon ce tableau, les impacts les plus prononcés sont dus aux produits chimiques qui favorisent les phénomènes d'eutrophisation

dans les eaux réceptrices ainsi qu'aux désinfectants [44].

Tableau III.3: Les impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement [46].

Impact	Degré d'impact	Origine de l'impact	Techniques d'atténuation
Pollution thermique Réduction de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices, Effets nocifs pour les espèces thermorésistantes	M M	-Saumure chaude	Mélange de la saumure avec de l'eau froide avant le rejet. Bassins de retenue
Salinité accrue Effets nocifs pour les espèces résistantes aux sels	M	-Saumure concentrée	Dilution de la saumure avant rejet Récupération de sels Bon choix de l'emplacement pour l'émissaire afin de permettre le maximum de brassage et de dispersion.
Désinfectants	E	Chlore et ses composés Réaction du chlore avec des composés organiques, hydrocarbures principalement.	Utilisation d'autres désinfectants. Mesures de protection contre les polluants au prélèvement de l'usine.
Métaux lourds -toxicité	M	Corrosion du matériel de l'usine.	Conception et choix judicieux du matériel de l'usine en recourant à des matériaux résistants à la corrosion
Produits chimiques : -eutrophisation des eaux réceptrices -toxicité	E F	Adjonction d'agents Anticorrosion et antitartre	Réduction au minimum de l'utilisation de produits chimiques. Utilisation d'additifs sans danger pour l'environnement.
Pollution atmosphérique Plus d'acides Effet de serre poussières	F M M	Utilisation de combustibles et d'activités d'élimination.	Utilisation d'énergies propres et renouvelables autant que possible. Application de systèmes mixtes et de production couplée.
Sédiments Turbidité et limitation de la photosynthèse Difficultés de respiration	M	Perturbation des sables par des activités	Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage.
Chez les animaux aquatiques	M	D'excavation et de dragage	Bonne maîtrise du ruissellement dans la zone du site

Bruit	F	Activités de construction Pompes et autres appareils au cours de l'exploitation de l'usine.	Limitation des activités de construction aux seuls horaires de travail Choix du matériel le moins bruyant.
--------------	---	--	--

E:impact de degré élevé, M:impact de degré moyen, F:impact de degré faible.

La réduction de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices par suite du rejet de saumure chaude et les effets nocifs pour les espèces résistantes aux sels sont caractérisés comme étant des impacts de degré moyen. La turbidité accrue et la limitation de la photo synthèse par suite de la perturbation des sables due aux activités d'excavation et de dragage sont caractérisées également comme des impacts de degré moyen.

La toxicité due aux produits chimiques est caractérisée comme étant un impact de degré faible.

De fait, les principaux procédés de dessalement distillation, osmose inverse et électrodialyse, diffèrent quant à leur impact sur l'environnement en raison des différences dans les technologies appliquées.

De nombreux chercheurs ont évalué les considérations «sécurité-santé environnement» pour les procédés OI, MSF and ED en recourant à des techniques d'étude d'impact. Il en ressort de leurs résultats qu'OI et ED ont un impact moindre sur l'environnement [44].

En vue d'évaluer les considérations « sécurité-santé environnement», pour les procédés du Dessalement de l'eau de mer à savoir: osmose inverse, distillation et électrodialyse. Des études ont été menées en recourant à des techniques d'impact, il en ressort des résultats que les procédés d'osmose inverse et électrodialyse ont un impact moindre sur l'environnement.

III.2.2.1 Effets dus aux produits de la corrosion :

Comme on l'a déjà relevé, les usines de dessalement par distillation rejettent des métaux tels que le cuivre, le nickel, le fer, le chrome et le zinc dans le milieu marin.

Ces métaux ne se trouvent pas à l'état d'ions libres mais forment des complexes inorganiques et organiques qui sont adsorbés sur les matières en suspension et déposent en s'accumulant dans les sédiments. Comme, dans ce cas, le problème ne réside pas dans la concentration effective du métal mais dans sa charge totale atteignant l'environnement, on ne peut atténuer les effets en diluant le rejet.

Une étude d'impact sur l'environnement, menée à une usine de dessalement MSF, a montré que les concentrations de cuivre, qui étaient souvent 5 à 10 plus élevées que les concentrations ambiantes, s'avéraient toxiques pour les organismes marins [49].

Il convient de bien préciser qu'il est encore difficile d'établir une corrélation entre des concentrations de métaux lourds dans l'eau de mer et les sédiments, d'une part, et les conséquences écologiques de l'autre. Cependant, dans l'ensemble, des concentrations de Métaux lourds dépassant significativement les concentrations naturelles de base sont considérées comme une pollution de l'environnement, même si des effets biologiques n'ont pas été démontrés. Il n'est pas encore possible de fixer une limite en deçà de laquelle la pollution serait inoffensive et au-delà de laquelle elle serait nocive [50].

➤ *Effets dus aux additifs antitartres :*

Une action précoce contre l'entartrage est obtenue avec l'adjonction de phosphates polymères. L'ortho phosphate, produit de l'hydrolyse des poly phosphates, est un macroélément nutritif qui stimule la productivité primaire. Dans une zone marine oligotrophe comme la mer Méditerranée, le rejet d'un macroélément nutritif peut avoir des effets drastiques tels que des efflorescences algales, des proliférations d'algues macroscopiques, etc. Ces dernières années, les agents antitartre les plus largement utilisés ont été les polymères de l'acide maléique. L'utilisation de ces produits permet d'empêcher l'apparition d'effets eutrophisants.

Il convient de prendre en compte le recours à l'acide sulfurique pour faciliter l'action des agents antitartre sur les membranes d'usines utilisant le procédé d'osmose inverse [51].

➤ *Effets dus aux additifs antisalissure :*

La chloration est un bon auxiliaire mais un mauvais maître en ce sens qu'elle est très économique et efficace mais qu'elle n'est pas correctement maîtrisée; elle donne naissance à des dérivés tels que des thiolométhanes qui sont soumis à réglementation en raison de leurs effets cancérigènes.

Si le chlore est un agent antisalissure à large spectre, il présente aussi des effets étendus sur le milieu marin quand il est rejeté avec la saumure. Il occasionne des effets biologiques par son action stérilisante intrinsèque et des effets chimiques en halogénant les constituants organiques de l'eau de mer.

D'autres agents antisalissures comme les sels de cuivre entraînent des rejets de cuivre dans la

saumure, et ce métal, même à de très faibles concentrations (moins de 1 ppm), peut avoir des incidences sur l'environnement par suite de son accumulation [50].

➤ *Effets des additifs antimousse :*

Les agents anti mousse sont des détergents. Les détergents ont des effets nocifs sur les organismes en altérant le système membranaire intracellulaire. Les effets sur l'écosystème marin n'ont pas été étudiés mais pourraient être négligeables [44].

➤ *Effets du concentré (saumure) :*

Il est indubitable que c'est la saumure qui exerce le plus fort impact sur le milieu marin. Le volume total de saumure libéré dans ce milieu est déterminant pour les dommages qu'il peut induire. Un rejet de saumure concentrée en grandes quantités appelle un examen plus soigneux des impacts potentiels sur l'environnement que s'il s'agit d'un rejet en petites quantités.

À part le volume proprement dit, les modalités et l'emplacement du rejet sont essentiels pour les impacts qui peuvent en résulter. La longueur de l'émissaire, sa distance au rivage, son niveau au-dessus du fond de la mer, l'existence ou non d'un diffuseur, ainsi que la profondeur de l'eau et les caractéristiques hydrologiques (courants, vagues) peuvent conditionner la dispersion de la saumure et l'efficacité de la dilution au point de rejet et, par voie de conséquence, l'impact potentiel sur l'environnement.

La zone d'impact présentant une forte salinité varie selon la saison, l'impact le plus marqué se produisant durant les mois d'été.

Le rejet du concentré dans la mer aboutit à la formation d'un système stratifié avec un courant de concentré à la couche du fond puisqu'il contient des concentrations en sel supérieures à celles de l'eau de mer ambiante. Le courant de fond à plus forte salinité peut affecter sérieusement le milieu marin et en particulier les biotes benthiques [52].

La salinité accrue affecte les organismes marins par le processus d'osmose qui consiste en la diffusion d'eau pure à travers une membrane qui est perméable à l'eau mais non aux ions qui y sont dissous. Par conséquent, le contenu en sels diffère de part et d'autre de la membrane, l'eau pure diffusera à travers la membrane à partir du compartiment ayant une faible concentration d'ions dissous vers le compartiment ayant une concentration supérieure d'ions dissous. Quand des organismes marins sont exposés à une variation de la salinité (contenu en sels plus élevé dans le milieu externe que dans les fluides de l'organisme) ils sont soumis à

un choc osmotique qui est préjudiciable pour la plupart d'entre eux en fonction de leur tolérance à la salinité [53].

Dans cette optique une étude sur trois années de l'impact du concentré sur le macro benthos marin révéla que les salinités élevées causaient des dommages importants aux communautés de l'algue macroscopique *Cystoseira barbata* à proximité de l'émissaire du concentré, alors que d'autres espèces d'algues microscopiques disparaissaient de la zone environnante (à une distance de 100m du point de rejet). En outre, il en est résulté une diminution importante de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique au site de rejet du concentré, par comparaison avec celles relevées avant la mise en service de l'usine de dessalement. Surtout, les modifications de la salinité de l'eau ont induit des changements dans la composition des formations macro faunistiques à proximité du point de rejet. Alors que la communauté benthique avant la mise en place de l'émissaire se composait pour 27% de polychètes, pour 27% d'échinodermes, pour 26% de scaphopodes et pour 20% de gastropodes, au bout de trois années d'exploitation de l'usine, les seuls taxons observés étaient les polychètes et les crustacés représentant respectivement 80 et 20% de l'ensemble de la macrofaune.

Des impacts ont également été signalés, où l'effluent a affecté la croissance des algues à proximité de l'émissaire de saumure [44].

➤ *Effets dus à la chaleur :*

Normalement, les usines de distillation rejettent la saumure à une température qui est environ supérieure de 10 à 15°C à celle de l'eau de mer. On obtient 1°C de plus que la température ambiante dès que le concentré est dilué de dix fois son volume par l'eau de la zone marine réceptrice. Ce 1°C de plus que la température ambiante n'a pas d'importance écologique et n'est pas significativement démontrable.

Ce cas se présente lorsqu'il existe un brassage et un échange suffisants avec l'eau de mer du concentré [51].

➤ *Effets dus au prélèvement d'eau de mer :*

Les usines de dessalement de l'eau de mer ont des dispositifs d'admission situés au large qui leur permettent de prélever de grosses quantités d'eau à proximité de certains habitats marins. Ce processus comporte des impacts potentiels pour la flore et la faune de la zone concernée. Par exemple, des tambours tamiseurs sont souvent disposés entre le dispositif d'apport et les pompes d'alimentation afin d'empêcher des débris flottants, des organismes marins volumineux et autres matières de pénétrer dans le circuit de prétraitement de l'usine

de dessalement.

En général, le maillage de ces tambours tamiseurs est de l'ordre de 5mm, afin d'empêcher l'apport de la plupart des poissons et autres organismes marins. Cependant, le prélèvement représente deux sources potentielles d'impact, à savoir le heurt du poisson sur les tambours et l'introduction de biotes dans le circuit d'eau d'alimentation.

Il est notoire que le prélèvement et le tamisage de volumes relativement importants d'eau de refroidissement provoque le heurt du poisson et d'autres organismes sur les tambours tamiseurs, avec pour conséquences des dommages physiques comme l'écaillage et des troubles tels qu'une désorientation. Ce phénomène entraîne une augmentation de la mortalité par maladie et une vulnérabilité accrue à la prédation.

Ensuite, bien que les mailles empêchent l'apport de poissons et invertébrés de grande taille, on sait que l'introduction dans le circuit représente une menace importante pour le phytoplancton et le zooplancton. Les principaux impacts associés au passage dans les circuits de prétraitement et de dessalement, qui dépendent en grande partie de la technique adoptée pour les procédés osmose inverse et MSF, sont liés à des activités telles que la chloration, les lésions de cisaillement et le changement rapide de pression dans le circuit. La conséquence générale de l'entraînement d'organismes dans le circuit est une réduction du recrutement pour les habitats existants et une chute de la productivité globale de l'écosystème [51].

III.2.3 Les problèmes techniques rencontrés en dessalement :

Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est une solution qui a prouvé son intérêt pour subvenir au besoin en eau potable dans certaines régions. Ses performances et son coût énergétique la rendent aujourd'hui compétitive face aux procédés «historiques» de dessalement thermique.

Cependant, ce procédé possède encore des limitations. La principale limitation est due à la pression de travail qui doit être appliquée pour vaincre la pression osmotique. Cette pression osmotique est d'autant plus importante que la concentration en sels augmente ce qui limite les taux de conversion pouvant être obtenus avec l'osmose inverse. Cela entraîne deux problèmes majeurs: un problème économique en limitant la production d'eau et un problème environnemental en empêchant de minimiser les volumes de concentrats. Ces concentrats sont actuellement majoritairement rejetés sans traitement dans l'eau de mer dont il modifie fortement l'équilibre et la biodiversité.

Parmi les autres limitations de l'osmose inverse, il faut noter le phénomène de polarisation

de concentration qui contribue à réduire les flux produits et les phénomènes de corrosion, en tartrage et colmatage, qui rendent le procédé très sensible à la qualité des prétraitements [44].

III.2.3.1 La corrosion :

La corrosion des matériaux par l'eau de mer (ou des solutions salines concentrées) est un phénomène important qui conditionne la durée de vie des installations, donc leur coût. Elle dépend d'un certain nombre de facteurs, comme:

- la teneur élevée en chlorures la teneur en oxygène dissous la présence de H₂S.
- la présence de particules solides, de bactéries, d'organismes marins (algues) de la conductivité.

Cette dernière, très élevée en eau de mer, peut conduire à des effets galvaniques si les matériaux ne sont pas judicieusement choisis. L'utilisation dans le circuit haute pression d'osmose inverse d'acier sa austénitiques ou ferritiques voire de titane (coût élevé) est recommandé malgré des surcoûts importants. Il en est de même pour les évaporateurs dans les quels circulent de l'eau de mer à haute température.

La production d'eaux trop agressives par distillation ou par osmose inverse implique une remise à l'équilibre de ces eaux avant injection dans les réseaux d'eau potable et par fois une minéralisation lors que la teneur en sels dissous est insuffisante. Dans le premier cas une simple neutralisation peut être suffisante par exemple à la chaux ou la soude, mais dans le second l'ajout de chaux doit être combiné à celui de gaz carbonique [44].

III.2.3.2 L'entartrage (scaling) :

L'entartrage correspond à la formation d'un dépôt de sels minéraux. C'est un phénomène qui se produit sur les surfaces d'échanges aussi bien thermiques que membranaires qui sont des zones de concentration ionique élevée. L'entartrage est lié à la formation de solides amorphes ou cristallisés qui est fonction de la température (diminution de la solubilité quand la température augmente) et de la composition de l'eau.

La formation de tartre doit être évitée pour maintenir un fonctionnement correct des installations. Une première solution consiste à jouer sur le procédé même : apport d'énergie calorifique supplémentaire dans le cas des procédés de distillation, application d'une pression supérieure dans celui des procédés membranaires. Une deuxième solution consiste à prétraiter l'eau par :

- L'ajout d'acide qui induit une décarbonatation du milieu par dégazage du gaz carbonique formé à partir des hydrogénocarbonates;
- L'ajout de chaux et de germes de cristallisation qui favorise la précipitation du carbonate de calcium;
- L'emploi d'inhibiteurs d'entartrage : poly phosphate, organophosphoré, polymères poly carboxyliques.

Le traitement va dépendre de la nature de la ou des espèces susceptibles de provoquer l'entartrage et du procédé de dessalement utilisé.

Quelle que soit la solution adoptée, elle augmente le coût du dessalement [44].

III.2.3.3 Le colmatage (Fouling) :

Les eaux brutes naturelles peuvent également contenir des substances organiques, des microorganismes. En osmose inverse ces organismes qui sont retenus par les membranes peuvent les encrasser et trouver des conditions favorables à leur développement. Elles forment alors un biofilm qui peut conduire au colmatage des membranes. Ce phénomène a des conséquences directes sur la capacité de production des installations et le coût du procès. Comme pour les autres problèmes il est possible de réduire le colmatage par un prétraitement adéquat: dans certains cas une étape de coagulation-floculation suivie d'une filtration sera indispensable [44].

III.3: Cadre Législatif régissant la protection de l'environnement :

Cette section résume la législation environnementale, les normes et les directives pour l'environnement.

III.3.1-Législation, conventions et protocoles internationaux Convention-cadre sur les changements climatiques (FCCC) :

La convention-cadre sur les changements climatiques a été approuvée lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED, Conférence de la Terre) qui a eu lieu au Brésil, en 1992. Elle est entrée en vigueur le 21 Mars 1994. En vertu de la convention, les pays développés sont tenus de prendre des mesures visant à ramener les émissions des gaz à effet de serre (en particulier l'acide carbonique) aux niveaux de 1990 et de prêter assistance aux pays en voie de développement.

Le protocole de Kyoto a été conclu en décembre 1997 au titre de la Convention-cadre sur les

changements climatiques. Il impose des cibles juridiquement contraignantes aux pays industrialisés en vue de réduire les émissions totales des gaz à effet de serre à au moins 5% au-dessous des niveaux 1990 au cours de la période budgétaire de 2008 à 2012 [44].

III.3.1.1 Accord relatif aux substances nocives pour la couche d'ozone :

Le protocole de Montréal, qui a été signé en Septembre 1987 et ratifié ultérieurement, a été rédigé en réponse aux inquiétudes soulevées par la dégradation de la couche d'ozone. Le protocole engageait les nations industrialisées à réduire de 50% la consommation de CFC dès 1999 et à bloquer la production d'Halon dès 1992. Les réexamens du protocole en 1990 et en 1992 l'ont renforcé de sorte qu'il impose désormais aux pays d'éliminer progressivement les chlorofluorocarbures et d'autres alcanes halogénés. Les pays industrialisés sont tenu d'arrêter la production plus rapidement que les pays moins développés [44].

III.3.1.2 Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance :

Cette convention, qui a été adoptée à Genève en 1979, a été conclue sous les auspices de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe et est entrée en vigueur en 1983. Elle traduit le souci exprimé par certains pays de voir le transport longue distance de certains produits polluants (principalement le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote) réduire l'effet néfaste sur l'environnement de leur territoire.

La Convention stipule que les pays feront de leur mieux pour limiter et, dans la mesure du possible, réduire progressivement et empêcher la pollution de l'air, y compris la pollution atmosphérique transfrontière longue distance. La Convention traite également du transport longue distance des composés d'azote et de chlore, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des particules et métaux lourds. Des protocoles associés ont été adoptés, dans le but de réduire les émissions de soufre, d'oxydes d'azote et de composés organiques volatiles (VOC-Volatile Organic Compounds) et des Protocoles sont en cours d'élaboration pour les métaux lourds (cadmium, plomb et mercure) et les produits organiques persistants (pour inclure les pesticides, les dioxines et les furanes) [44].

III.3.1.3 Convention de Barcelone :

La Convention for the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution-Convention pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution (Convention de Barcelone) a été amendée en 1995 pour former la nouvelle Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Région of the Mediterranean-Convention pour la protection de l'environnement marin et de la région côtière de la Méditerranée. La convention amendée

n'est pas encore entrée en vigueur. Un certain nombre de protocoles a été convenu dans le cadre de la convention d'origine ou de son amendement traitant dans le détail les différents aspects de la protection de l'environnement marin, aspects convenus aux termes des Conventions. Comme l'Algérie est signataire de la Convention de Barcelone, chaque nouveau projet devra respecter les sept protocoles de référence suivants, élaborés dans le cadre de la Convention.

- Protocol for the Prévention and Elimination of Pollution of the Mediterranean Sea by Dumping from Ships and Air crafts or Incinération at Sea, 1976- protocole relatif à la prévention de la pollution en mer Méditerranée par opérations d'immersion effectuées par les navires et les aéronefs ou l'incinération en mer-(version amendée adoptée par les parties contractantes en 1995).
- Protocole Concerning Coopération in Combating Pollution of the Mediterranean Sea by Oil and Other Harmful Susstances in Cases of Emergency, 1976- protocole relatif à la coopération dans la lutte contre la pollution de la mer Méditerranée provoquée par le pétrole et autres substances nocives en cas d'urgence.
- Protocol Concerning Specially Protected Areas and Biological Diversity in the Mediterranean, 1995- Protocole relatif aux zones spécialement protégées et la diversité biologique en Méditerranée (annexes adoptées en 1996).
- Protocol on the prévention de Pollution of the Mediterranean Sea by Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposai, 1996 - protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination.
- Protocol the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution Resulting from the Exploration and exploitation of the Continental Shelf and the Seabed and the subsol, 1994 Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution résultant de l'exploration et de l'exploitation du plateau continental, du fond de la mer et du sous-sol.
- Protocol for the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution from Land-Based Sources and Activities, 1980-Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution tellurique.

Protocol on Pollution from Exploration and exploitation of the Continental Shelf and Seabed- Protocole relatif à la pollution provoquée par l'exploration et l'exploitation du

plateau continental et du fond de mer [44].

III.3.2 Législation relative à l'Impact sur l'Environnement en Algérie :

III.3.2.1 Législation Générale d'EIE :

L'EIE a été introduite dans la législation algérienne par la Loi 83-03 en 1983 qui fixait le cadre initial, avec pour objectifs l'évaluation et la sensibilisation de la population aux impacts directs et indirects des projets de développement sur les équilibres écologiques, l'environnement et la qualité de vie [54].

La mise en application réelle de la législation se fait par le biais du Décret 90-78 en 1990, qui nécessite une EIE pour toute activité susceptible d'affecter directement ou indirectement l'environnement, la santé publique, l'agriculture, les zones naturelles, la faune, la flore ou les monuments et sites historiques.

Le Décret 90-78 spécifie également la méthodologie à adopter pour effectuer une EIE acceptable, à savoir:

- Décrire les conditions dans lesquelles il faut tenir compte des questions environnementales dans les procédures réglementaires actuelles pour les projets de développement:

L'étendue de l'évaluation EIE doit comprendre:

- Une analyse de l'état des lieux à l'origine et de son environnement, avec la valeur écologique et les zones agricoles, forestières, maritimes, hydrauliques ou de loisirs affectées par les travaux, développements ou entreprises.
- Une analyse des effets sur l'environnement et en particulier, sur les sites, les paysages, la faune, la flore, les équilibres environnementaux et biologiques, le voisinage du site (bruit, vibrations, odeurs, fumée et lumière) et sur l'hygiène et la santé publiques ;
- Les motifs pour lesquels le projet est acceptable
- Les mesures envisagées par le propriétaire du projet ou par le candidat pour supprimer, réduire et compenser les conséquences néfastes du projet sur l'environnement, ainsi qu'une estimation des coûts correspondants.
- Les conditions dans lesquelles les études sur l'impact sur l'environnement ont été publiées;

- Les dispositions permettant au Ministère de l'Environnement d'agir ou d'être sollicité pour agir en vue d'obtenir une opinion sur l'étude de l'impact.
- A l'appui de cette législation, le Ministère pour l'Environnement et le Développement Régional a publié un document intitulé« Directives pour la Production d'un Rapport d'Evaluation Environnementale», qui a pour intention de:
 - Normaliser la mise en œuvre d'études d'EIE;
 - Fournir des informations aux personnes qui y participent;
 - Expliquer la méthodologie générale.

Les Directives expliquent la base juridique de l'EIE, le processus administratif et les rôles des différents organismes et personnels concernés. Elles donnent également des conseils sur l'identification et l'évaluation des impacts et sur la portée prévue de la Déclaration sur l'Environnement. Même si cette assistance est généralisée, elle est essentiellement compatible avec les pratiques qui ont cours sur le plan international, aussi une Evaluation de l'Impact sur l'Environnement aux normes habituelles des grandes Institutions de Financement International devrait-elle généralement satisfaire aux besoins de l'Algérie [55].

III.3.2.2 Bruit et Vibration :

Les émissions sonores sont régies par le Décret93-184 qui vient renforcer l'Article121 de la Loi 83-03.Ce décret fixe les limites des émissions sonores décrites dans le Tableau III.4 et présentées ci-dessous: [56]

Tableau III.4: Limites des Emissions de Bruit de la Réglementation Algérienne [57].

Zone	0600–2200	2200–0600
Zone1- Zones résidentielles d'accès publics et privés	70 db A	45 db A
Zone2– Proximité des hôpitaux, établissements d'enseignement, et maisons de repos	45 db A	40 db A

Selon l'Article 6 de ce décret toutes les personnes ayant directement ou indirectement des activités nécessitant l'utilisation de moteurs, d'outils, de machines, d'appareils produisant du bruit à des niveaux plus élevés que ceux qui figurent ci-dessus, doivent prévoir des dispositifs d'insonorisation ou mettre en place des méthodes appropriées pour éviter toute nuisance ou tout risque pour la santé. A noter qu'il n'y a aucune directive sur les émissions de bruit dans les zones industrielles.

Marteaux piqueurs, générateurs de courant et compresseurs doivent être équipés de dispositifs d'insonorisation lors qu'ils sont utilisés à moins de 50m. des habitations ou des lieux de travail.

III.3.2.3 Réglementation sur les ressources en eau :

Les dispositions de la Loi 83-03 portent sur le contrôle de la pollution de l'eau et sa régénération, afin de réconcilier les demandes d'approvisionnement en eau potable et de la santé publique avec celles de l'agriculture, de l'industrie, des transports et de toute autre activité humaine, et sur l'état biologique du système de réception, en particulier la faune aquatique, les loisirs, les sports nautiques, et la protection des ressources en eau.

Ces dispositions (qui concernent les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux du littoral) couvrent la décharge, le dragage, l'élimination, et les dépôts directs ou indirects de substances de toute nature. Elles s'étendent d'une manière plus générale à tout ce qui peut représenter une menace pour la qualité de l'eau, en modifiant ses caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques.

Outre la législation sur l'EIE (Loin°83-03), les systèmes d'eau sont également réglementés par la Loin°83-17 sur le code de l'eau. Cette loi met en place une politique de l'eau pour répondre aux besoins de la population et du secteur économique. La législation a pour but de garantir la protection des eaux contre la pollution, les rejets d'eaux usées et la sur-extraction. Cette loi définit les priorités d'utilisation de l'eau (réserve en eau potable, agriculture et industrie). Elle définit les droits et obligations des usagers de l'eau. Les Articles 73 et 74 stipulent que tout projet impliquant des développements de sites ou l'extension d'unité industrielles utilisant de l'eau, doivent tenir compte des critères d'économie d'eau et des priorités d'utilisation de l'eau mentionnées ci-dessus. En outre, les industries doivent recycler leurs eaux usées dans la mesure du possible du point de vue technique et économique. De même, les industries doivent prévoir des installations de traitement des eaux usées (Art102) pour les déchets polluants. Le déversement, l'épandage ou la pulvérisation de

substances risquant de polluer le système aquatique sont également interdits (Art. 104).

Les Articles 110 et 111 stipulent que la limite de la zone de protection est un périmètre

Délimitant la zone géographique à l'intérieur de laquelle toute activité risquant d'affecter la qualité des ressources en eau est interdite ou réglementée. Parmi les activités soumises à la réglementation et à l'interdiction, on compte les exploitations de carrières, la construction, et le rejet de toute substance susceptible d'affecter la qualité de l'eau [58].

III.3.2.4 Réglementations sur les Déchets Liquides :

La réglementation de la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines est issue de la Loi 83-03 sur la protection de l'environnement et de la Loi 83-17 sur le code de l'eau. Le Décret 93-160, conformément aux deux lois susmentionnées, réglemente l'élimination des effluents industriels liquides. Le rejet dans un système de réception n'est autorisé que s'il ne dépasse pas les valeurs limite maximales à la source imposées par ce décret, et s'il est conforme aux conditions techniques définies par le décret ministériel. Ces conditions techniques tiennent compte du débit et du degré de pollution dans les systèmes de réception, et de leurs capacités naturelles de régénération, des conditions d'utilisation des eaux de réception, des besoins de réserve en eau de la population, de la protection de la flore et de la faune, et des besoins sanitaires, économiques et touristiques. Ce décret impose également les moyens par lesquels s'appliquent les permis d'habilitation à décharger des déchets industriels [59].

Tableau III.5: Décret 93-160 Article 4: Tolérances de rejet des effluents industriels algériens [60]

Paramètre	Unités	Valeurs max
Température	°C	30
PH	Mg/l	5,5-8,5
MES	Mg/l	30
Demande en oxygène biochimique (DBO ₅)	Mg/l	40
Demande en oxygène chimique (DCO)	Mg/l	120
Azote	Mg/l	40
Phosphates	Mg/l	0.2
Cyanure	Mg/l	0.1

Aluminium	Mg/l	5
Cadmium	Mg/l	0.2
Chrome³⁺	Mg/l	3
Chrome⁶⁺	Mg/l	0.1
Fer	Mg/l	5
Manganèse	Mg/l	1
Mercure	Mg/l	0.01
Nickel	Mg/l	5
Plomb	Mg/l	1
Cuivre	Mg/l	3
Zinc	Mg/l	5
Huile et graisse	Mg/l	20
Hydrocarbures	Mg/l	20
Phénols	Mg/l	0.5
Solvants organiques	Mg/l	20
Chlore	Mg/l	1
PCB	Mg/l	0.001
Détergent	Mg/l	2
Tension actifs anioniques	Mg/l	10

III.3.2.5 Durabilité du Projet :

Une législation de grande portée a été introduite sous la forme de la Loi 03-10 du 19 juillet 2003 sur la protection de l'environnement dans un contexte de développement durable. Cette législation est très complète et porte sur tous les milieux de l'environnement; l'air, la terre et l'eau, dont la mer. Cette nouvelle loi consolide et étend la législation sur l'environnement, y compris celle qui porte sur l'Evaluation de l'Impact sur l'Environnement de propositions de développements industriels. Tout en restant en phase avec les pratiques internationales, elle définit la durabilité comme « l'Intégration de considérations environnementales dans les décisions de développement visant à répondre aux besoins des générations à venir et des générations actuelles. Particulièrement pertinente pour le développement de l'installation des usines de dessalement, elle met donc l'accent sur la conservation des ressources énergétiques et sur la réduction des émissions «de gaz de l'effet de serre» et sur la minimisation de la

Production de déchets, en faisant appel à des technologies plus propres en tant que telles. Elle adopte aussi le principe des MTD, en faisant appel à des sponsors du projet, pour démontrer que le développement fera appel aux Meilleures Techniques Disponibles à des coûts économiquement acceptables [61].

III.3.2.6 Emissions dans l'air :

Ilya eu plusieurs décrets algériens portant sur les normes ou les directives en matière de qualité de l'air ambiant. Plus récemment, il y eu le Décret 2000-73 et le Décret 93-165. Le Décret 93-165 définit les émissions atmosphériques (la fumée, le gaz, la poussière, les odeurs et les particules solides), et le décret exécutif N° 06-02 du 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.

Ce dernier décret indique dans son article 6, les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air fixés comme suit: [62]

Tableau III.6: Valeurs limites et objectifs de qualité de l'air [63]

Polluant	Objectif de qualité micro grammes/ Nm ³	Valeur limite micro grammes/ Nm ³
Dioxyde d'azote	135	200
Dioxyde de soufre	150	350
Ozone	110	200
Particules fines en suspension	50	80

Tableau III.7: Seuils d'information et d'alerte [64]

Polluant	Seuil d'information micro grammes/ Nm ³	Seuil d'alerte micro grammes/ Nm ³
Dioxyde d'azote	400	600
Dioxyde de soufre	350	600
Ozone	180	360

Tableau III.8: Directives sur la qualité de l'air ambiant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Polluant Période de Moyennage	Directive de la Banque Mondiale / générales IFC ^[65]	Directive de l'organisation Mondiale de la Santé ^[66]
Dioxyde d'azote 1 heure	-	200
(NO ₂) 24 heures	150	-

Dioxyde de soufre 10 minutes	-	500
(SO₂) 24 heures	125	125
Particules (PM10) 24 heures	-	-
1 an	-	-
Total de particules 24 heures	70	-
en suspension 1 an (TSP)	50	50
Oxyde de carbone 15 minutes	-	100 000
(CO) 30 minutes	-	60 000
1 heure	-	30 000
8 heures	-	10 000

III.4. Réticence des fournisseurs au transfert de la technologie et de la formation :

Dans le domaine du dessalement et du traitement de l'eau, qui sont liés, un développement industriel important est possible dans les PSEM, sous réserve de transfert de technologie, de formation et de coopération. L'accent pourrait être mis sur le décentralisé en énergies renouvelables. Malheureusement et à ce jour, ce n'est pas le cas, les investissements qui se réalisent sont de simples achats « clé en main » de technologies importées et utilisant une énergie d'origine fossile.

Le développement du dessalement en Méditerranée peut apporter des bénéfices significatifs

Pour la région, en termes d'emplois, de développement de filières industrielles, de création d'entreprises de services. Ces bénéfices peuvent varier sensiblement selon les options retenues pour le dessalement (taille des infrastructures, type d'énergie). Les grandes unités de dessalement à osmose inverse sont aujourd'hui construites «Clé en main», avec peu de fabrication locale. La technologie vient des pays développés du Nord, il y a donc encore assez peu de transfert de technologie et de savoir-faire des partenaires européens vers les partenaires méditerranéens. Les récupérateurs d'énergie (Energy recovery) sont protégés par des brevets élaborés. Les membranes ne sont pas fabriquées dans les pays méditerranéens du Sud et de l'Est (sauf Israël, qui développe beaucoup les technologies liées à l'eau, et les entreprises israéliennes sont aujourd'hui compétitives pour de nouveaux marchés d'exportation). A noter le modèle institutionnel de la concession de dessalement à un opérateur privé, comme investisseur constructeur opérateur en BOO, choisi après appel d'offres international et souvent étranger (Alger El Hamma , Oran Magtaa , Emirats, Agadir dans l'appel d'offres ONEP au Maroc) qui est basé sur le seul critère du plus bas coût du m³

et ne privilégie pas le transfert de technologie, le développement d'une filière industrielle dans les PSEM et l'absence de formation en raison de l'absence de volonté voire le refus des fabricants de ces usines de concéder ne serait-ce qu'une part de la technologie de fabrication.

Pour tous les investissements futurs en dessalement et en traitement de l'eau dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée, les orientations proposées devraient être d'encourager le développement dans les PSEM, et en particulier les pays arides pour lesquels la bonne gestion de l'eau est cruciale, d'un vrai tissu industriel et de services liés à l'eau. Les besoins des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée en termes de recherche-développement,

D'investissements et de formation relatifs au dessalement, sont considérables, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau, de la formation en membranes et de retraitement d'eau. Il faut encourager et utiliser les écoles d'ingénieurs, universités et centres de formation dans ce sens.

En favorisant le transfert de technologie et la formation pour la création d'emplois. Une véritable stratégie industrielle est donc à mettre en place dans le domaine du traitement de l'eau (par exemple : technologies membranaires, efficacité énergétique, distillateurs solaires thermiques...). Il s'agit d'un enjeu très important et d'un travail de longue haleine qui devrait être entrepris en partenariat avec les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée. de poursuivre le travail sur le dessalement et la réutilisation des eaux usées, dans un esprit de développement industriel dans le domaine de l'eau en Méditerranée. Un recensement des savoir-faire et des besoins dans les PSEM, en équipements et en services de maintenance pour les technologies et les métiers du traitement de l'eau, du pompage, des prélèvements et de l'irrigation, est à établir dans cette perspective de développement d'un vrai projet industriel, pour lequel il y aura complémentarité entre les deux rives de la Méditerranée.

La gestion de l'eau douce est un secteur très important en Méditerranée, mais les techniciens, gestionnaires et exploitants sont encore souvent trop peu nombreux. La formation initiale des techniciens et administratifs est souvent plus théorique que réellement pratique, et celle des agriculteurs et des irrigants est à développer. La formation professionnelle continue reste à organiser. Il faut donc former du personnel qualifié dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée, pour la bonne utilisation de l'eau, les techniques membranaires, les prétraitements et les traitements physico-chimiques pour les problèmes d'entartrage, de colmatage des surfaces d'échange, de dépôts et d'encrassement, de corrosion, de conditions de fonctionnement, de pression, de température, de vitesse d'eau, de type de pompes et de

dimensionnement, de nettoyage, de filtration...Des plateformes de démonstration sont à utiliser pour ces actions de formation et de sensibilisation, en particulier dans les zones rurales dispersées et semi-arides pour des solutions décentralisées par énergies renouvelables. Formation et information peuvent répondre aux aspects psychologiques et culturels de l'eau qui constituent souvent des obstacles à l'utilisation durable de l'eau recyclée. Il faudrait introduire ces questions dans la formation (y compris pour sensibiliser le grand public) ou dans les programmes scolaires [66].

III.5. Conclusion :

Tous les procédés de dessalement présentent des inconvénients ; besoins énergétiques

Importants, rejets de saumures concentrées chaudes dans le cas de la distillation, en mer ou injectées dans le sol, emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes, traces de métaux lourds échappés des installations, et bruit généré par les pompes haute pression et certains systèmes de récupération d'énergie tels que les turbines. Il en est de même pour les émissions de gaz à effet de serre qui sont plus fortes si l'énergie électrique du dessalement est produite à partir de combustibles fossiles.

Les rejets de saumures à forte concentration (environ 70g/l) et la dilution insuffisante peuvent appauvrir ou détruire les écosystèmes aquatiques et dégrader la qualité de l'eau.

Afin de limiter cet impact sur l'environnement, la solution adoptée aujourd'hui est la mise en place de systèmes de diffuseurs permettant de maîtriser la dilution de la saumure avec l'eau de mer et de limiter spatialement la zone impactée.

Un bilan et un suivi des rejets de saumures et produits chimiques doivent, en outre, être accompagnés d'un suivi des répercussions sur la faune et la flore, terrestres et surtout marines.

Conclusion Général

Le dessalement de l'eau de mer est une technologie d'avenir c'est vrai, mais plutôt en cas de dernier recours et quand aucune autre solution n'est possible. Les gouvernements devraient donc éviter de se détourner de solutions de recharge moins coûteux et moins agressif comme l'économie d'eau, et recyclage des eaux usées.

Le dessalement de l'eau de mer est une activité en très forte croissance, toutes les techniques de dessalement sont très intéressantes au vu de leurs performances. Toutefois, à l'heure actuelle, le dessalement ne peut subvenir aux besoins en eau douce des populations les plus pauvres, en raison de ses coûts énergétiques trop élevés, mais les techniques ne cessent de se développer, ce qui va permettre une baisse des coûts de production et peut être permettre à certains de ces pays, en grande pénurie d'eau, de s'équiper à leur tour afin de pouvoir sécuriser leur alimentation.

Le dessalement de l'eau de mer constitue une solution compétitive pour pallier à la rareté de cette ressource. Les techniques de dessalement ont connus une amélioration continue permettant pour atteindre des coûts raisonnables et des débits plus importants. La maîtrise de l'énergie est un paramètre important dans le rendement de l'installation par la récupération de l'énergie et l'utilisation des formes d'énergie disponibles, non polluantes et très économiques comme le solaire thermique.

Le dessalement va ainsi s'imposer comme une ressource alternative essentielle à la pérennité de grandes zones urbaines du littoral ou le besoin se fait sentir. Pour illustrer son importance désormais stratégique, le dessalement est devenu une nécessité vitale pour les grands centres urbains algériens du littoral méditerranéen.

Il est important de noter, en outre, que les procédés des dessalements actuelles, génèrent un certain nombre de problèmes environnementaux ce qui reste un frein pour leur développement à plus grande échelle.

Le problème des rejets est un problème qu'il faut traiter en urgence vu la vitesse à laquelle le nombre d'installations de dessalement d'eau de mer en Algérie augmente en même temps que les rejets d'eaux saumâtres.

Références Bibliographiques

1. *Source : BRGM – 2011*
<https://www.cieau.com/connaitre-leau/les-ressources-en-france-et-dans-le-monde/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/>
2. **BAKALOWICZ, M.**, *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques*, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, Corse, 1999.
3. *Iver Duedall, Notes de cours - Océanographie*, Florida Institute of Technology.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_de_mer
4. <https://www.google.fr/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fplaneteviable.org%2Frepartition-eau-sur-terre%2F&psig=A0vVaw2LizjvLtNYTDPYtw23Onac&ust=1593955674663000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCKCBzOfZs-oCFQAAAAAdAAAAABAN>
5. *La salinité de l'océan [archive]*
Alice Bomboy, « L'odeur rafraîchissante de l'océan » [archive], juin 2008 (consulté le 17 juin 2010)
6. <http://univ-guelma.dz/fr> *Mémoire de Master. Présenté par :*
MECHENENE Hamza en 2011
7. **LE CALVÉ, O.**, *Propriétés Physiques du Milieu Marin*, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, France, 40pages, mai 2002.
8. **HABET, L.**, *Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement*, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 153pages, 2012.
9. (en) *E. Halley*, « A short account of the cause of the saltiness of the ocean, and of the several lakes that emit no rivers; with a proposal, by help

- thereof, to discover the age of the world », *Phil. Trans.*, vol. 29, 1715, p. 296-300 Paul R. Pinet, *Invitation to Oceanography*, St. Paul: West Publishing Company, 1996 (ISBN 978-0763740795), p. 133.
10. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Salinit%C3%A9>
11. **MOULIN, B.**, *Le kayak et la mer*, édition le Canotier, 2004.
12. **HENRI, L., KAMEL, F.**, *Dessalement de l'eau de mer et des saumâtres par Osmose Inverse*, Middle East Desalination Research Center en collaboration avec L'université Saad Dahlab de Blida, Algérie, Janvier 2008
13. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-eau-elle-encore-bleue-618/page/11/>
14. **HABET, L.**, *Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement*, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 153pages, 2012.
15. **ATALLAH, A.**, *Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station HONAINÉ*. Mémoire de fin d'étude, Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 99 pages, 2014.
16. **ALPHA, S. M.**, *Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDMSA dans la ville de Bamako*, Thèse de doctorat en pharmacie, université de bamako, 2005
17. **MONIQUE, H.**, *Les eaux naturelles et les eaux de consommation*, Saint Laurent, 1991
18. **SAVARY P.**, *Guide des analyses de la qualité de l'eau, territorial éditions*, pp75-115, 2010
19. **HASLAY C. et LECLERC H.**, *Microbiologie des eaux d'alimentation, technique et documentation*, édition Lavoisier, Paris, 1993.
20. <https://www.aquaportail.com/definition-7304-eau-saumatre.html>

21. **HAMANI, A.**, *Etude des performances du pilote d'électrodialyse dans la déminéralisation des eaux saumâtres*, Mémoire de fin d'études, Ecole nationale supérieure de l'hydraulique Abraoui Abdelah, 100 pages, 2013.
22. **Philippe Bandelier et Jean-Claude Deronzier.** « Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh) ». Direction de la recherche technologique ;Grenoble (2001).
23. **Dossier thématique - La Cité de la Mer - Technopole Cherbourg-Normandie / Avril 2012**
24. **Alain .MAUREL.** «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres», édition technique et documentation. 2001.
25. **BOUTRIAA ABDELOUAHAB (2009)** : « Effet des paramètres de fonctionnement sur les performances d'un distillateur solaire »
26. **Farid TATA-DUCRU** «Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes» Janvier 2009
- [16] **Viviane Renaudin**, «le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumatres».CNRS, Nancy, article 2003
27. **Viviane Renaudin**, «le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumatres».CNRS, Nancy, article 2003.
28. **Youssef Mandri** «Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide» ; mémoire de doctorat ; université de lyon 1 ; 2011.
29. **M.SEBKI et I. AISSAOUI** ; « Etude paramétrique pour le dimensionnement du diffuseur de saumure de la méga station de dessalement de Magtâa » ; mémoire fin d'étude Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2016.
30. <http://www.lenntech.fr/.htm>

31. Bilel FATHALLI ; «influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse» ; Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis ;2010/2011 .
32. BANDELIER Philippe ;«Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres» ; Article: 121 janv-2017.
33. Alain .MAUREL. «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres», édition technique et documentation. 2006.
34. TRIKI Zakaria ; «Études, Analyses et Optimisation de la Consommation Énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés » mémoire de Doctorat ; Université Constantine 1 ; 2014.
35. SÉVERINE – PLANTIER ; « procédé de prétraitement d'eau de mer avant osmose inverse en présence d'efflorescences algales » mémoire de doctorat ; Université de Nantes ;2013.
36. http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0607/beiere/1/html/projet_dessalement2.html.
37. Cours Thématique sur le dessalement d'eau ; bonnes pratiques d'ingénierie pour le dessalement d'eau ; avril 2013
38. MORSLI MEBARKA SOUMIA ; «Impact des Arrêts Techniques de L'usine de Dessalement de L'eau de Mer sur L'entreprise et L'environnement» ; mémoire de magister ; université d'Oran 2013.
39. J.SCHIPPER ; « Environmental impact from desalination plants – Pollution of the sea » ; WHO cours, Desalination March 2000
40. C.LE GUERN, P.LACHASSAGNE ; « dessalement et recharge artificielle : synthèse techno- économique» rapport final mars 2003.
41. <https://www.partagedeseaux.info/Enjeux-environnementaux-et-economiques-du-dessalement-de-l-eau>
42. Le dessalement de l'eau de mer : une réponse aux besoins d'eau douce en Méditerranée ? Les Notes du Plan Bleu Environnement et Développement en Méditerranée .N° 16 Juillet 2010.

43. *La corrosion des métaux et de leurs alliages témoigne de leur tendance à revenir à leur état originel de minerais (oxydes, sulfures, carbonates, ...) sous l'action des agents atmosphériques.*
44. **Wade ET Fletcher (1995)**, *Energy allocation and other factors in the inthencing water cost in desalination and dual purpose power /water plants. of IDA World Congress, Abu Dhabi, Nov.1995.*
45. **Schipper, J. 2000**, *Environmental Impact from desalination plants – Pollution of the sea. WHO course on desalination March, 2000.*
46. **Henri Boyé, 2010**. *Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens.*
47. **Finan, M., S. Smith, K. Evans and J. Muir (1989)**, *Desalination.*
48. **Zimmerman, R. (1999)**, *The Larnaca seawater desalination plant. Environmental impact Assessment Report.*
49. **California Coastal Commission (1991)**, *Seawater desalination in California Chap . there : Potential Environmental Impacts.*
50. **Hoepner, H, 1999**, *A procedure for environmental impact assessments (EIA) for seawater desalination plants.*
51. **Aguis,A, 1988**. *Salinity effects of the effluents from the TIGNE RO plant on the surrounding sea. Diploma thesis, University of MALTE.*
52. **Argyrou, M, 2000**. *Impact of Desalination Plant on marine macrobenthos in the coastal waters of Dehkelia bay, Cyprus, Internal Report.*
53. **Levinton , J.S, 1996**, *Marine Biology Function . Biodiversity, Ecology. Oxford University Press, New York, U.S.A.*
54. *Loi algérienne No. 83-03 du 5 février 1983 sur la protection de l'environnement.*
55. *Décret n° 90-78 – Décret sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement.*
56. *Décret n° 93-184 – Décret sur la réglementation des émissions de bruit, qui renforce l'Article 121 de la Loi 83-03*

57. *Journal officiel.*
58. *Loi algérienne n° 83-17 – sur le code de l'eau.*
59. *Décret n° 93-160 – Réglementation des déversements d'effluents industriels liquides.*
60. *Décret 93-160 Article 4.*
61. *Décret n° 93-160 - Réglementation des déversements d'effluents industriels liquides.*
62. *Meilleures Technologies Disponibles.*
63. *Valeurs limites et objectifs de qualité de l'air.*
64. *Seuils d'information et d'alerte..*
65. *Banque Mondiale, Pollution Prévention and Abatement Handbook (General Environmental Guidelines), 1998 - Manuel de Pollution, prévention et réduction (directives générales en matière d'environnement).*
66. *Organisation Mondiale de la Santé, Directives de qualité de l'air 1999.*