

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Etude paramétrique pour le
dimensionnement du diffuseur de saumure
de la méga station de dessalement de
Magtâa**

Réalisé par :

Mohamed Salim SEBKI
Lyes AISSAOUI

Dirigé par :

Pr. A.BERMAD

Présenté et soutenu publiquement le 14/06/2016

Composition du jury :

| | | |
|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| Président | Mr A.BALI | Professeur ENP |
| Promoteur | Mr A.BERMAD | Professeur ENP |
| Examineurs | Mr A.LEFKIR | Docteur ENSTP |
| | Mr M. AMITOUCHE | Docteur Université de Boumerdes |
| | Mr.Med A.BOUKHEMACHA | Docteur ENP |

Juin 2016

DEDICACES

Je dédie ce travail

A mes très chers parents, qui m'ont tout donné, qui ne m'ont privé de rien et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

A ma sœur Wassila et mon frère Mehdi qui ont toujours été la pour moi.

A ma grand-mère paternelle Azizou et mes grands parents maternels et à toute la famille SEBKI et SLAHDJI.

A tonton Yves GANANSIA qui m'a toujours soutenu.

A mes amis de la cellule avec lesquels j'ai passé des moments inoubliables lors de mes 3 années à polytech.

A mes amis du CAP et à ce club qui m'a tant offert que ce soit du côté professionnel que personnel.

A mes amis de l'EPST Tlemcen qui ont rendu les 2 années de prépa inoubliables.

Et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Med Salim SEBKI.

A mon exemple éternel, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir et à qui je dois absolument tout, mon père.

A ma source de joie et de bonheur, celle qui a toujours cru en moi, qui m'a toujours tout donné et qui m'a toujours encouragé, ma mère.

A mes sœurs Kahiha, Souhila, Nabila, Yasmine ainsi qu'à mon frère Youcef qui ont toujours été présents pour moi.

A mon beau frère Rabah ainsi qu'à mes petits bouts de choux de neveux, Malik, Yanis, Adam et Zakaria qui ont toujours su trouver le moyen de me faire rire.

A tous mes amis, à toute personne à qui je tiens.

Lyes AISSAOUI

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

Nous adressons également nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur le professeur **A.BERMAD**, qui a accepté de nous encadrer avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Nous tenons à le remercier aussi pour sa générosité en matière de formation. Ses conseils nous ont été très précieux.

On remercie aussi Monsieur **A.LEFKIR**, Enseignant à l'ENSTP, pour nous avoir apporté une aide précieuse dans l'élaboration de ce mémoire, ainsi que pour ses conseils et ses encouragements tout au long de ces derniers mois.

Nous tenons également à remercier Monsieur **M.AMITOUCHE**, enseignant à l'Université de Boumerdes, qui nous a permis d'utiliser le logiciel CORMIX sans lequel ce projet n'aurait pu aboutir et de nous avoir aidé tout au long de la préparation de notre mémoire.

Nous exprimons toute notre gratitude à Monsieur **A.BALI** qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire et également aux membres du jury, qui nous ont honoré en acceptant de juger ce travail.

Enfin, un grand remerciement destiné aux enseignants et enseignantes, qui ont contribué à notre formation, depuis le cycle primaire jusqu'au cursus universitaire.

ملخص:

الهدف من هذا المشروع هو القيام بدراسة متغيرة بغرض تحجيم ناشر مصمم لتمديد محلول ملحي صادر عن محطة تحلية مياه البحر بمقطع، و دراسة سلوك هذا المحلول وفق الظروف الخارجية.

الكلمات الدالة : تحلية الماء، ماء البحر، تفريغ، محلول ملحي، تمديد، الناشر، البيئة

Abstract :

The purpose of this graduation project is to carry out a parametric study for the design of a diffuser for diluting the brine generated by the desalination plant of Magtaa, also studying the behaviour of this brine under external conditions.

Key word : Desalination, seawater, discharge, brine, dilution, diffuser, environment.

Résumé :

Le but de ce projet de fin d'étude est de réaliser une étude paramétrique pour le dimensionnement d'un diffuseur pour la dilution de la saumure générée par l'usine de dessalement de Magtaa, ainsi que d'étudier le comportement de cette saumure dans le milieu récepteur en tenant compte de la variations de ses vitesses environnementales.

Mots clés : dessalement, eau de mer, rejet, saumure, dilution, diffuseur, environnement.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

| | |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 14 |
|----------------------------|----|

Chapitre I : Le dessalement dans le monde et en Algérie

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction..... | 16 |
| I.2. La nécessité du dessalement de l'eau de mer..... | 17 |
| I.3. Les pays producteurs d'eau douce dans le monde..... | 19 |
| I.3.1. Le Golfe..... | 20 |
| I.3.2. La Mer Rouge..... | 20 |
| I.3.3. En Mer Méditerranée..... | 21 |
| I.4. Le dessalement d'eau de mer en Algérie..... | 22 |
| I.5. L'expérience algérienne dans le dessalement..... | 23 |

Chapitre II : Les différents procédés de dessalement

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction..... | 27 |
| II.2. Généralités..... | 27 |
| II.3. Procédés de distillation..... | 28 |
| II.3.1. Distillation par détente à étages multiples (MSF)..... | 28 |
| II.3.2. Distillation à effets multiples (MED)..... | 29 |
| II.3.3. Distillation par compression de vapeur (VC)..... | 30 |
| II.3.4. Perspectives de la distillation..... | 30 |
| II.4. Procédés membranaires..... | 31 |
| II.4.1. L'osmose inverse..... | 31 |
| II.4.2. L'électrodialyse..... | 34 |
| II.4.3. La nano-filtration par nano-membrane..... | 34 |
| II.5. Comparaison des techniques de dessalement : osmose inverse, distillation et nano-membrane..... | 35 |
| II.5.1. Méthodologie..... | 35 |
| II.5.2. Procédé d'osmose inverse..... | 36 |
| II.5.3. Procédé par nano-membrane..... | 37 |
| II.5.4. Procédé par distillation..... | 38 |
| II.5.5. Comparaison des différentes technologies..... | 39 |
| II.5.5.1. Aspects économiques..... | 40 |
| II.5.5.2. Aspects techniques..... | 41 |
| II.5.5.3. Aspects environnementaux..... | 41 |
| II.5.5.4. Aspects sociaux..... | 41 |
| II.6. Conclusion..... | 41 |

Chapitre III : Impacts sur l'environnement du dessalement de l'eau de mer.

| | |
|--|----|
| III.1. | 43 |
| Introduction..... | |
| III.2. Origine et type des émissions et rejets..... | 44 |
| III.2.1. Emissions atmosphériques..... | 44 |
| III.2.2. Rejets chimiques..... | 45 |
| III.2.3. Saumure concentrée..... | 46 |
| III.3. Impacts sur l'environnement..... | 48 |
| III.4. Effets de la saumure concentrée (conclusion)..... | 50 |

Chapitre IV : Description de la station de dessalement de Magtâa

| | |
|---|----|
| IV.1. Situation géographique de la station..... | 51 |
| IV.2. Structure du projet..... | 52 |
| IV.3. Principales Données techniques du projet..... | 52 |
| IV.4. Les différentes étapes de l'usine de dessalement..... | 54 |
| IV.4.1. Amenée d'eau de mer..... | 54 |
| IV.4.2. Station de pompage d'eau de mer..... | 56 |
| IV.4.3. Système membranaire d'ultra-filtration (UF)..... | 56 |
| IV.4.4. Prétraitement chimique..... | 58 |
| IV.4.5. Stockage et pompage de l'eau filtrée..... | 58 |
| IV.4.6. Etape de l'osmose inverse..... | 59 |
| IV.4.7. Traitement chimique de l'eau dessalée..... | 61 |
| IV.4.8. Rejet de saumure..... | 63 |
| IV.4.9. Station d'air comprimé..... | 63 |
| IV.10. Stockage d'eau traitée..... | 63 |

Chapitre V : Hydrodynamique des rejets en mer

| | |
|--|----|
| V.1. Introduction..... | 65 |
| V.2. L'effet de la stratification..... | 66 |
| V.3. Caractéristiques de la diffusion..... | 67 |
| V.3.1 Géométrie du diffuseur..... | 67 |
| V.3.2. Types de diffuseurs multiports..... | 69 |
| V.4. Les processus hydrodynamique de mélange..... | 71 |
| V.4.1. Les concepts de base du jet et de la plume..... | 71 |

| | |
|---|----|
| V.4.1.1. Définition..... | 71 |
| V.4.1.2. Paramètres liés aux jets et aux plumes..... | 71 |
| V.4.1.3. Echelle de longueur et de temps..... | 72 |
| V.4.1.4. Analyse dimensionnelle des jets et plumes..... | 73 |
| V.4.2. Le champ proche..... | 78 |
| V.4.2.1. Dynamique du mélange de jet submergé..... | 78 |
| V.4.2.2. Les limites d'interactions et la stabilité du champ proche..... | 79 |
| V.4.2.3. Mélange de jet en surface..... | 82 |
| V.4.2.4. L'effet du champ intermédiaire sur la diffusion des diffuseurs multiport..... | 83 |
| V.4.3. Le champ lointain..... | 84 |
| V.4.3.1. Processus de propagation de flottabilité..... | 84 |
| V.4.3.2. Processus de diffusion passive dans le milieu ambiant..... | 85 |

Chapitre VI : Simulation des rejets en mer et optimisation des dimensions du diffuseur de saumure

| | |
|---|------------|
| VI.1. Introduction et problématique..... | 87 |
| VI.2. Technique de simulation (Modèle CORMIX)..... | 87 |
| VI.3. Concepts généraux..... | 91 |
| VI.4. Analyse et interprétation des résultats..... | 91 |
| A. Optimisation des dimensions du diffuseur..... | 91 |
| B. Etude de comportement du diffuseur dans le milieu récepteur..... | 98 |
| VI.5. Conclusion..... | 100 |
| Conclusion générale..... | 102 |
| Références bibliographiques..... | 103 |

Annexes

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I. 1: La disponibilité annuelle en eau par habitant en Algérie en 2020. [1]..... | 8 |
| Tableau I. 2: Répartition des eaux de surface en Algérie. [4] | 8 |
| Tableau I. 3: Stations réalisées par LINDE-KCA [3]..... | 10 |
| Tableau I. 4: Stations réalisées par HYDRO-TRAITEMENT [3] | 10 |
| Tableau I. 5: Les grandes stations de dessalement en Algérie [3]..... | 11 |
| | |
| Tableau II. 1: Gabarit de présentation des impacts par technologie. [6] | 20 |
| Tableau II. 2: Échelle de valeur et symboles pour l'évaluation des impacts. [6]..... | 21 |
| Tableau II. 3: Évaluation du procédé d'osmose inverse. [6] | 22 |
| Tableau II. 4: Évaluation du procédé à base de nanotubes de carbone. [6]..... | 23 |
| Tableau II. 5: Évaluation du procédé de distillation. [6] | 24 |
| Tableau II. 6: Présentation des résultats comparatifs et des totaux | 25 |
| | |
| Tableau III. 1: Indicateurs de durabilité pour une usine MSF à production simple. [26] | 29 |
| Tableau III. 2: Indicateurs de durabilité pour une usine OI avec une source locale d'énergie électrique. [26]..... | 29 |
| Tableau III. 3: Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer. [27] | 32 |
| Tableau III. 4: Grille d'impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement. [26] | 33 |
| | |
| Tableau IV. 1: Données techniques du projet..... | 37 |
| Tableau IV. 2: Les capacités nominales des équipements..... | 38 |
| Tableau IV. 3: Paramètres techniques caractérisant les différentes étapes du processus. [25] | 49 |
| | |
| Tableau V. 1: Processus et ordre de grandeur. [12]..... | 58 |
| | |
| Tableau VI. 1: Caractéristiques de la méga-station de dessalement de Magtâa..... | 74 |
| Tableau VI. 2: Alternatives proposées de diffuseurs..... | 81 |
| Tableau VI. 3: Résultats de simulations | 82 |
| Tableau VI. 4: Cas de vitesses environnementales étudiées | 83 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I. 1: Densité de la population sur les côtes..... | 1 |
| Figure I. 2: Les Zones de Vulnérabilité Hydrique..... | 3 |
| Figure I. 3: Les Principaux pays producteurs d'eau douce dans le monde | 4 |
| Figure I. 4: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans le Golfe en m ³ / j..... | 5 |
| Figure I. 5: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans la mer Rouge en m ³ / j..... | 6 |
| Figure I. 6: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans la mer Méditerranée en m ³ / j..... | 7 |
| Figure I. 7: Emplacement des grandes stations de dessalement en Algérie | 11 |
| | |
| Figure II. 1: Les divers procédés de dessalement..... | 12 |
| Figure II. 2: Schéma d'une usine de distillation par détente à étages multiples (MSF)..... | 14 |
| Figure II. 3: Schéma d'une usine de distillation à effets multiples (MED) | 14 |
| Figure II. 4: Schéma d'une usine de distillation par compression de vapeur (VC)..... | 15 |
| Figure II. 5: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse | 17 |
| Figure II. 6: Membrane d'osmose inverse..... | 18 |
| Figure II. 7: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse..... | 18 |
| Figure II. 8: Principe de dessalement par l'électrodialyse..... | 19 |
| | |
| Figure IV. 1: Emplacement de l'usine de dessalement de Magtâa..... | 36 |
| Figure IV. 2: Vue aérienne de l'usine de dessalement de Magtâa | 36 |
| Figure IV. 3: Structure du projet de la station de dessalement de Magtâa | 37 |
| Figure IV. 4: Composition de l'usine de dessalement de Magtâa..... | 38 |
| Figure IV. 5: Système d'amenée d'eau de mer | 40 |
| Figure IV. 6: Système de prétraitement – Membranes d'Ultrafiltration | 41 |
| Figure IV. 7: Procédure d'Ultrafiltration..... | 42 |
| Figure IV. 8: Système de Membrane d'Osmose Inverse d'Eau de Mer..... | 45 |
| | |
| Figure V. 1: Diffusion flottante côtière | 50 |
| Figure V. 2: Types de stratification..... | 52 |
| Figure V. 3: Diffuseur multiport et sa configuration générale | 53 |
| Figure V. 4: Diffuseur unidirectionnel | 54 |
| Figure V. 5: Diffuseur étagé..... | 55 |
| Figure V. 6: Diffuseur alternatif..... | 55 |
| Figure V. 7: Classification des jets..... | 57 |
| Figure V. 8: Un jet flottant turbulent diffusé dans un écoulement ambiant. | 59 |
| Figure V. 9: Types de modèles de jet flottant sous différentes conditions ambiantes | 64 |
| Figure V. 10: Exemples de conditions de stabilité et d'instabilité du champ proche pour des diffusions de flottabilité positive profondément immergé | 65 |

| | |
|---|----|
| Figure V. 11: Exemples de conditions d'attachement de sillage et d'attachement pour des diffusions proche des limites profondes | 67 |
| Figure V. 12: Types de modèles de mélange de jet en surface sous des conditions ambiantes stagnantes et fluctuantes | 68 |
| Figure V. 13: Exemple de propagation de flottabilité le long de la surface d'eau | 70 |
| Figure V. 14: Processus de diffusion passive avec advection dans le champ lointain | 71 |
| | |
| Figure VI. 1: Distribution gaussienne des concentrations | 73 |
| Figure VI. 2: Schéma descriptif du diffuseur de saumure de l'Usine de Magtâa..... | 75 |
| Figure VI. 3: Onglet destiné aux paramètres du diffuseur sur l'interface CORMIX | 75 |
| Figure VI. 4: Graphique des dilutions en fonction de différentes inclinaisons du diffuseur.... | 77 |
| Figure VI. 5: Graphiques des dilutions en fonction des différentes hauteurs de la bouche de versement..... | 78 |
| Figure VI. 6: Graphiques des dilutions en fonction des différentes profondeurs sur la décharge du rejet..... | 79 |
| Figure VI. 7: Profil topographique du fond marin | 79 |
| Figure VI. 8: Bathymétrie 3D du fond marin | 80 |
| Figure VI. 9: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports | 81 |
| Figure VI. 10: Graphiques des dilutions en fonction des différents types de diffuseurs..... | 82 |
| Figure VI. 11: Graphiques des dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales..... | 84 |
| Figure VI. 12: Profil vertical du panache | 84 |
| Figure VI. 13: Profil 3D du panache | 85 |

Liste des abréviations

OMS : Organisation mondiale de la santé

MSF : Distillation par détente à étages multiples (flash)

MED : Distillation à effets multiples

OI : Osmose Inverse

SWRO : Seawater reverse osmosis

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

DGAIH : Direction des Grands Aménagements Hydrauliques

LINDE-KCA : Linde Engineering Division, office Dresden

VC : Compression de vapeur.

ED : Electrodialyse

PPM : Partie par million

PPB : Partie par milliard

UF : Ultrafiltration

PTM : Pression transmembranaire

ERS : Système de récupération d'énergie

SDT : Solides Dissous Totaux

MLD : Million Litres per Day

CIP : Cleaning-In-Place

NPSH : Net Positive Suction Head

NTU : Nephelometric turbidity *unit*

SDI : Silt Density Index

CIP SWRO : Cleaning-in-place Sea Water Reverse Osmosis

SDT : Sulfadiazine/Trimethoprim

ε : Gradient linéaire de flottabilité

g : Accélération gravitationnelle.

ρ_a : Densité du milieu ambiant.

d_{ρ_a}/dz : Gradient de densité.

L_d : Longueur du diffuseur

N : Nombre de port

l : Espacement moyen des ports

D : Diamètre du port

h_0 : Hauteur du port au-dessus du fond

θ : Angle vertical de diffusion

σ : Angle de décalage horizontal de diffusion

γ : Angle d'alignement (direction du courant ambiant par rapport à l'axe du diffuseur)

β : Angle d'orientation des ports (orientation angulaire par rapport à l'axe du diffuseur)

$c(x, y, z)$: Concentration de l'effluent

ρ_0 : Masse volumique de décharge

ρ_a : Masse volumique du milieu ambiant

H_d : Profondeur de décharge

D_0 : Diamètre de décharge

u_0 : Vitesse de décharge

u_a : Vitesse ambiante

c_0 : Concentration de décharge

Re : Nombre de Reynolds du jet

F_{Δ_0} : Nombre de Froude densimétrique du jet initial

Q : Flux du volume

M : Flux d'élan

B : Flux de flottabilité

L_q : Échelle de longueur du volume

L_m : Échelle de longueur de l'élan

L_b : Échelle de longueur de la flottabilité

S : Dilution locale spécifique à un point de coordonnées (x, y, z)

$C1, C2, C3, C4, C5$: Constantes à déterminer expérimentalement.

m, n : Exposants à déterminer expérimentalement.

p, q, r : Puissance à déterminer expérimentalement.

S_0 : La dilution moyenne

Q_i : Flux du volume local

g' : Réduction de la gravité

CORMIX : Modèle de simulation spécialisé (Cornel Mixing Zone Expert System).

Psu : *Practical Salinity Unit*

INTRODUCTION GENERALE :

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

Cependant les populations ont un accès très inégal à ces ressources, 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 et on estime 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.

La construction d'une usine de dessalement apparaît alors plus rapide que la rénovation de l'ensemble du réseau de distribution (celui de l'Algérie n'ayant pas été rénové, par exemple, depuis l'indépendance).

Dans la région méditerranéenne, comme dans le monde, la croissance démographique et l'intensité de l'activité socio-économique font de l'eau douce une ressource de plus en plus rare. Selon les estimations, la demande totale dans la région, qui était de 300 milliards de mètres cubes par an en 1990, a augmentée de 32 % en 2010 et augmentera de 55 % d'ici à 2025, pour atteindre plus de 460 milliards de mètres cubes.

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

Jusqu'à là, 20 petites stations de dessalement d'eau de mer pour une capacité de 53 000 m³/j ont été réalisées et réparties à travers 08 wilayas et 11 grandes stations d'une capacité de 2 190 000 m³/j ont été lancées et sont en cours d'exploitation et 3 stations d'une capacité de 300 000 m³/j sont en cours de construction.

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. Cette technique est considérée comme une solution efficace face à la pénurie d'eau. 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, métaux lourds et composé organiques. Cette saumure est deux à trois fois plus salée (entre 50 et 80 g/L) que l'eau de mer habituelle.

Pour que cette saumure soit diluée et ainsi atteindre un taux de salinité toléré, la solution la plus courante est sa diffusion à travers des émissaires sous-marins, ce dernier est composé d'un pipeline tout au long du fond marin et d'un diffuseur avec un seul port ou multiport selon la quantité de saumure rejetée.

La station de Magtâa situé dans la wilaya d'Oran est la 2^{ème} plus grande station de dessalement au monde avec une capacité de 500 000 m³/j, a été réceptionnée en 2014. Cette station est dotée d'un diffuseur de 120 m et 60 ports.

L'objectif de notre travail est d'étudier les paramètres pris en compte dans le dimensionnement de ce diffuseur et de vérifier si ce dimensionnement est optimal, on étudiera aussi l'influence des paramètres environnementaux telles que la vitesse du courant et la vitesse du vent sur la dilution de la saumure, pour ce faire nous avons simulé plusieurs scénarios de dispersion du rejet dans le milieu marin en utilisant le code CORMIX9.0GT (Cornell Mixing Expert System) commercialisé par la société MixZon, sous licence, il s'agit d'un modèle servant à l'analyse, la prédiction et la conception de rejets de liquides contaminants ou non en milieux aquatiques.

Chapitre I : Le dessalement dans le monde et en Algérie

I.1. Introduction :

Depuis plusieurs années, dans le monde, un manque d'eau commence à se faire sentir, notamment sur le pourtour méditerranéen, dont l'Algérie. Ce manque d'eau est dû à plusieurs facteurs : un accroissement démographique important, avec augmentation de 50% de la population en 50 ans ce qui engendre une augmentation considérable en demande d'eau potable par habitant.

En 2050 nous seront plus de 10 milliards sur Terre et 60% de la population mondiale vivra dans des régions connaissant un fort stress hydrique, pourtant plus de 40 % de la population vit à proximité des côtes (figure I.1).

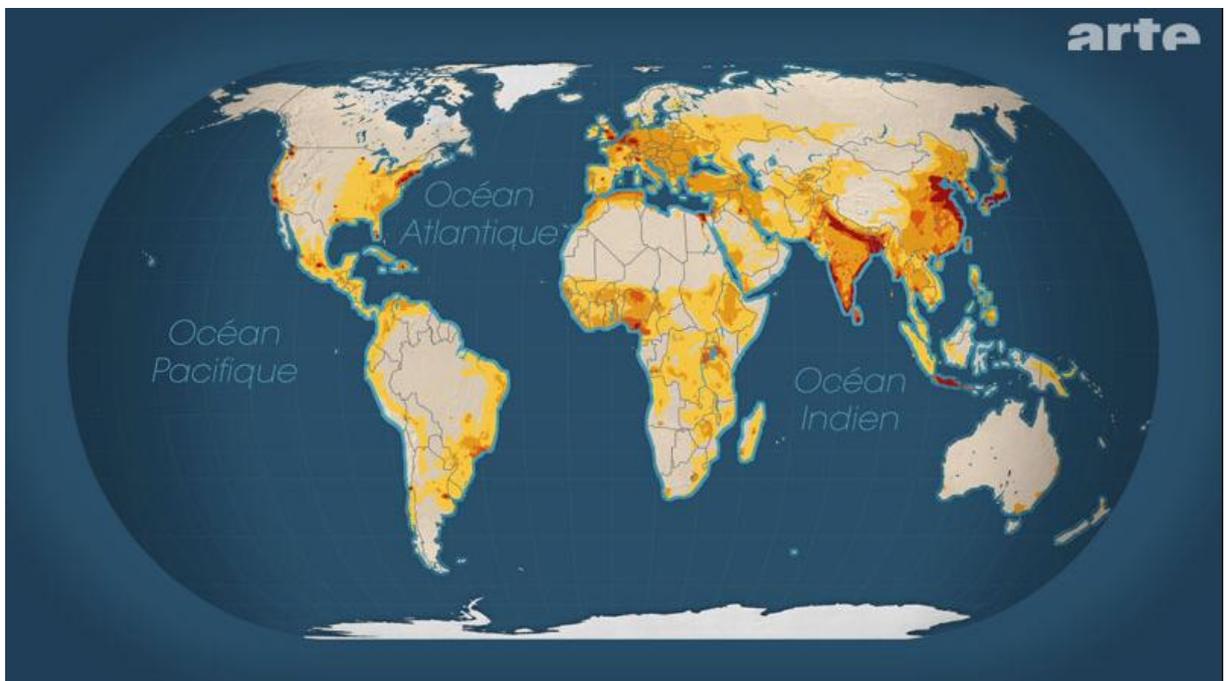


Figure I. 1: Densité de la population sur les côtes. [1]

Afin de satisfaire cette demande en eau qui ne cesse d'accroître, la quasi-totalité des eaux douces naturelles disponibles sont exploitées, sauf que ces quantités restent insuffisantes. En effet, bien que les $\frac{3}{4}$ de la surface de notre planète soient recouverts d'eau, seulement deux centièmes de cette dernière ne sont exploitables. Le reste, qui ne représente pas moins de 98% et non potable ou salée, ce qui fait d'elle une ressource inutilisable, où du moins, avant que des experts ne pensent à trouver le moyen de l'exploiter, il y a de cela quelques décennies.

Aujourd'hui, Face aux besoins d'eau douce dans le monde, pour la consommation des populations, l'irrigation, et le développement touristique, il parait fort séduisant et même logique d'avoir recours au dessalement de l'eau de mer. En effet, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue l'une des réponses possibles pour faire face aux crises et pénuries d'eau.

En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a débuté principalement dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Chypre...), littorales (Libye) et désertiques (Maghreb). Ces productions industrielles d'eau ont progressé régulièrement en volume et en performance. Les techniques sont aujourd'hui bien maîtrisées et en progrès, mais leur mise en œuvre requiert d'importantes quantités d'énergie, sous forme de chaleur ou d'électricité, coûteuses et sources d'émissions de gaz à effet de serre. [2]

L'Etat algérien en a fait une priorité. La capitale de l'Ouest, Oran, et toute la région Ouest en général, souffre depuis plusieurs décennies d'un dramatique déficit en eau potable.

La capitale de l'Ouest a besoin de 350.000m³/j d'eau potable pour la consommation de la population. Elle dispose désormais d'une station de dessalement d'eau d'une capacité de 500.000 m³/j par jour, et de plusieurs petites unités, de quoi satisfaire les besoins en eau de 5 millions de personnes. Reste que le procédé qui permet de transformer l'eau de mer en eau douce est très gourmand en énergie et donc coûteux. Le mètre cube d'eau est plus cher que celui issu des barrages.

L'Algérie a développé un programme ambitieux dans le domaine de dessalement des eaux de mer en mettant en place, en premier lieu, 20 stations « Monobloc » réparties sur un littoral qui s'étale sur plus de 1200 Km de long.

Suite à cette expérience, 12 grandes stations avec une capacité totale de 1,940,000 m³/j ont été réalisées entre 2003 et 2011. Notons que la plus grande station a été mise en service en 2014 avec une capacité de 500,000 m³/j, il s'agit de la station de Magtaâ à Oran. [3]

I.2. La nécessité du dessalement de l'eau de mer :

Une quantité équivalente à 98% du stock d'eau de la planète est salée et seule une fraction correspondant à 2 % se compose d'eau douce. Environ 70% de cette eau douce de la planète est fixée dans les calottes glaciaires des pôles et une partie importante des 30% restants est constituée par des nappes aquifères souterraines de régions reculées. En effet, seule une fraction minuscule de l'eau douce (moins de 1% de l'eau douce totale, soit 0,007 % du stock d'eau mondial) est disponible dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs et est facilement accessible à l'homme pour son utilisation directe. En outre, la répartition spatiale et temporelle du stock et du débit d'eau douce est très inégale. [4]

Par suite de l'extension des régions arides et aussi de l'utilisation intensive d'eau dans les zones urbaines du monde entier, il est fréquent que l'eau douce ne soit pas disponible dans les quantités souhaitées.

Par ailleurs, l'OMS, c'est-à-dire l'Organisation Mondiale de la Santé, estime qu'en dessous du seuil de 2 500 m³ par habitant et par an, l'individu se trouve dans une situation de «vulnérabilité hydrique».

Or, quand on regarde une carte des ressources en eau douce disponible, on voit que c'est déjà le cas pour plusieurs pays, alors qu'au contraire seuls quelques pays se partagent 60% des ressources. L'Amérique du Nord, le nord de l'Europe, l'Amérique du Sud, l'Afrique tropicale sont bien dotés. Mais en revanche, la plupart des États du Moyen-Orient, du Maghreb ou de l'Asie centrale sont dans une situation dite de « stress hydrique », c'est-à-dire qu'ils disposent par an de moins de 1500 m³ d'eau douce par habitant. [1]



Figure I. 2: Les Zones de Vulnérabilité Hydrique [1]

Nous sommes présentement témoins d'une tendance prononcée à la création de zones arides et dénudées au peuplement très dense. Cette tendance résulte de l'accroissement de la population mondiale (qui a déjà franchi la barre des 7 milliards d'habitants et devrait atteindre les 10 milliards en 2050) de la possibilité d'un conditionnement de l'air à l'intérieur des habitations et de divers facteurs militaires, économiques et politiques. [5]

Au cours de la période 1950 -1990, la consommation mondiale d'eau a triplé. Chaque jour, à chaque seconde, la population de la planète augmente de 2,3 habitants, ce qui signifie que les consommateurs d'eau augmentent de 150 par minute, de 9 000 par heure, de 216 000 par jour ou de 28,8 millions par an. Où aurions-nous pu trouver les deux trillions de mètres cubes d'eau nécessaires pour répondre aux besoins des 2,6 milliards de consommateurs qui allaient venir s'ajouter à une population mondiale dépassant déjà les 5 milliards? [5]

La population mondiale poursuit sa croissance : 1 milliard d'habitants en 1800, 6 milliards 700 millions en 2008, soit 200 ans plus tard. Et sur ces 6 milliards 700 millions, un peu plus de 1 milliard de personnes, soit une personne sur six n'a pas d'accès à l'eau potable, ou même seulement à l'eau propre.

Les ressources en eau de la région méditerranéenne sont limitées, fragiles et menacées. Elles font déjà l'objet d'une exploitation intensive, notamment dans le sud et à l'Est où la saison sèche se caractérise par sa longueur, avec une pluviométrie annuelle faible. [6, 5]

De ce fait, nous pouvons résumer que le stress hydrique, l'accroissement de la population et la densité de population importante sur les côtes sont les principaux paramètres incitant à la production d'eau douce à partir du dessalement de l'eau de mer.

I.3. Les pays producteurs d'eau douce dans le monde :

En 2008, nous avons exactement 13 869 usines de dessalement, construites ou en construction dans le monde et elles produisaient 52 millions de mètres cubes d'eau douce par jour. Soit 0,5% de la consommation mondiale, ou bien encore 100 fois la production quotidienne d'une ville comme Paris. (Figure I.3)

Les experts du secteur du dessalement estiment que le taux de croissance du marché atteindra 22 % par an en 2020. La demande en eau douce des pays en développement est l'un des principaux moteurs du marché mondial.

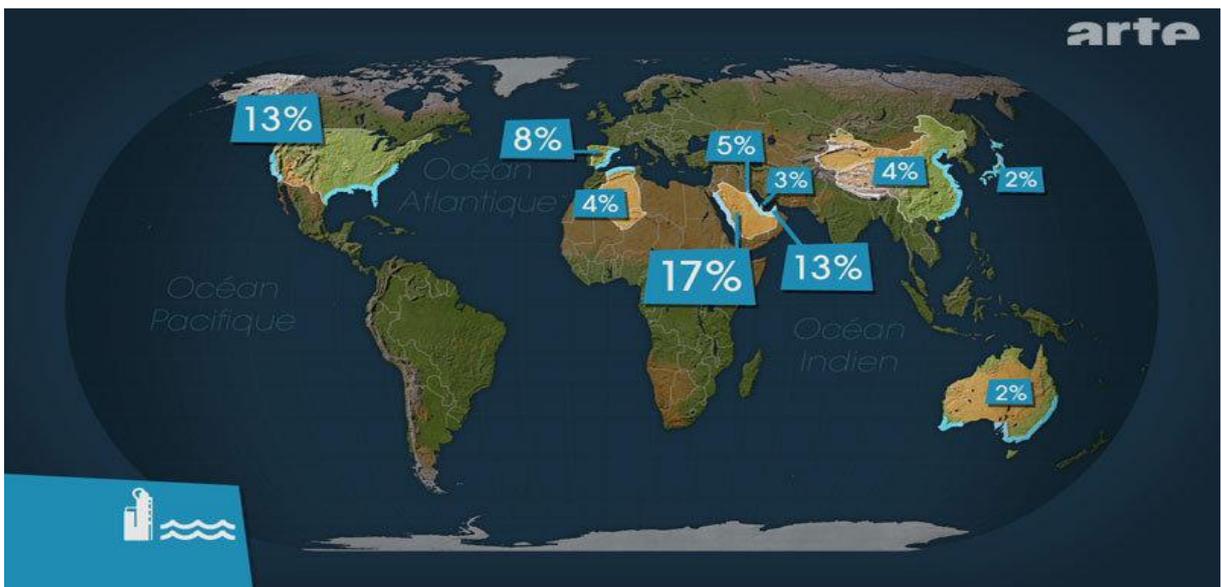


Figure I. 3: Les Principaux pays producteurs d'eau douce dans le monde [1]

Comme nous le voyons sur la figure, Les principaux pays producteurs d'eau douce par dessalement dans le monde sont : - l'Arabie Saoudite, - les Émirats Arabes Unis, - les États-Unis, - l'Espagne,- le Koweït.

Ces pays étant suivis ensuite par l'Algérie, la Chine, le Qatar, le Japon et l'Australie, qui produisaient en 2008, entre 2% et 4% de l'eau dessalée dans le monde. Des chiffres qui maintenant, en 2016, ont augmenté jusqu'à 3% de plus. [1]

I.3.1. Le Golfe :

En effet, En termes de zones maritimes, le plus grand nombre d'usines de dessalement peut être trouvé dans le Golfe avec une capacité de dessalement total d'environ 12,1 Mm³ / j ou environ 44% de la production journalière dans le monde entier. Comme cité précédemment, les plus grands producteurs de l'eau dessalée dans le Golfe sont l'Arabie saoudite (25% de dessalement de l'eau de mer de la capacité mondiale entière de dessalement, dont 11% sont situés dans la région du Golfe, 12% dans la région de la mer rouge, et 2% à des lieux inconnus), les Emirats Arabes Unis (23% de la capacité mondiale du de dessalement de l'eaude mer), et le Koweït (6%).

Les procédés thermiques de dessalement dominent dans la région du Golfe. Environ 81% de l'eau dessalée dans la région du Golfe est produite par MSF et 13% par les usines MED, et seulement 6% par OI (SWRO). [3, 7, 8]

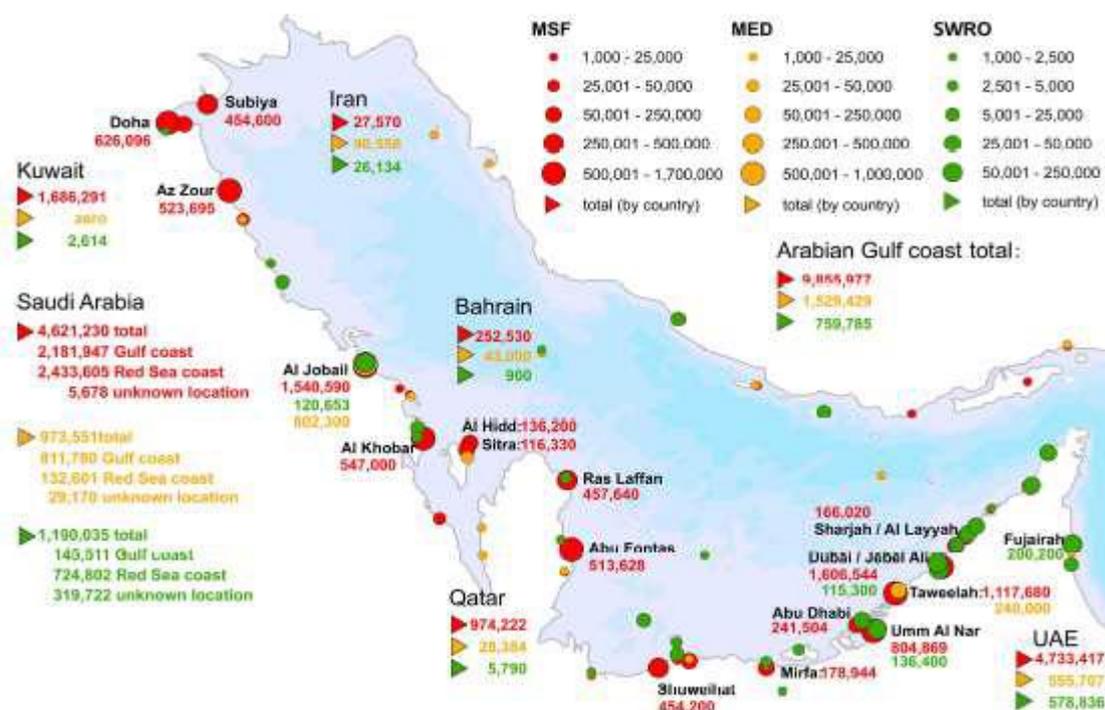


Figure I. 4: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans le Golfe en m³ / j. [7]

I.3.2. La Mer Rouge :

Dans la région de la mer Rouge, les usines de dessalement ont une capacité de production totale de 3,6 Mm³ / j (13% de la capacité de dessalement à travers le monde. La plupart des eaux sont produites dans les grandes centrales de cogénération (72%), principalement en Israël qui détient la plus grande station de dessalement au monde depuis 2013 (624 000 m³/j) et en côte d'Arabie Saoudite dans les lieux de Yanbu, Rabigh, Jeddah, Shoaiba et Assir. Plus grand complexe de dessalement dans le monde avec une production totale de l'eau de 1,6 Mm³ / j est situé à Shoaiba.

L'Arabie Saoudite représente la majorité de la production d'eau dessalée dans la région de la mer rouge, 78% (2,6 Mm³ / j) de la production nationale provenant des centrales thermiques, alors que l'Egypte représente que 7% de la production d'eau dessalée de la mer Rouge, dont 90% (0,2 Mm³ / j) est produite par des petites usines d'OI, principalement sur la péninsule du Sinaï et dans les stations touristiques le long de la côte de la mer Rouge [3, 7, 8]

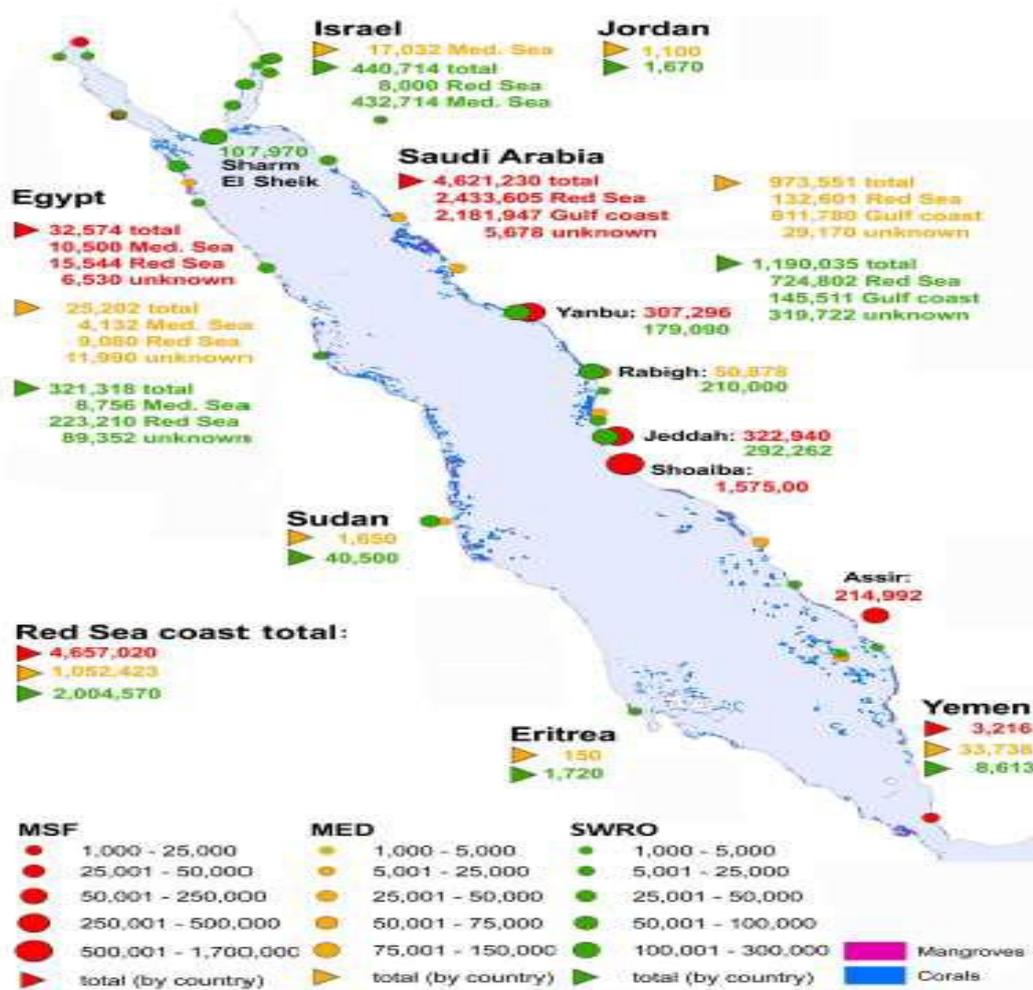


Figure I. 5: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans la mer Rouge en m³ / j. [7]

I.3.3. En Mer Méditerranée :

En Méditerranée, la production totale de dessalement de l'eau de mer est d'environ 4,0 Mm³ / j (14% de la capacité mondiale de dessalement. L'Espagne, avec environ 8% de la production totale du monde (2,2 Mm³ / j), est le troisième plus grand producteur d'eau dessalée à l'échelle mondiale et le plus grand dans la région. Cependant, environ 25% de la capacité espagnole est situé sur les îles Canaries dans l'océan Atlantique, et «seulement» environ 65% en Méditerranée [8]

Aujourd'hui, le procédé d'OI représente 70% de la production en Méditerranée et pour 99% de la production espagnole en Méditerranée. Les installations de distillation se trouvent encore en Libye et en Italie (en ordre décroissant de priorité), mais de nouvelles usines dans

ces pays sont aussi des installations souvent en OI. Un grand exemple sur l'évolution dans le domaine de dessalement actuellement qui est en Algérie, marché le plus dynamique de dessalement de l'Afrique du Nord, où aussi la première grande usine d'OI (200 000 m³/j) a été ouverte en Février 2008. C'est la première d'une série d'autres grands projets qui augmentera la capacité de dessalement du pays à 2 Mm³ / j en 2008 et à 4 Mm³ / j d'ici 2020. [3]

A présent, sur la côte méditerranéenne, une méga-station de dessalement par la technologie d'osmose inverse a été mise en service, l'usine d'El Magtâa dans la région d'Oran en Algérie avec une capacité de 500000 m³/j qui représente également le plus grand projet de dessalement d'eau de mer par OI dans le monde.

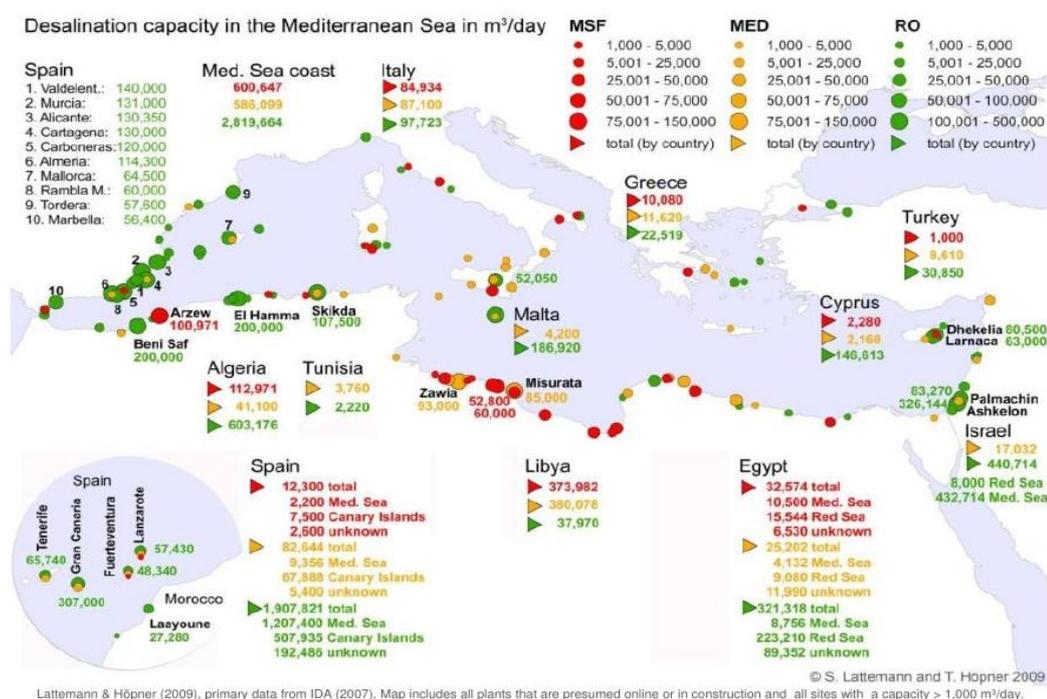


Figure I. 6: Capacités cumulatives MSF, MED et OI dans la mer Méditerranée en m³ / j. [8]

I.4. Le dessalement d'eau de mer en Algérie :

Se situant en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale et s'élevant à 1000 m³/hab/an, l'Algérie est donc considérée comme étant un pays « pauvre » en termes de potentialités hydriques.

Du fait de la pression démographique et de la diminution des ressources naturelles, la disponibilité hydrique annuelle qui s'élevait à 1500 m³/hab en 1962 s'est vue divisée par plus de la moitié en 2000. Jusqu'à atteindre, d'après les prévisions de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) les 490 m³/hab en 2020.

Cette disponibilité future, à l'horizon 2020 est représentée comme suit :

Tableau I. 1: La disponibilité annuelle en eau par habitant en Algérie en 2020. [9]

| Bassin Hydrographique | Ressources (hm ³) | Population (10 ⁶ habitants) | Disponibilité (m ³ /habitant) |
|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Oranie Chott-Chergui | 1400 | 6.3 | 220 |
| Chélif | 2072 | 7 | 300 |
| Algérois-Soumma-Hodna | 5125 | 15.8 | 320 |
| Const-Medj-Méllegue | 5048 | 10 | 500 |
| Sud | 5436 | 4.9 | 1120 |
| TOTAL | 19081 | 44 | 2460 |

Comme le montre clairement le tableau ci-dessus, les ressources en eau en Algérie s'amointrissent continuellement, de plus, elles sont extrêmement irrégulières, leur exploitation devient de plus en plus difficile, d'autant plus qu'elles sont exposées à des risques de pollutions importants et qui compromettent donc leurs utilisation dans certaines régions.

En effet, les écoulements de surface avaient été estimés pendant la période coloniale à 15 milliards de m³ pour les bassins tributaires de la Méditerranée (123 000 km²), c'est-à-dire sans tenir compte des bassins qui dépendent des chotts. Dans les dernières études menées dans le cadre du Plan National de l'eau par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et de la Direction des Grands Aménagements Hydrauliques (DGAIH) et qui intègrent des années de sécheresse, les ressources en eau de surface sont évaluées à 12.4 milliards de m³ réparties par bassin hydrographique selon le tableau I.2 :

Tableau I. 2: Répartition des eaux de surface en Algérie. [10]

| Bassin Hydrographique | Oranie Chott Chergui | Chelif Zahrez | Algérois Soummam Hodna | Constantinois Seybouse Mellègue | Sud | Total |
|--|----------------------|---------------|------------------------|---------------------------------|------|-------|
| Ressources pot. (hm³/an) | 1025 | 1840 | 4380 | 4500 | 600 | 12.34 |
| Pourcentage (%) | 8.7 | 15.7 | 37.3 | 38.3 | 0.48 | 100 |

Quant aux eaux souterraines, elles sont généralement faibles et localisées dans le Sahara. Les lits d'oueds alimentent quelques nappes phréatiques souvent saumâtres.

Au Nord, les précipitations sont irrégulières et mal distribuées géographiquement, elles augmentent d'Ouest en Est. [10]

La mobilisation des eaux souterraines au Nord du pays a atteint son seuil maximal.

L'augmentation des débits de pompage de ces eaux aura pour effets la surexploitation des nappes superficielles et la détérioration de la qualité des eaux. Cette situation pénalisera de ce fait tous les secteurs (population, industrie et agriculture).

De ce fait, l'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétrolière et sidérurgique.

Le recours au dessalement en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est quasi-inexistant.

I.5. L'expérience algérienne dans le dessalement :

En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié D'Arzew (ville côtière à l'Ouest du pays). Le procédé utilisé est la distillation à multiple effet.

En 1969, une autre installation (MSF) a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j.

En 1980, l'installation de l'usine de Mostaganem a été la plus grande du monde à cette époque, produisant environ 57 600 m³/j.

D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire au processus des complexes de production d'électricité (Cap Djinet à l'Est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

➤ Les stations monoblocs :

A l'issue de cette première expérience, considérée comme une réussite, de nombreuses petites stations de dessalement, dites « monobloc » ont été mises en place. En effet, l'algérienne des eaux, a amorcé la première expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la réalisation de 23 stations monobloc, d'une capacité totale de 57.500 m³/j, dans le cadre d'un programme d'urgence, dans les wilayas de Tlemcen, Oran, Tipaza, Alger, Boumerdès, Skikda et Tizi Ouzou.

Jusque là, 20 petites stations de dessalement d'eau de mer pour une capacité de 53 000 m³/j ont été réalisées et réparties à travers 08 wilayas. Cette opération a fait l'objet d'une passation de deux marchés. [3]

08 stations sur 05 sites d'une capacité globale de 22 500 m³/j ont été réalisées par l'entreprise Allemande LINDE-KCA, représentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. 3: Stations réalisées par LINDE-KCA [3]

| N° | Wilaya | Site | Commune | Capacité (m ³ /j) |
|--------------|---------|----------------|------------|------------------------------|
| 1 | Tlemcen | Ghazaouet | Ghazaouet | 2500 |
| 2 | | Ghazaouet II | Ghazaouet | 2500 |
| 3 | Tipaza | Bou-Ismaïl | Bou-Ismaïl | 5000 |
| 4 | Alger | Champ de tir | Zeralda | 2500 |
| 5 | | Champ de tir 2 | Zeralda | 2500 |
| 6 | | Palm Beach | Staouali | 2500 |
| 7 | | La Fontaine | Ain Benian | 2500 |
| 8 | | La Fontaine | Ain Benian | 2500 |
| Total | | 8 stations | | |

11 stations sur 07 sites d'une capacité globale de 30 500 m³/j ont été réalisées par l'entreprise Algérienne HYDRO-TRAITEMENT, représentées ci-dessous :

Tableau I. 4: Stations réalisées par HYDRO-TRAITEMENT [3]

| N° | Wilaya | Site | Commune | Capacité (m ³ /j) |
|--------------|------------|----------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | Alger | La Fontaine 3 | Ain Benian | 2500 |
| 2 | | Cap Caxine | Hammamet | 2500 |
| 3 | | Bateau Cassé 1 | Bordj El Kifane | 2500 |
| 4 | | Bateau Cassé 2 | Bordj El Kifane | 2500 |
| 5 | | Bateau Cassé 3 | Bordj El Kifane | 2500 |
| 6 | | Reghaïa Plage | Reghaïa | 2500 |
| 7 | Boumerdes | Corso | Corso | 5000 |
| 8 | Skikda | Larbi B.Mhidi1 | Larbi B.Mhidi | 2000 |
| 9 | | Larbi B.Mhidi2 | Larbi B.Mhidi | 3000 |
| 10 | | Larbi B.Mhidi3 | Larbi B.Mhidi | 2500 |
| 11 | | Larbi B.Mhidi4 | Larbi B.Mhidi | 2500 |
| 12 | Tizi-Ousou | | | 2500 |
| Total | | 12 stations | | 30500 |

➤ **Les grandes stations de dessalement :**

Depuis l'année 2008, plusieurs stations ont été mises en service ou sont en cours de construction. Nous les retrouvons dans le tableau I.5 et la figure I.7, ci-dessous :

Tableau I. 5: Les grandes stations de dessalement en Algérie [3]

| | Station | Wilaya | Capacité (10 ³ m ³ /j) | Mise en service |
|----|---------------|----------------|--|-----------------|
| 1 | Kahrama Arzew | Oran | 90 | 2005 |
| 2 | Hamma | Alger | 200 | 2008 |
| 3 | Skikda | Skikda | 100 | 2009 |
| 4 | Beni Saf | Ain Timouchent | 200 | 2009 |
| 8 | Mostaganem | Mostaganem | 200 | 2011 |
| 6 | Fouka | Alger Ouest | 100 | 2011 |
| 7 | Souk Tlata | Tlemcen | 200 | 2011 |
| 8 | Honaine | Tlemcen | 200 | 2012 |
| 9 | Cap Djinet | Boumerdes | 200 | 2012 |
| 10 | Ténès | Chlef | 200 | 2015 |
| 11 | Magtâa | Mostaganem | 500 | 2014 |
| 12 | El Taref | El Taref | 100 | Non lancé |
| 13 | Oued Sebt | Tipaza | 100 | Non lancé |
| 14 | Bejaia | Bejaia | 100 | Non lancé |

La production en eau dessalée, selon les experts, est passée de 500 000 m³/jour en 2008 à 1 100 000 m³/jour en 2009 et 2 260 000 m³/jour en 2011 pour atteindre 4 m³/j en 2020. [8]



- 📍 : Station de dessalement en phase d'exploitation
- 📍 : Station de dessalement en phase de construction

Figure I. 7: Emplacement des grandes stations de dessalement en Algérie

Chapitre II : Les différents procédés de dessalement

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons voir le fonctionnement du cœur d'une usine de dessalement qui est le procédé utilisé pour produire de l'eau potable. Depuis l'implantation des usines de dessalement, ce procédé a connu de multiples technologies qu'on détaillera ci-dessous, on fera également une comparaison entre les procédés conventionnels utilisés depuis des décennies tel que l'osmose inverse, la distillation ainsi que le récent procédé, la nano-filtration par nano-membrane.

II.2. Généralités :

Le dessalement de l'eau est un processus qui permet de supprimer les sels de l'eau salée ou saumâtre. Plusieurs procédés de dessalement ont été mis au point sur le marché mondial ; le choix d'utilisation de chacun d'eux est relatif à la disponibilité de la source d'énergie qui fait fonctionner l'appareillage de dessalement, les principales techniques de dessalement mondialement connues sont (figure II.1) :

- **Les procédés thermiques** qui se basent sur le principe de l'évaporation de la successive condensation
- **Les techniques membranaires** qui utilisent les capacités de certaines membranes à retenir les particules dissoutes dans l'eau. [11]

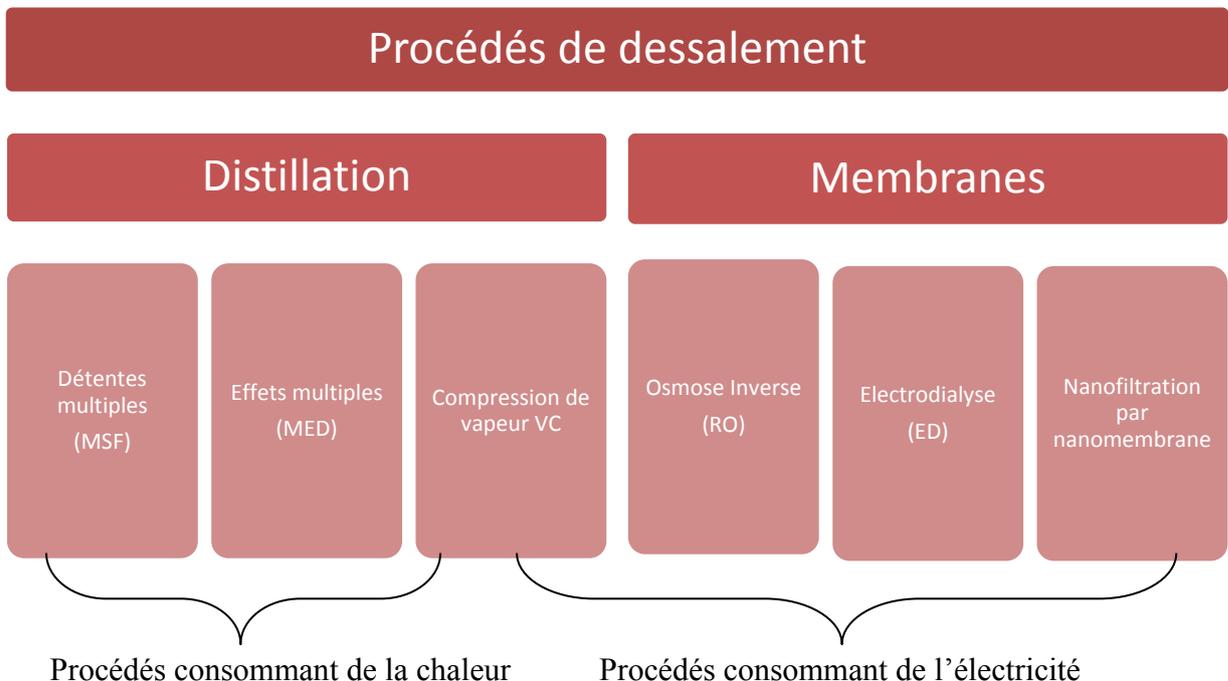


Figure II. 1: Les divers procédés de dessalement

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes

- une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite. [11]

II.3. Procédés de distillation :

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée, avec production de vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour former de l'eau douce.

Dans l'usine, l'eau est chauffée jusqu'à ébullition pour produire la quantité maximale de vapeur. Pour que le procédé soit économiquement rentable, la pression appliquée sur l'eau à bouillir est ajustée pour maîtriser le point d'ébullition. [5]

II.3.1. Distillation par détente à étages multiples (MSF) :

Dans le procédé MSF, l'eau de mer est chauffée dans une chaudière. Cela est généralement fait en condensant la vapeur sur un faisceau de tuyaux véhiculant de l'eau de mer qui passe à travers la chaudière. Cette eau de mer chauffée coule alors dans une autre cuve correspondant à un autre étage où la pression ambiante est plus basse, si bien que l'eau commence aussitôt à bouillir. L'introduction soudaine de l'eau chauffée à chaque étage déclenche une détente et son évaporation instantanée («flash»). En général, seule une petite fraction de cette eau est convertie en vapeur, en fonction de la pression maintenue à l'étage, étant donnée que l'ébullition continuera jusqu'à ce que l'eau retombe au point d'ébullition. [5]

Le concept de distillation de l'eau dans des étages successifs dont chacun est maintenu à la pression inférieure à la pression saturante correspondant à la température de l'eau dans l'étage n'est pas nouveau et est appliqué depuis plusieurs décennies. La figure suivante illustre le schéma d'une usine de type MSF. [12]

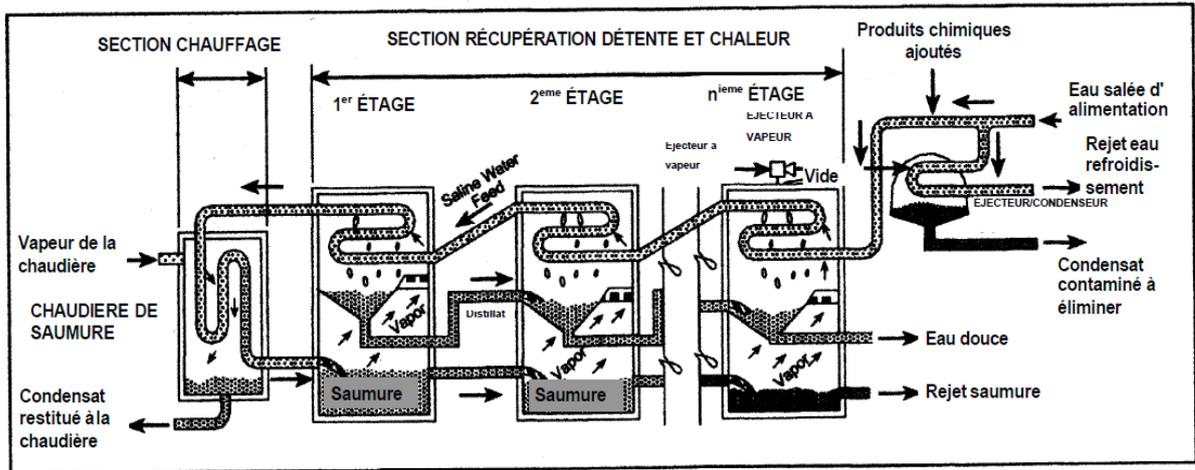


Figure II. 2: Schéma d'une usine de distillation par détente à étages multiples (MSF). [12]

II.3.2. Distillation à effets multiples (MED) :

Dans des évaporateurs à effets multiples (ME), la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second, et la chaleur de sa condensation sert à faire bouillir l'eau salée dans celui-ci. Par conséquent, le second évaporateur agit comme un condenseur de la vapeur provenant du premier, et l'action de cette vapeur dans le second évaporateur est identique à celle de la vapeur de chauffage dans le premier. De même, le troisième évaporateur agit comme condenseur pour le second, et ainsi de suite. Ce principe est illustré sur la figure II.3. Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un «effet».

Certaines des premières usines de distillation d'eau utilisaient le procédé ME, mais les unités MSF, en raison de leur meilleure résistance à l'entartrage, ont remplacé ce procédé. Cependant, à partir des années 1980, le procédé ME a connu un regain de faveur et il a été mis en place des installations de conception nouvelle introduisant une exploitation à des températures plus basses, ce qui a permis de réduire au minimum la corrosion et l'entartrage. [5]

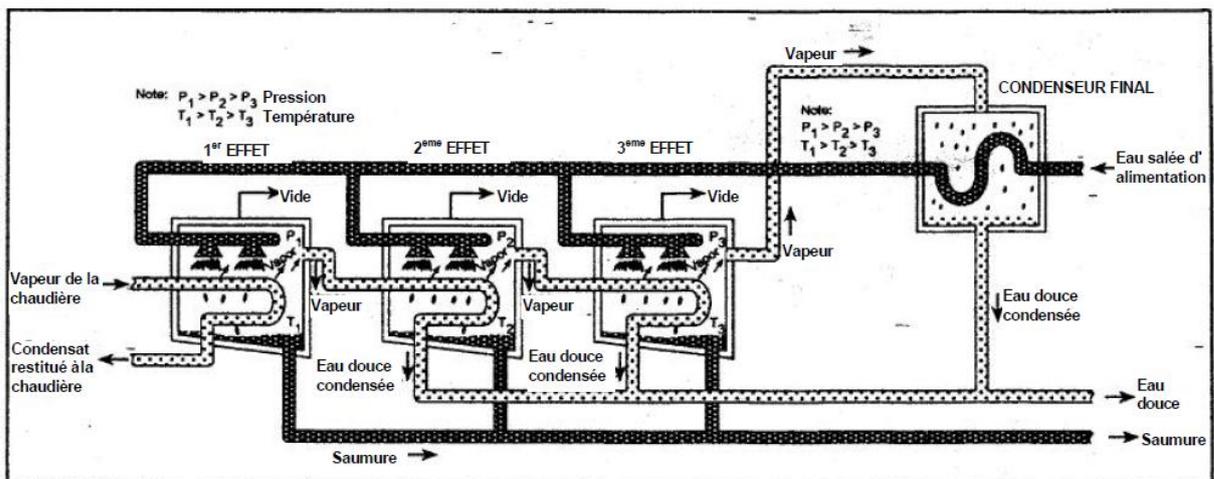


Figure II. 3: Schéma d'une usine de distillation à effets multiples (MED) [12]

II.3.3. Distillation par compression de vapeur (VC) :

Le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) est utilisé pour des installations de dessalement de petite ou moyenne capacité. Le procédé par compression de vapeur diffère des autres procédés de distillation en ce qu'il n'utilise pas de source de chaleur extérieure mais la compression de la vapeur d'eau (au moyen, par exemple, d'un compresseur pour accroître la pression de la vapeur et la température de condensation).

La figure suivante illustre une méthode simplifiée dans laquelle un compresseur mécanique sert à produire de la chaleur pour l'évaporation. Toute la vapeur est entraînée par un compresseur mécanique et introduite comme vapeur de chauffage dans le premier effet après compression où elle condense sur le côté froid de la surface caloporteuse et est distribuée sur l'autre côté où elle bout et s'évapore en partie, produisant davantage de vapeur.

Les unités VC sont souvent utilisées pour les stations de villégiature, les zones industrielles et de forage ne pouvant avoir un accès facile à de l'eau douce. Leur simplicité et facilité d'exploitation se prêtent bien à de petites installations.

Les unités mécaniques VC ont une capacité variable de quelques litres à 3 000m³/jour. [5]

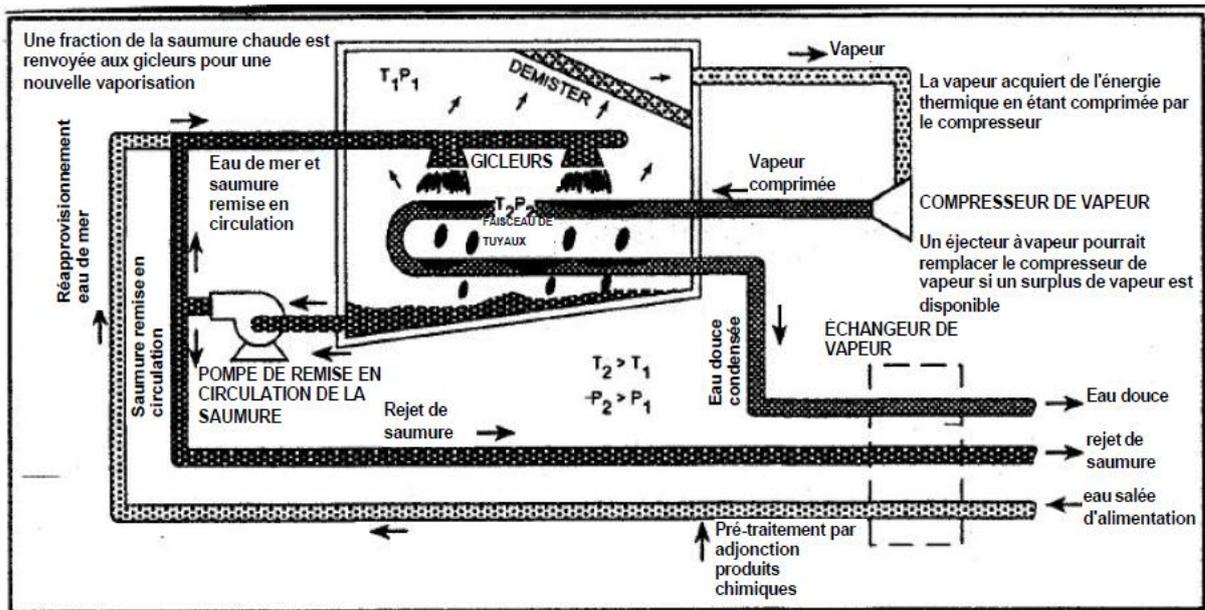


Figure II. 4: Schéma d'une usine de distillation par compression de vapeur (VC). [12]

II.3.4. Perspectives de la distillation :

Les perspectives de développement de la distillation pour le dessalement de l'eau de mer sont importantes, nous citerons les points forts de ce procédé :

- Les performances et les coûts de la distillation sont pratiquement indépendants de la salinité de l'eau de mer à traiter ;
- Les procédés de distillation ne nécessitent pas de prétraitement sophistiqué de l'eau de mer : une filtration classique et une chloration pour éviter la prolifération d'organismes marins sont généralement suffisantes ;
- La salinité de l'eau produite par distillation est très faible (de 5 à 30 mg/l), on peut même atteindre 1 mg/l, grâce à l'utilisation de séparateurs performants dans les évaporateurs ;
- Une grande partie de l'énergie nécessaire est constituée par l'énergie à bas niveau (température comprise entre 80°C et 110°C) que l'on peut obtenir dans certains cas à des coûts très faibles ;
- Unité de distillation moins sensible aux problèmes de colmatage ;
- Site disposant d'énergie dégradée à coût très faible ;
- Obtention d'une eau pure pour l'industrie qui atteint 5 à 30 ppm de salinité. [3]

II.4. Procédés membranaires :

Le procédé de traitement des eaux par membrane d'osmose inverse est une des techniques de filtration membranaire. Il est utilisé en dessalement des eaux saumâtres, des eaux de mer et également pour la réutilisation des eaux usées urbaines et industrielles.

L'objectif principal de cette technologie est l'élimination des sels et des substances organiques présentes dans les eaux ainsi qu'une partie des bactéries et des virus. En dessalement des eaux de mer, l'osmose inverse reste en compétition avec les procédés thermiques (multi flash ou multi effet).

Le choix entre ces deux technologies dépend essentiellement des coûts énergétiques (électricité et vapeur), de la qualité de l'eau brute à traiter ou de l'eau dessalée à obtenir.

[13, 5, 3]

II.4.1. L'osmose inverse :

L'osmose est un principe naturel. Si deux solutions aqueuses ayant une concentration saline différente, sont séparées par une membrane, l'eau passe spontanément de la solution la moins concentrée en sel à la plus concentrée.

Tandis que l'osmose inverse est basée sur le principe opposé. Elle consiste à appliquer à cette eau salée une pression importante supérieure à la pression osmotique, qui nécessite une consommation énergétique élevée, pour la faire passer à travers une membrane. Au terme de l'opération, seules les molécules d'eau traversent la membrane, fournissant ainsi de l'eau douce (figure II.5).

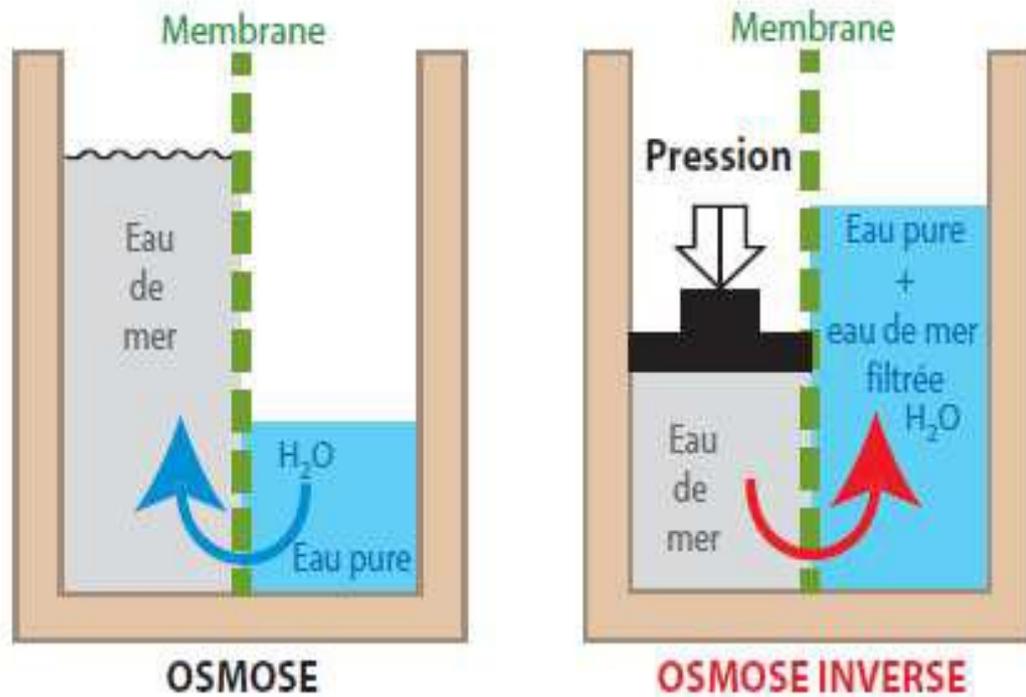


Figure II. 5: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse. [14]

L'écoulement s'effectue en continu tangentielle à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit Q_0) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes (figure II.6):

- ▶ une partie (débit Q_p) passe à travers la membrane qui représente le perméat.
- ▶ une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou retentât) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

L'osmose inverse progresse sur le marché de dessalement pour les raisons suivantes :

- ▶ Amélioration des performances des membranes d'osmose inverse (augmentation de la surface, réjection, perméabilité, matériaux...)
- ▶ Amélioration des performances des technologies de récupération d'énergie.
- ▶ Mise en œuvre plus facile.
- ▶ Effet de tailles des projets.
- ▶ Baisse des prix des équipements et des membranes.
- ▶ Eprouvée et maîtrisable techniquement.
- ▶ Modulable et flexible eu égard la demande en eau. [11]

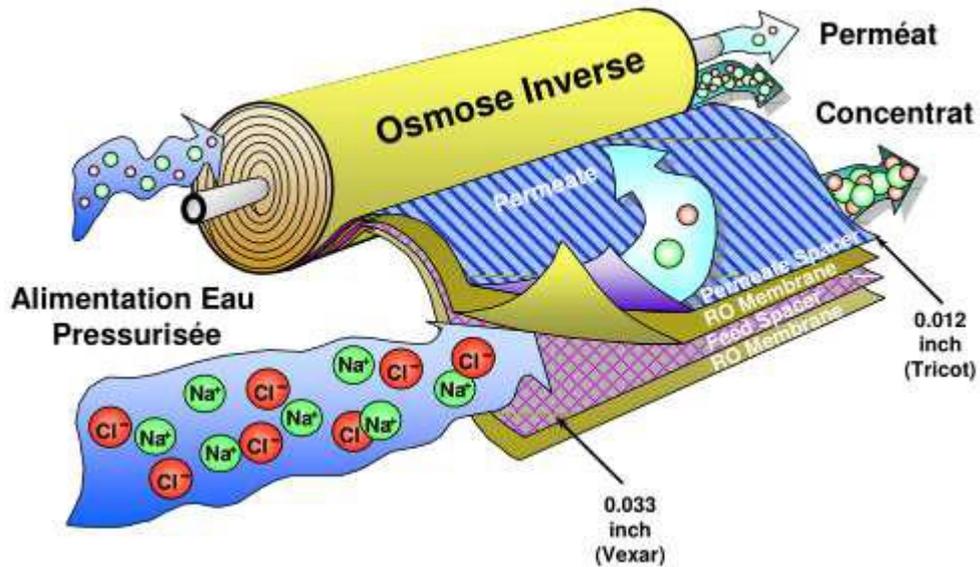


Figure II. 6: Membrane d'osmose inverse [14]

➤ **Schéma général d'une installation d'osmose inverse :**

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants (figure II.7) :

- Le poste de prétraitement;
- Module avec la membrane;
- La pompe haute pression;
- Un système de récupération d'énergie;

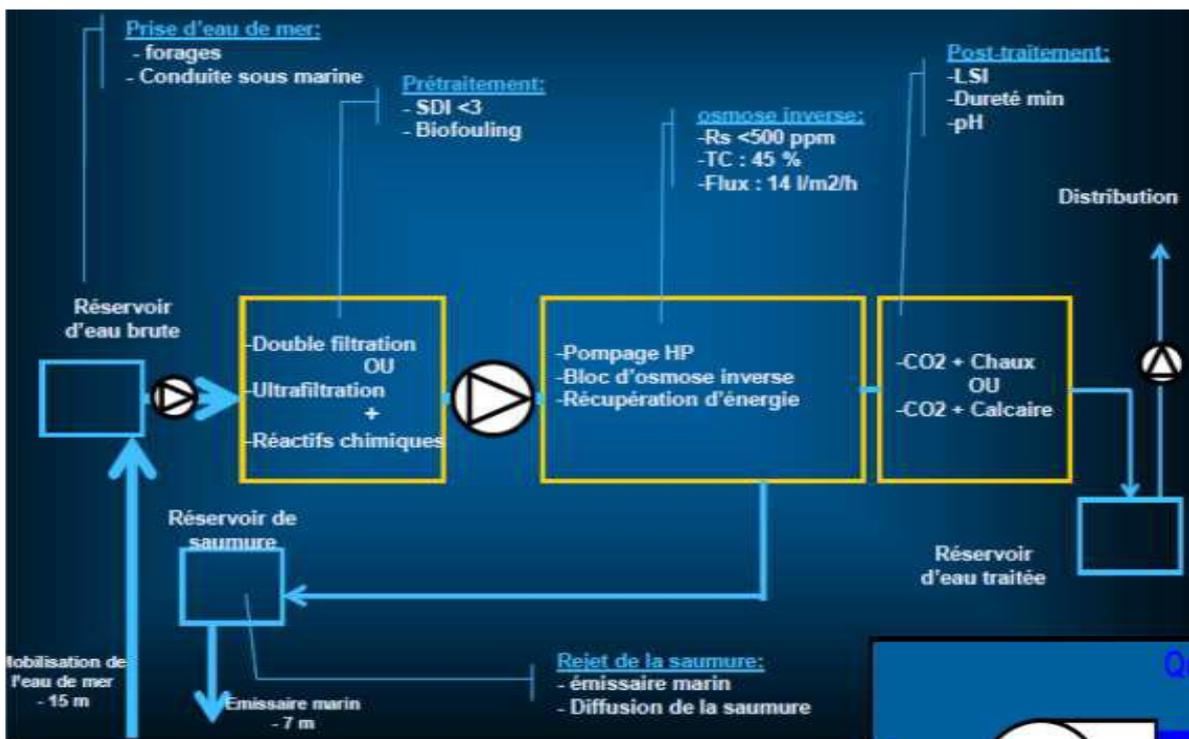


Figure II. 7: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. [8]

II.4.2. L'électrodialyse :

L'électrodialyse consiste à transférer des ions de sels dissous à travers des membranes qui ne laisse pas passer l'eau épurée, le mouvement des ions est provoqué par un champ électrique, l'électrode négative (cathode) attire les cations, tandis que les anions se déplacent vers l'électrode positive (anode) (figure II.8).

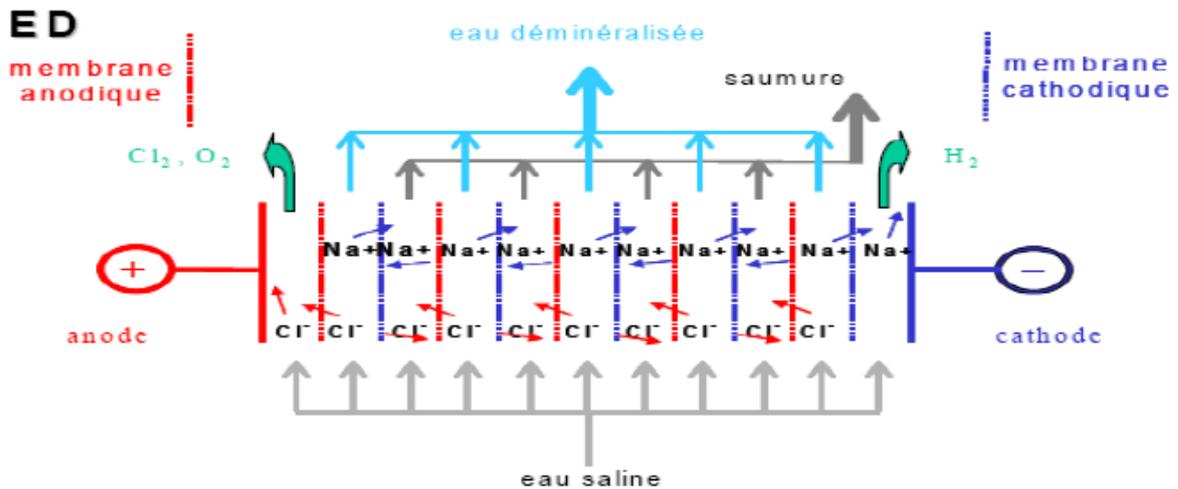


Figure II. 8: Principe de dessalement par l'électrodialyse. [14]

Les membranes utilisées en électrodialyse sont des membranes échangeuses d'ions qui se présentent sous la forme de feuilles dont l'épaisseur est comprise entre 0.1 et 0.8mm. Du point de vue propriétés on distingue deux types de membranes :

- Les membranes échangeuse de cations qui sont perméables uniquement aux cations et dont le groupement fonctionnel est en général un groupement acide sulfonique (SO_3^-).
- Les membranes échangeuses d'anions qui sont perméables uniquement aux anions et dont le groupement fonctionnel est en général un groupement ammonium quaternaire (NR_3^+). [11]

II.4.3. La nano-filtration par nano-membrane :

C'est l'une des recherches les plus prometteuses dans le domaine du dessalement et des nanotechnologies, elle traite d'une membrane de filtration à base de nanotubes de carbone créée par une équipe de chercheur du Lawrence Livermore National Laboratory. Cette membrane, dont les pores sont composés de nanotubes de carbone double feuillet de moins de deux nanomètres, était à l'origine développée pour étudier la mécanique des fluides.

Selon les résultats obtenus, la perméabilité observée pour cette membrane est supérieure à celle des membranes commerciales de polycarbonate utilisées pour l'osmose inverse et ce même si ses pores sont plus étroits.

Malgré le côté innovateur du procédé, cette section présente un inventaire des risques et des impacts anticipés pour cette technologie de dessalement. [15]

II.5. Comparaison des techniques de dessalement : osmose inverse, distillation et nano-membrane :

II.5.1. Méthodologie :

Afin de répondre aux questions soulevées à propos des techniques de dessalement, nous procéderons à la comparaison des technologies de dessalement conventionnelles avec le procédé utilisant une membrane de nanotubes de carbone. Les critères d'évaluation décrits précédemment seront évalués pour chacun des procédés. Si l'information pertinente n'est pas disponible, une mention sera faite à cet effet. Le Tableau II.1 présente le gabarit qui sera utilisé pour présenter les impacts associés à chaque procédé analysé.

Tableau II. 1: Gabarit de présentation des impacts par technologie. [15]

| Aspect | Critères | Description | Évaluation de l'impact |
|-----------|---|-------------|------------------------|
| Eco | Couts initiaux | | |
| | Couts de maintenance et d'opération | | |
| Technique | Consommation énergétique | | |
| | Capacité de traitement | | |
| | Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile | | |
| Environ | Ecosystème marin | | |
| | Bruit | | |
| | Source d'énergie | | |
| | Gestion des résidus | | |
| Sociaux | Réponse au besoin | | |
| | Main d'œuvre | | |
| | Acceptation | | |
| | Santé humaine | | |

Dans le tableau en question, les critères seront évalués afin de savoir si les technologies évaluées engendrent des impacts positifs, négatifs ou encore si les impacts potentiels sont inconnus ou s'ils ne seront pas évalués. La colonne « Symbole » du Tableau II.2 présente les valeurs possibles pour la colonne d'évaluation de l'impact tandis que la colonne « Valeur » permettra de quantifier l'impact total associé à un procédé par l'addition des résultats obtenus lors de l'évaluation des impacts.

Tableau II. 2: Échelle de valeur et symboles pour l'évaluation des impacts. [15]

| Description | Commentaires | Symbole | Valeur |
|-------------------|---|---------|--------|
| Positif | Aspect dont l'impact est positif | + | 2 |
| Négatif | Aspect dont l'impact est négatif | - | -2 |
| Inconnu | Aspect dont l'impact est inconnu | * | -1 |
| Sans objet | Aspect dont l'impact ne sera pas évalué | S/O | 0 |

Il va de soit qu'une valeur positive soit choisie pour un impact positif et que le contraire s'applique pour un impact négatif. Cependant, afin de représenter l'importance de rester sur ses gardes en cas d'incertitude et pour bien illustrer la précaution dont il faut faire preuve devant les risques hypothétiques, une valeur négative a également été donnée pour les impacts dont l'issue réelle est inconnue à l'heure actuelle. Ceci permettra d'avoir un poids associé aux impacts inconnus qui auront été abordés lorsqu'on fait la somme des impacts totaux par procédé. Ceci n'aurait pas été possible si une valeur nulle avait été donnée à l'inconnu comme c'est le cas pour les impacts non évalués. Les résultats auraient alors été faussés parce qu'elles n'auraient pas tenu compte d'un nombre important d'impacts potentiels.

II.5.2. Procédé d'osmose inverse :

L'osmose inverse présente les avantages suivants par rapport à la distillation: faible consommation énergétique, coût d'investissement plus faible, gamme étendue de capacités allant jusqu'à la production de plus de 100 000 m³ d'eau par jour, salinité de l'eau produite qui convient bien aux usages domestiques. Le Tableau II.3 présente l'évaluation des impacts associés à ce procédé. [15]

Tableau II. 3: Évaluation du procédé d'osmose inverse. [15]

| Aspec | Critères | Description | Évaluation de l'impact |
|------------------|---|---|------------------------|
| Eco | Couts initiaux | Moindre que distillation | + |
| | Couts de maintenance et d'opération | Nécessite un prétraitement | - |
| Technique | Consommation énergétique | Moindre que pour la distillation | + |
| | Capacité de traitement | Le procédé consomme moins d'eau de mer que la distillation pour produire la même quantité d'eau potable | + |
| | Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile | Susceptible au colmatage et à la dégradation | - |
| Environ | Ecosystème marin | Les produits chimiques utilisés lors du prétraitement peuvent contaminer le rejet | - |
| | Bruit | Utilisation de turbines et de pompes à haute pression bruyantes | - |
| | Source d'énergie | Consommation moindre | + |
| | Gestion des résidus | Les membranes ont une courte durée de vie et constituent des déchets | - |
| Sociaux | Réponse au besoin | Possibilité d'usine à grande capacité | + |
| | Main d'œuvre | Procédé répandu et bien connu | + |
| | Acceptation | Procédé le plus populaire | + |
| | Santé humaine | Eau produite convient bien aux usages domestiques | + |

Légende : + Impact positif ; - Impact Négatif ; * Impact Inconnu ; S/O non évalué

II.5.3. Procédé par nano-membrane :

Malgré tout le potentiel que possède la nano-membrane de filtration, l'incertitude concernant les risques qui lui sont réellement associés et qui sont encore à l'étude pour les nanotubes de carbone sont des handicaps importants. Des études additionnelles coûteuses seront nécessaires afin de répondre aux nombreuses questions soulevées.

Le Tableau II.4 présente un résumé des enjeux dont il a été question dans les sections précédentes ainsi qu'une évaluation des impacts selon l'échelle de valeur présentée au Tableau II.1.

Tableau II. 4: Évaluation du procédé à base de nanotubes de carbone. [15]

| Aspec | Critères | Description | Évaluation de l'impact |
|------------------|---|---|------------------------|
| Eco | Coûts initiaux | Utilisation des infrastructures existantes | + |
| | Coûts de maintenance et d'opération | Aucune mention que le prétraitement de l'eau serait éliminé. Indisponibilité, coût prohibitif au stade actuel de recherche | - |
| Technique | Consommation énergétique | Pression nécessaire moins élevée que l'osmose inverse | + |
| | Capacité de traitement | Plus élevée que pour l'osmose inverse car la perméabilité est plus grande | + |
| | Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile | Facilité de fabrication non prouvée au stade actuel de recherche ; Selon les données actuelles, les nanotubes double feuillets sont peu sujets au blocage. Vie utile et dégradation inconnues | * |
| Environ | Ecosystème marin | Possibilité de rejet de nanotubes si la membrane se détériore | - |
| | Bruit | Idem aux autres alternatives | - |
| | Source d'énergie | Moins grande consommation d'énergie | + |
| | Gestion des résidus | Devra tenir compte de la libération potentielle dans l'environnement | * |
| Sociaux | Réponse au besoin | Atteinte d'un niveau de dessalement incertain | * |
| | Main d'œuvre | Exposition des travailleurs | - |
| | Acceptation | Déjà il existe des mouvements anti nanotechnologie, la communication sera importante | - |
| | Santé humaine | La recherche sur la toxicité des nanotubes de carbone identifie certains problèmes sur les rongeurs. L'application du principe de précaution sera essentielle | - |

Légende : + Impact positif ; - Impact Négatif ; * Impact Inconnu ; S/O non évalué

II.5.4. Procédé par distillation :

Une usine de dessalement faisant appel à la distillation est plus coûteuse initialement et demande une plus grande quantité d'énergie qu'une installation d'osmose inverse. Cependant puisqu'il ne requiert pas de prétraitement complexe ou de membrane, le procédé est moins compliqué et produit moins de rejets tangibles. Le Tableau 2.5 présente l'évaluation des impacts associés au dessalement pas distillation.

Tableau II. 5: Évaluation du procédé de distillation. [15]

| Aspec t | Critères | Description | Évaluation de l'impact |
|------------|---|---|---------------------------|
| Eco | Coûts initiaux | Les coûts de démarrage sont plus élevés que pour l'osmose inverse | - |
| | Coûts de maintenance et d'opération | Procédé très fiable et sans membrane | + |
| Technique | Consommation énergétique | Très élevée due à la nécessité de chauffer l'eau pour l'évaporation | - |
| | Capacité de traitement | | + |
| | Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile | Non évaluée puisqu'il s'agit d'un procédé thermique | S/O |
| Environ | Ecosystème marin | Rejet d'eau ayant une température plus élevée que le milieu récepteur | - |
| | Bruit | Ne nécessite pas l'utilisation de pompe à haute pression et de turbine, il est donc moins bruyant | + |
| | Source d'énergie | Très énergivore | - |
| | Gestion des résidus | Aucune membrane donc moins de déchets produits | + |
| Sociaux | Réponse au besoin | Possibilité d'usine à grande capacité | + |
| | Main d'œuvre | Procédé répandu et bien connu | + |
| | Acceptation | Procédé populaire et accepté | + |
| | Santé humaine | La production d'énergie pollue et a un impact sur la santé | - |

Légende : + Impact positif ; - Impact Négatif ; * Impact Inconnu ; S/O non évalué

II.5.5. Comparaison des différentes technologies :

Le Tableau II.6 présente les résultats de l'évaluation des alternatives dont il a été question précédemment. Dans celui-ci, les impacts positifs, négatifs, inconnus ou incertains ont été associés aux valeurs correspondantes établies dans le Tableau II.2. Suite à cela, les sous-totaux par aspect ont été calculés avant de faire la somme pour l'ensemble des critères pour chaque alternative comparée.

Étant donné que des poids positifs sont associés aux impacts positifs et que des poids négatifs sont associés aux impacts négatifs ou inconnus, le Tableau II.6 permet de voir en un coup d'œil quelle technologie comporte le plus d'impacts positifs par aspect en regardant les rangées « Sous-totaux » et dans son ensemble en consultant la rangée « Totaux ». [15]

Tableau II. 6: Présentation des résultats comparatifs et des totaux

| Aspec | Critères | Nanotubes de carbone | Osmose inverse | Distillation |
|------------------|---|----------------------|----------------|--------------|
| Eco | Couts initiaux | 2 | 2 | -2 |
| | Couts de maintenance et d'opération | -2 | -2 | 2 |
| | Sous totaux - économique | 0 | 0 | 0 |
| Technique | Consommation énergétique | 2 | 2 | -2 |
| | Capacité de traitement | 2 | 2 | 2 |
| | Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile | -1 | -2 | 0 |
| | Sous totaux - technique | 3 | 2 | 0 |
| Environ | Ecosystème marin | -2 | -2 | -2 |
| | Bruit | -2 | -2 | 2 |
| | Source d'énergie | 2 | 2 | -2 |
| | Gestion des résidus | -1 | -2 | 2 |
| | Sous totaux - environnement | -3 | -4 | 0 |
| Sociaux | Réponse au besoin | -1 | 2 | 2 |
| | Main d'œuvre | -2 | 2 | 2 |
| | Acceptation | -2 | 2 | 2 |
| | Santé humaine | -2 | 2 | -2 |
| | Sous totaux – sociaux | -1 | 8 | 4 |
| | Totaux | -7 | 6 | 4 |

Les résultats obtenus pour chacun des aspects évalués sont abordés dans les paragraphes suivants. Il sera par la suite question des résultats totaux.

II.5.5.1. Aspects économiques :

À première vue, du point de vue des coûts, aucune des technologies retenues pour l'étude ne démontre un avantage particulier. Si l'investissement initial est moindre, les coûts d'entretien et de fonctionnement sont plus élevés par la suite et vice versa.

Par contre, l'énergie nécessaire au procédé de distillation a un coût élevé et il se doit d'être considéré dans le calcul du coût de production de l'eau. Pour un projet où, techniquement, l'osmose inverse et la distillation sont des alternatives, l'osmose inverse est environ 15% moins chère.

En ce qui a trait au procédé de dessalement utilisant la nano-membrane faite de nanotubes de carbone, les coûts ont été considérés identiques à ceux d'une usine d'osmose inverse.

Ces membranes étant considérées pour remplacer les membranes actuelles le procédé quoique légèrement modifié ferait, selon les hypothèses actuellement proposées, appel aux mêmes installations. [15]

II.5.5.2. Aspects techniques :

En ce qui a trait aux enjeux techniques, la distillation est largement désavantagée en raison de sa consommation d'électricité très élevée. Par contre, ce procédé ne nécessite pas de membranes, il n'y a donc pas de risque de dégradation ou de colmatage dans les installations. Quel que soit le procédé évalué, ils ont tous techniquement une capacité de traitement variable capable d'être étendue selon les besoins.

Le procédé utilisant une nano-membrane vise l'utilisation de membranes plus perméables et moins sujettes au colmatage. Il nécessiterait par le fait même une plus faible quantité d'énergie. Il se retrouve donc avec une légère avance sur le procédé d'osmose inverse traditionnelle et loin devant la distillation d'un point de vue des enjeux techniques. [15]

II.5.5.3. Aspects environnementaux :

Comme il fut mentionné dans les chapitres précédents, les procédés de dessalement sont associés au rejet d'une saumure très saline ainsi qu'à d'autres rejets d'effluents provenant du prétraitement de l'eau brute ou de la vidange des systèmes. Dans le cas des procédés thermiques de dessalement, une élévation de la température est également notée.

Ils ont donc tous leur lot d'impacts négatifs sur l'environnement mais les critères évalués avantagent le procédé de distillation puisqu'il génère moins de pollution sonore et de résidus. Pourtant, dans un article publié en 2005, Meerganz Von Medeazza fait remarqué que « les émissions atmosphériques et l'impact environnemental associés à l'osmose inverse est d'une unité de grandeur moindre que celles correspondant à la distillation à détente étagée ou à la distillation à multiples effets ». [15]

II.5.5.4. Aspects sociaux :

Loin derrière les deux autres procédés en ce qui a trait aux aspects sociaux, le procédé issu des nanotechnologies rencontre un lot d'incertitudes. En effet, les nanotechnologies suscitent déjà un ensemble de réticences puisqu'il n'est pas prouvé qu'elles soient sans risque. Si les résultats sur la toxicité des nanotubes de carbone telle qu'étudiée sur les rongeurs sont transposés sur les humains, leur fabrication, leur utilisation et leur dispersion pourrait avoir des impacts importants sur la santé humaine. [15]

II.6. Conclusion :

Malgré le lot d'impacts négatifs associés aux procédés de dessalement répandus, le recours à ces solutions est en croissance constante mondialement. Les impacts négatifs de ceux-ci ne sont pas assez importants pour justifier de ne pas répondre aux besoins en eau potable. Il n'existe en effet que peu d'alternatives pour la production d'eau potable en quantité suffisante afin de satisfaire les populations.

Actuellement, lorsqu'un projet d'usine de dessalement est à l'étude, on fait très souvent le choix entre l'osmose inverse et la distillation car elles ont fait leurs preuves et ont chacune leurs forces et leurs faiblesses. La teneur en sel de l'eau, sa qualité et la disponibilité de l'énergie seront des facteurs déterminants pour la sélection du procédé.

Étant donné que le dessalement continuera d'être une solution aux besoins en eau, existe-t-il des moyens de réduire les impacts engendrés? Est-ce que la nano-membrane à base de nanotubes de carbone est intéressante lorsqu'elle est comparée aux technologies actuelles?

Avec les résultats obtenus dans cette étude comparative, la nano-membrane à base de nanotubes de carbone est loin derrière et ne se démarque pas comme il aurait été possible de le penser à la lecture des résultats de recherches publiés.

Chapitre III : Impacts sur l'environnement du dessalement de l'eau de mer.

III.1 Introduction :

Parmi les impacts dus à une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux 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 à l'accès du public et aux loisirs. Les plus importants de ces impacts concernent la qualité de l'air et la qualité de l'eau qui retentissent ensuite sur la flore, la faune et les écosystèmes marins.

En dépit du fait que des procédés différents ont été mis au point pour le dessalement, ils ont tous en commun de consister à ôter de l'eau de mer les substances minérales qui y sont dissoutes. 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 2 fois plus élevée, avec en plus les produits chimiques utilisés au cours des phases de pré-traitement 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.

Ainsi, tous les produits chimiques utilisés lors du processus de dessalement se voient ainsi rejetés en mer. En effet, les rejets des usines de dessalement ne comprennent pas seulement l'effluent de saumure concentrée mais aussi tous les désinfectants, les agents antisalissures, et les eaux chaudes.

Dans ce chapitre, nous étudierons de près le devenir de ces rejets ainsi que leurs impacts sur l'environnement marin, bien qu'à ce jour, les effets à long terme de ces modifications de l'environnement marin sont mal connus, bien que certaines études d'impact des rejets d'usines de dessalement soient en cours, notamment dans les pays du Golfe.

III.2 Origine et type des émissions et rejets :

III.2.1. Emissions atmosphériques :

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 OI).

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.

Etant donné que la technologie d'osmose inverse a un besoin en énergie inférieur à celui de la distillation MSF et que les émissions atmosphériques dues à un procédé de dessalement sont directement en rapport avec ses besoins respectifs en énergie, il va de soi que les émissions dues à l'OI sont moindres que celles dues à la MSF. [5]

L'étude d'Afgan *et al.* (1999) qui porte sur des usines de dessalement des pays du Golfe a permis de calculer des indicateurs de durabilité qui ont confirmé ce qui précède, ainsi qu'il ressort des tableaux III.1 et III.2 ci-dessous :

Tableau III. 1: Indicateurs de durabilité pour une usine MSF à production simple. [5]

| | |
|--|-------------|
| Indicateur de ressources en combustible, kg combustible/m³ | 11 |
| Indicateur environnemental pour CO₂, kg CO₂/m³ | 37 |
| Indicateur environnemental pour SO₂, kg SO₂/m³ | 0.09 |
| Indicateur environnemental pour NO_x Kg NO_x/m³ | 0.06 |

Tableau III. 2: Indicateurs de durabilité pour une usine OI avec une source locale d'énergie électrique. [5]

| | |
|--|--------------|
| Indicateur de ressources en combustible, kg combustible/m³ | 1.8 |
| Indicateur environnemental pour CO₂, kg CO₂/m³ | 6 |
| Indicateur environnemental pour SO₂, kg SO₂/m³ | 0.005 |
| Indicateur environnemental pour NO_x Kg NO_x/m³ | 0.009 |

III.2.2. 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, antitartre, antisalissures et antimousse, 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.

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

➤ **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 exemple le titane.

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 0,04-0,70 ppb, alors que pour les eaux côtières l'intervalle est de 0,01-50 ppb. Si l'on admet une valeur de 20 ppb de cuivre dans l'effluent de saumure d'une usine de dessalement ayant une capacité de 50 000 m³ par jour et un taux de conversion de l'eau de 10%, alors plus de 10 kg 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 MSF 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 OI puisque celui-ci se déroule à des températures ambiantes et que les parties métalliques du système sont surtout en acier inoxydable. Ainsi, dans les usines de dessalement la concentration de cuivre relevée dans l'eau de mer, près de l'émissaire de la saumure, est généralement inférieure à 1 ppb. [16]

➤ **Agents antitartre:**

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. 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 OI, l'acide sulfurique est utilisé avec des adjuvants polymères pour prévenir la formation de tartre. [5]

➤ **Agents antisalissures et antimousse :**

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 biofilm adhèrent des périphytes, puis des microalgues, des protozoaires et des champignons, et enfin des débris, détritus et particules inorganiques.

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. Habituellement, on ajoute du chlore à raison de 2ppm. Un procédé bien conduit vise à obtenir une concentration de chlore nulle à l'émissaire. [17]

Quant à la mousse, elle est produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multistage 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 antimousse sont habituellement des polyglycols alkylés, des acides gras et des esters d'acides gras. On ajoute habituellement ces produits à raison de 0,1 ppm, 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'OI, il est nécessaire d'ajouter des agents antimousse. [5]

La plupart des produits ajoutés lors des différentes phases de production d'eau potable par technologie de dessalement se retrouvent retenus dans la saumure concentrée à la fin du processus. Ils seront donc rejetés en mer au même titre que l'effluent de saumure.

III.2.3. 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. De plus, le concentré est généralement dilué par deux avec l'eau de refroidissement avant d'être rejeté, et par conséquent le facteur de concentration est encore plus réduit, ce qui réduit les impacts sur l'environnement.

Avec le procédé OI, le facteur de conversion varie de 30 à 70%. Dans ce cas, la salinité du concentré est de 2 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation. Nous pouvons voir dans le tableau III.3 la différence de composition chimique entre la saumure concentrée et celle de l'eau de mer, en prenant en considération une usine type en Méditerranée. [16]

Tableau III. 3: Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer. [16]

| Analyse | Eau d'alimentation mg/l | Saumure mg/l | Rapport entre les deux |
|--|----------------------------|--------------|---------------------------|
| 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 |
| NH₄⁺ | 0.004 | 0.005 | 1.25 |
| HCO₃⁻ | 195 | 256 | 1.31 |
| CO₃⁻ | Nil | Nil | |
| SO₄ | 3.162 | 5.548 | 1.75 |
| CL⁻ | 21.312 | 43.362 | 2.03 |
| F⁻ | 1..5 | 1.9 | 1.26 |
| NO₃⁻ | 2.6 | 4 | 1.54 |
| PO₄⁻ | 0-08 | 0.4 | 5 |
| NO₂⁻ | 0.03 | 0.05 | 1.67 |
| Dureté totale en CaCO₃ | 6.600 | 11.800 | 1.78 |
| Salinité Totale (TSD) | 38.951 | 63.840 | 4.64 |
| Fe⁺⁺⁺ | 0.04 | 0.05 | 1.25 |
| AL⁺⁺⁺ | 0.001 | 0.007 | 7 |
| PH | 6.33 | 3.26 | NA |
| Conductivité | 46.200 iS | 75.300 iS | NA |

III.2.4. Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI :

Dans les usines OI, le nettoyage et le stockage des membranes peuvent engendrer 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 utilisée si les membranes sont stockées pendant la fermeture de l'usine. Ces produits chimiques sont normalement épurés avant leur rejet dans la mer. [5]

III.3 Impacts sur l'environnement :

Une grille présentant les impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement est reproduite sur le tableau III.4. 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.

Tableau III. 4: Grille d'impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement. [5]

| Impact | Degré d'impact | Origine de l'impact | Technique d'atténuation |
|---|-----------------------|--|--|
| -Pollution thermique Réduction de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices. | -M | -Saumure chaude. | -Mélange de la saumure avec de l'eau froide avant le rejet. -Bassins de retenue. |
| -Effets nocifs pour les espèces thermorésistantes. | -M | | |
| -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 - Hausse du pH | -E -F -F | -Adjonction d'agents Anticorrosion et Antitartre. | -Réduction au minimum de l'utilisation de produits chimiques. -Utilisation d'additifs sans danger pour l'environnement. |

| Impact | Degré d'impact | Origine de l'impact | Technique d'atténuation |
|--|----------------|---|---|
| Pollution atmosphérique : -Plus acides -Effet de serre -Poussières | -F -M -M | -Utilisation de combustibles et activités d'élimination. | -Utilisation d'énergies propres et renouvelables autant que possible. -Application de systèmes mixtes et de production couplée. -Purification des gaz avant émission dans l'atmosphère. |
| -Sédiments Turbidité et limitation de la Photosynthèse. -Difficultés de respiration chez les animaux Aquatiques. | -M -M | -Perturbation des sables par des activités d'excavation et de dragage. | -Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage. -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 : Elevé / M : Moyen / F : Faible | | | |

Ainsi, 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 photosynthèse 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.

III.4 Effets de la saumure concentrée (conclusion) :

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.

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. [18]

La température d'effluent a une influence importante sur les propriétés physiques de l'eau de mer et peut détériorer sa qualité. La solubilité d'oxygène diminue avec l'augmentation de la température, cette température élevée de l'eau accélère la respiration de bactéries et peut promouvoir l'anoxie ou l'hypoxie contribuant à l'élimination de la vie aquatique, en particulier durant l'été. Les effets de ces rejets sur le milieu marin, comme l'ont démontré de nombreuses études, sont les suivants :

- Anoxie au niveau des fonds marins : la colonne d'eau se trouve divisée en deux : l'eau de mer constitue la couche supérieure et la saumure la couche inférieure. Dans des conditions de calme du milieu récepteur, avec un faible renouvellement des algues, la présence d'espèces benthoniques, consommatrices d'oxygène, peut conduire à des périodes d'anoxie du fond marin. [19]
- Diminution de la lumière : la présence d'un fluide hypersalin modifie le coefficient de réflexion de la lumière filtrée, provoquant la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales.
- Affection des espèces marines: on a détecté des réductions significatives dans les communautés des échinodermes (utilisés comme bio indicateurs pour leur sensibilité) près de la zone de rejet. [20]
- Affection des fanerogames marines : la mer méditerranée est la zone du monde où le plus grand nombre d'études a été réalisé à ce sujet. On a détecté des effets négatifs sur les fanerogames marines. Notamment, en ce qui concerne la Posidonia océanique, on a détecté une augmentation de la mortalité des individus, apparition de nécrose sur les tissus et plus grandes chutes des feuilles. [16]

Chapitre IV : Description de la station de dessalement de Magtâa

IV.1. Situation géographique de la station :

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer de Magtaa est localisé dans la wilaya d'Oran, daïra de Béthioua, commune de Mers El Hadjadj au niveau de la ferme Moza à 3 km du chef lieu.

A 48 km à l'Est de la wilaya d'Oran et à environ 30 km à l'Ouest de la wilaya de Mostaganem, le site est sillonné par la route nationale RN°11 en provenance de Mostaganem et en direction d'Oran.

De même le site du projet est situé à 5 km de la zone industrielle d'Arzew.



Figure IV. 1: Emplacement de l'usine de dessalement de Magtâa



Figure IV. 2: Vue aérienne de l'usine de dessalement de Magtâa

IV.2. Structure du projet :

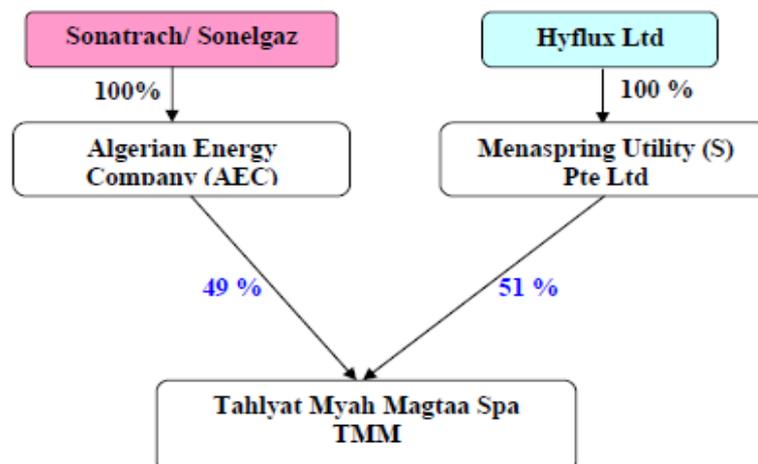


Figure IV. 3: Structure du projet de la station de dessalement de Magtâa

IV.3. Principales données techniques du projet :

Le tableau ci-dessous, résumé les différentes caractéristiques techniques de la station :

Tableau IV. 1: Données techniques du projet

| Paramètre | Unité de mesure | Valeur |
|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| Production d'eau | m ³ /j | 500.000 |
| Superficie | m ² | 174.000 |
| Prise d'eau de mer | m ³ /j | 1.250.000 |
| Salinité d'eau de mer | mg/l | 37.000 |
| Température de prise d'eau de mer | °C | 24 |
| Volume d'eau rejetée | m ³ /h | 45.833,33 |
| Qualité de l'eau | mg/l | 39.000 |
| Température de l'eau rejetée | °C | 34 |
| Taux de rendement de dessalement | % | 45 |
| Durée de la construction | Mois | 28 |
| Coût | Million de US\$ | 491 |

L'usine comprend les équipements principaux suivant :

- L'amenée d'eau de mer et les tamis.
- La station de pompage d'eau de mer.
- Les trains d'ultra-filtration (UF).
- La station de pompage d'eau filtrée.
- Les trains d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO = Sea Water Reverse Osmosis).
- Le réservoir d'eau traitée.
- Le rejet.



Figure IV. 4: Composition de l'usine de dessalement de Magtâa [21]

Les capacités nominales des principaux équipements sont répertoriées dans le tableau IV.2 :

Tableau IV. 2: Les capacités nominales des équipements

| Equipements | En service/Stand-by | Débit en millions de litres par jour (MLD) | Remarques |
|---|---|--|--|
| Amenée d'eau de mer incluant les tamis | Une(1) canalisation d'amenée d'eau de mer. Quatre ensembles de tamis grossiers et fins chacun utilisé à 33.3 % | 1250 MLD | Les quatre ensembles de tamis sont normalement en services |
| Station de pompage d'eau de mer | Douze(12) pompes en service et une(1) en stand-by | 125 MLD par pompe | |
| Trains d'ultrafiltration | Dix(10) bancs d'UF, chaque banc comprend neuf(9) trains en services et un(1) en stand by | 12.5 MLD par train | |

| Equipements | En service/Stand-by | Débit en millions de litres par jour (MLD) | Remarques |
|---|---|--|---|
| Station de pompage d'eau filtrée | Un(1) réservoir d'eau filtrée Douze(12) pompes d'eau filtrée en service et une(1) en stand by | Généralement d'une capacité de 15 min basé sur un débit de conception de 500 MLD 92.6 MLD par pompe | |
| Trains de SWRO | Vingt-quatre(24) trains en services et un(1) en stand-by | 20.9 MLD par train | |
| Réservoir d'eau traitée | Un(1) réservoir d'eau traitée séparé en deux(2) compartiments Train 1 : l'eau traitée alimente un compartiment, Train 2 : l'eau traitée alimente le deuxième compartiment | Capacité nominale | Approximativement d'une durée de 2 heures de rétention pour 500 MLD |
| Station de pompage d'eau traitée | Pompes d'eau traitée en services Ligne 1 : 3+1 Ligne 2 : 6+1 Ligne 2 : 6+1 Surpresseurs : 3+1 | 46.7 MLD 60 MLD 60 MLD 166.7 MLD | |
| Rejet | Chambre de rejet | 1100 MLD | |

IV.4. Les différentes étapes de l'usine de dessalement :

IV.4.1. Amenée d'eau de mer :

Le système proposé d'amenée d'eau de mer est une amenée ouverte, l'eau est acheminée dans l'amenée d'eau de mer par l'intermédiaire d'une canalisation, qui s'étend jusqu'à 500 mètres au large de la côte afin de s'assurer que l'eau de mer est exempte de débris et est uniforme en termes de caractéristiques. La canalisation achemine l'eau dans trois canaux chacun équipé de tamis grossiers puis fins.



Figure IV. 5: Système d'amenée d'eau de mer

Les canaux sont conçus pour recevoir la pleine charge des besoins en eau de mer de l'usine. Les canaux fonctionnent à 50% de leur capacité pendant l'exploitation normale. Afin de pouvoir effectuer les activités de maintenance dans n'importe quels canaux, l'écoulement dans le canal peut être arrêté. Il y a deux points d'arrêt d'eau par canal, en amont et en aval des tamis (c.-à-d. en amont du tamis grossier et en aval du tamis fin). Pour des situations d'urgence comme des déversements de pétrole en mer, le flux d'eau de mer dans la station de pompage d'amenée d'eau de mer peut être arrêté par la mise en place de points d'arrêt d'eau de mer au niveau des tamis grossiers et fins.

Les tamis grossiers sont conçus pour que l'un des deux soit en service pendant que l'autre est en stand-by, mais pendant l'exploitation normale les deux tamis fonctionnent seulement à 50% de charge. Les mailles des tamis auront un espacement de 20 millimètres. Les tamis grossiers peuvent fonctionner en mode automatique basé sur la différence de pression en amont et en aval de ceux-ci.

Les deux tamis fins rotatifs sont basés sur les mêmes critères de conception que les tamis grossiers. La taille des mailles est de 200 microns. La taille des mailles a été spécifiquement choisie afin d'approvisionner l'eau dans le système d'UF, car ce système ne peut pas tolérer de particules plus grosses que 200 microns. Un (1) tamis est en service tandis que l'autre tamis est en stand-by. Les tamis sont équipés de systèmes autonettoyants pour enlever les débris accumulés avec le temps. Les tamis peuvent être mis en mode automatique basé sur la différence de pression en amont et en aval de ceux-ci.

Deux (2) pompes de pulvérisation sont prévues afin de nettoyer les tamis fins rotatifs. Le tuyau d'aspiration d'eau des pompes est relié à la canalisation commune d'amenée d'eau de mer et ces pompes centrifuges horizontales amplifient la pression reçue de l'eau aspirée pour satisfaire aux exigences du nettoyage des tamis fins. Le fonctionnement des pompes est synchronisé avec celui des tamis. [21]

IV.4.2. Station de pompage d'eau de mer :

Les pompes d'amenée d'eau de mer alimentent le système de prétraitement en eau de mer. Il y a treize (12 en service + 1 en stand-by) pompes centrifuges horizontales prévues. Chaque pompe décharge l'eau dans une canalisation commune qui transporte l'eau aux trains d'UF. Des points de prélèvement (sur cette canalisation commune) sont prévus pour le prélèvement manuel ainsi que pour alimenter les analyseurs en temps réel. [21]

IV.4.3. Système membranaire d'ultra-filtration (UF) :

L'ultra-filtration est choisie comme prétraitement afin d'alimenter le système d'osmose Inverse avec une eau de qualité désirée et constante.

Les modules d'UF *Kristal* de flux de conception de 50 litres/m²/h et d'une superficie totale de 70 m²/module sont utilisés. Le système d'UF se compose de dix (10) bancs, chaque banc contenant dix (10) trains d'UF. Neuf (9) trains sont en service.

Chaque train est équipé de 150 modules d'UF. Une canalisation commune de filtrat d'UF est prévue pour transporter l'eau des bancs vers le réservoir d'eau filtrée.

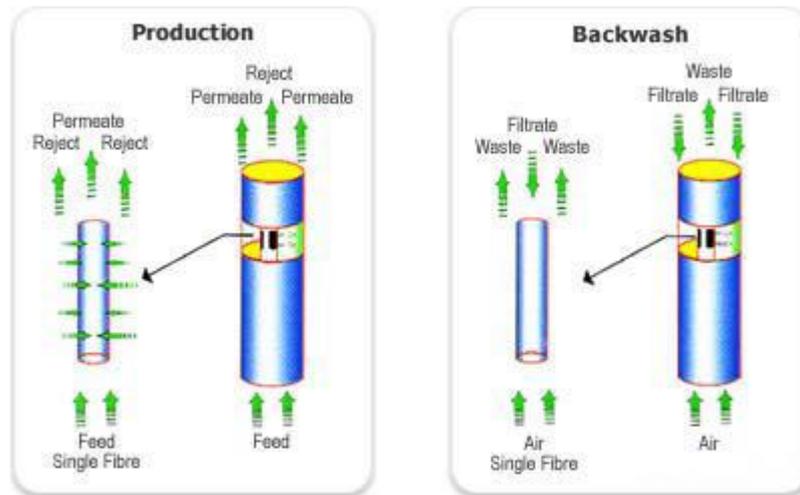


Figure IV. 6: Système de prétraitement – Membranes d'Ultrafiltration

➤ **Procédure d'UF – Filtration :**

Le système de membrane d'UF *Kristal* opère de l'extérieur vers l'intérieur où le jet d'alimentation circule sur l'extérieur de la membrane et avec le filtrat traversant l'intérieur de la membrane. Le jet de recyclage s'écoule depuis la surface externe de la membrane et est concentré sur la longueur de la membrane.

Le jet de recyclage est retourné au réservoir d'alimentation où est purgé au loin pour réduire l'agglomération de solides dans les modules de membrane. Une telle opération d'alimentation et de purge permet à l'UF de fonctionner plus longtemps et donc de réduire le besoin en nettoyage à contre courant (backwash) améliorant de ce fait le rendement et la disponibilité du système.



Lexique : production = production ; reject = rejet ; permeate = perméat ; feed = alimentation ;
backwash = nettoyage à contre courant ; waste = déchet, filtrate = filtrat.

Figure IV. 7: Procédure d'Ultrafiltration

Le procédé de filtration ne peut pas être indéfiniment maintenu dû au fait que la force d'entraînement à travers la membrane doit être en augmentation constante pour garder un débit constant à travers les membranes; un système et des procédures de nettoyage à contre courant sont donc mise en œuvre.

Les pompes d'alimentation pompent l'eau de mer vers les trains d'UF. Chaque train possédant une valve de commande de débit d'écoulement équilibre le débit entre les trains en service et empêche le train de fonctionner à un trop fort débit de perméat qui pourraient avoir comme conséquence un taux d'encrassement plus élevé, donc une augmentation de la fréquence de nettoyage à contre courant ainsi que du nettoyage chimique. La pression avant et après les membranes est contrôlée en permanence de sorte que la Pression Transmembranaire (PTM) puisse être mesurée et normalisée pour contrôler les performances. [21]

➤ **Procédure d'UF – Nettoyage à contre courant (backwash) :**

Avec l'accumulation de solides lors de la filtration, la résistance à l'écoulement augmente, ceci peut être surmonté en soumettant la membrane à une inversion d'écoulement avec le filtrat d'UF. De l'air de décapage est introduite à contre courant pour améliorer l'efficacité du nettoyage à contre courant.

Cette opération de nettoyage à contre courant est effectuée périodiquement et peut être prédéterminée par le débit total ou le nombre d'heures écoulées, typiquement cette opération a lieu toutes les 30 à 45 minutes. Le système complet est commandé pour que seulement 1 train par banc subisse le nettoyage à contre courant à n'importe quel moment. Le jet de nettoyage de contre courant est déchargé directement à la décharge. [21]

➤ **Procédure d'UF – Nettoyage chimique :**

Le nettoyage à contre courant peut enlever la plupart des solides du système, cependant il y a un besoin périodique de nettoyer plus efficacement la surface des membranes.

Ceci peut être entrepris de deux (2) manières différentes. La première est le nettoyage chimique de maintenance qui est un processus fréquent de nettoyage de courte durée, la seconde est un nettoyage chimique de rétablissement qui exige un arrêt de fonctionnement à plus long terme mais donne un nettoyage plus profond de la surface de membrane.

Le nettoyage chimique de maintenance régulière des trains de membranes est inclus dans la conception. Ceux-ci se produisent à un intervalle de 1 à 7 jour(s) basés sur les caractéristiques d'encrassement de l'eau. La solution de nettoyage est une solution alcaline de chlore ou une solution d'acide. Ces nettoyages sont de courte durée de l'ordre de 5 à 10 minutes de temps de contact avec le produit chimique et donc d'arrêt de fonctionnement relativement court au total.

Après quelques semaines de mise en service, la pression transmembranaire (PTM) peut ne plus être commandée par le nettoyage à contre courant ainsi que le nettoyage chimique de maintenance. A ce stade, un nettoyage chimique de rétablissement de train d'UF est fait en utilisant l'hypochlorite et l'acide de sodium. À la fin du nettoyage chimique de rétablissement le train peut être de nouveau mis en service ou en stand-by. Les solutions utilisées pour ce dernier type de nettoyage sont dirigées vers le réservoir de neutralisation pour leurs traitements avant leurs rejets. [21]

IV.4.4. Prétraitement chimique :

Deux réservoirs de stockage et quatre pompes de dosage (2 en service + 2 en standby).

IV.4.5. Stockage et pompage de l'eau filtrée :

L'eau filtrée des trains d'ultrafiltration est stockée dans un réservoir à compartiment unique construit en béton et garni d'un enduit d'époxy. Ce réservoir a un temps de rétention de 30 minutes basé sur le débit maximum de conception de l'usine et agit en tant que stockage intermédiaire pour l'eau d'alimentation de SWRO (Sea Water Reverse Osmosis) ainsi que d'être la source de l'eau du nettoyage à contre courant.

Douze (12) pompes d'eau de nettoyage à contre courant sont fournies, chacune d'elles est consacrée à 1 banc, la onzième et la douzième pompe étant en stand-by.

Les pompes sont commandées par le variateur de vitesse afin de fournir le débit exigé pour le nettoyage à contre courant d'UF indépendamment de la PTM pendant le processus de nettoyage à contre courant.

Douze (12) pompes d'eau filtrée d'OI sont prévues. A débit maximum, dix (10) pompes seront en service et deux seront en stand-by. Le nombre de pompes en service sera basé sur le nombre de trains de SWRO en service. Les pompes sont commandées par les variateurs de vitesse qui maintiennent la pression fixée dans l'ensemble de la canalisation commune d'eau alimentant les pompes d'alimentation d'OI. Cette pression d'ensemble augmente avec le temps car les membranes vieillissent et ont donc besoin d'une pression d'alimentation plus élevée pour compenser le déclin du flux.

Toutes les pompes citées ci-dessus sont de construction centrifuge horizontale avec des pièces construites en matériau approprié pour fonctionner avec l'eau de mer. [21]

IV.4.6. Etape de l'osmose inverse :

L'étape d'osmose inverse de l'usine inclut les équipements suivants :

- Les pompes d'eau filtrée
- Les pompes d'alimentation d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO)
- Les trains de SWRO
- Le système de récupération d'énergie (Energy Recovery System)
- Le réservoir encastré
- Le système de nettoyage chimique d'OI
- Le système de dosage de l'hydroxyde de sodium
- Le système de dosage de l'antitartre.

➤ Pompes d'eau filtrée :

Celles-ci fournissent l'eau filtrée aux pompes d'alimentation de SWRO. Le variateur de vitesse commande la vitesse du moteur de la pompe qui ajuste ainsi la pression de l'eau filtrée avec le temps afin de s'adapter au vieillissement des membranes de SWRO. [21]

➤ **Pompes d'alimentation de SWRO :**

Ces pompes de vitesse fixe augmenteront la pression de l'eau filtrée à la pression exigée pour le fonctionnement des membranes de SWRO. L'eau filtrée à haute pression provenant de cette source sera mélangée avec l'eau filtrée pressurisée par le système ERS pour l'alimentation des trains d'OI. Chaque pompe d'alimentation de SWRO est consacrée à son propre train de SWRO. [21]

➤ **Trains d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO) :**

Le dessalement primaire d'eau de mer se produit dans ce système d'étape unique de SWRO. L'eau de mer pressurisée est séparée en 2 jets, un jet de basse pression de perméat et un jet à haute pression de saumure. 45% de l'eau d'alimentation des trains de SWRO est convertie en perméat, les 55% restant étant le rejet de saumure.

L'eau de faible teneur en SDT (Solides Dissous Totaux) obtenue des trains de SWRO satisfait les conditions en SDT, chlorure, sodium et en bore lors de la mise en service de l'usine. Le SWRO au commencement produit approximativement 505 MLD (Million Litres per Day) de perméat.

La conception des trains de SWRO est basée sur l'utilisation en une seule étape de modules de pression pour réduire la tuyauterie et pour simplifier la construction.

Vingt-cinq (25) trains de SWRO sont prévus et vingt-quatre (24) sont en service et cela afin de fournir le débit de conception maximum de SWRO, tandis qu'un (1) train est en standby ou en CIP.

Chaque train de SWRO est composé de 218 modules de pression de SWRO multiports disposés en parallèle et fonctionnent avec un taux de rendement de 45%. Chaque module de pression contient 7 éléments de SWRO.

La canalisation d'alimentation de chaque train d'OI dispose d'une valve de commande qui s'ouvre progressivement pendant la procédure de démarrage afin d'augmenter lentement la pression dans le train de membranes. Cette procédure est très importante car une forte augmentation de pression pourrait endommager les membranes.

En plus d'avoir une pompe d'alimentation de SWRO consacrée, chaque train est également équipé d'isobare et de pompe d'appoint consacrée au système de récupération d'énergie.



Figure IV. 8: Système de Membrane d'Osmose Inverse d'Eau de Mer. [21]

➤ **Système de récupération d'énergie (ERS) :**

Le système de récupération d'énergie est basé sur l'utilisation d'un système de turbo chargeurs hydrauliques dans lesquels l'énergie du rejet est utilisée pour augmenter la pression d'alimentation d'OI au niveau requis. [21]

➤ **Réservoir encastré :**

Ce réservoir sert de réservoir tampon pour le perméat de SWRO. Le perméat de SWRO s'écoule par gravité vers le réservoir de l'eau traitée. De plus ce réservoir est la source de l'eau de service pour le site. [21]

➤ **Système de nettoyage chimique d'OI (CIP = Cleaning-In-Place) :**

Un système de nettoyage est prévu pour traiter les membranes d'OI si elles s'encrassent. Le nettoyage chimique est sous le contrôle d'un opérateur et s'effectue seulement en cas de besoin. [21]

➤ **Dosage de l'hydroxyde de sodium :**

Afin de maximiser l'enlèvement du bore les trains SWRO sont dosés à l'hydroxyde de sodium pour élever le pH. Le pH des trains de SWRO peut être augmenté dans le temps afin de prendre en compte l'abaissement du rejet des membranes. [21]

➤ **Dosage de produit chimique d'antitartre :**

Dans le SWRO la cause principale du souci pour l'entartrage est la précipitation du carbonate de calcium dans le rejet de saumure. L'utilisation du dosage de l'acide sulfurique ou d'un inhibiteur peut contrôler cet entartrage pour le SWRO.

Nous avons choisi le dosage d'antitartre plutôt que l'ajout d'acide en tant que mécanisme primaire de contrôle. Ceci permet au pH de l'eau d'alimentation de SWRO d'être autour de 7,8 à 8,2 et de donner une meilleure qualité de bore dans le perméat de SWRO plutôt que le dosage d'acide qui abaisse le pH de 6,5 à 7,0 pour le contrôle de l'index de Langelier. [21]

IV.4.7. Traitement chimique de l'eau dessalée :

Les systèmes suivants sont employés dans le post-traitement chimique :

- Dosage du chlore utilisant l'hypochlorite de sodium
- Dosage du dioxyde de carbone
- Dosage de la chaux

➤ **Post-chloration :**

Un réservoir d'hypochlorite de sodium est prévu. Deux (2) pompes de dosage sont prévues pour la désinfection de post-traitement, une (1) pompe étant en service tandis que la seconde est en stand-by. La vitesse du moteur de la pompe de service est commandée par un variateur de vitesse et est directement proportionnelle au débit du perméat d'eau. Le taux de dose du chlore est ajusté manuellement en changeant le dosage de la pompe. Cette condition est peu fréquente ; par conséquent l'automatisation du dosage de la pompe n'est pas incluse. [21]

➤ **Reminéralisation (dosage du dioxyde de carbone et de la chaux) :**

Deux (2) cuves de stockage de dioxyde de carbone sont prévues pour le stockage sur site du dioxyde de carbone liquide. De ce réservoir, le dioxyde de carbone liquide va être dirigé vers une des deux unités de vaporisation atmosphérique, une unité en service et l'autre en stand-by. Le débit du dioxyde carbonique est mesuré et commandé par la valve de commande afin de maintenir la dose réglée en mg/l dans l'eau chlorée après le réservoir de chloration par contact. L'injection du gaz est créée au moyen d'un système éjecteur qui est actionné par l'eau de service.

Le système de chaux possède plusieurs types d'équipements pour stocker la poudre de chaux et créer une solution saturée de chaux pour doser l'eau chlorée afin d'ajuster le pH désiré de l'eau traitée.

La chaux est stockée dans un silo. Ce silo est fabriqué en acier et est équipé d'un système de contrôle de poussières, d'un système de vibration de silo et de conduites de poudre. La poudre de chaux est dosée du silo dans le réservoir de boue en service, deux (2) réservoirs sont inclus, un en service et l'autre en stand-by.

Le dosage se fait au moyen de la conduite de poudre commandé par un variateur de vitesse. Le débit de la chaux dans le réservoir de boue est maintenu avec un rapport fixe par rapport au débit de l'eau de dilution entrant dans le saturateur de chaux.

La poudre de chaux tombe dans le réservoir de dilution en continu où elle se mélange avec de la perméat d'eau mélangée d'OI. La boue est gardée en suspension par un agitateur en fonctionnement continu.

La boue de chaux est transférée au saturateur de chaux à un débit fixé par une des deux (2) pompes de transfert, la deuxième pompe étant en stand-by. Le pourcentage de boue change selon le débit d'alimentation en poudre.

La boue est injectée dans une canalisation qui alimente équitablement en lait de chaux les deux saturateurs de chaux pour se mélanger avec l'eau de dilution pour former une solution nominale de 0,14% (généralement désignée sous le nom de lait de chaux). La solution de lait de chaux formée dans le saturateur déborde dans le déversoir situé au-dessus du saturateur et par gravité s'écoule vers le réservoir de stockage de lait de chaux. L'écoulement du lait de chaux est ascendant dans le saturateur. Les impuretés présentes dans la poudre de chaux tombent en raison de la pesanteur et forment de la vase au fond du saturateur.

Deux (2) pompes de vase de chaux sont prévues pour enlever la vase du saturateur qui est ensuite dirigée vers le réservoir de neutralisation. La vase est injectée de nouveau dans le saturateur sur une base périodique de sorte que la chaux n'ayant pas encore réagi puisse se dissoudre. Après le transfert de la vase, la chaux est rincée avec l'eau de service pour réduire au minimum les obstructions dans le système.

Un réservoir de lait de chaux d'une capacité nominale de 15 minutes est prévu comme intermédiaire entre le saturateur et le point de dosage. Deux pompes de lait de chaux sont prévues, celles-ci sont de construction centrifuge horizontale, une étant en service et la deuxième pompe en stand-by. Une valve de commande de décharge de la pompe règle l'écoulement de chaux selon le pH de l'eau entrant dans le réservoir d'eau traitée. [21]

IV.4.8. Rejet de saumure :

Le rejet fonctionne par gravité, donc sans station de pompage. La saumure de SWRO est dirigée dans la chambre de rejet et fournit un débit constant à la mer. L'eau de nettoyage à contre courant provenant de l'UF et elle aussi dirigée vers la chambre de rejet.

Comme le volume d'eau de nettoyage à contre courant par train est relativement faible et se produit fréquemment, alors aucun réservoir d'eau usagée n'est nécessaire, l'eau de nettoyage à contre courant allant directement au puisard de rejet.

L'eau du réservoir de neutralisation est également dirigée vers la chambre de rejet. Ces eaux résiduaires sont d'abord neutralisées avant d'être pompées vers la chambre de rejet. [21]

IV.4.9. Station d'air comprimé :

Un système commun d'air comprimé est prévu pour le site entier. Deux (2) compresseurs sont prévus, un en service et un en stand-by lors de l'exploitation normale. Les compresseurs auront leur propre système de commande.

L'air comprimé est stocké dans deux (2) conteneurs, un conteneur est consacré aux instruments et l'autre conteneur au processus. L'air pour le processus est employé pendant le nettoyage à contre courant d'UF et n'a donc pas besoin d'être à sec. Ce jet est filtré pour enlever l'huile et les particules.

L'air pour les instruments subit d'autres processus, après filtration, pour réduire l'humidité contenue. Un système de dessiccation d'air est employé pour obtenir un point de condensation bas. [21]

IV.4.10. Stockage d'eau traitée :

L'eau traitée après sa stabilisation est stockée dans le réservoir de stockage d'eau traitée. Ce réservoir est divisé en deux (2) compartiments et peut s'il y a lieu fonctionner avec un seul compartiment en service tandis que le deuxième compartiment peut être en maintenance ou nettoyé (capacité divisée par deux).

Cependant les deux compartiments sont normalement en service.

La ligne 1 a 4 pompes en service + 1 en stand-by. Les pompes utilisées sont un mélange de pompes à vitesse fixe et variable.

La ligne 2 a 6 pompes en service + 1 en stand-by. Les pompes utilisées sont un mélange de pompes à vitesse fixe et variable.

La ligne 3 a 6 pompes en service + 1 en stand-by. Les pompes utilisées sont un mélange de pompes à vitesse fixe et variable.

Les pompes de la ligne dédiée sont alimentées par les pompes basses pressions (3 en service + 1 en stand-by), de taille suffisante pour fournir un «Net Positive Suction Head (NPSH)» (Pression d'aspiration manométrique nette positive), disponible pour la ligne dédiée. Ces pompes basses pression sont à vitesse fixe. [21]

Tableau IV. 3: Paramètres techniques caractérisant les différentes étapes du processus. [21]

| Étapes du processus | Paramètres | Commentaires |
|---------------------------------------|--|---|
| Prétraitement | | |
| Flux des membranes d'UF | 50 l/m ² /h | Le régime opérationnel pourra être différent afin de s'accorder aux tests de la station pilote en Algérie |
| Recyclage d'UF | De 15 à 20 % | |
| Nettoyage de maintenance d'UF | Excepté d'être journalier | |
| Nettoyage de recouvrement d'UF | Excepté d'être tous les 3 à 4 semaines | |
| Qualité de l'eau filtrée d'UF | Excepté d'être moins de 0.2 NTU et moins de 4 SDI(Silt Density Index) | |
| Osmose inverse (OI) | | |
| Flux des membranes de SWRO | 14.1 l/m ² /h | |
| Rendement SWRO | 45 % | |
| CIP SWRO | Excepté d'être tous les 2 à 4 mois | |
| Qualité de l'eau | 400 mg/l de SDT | |
| Eau traitée | | |
| Stockage de l'eau traitée | Temps de rétention normale de 2 heures | |
| Pression de l'eau traité | Ligne 1 : 151 mètres d'eau Ligne 2 : 220 mètres d'eau Ligne 3 : 267 mètres d'eau | |
| Qualité de l'eau traitée | Moins de 500 mg/ l SDT | |

Chapitre V : Hydrodynamique des rejets en mer

V.1. Introduction :

Le comportement de mélange de tout rejet des eaux usées est régi par les conditions ambiantes du milieu récepteur et par les caractéristiques de diffusion. Un exemple d'un panache d'évacuation des eaux usées de flottabilité positive dans un environnement côtier est illustré dans la figure V.1. [22]



Figure V. 1: Diffusion flottante côtière. [22]

Les conditions ambiantes dans le plan d'eau récepteur, que ce soit ruisseau, rivière, lac, réservoir, estuaire ou des eaux côtières, sont décrites par les caractéristiques géométriques et dynamiques du corps de l'eau.

Les caractéristiques géométriques importantes sont la forme du plan, les sections verticales, et la bathymétrie, en particulier dans le voisinage de la zone de diffusion.

Les caractéristiques dynamiques sont données par la distribution de la vitesse et de la densité dans le corps de l'eau, de nouveau essentiellement dans le voisinage de la zone de diffusion.

Dans de nombreux cas, ces conditions peuvent être considérées comme l'état d'équilibre avec peu de variation parce que l'échelle de temps pour les processus de mélange est généralement de l'ordre de minutes jusqu'à l'ordre de l'heure.

Dans certains cas, pour les flux notamment influencé par les marées, les conditions ambiantes peuvent être très transitoires et l'hypothèse de l'état d'équilibre peut être inappropriée. Dans ce cas, la dilution effective du panache de décharge peut être réduite par rapport à celle dans des conditions stables.

Les caractéristiques du flux sont définies par le débit d'évacuation des effluents, par son flux de quantité de mouvement et de son flux de flottabilité. Le flux de flottabilité représente l'effet de la différence de densité relative entre les conditions ambiantes et d'évacuation des effluents en combinaison avec une accélération gravitationnelle.

La flottabilité du flux est une mesure de la tendance pour l'écoulement de l'effluent à monter (la flottabilité positive) ou à descendre au fond (flottabilité négative).

L'hydrodynamique d'un effluent en diffusion continu dans un plan d'eau récepteur peut être conceptualisée comme un processus de mélange se produisant dans deux régions distinctes. Dans la première région, les caractéristiques du jet initial de quantité de mouvement du flux, la flottabilité du flux et de la géométrie du diffuseur influent sur la trajectoire du jet et du mélange. Cette région sera désignée sous le nom de « **champ proche** », Dans cette région, les concepteurs des diffuseurs peuvent généralement affecter les caractéristiques de mélange initiales par la manipulation appropriée des variables de conception.

Comme le panache turbulent se déplace plus loin de la source, les caractéristiques du diffuseur sont moins importantes. Les conditions de l'environnement ambiant vont contrôler la trajectoire et la dilution de l'effluent, cette région sera désignée ici comme le «**champ lointain**». [22]

V.2. L'effet de la stratification :

Une variation de densité par rapport à la profondeur est courante dans de nombreuses masses d'eau. Par exemple, les conditions de températures saisonnières peuvent avoir une influence sur la densité et peuvent conduire à une stratification de l'environnement ambiant. Cette dernière a un rôle important dans les objectifs de conception des diffuseurs.

La méthodologie tient compte de quatre cas de profils de densité qui sont présentés dans la figure V.2. L'utilisateur doit choisir parmi les quatre profils celui qui correspond le mieux au profil du milieu ambiant. [23]

Les quatre profils sont les suivants:

- **Stratification type A** : la densité varie linéairement entre la surface et le fond.
- **Stratification type B** : il y a une couche supérieure mélangée avec une densité uniforme, un saut brusque de densité à un niveau intermédiaire, appelé la pycnocline (thermocline), et une couche inférieure avec une densité uniforme.
- **Stratification type C** : il y a une couche supérieure mélangée avec une densité uniforme, un saut brusque de densité, et une couche inférieure, dans lequel la densité varie linéairement jusqu'à la valeur inférieure.

- **Stratification type D** : il y a une couche supérieure mélangée avec une densité uniforme. A un niveau intermédiaire, la densité commence à varier linéairement jusqu'à la valeur inférieure.

Dans chaque type, le gradient linéaire de flottabilité ϵ est défini :

$$\epsilon = - (g/\rho_a) d\rho_a/dz$$

Où :

g : Accélération gravitationnelle.

ρ_a : Densité du milieu ambiant.

$d\rho_a/dz$: Gradient de densité.

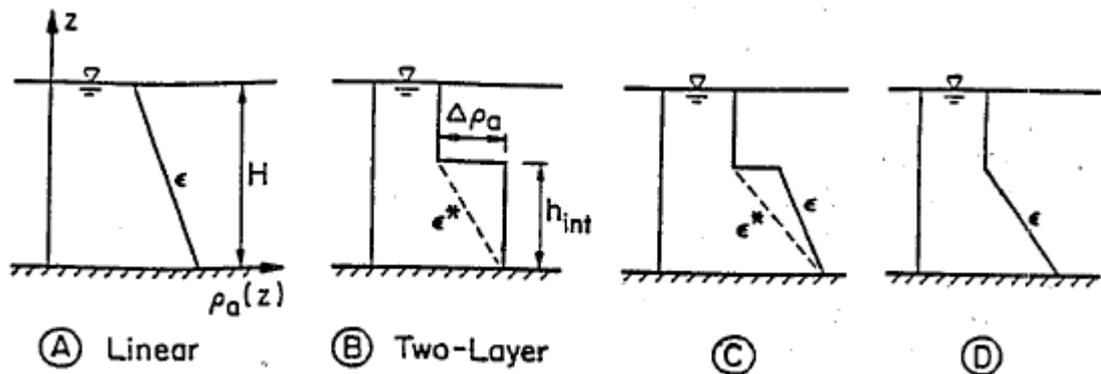


Figure V. 2: Types de stratification [22]

V.3. Caractéristiques de la diffusion :

Les conditions de diffusion sont liées aux caractéristiques d'écoulement de diffusion, la géométrie de la structure d'évacuation, et les paramètres d'écoulement.

V.3.1 Géométrie du diffuseur :

La géométrie du diffuseur est définie par le diffuseur multiport, ce dernier est une structure qui est constitué de ports étroitement espacés ou buses qui injectent des jets turbulents de grandes vitesses dans le milieu récepteur. On peut distinguer deux formes de diffuseurs, un simple pipeline avec un port à son extrémité, ou un pipeline équipé d'orifices (plusieurs ports). [23]

L'installation du diffuseur consiste à fixer le pipeline au fond marin, à l'enterrer à moitié, ou complètement enterré, ou un tunnel sous le fond marin.

Les variables suivantes définissent la géométrie du diffuseur :

Caractéristiques d'un diffuseur :

L_d : longueur du diffuseur

N : nombre de port

l : espacement moyen des ports

D : diamètre du port

h_0 : hauteur du port au dessus du fond

θ : angle vertical de diffusion

σ : angle de décalage horizontal de diffusion

γ : angle d'alignement

β : angle d'orientation des ports

La disposition générale du diffuseur multiport ainsi que ses caractéristiques géométriques importantes sont représentés dans la figure V.3.

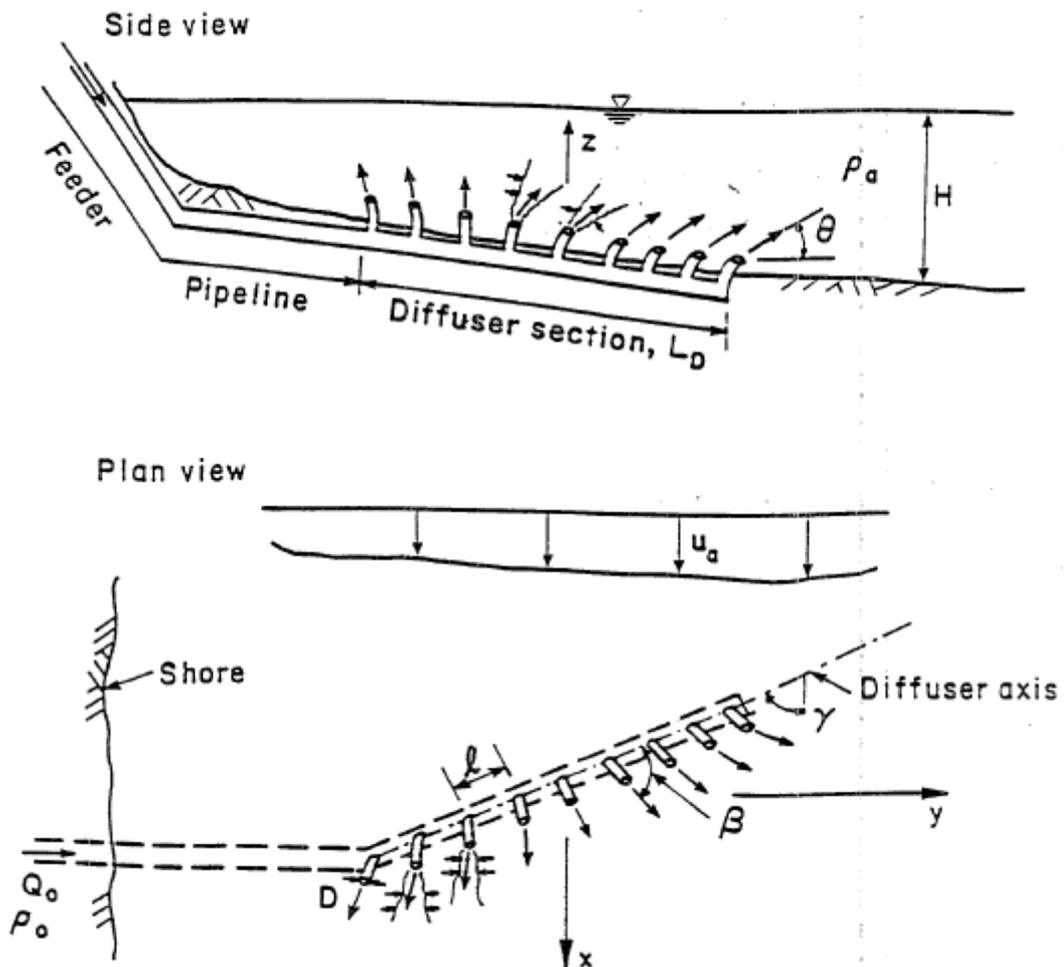


Figure V. 3: Diffuseur multiport et sa configuration générale. [24]

V.3.2 Types de diffuseurs multiports :

Les diffuseurs multiports peuvent avoir une grande quantité de détails géométriques. Chaque paramètre géométrique peut jouer un rôle important dans le comportement de l'écoulement. Par exemple, une variation de l'angle d'orientation de l'orifice horizontal, peut induire un changement dans la trajectoire de diffusion.

Trois grands types de géométries de diffuseur multiports, chacun avec un comportement de mélange très différents, ont évolué dans la pratique de l'ingénierie réelle: unidirectionnel (figure V.4), étagé (figure V.5), et le diffuseur alternatif (figure V.6). Ces types de diffuseurs sont classés principalement en fonction de leur orientation angulaire par rapport à l'axe du diffuseur.

Dans le diffuseur unidirectionnel, tous les orifices sont orientés dans la même direction perpendiculaire à l'axe du diffuseur ($\beta = 90^\circ$).

Dans le diffuseur étagé, les ports pointent tous dans la même direction parallèle à l'axe du diffuseur ($\beta = 0^\circ$).

Dans le diffuseur alternatif les orifices sont disposés de manière alternée et orientée dans des sens opposés ($\beta = +/- 90^\circ$).

Les diffuseurs unidirectionnels et multi-étages possèdent une entrée de mouvement horizontal nette avec une tendance à induire des courants dans le milieu récepteur ambiant.

Le diffuseur alternatif n'a pas de mouvement horizontal, et a moins tendance à générer des courants et des circulations. [3]

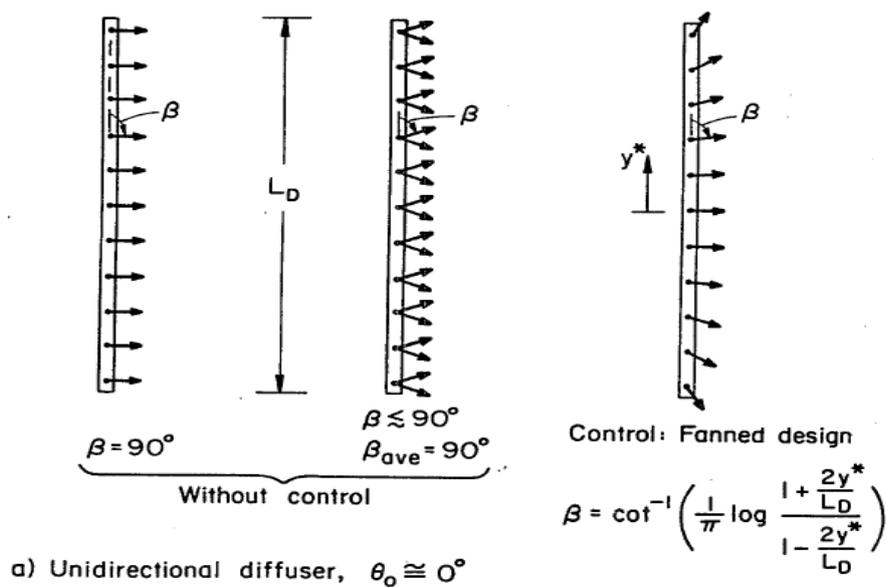


Figure V. 4: Diffuseur unidirectionnel [3]

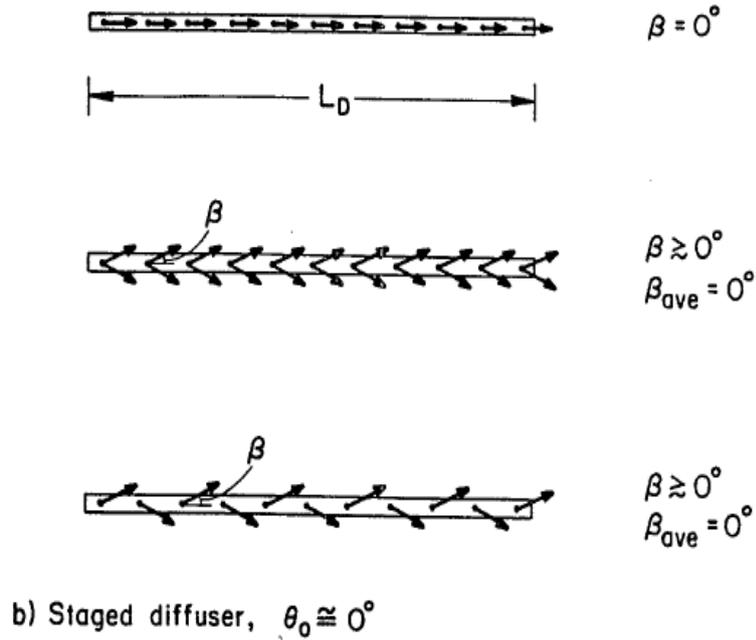


Figure V. 5: Diffuseur multi-étages. [3]

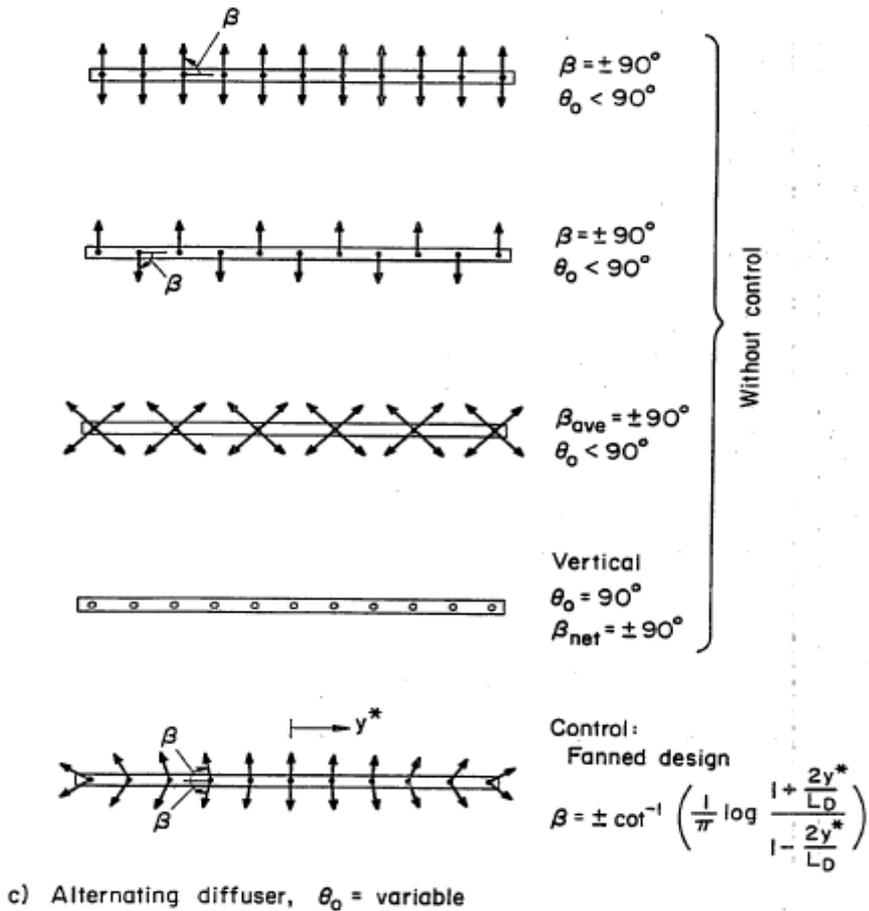


Figure V. 6: Diffuseur alternatif. [3]

En outre, le concepteur peut exercer un certain contrôle sur le comportement du panache de diffusion et d'autres circulations induites dans le milieu ambiant. Ceci est particulièrement important pour les rejets de diffuseur dans les eaux peu profondes qui sont susceptibles à des instabilités verticales conduisant à des panaches concentrées à grande vitesse.

Ces flux concentrés peuvent être contrôlés si les ports du diffuseur ont une «conception en éventail" avec un angle d'orientation variable le long du diffuseur.

$$\beta = \cot^{-1} \left(\frac{1}{\pi} \log \frac{1 + \frac{2y^*}{Ld}}{1 - \frac{2y^*}{Ld}} \right)$$

Où y^* est la distance mesurée à partir du point médian du diffuseur.

L'efficacité de chaque type de diffuseur va en outre, dépendre de la direction du courant ambiant par rapport à l'axe du diffuseur appelé l'angle d'alignement. On peut distinguer deux cas extrêmes: alignement perpendiculaire ($\gamma = 90^\circ$) et l'alignement parallèle ($\gamma = 0^\circ$).

V.4. Les processus hydrodynamique de mélange :

V.4.1. Les concepts de base du jet et de la plume :

V.4.1.1 Définition

Un **jet simple** est défini comme écoulement d'un orifice avec l'élan comme source pure, une **plume** est une source pure de flottabilité et un **jet flottant** qui est un écoulement d'un orifice avec élan et flottabilité comme source pure.

V.4.1.2 Paramètres liés aux jets et aux plumes :

Les jets et les plumes peuvent dépendre de trois groupes de paramètres : paramètres du jet, paramètres du milieu ambiant, paramètre géométrique, comme illustré dans la figure V.7.

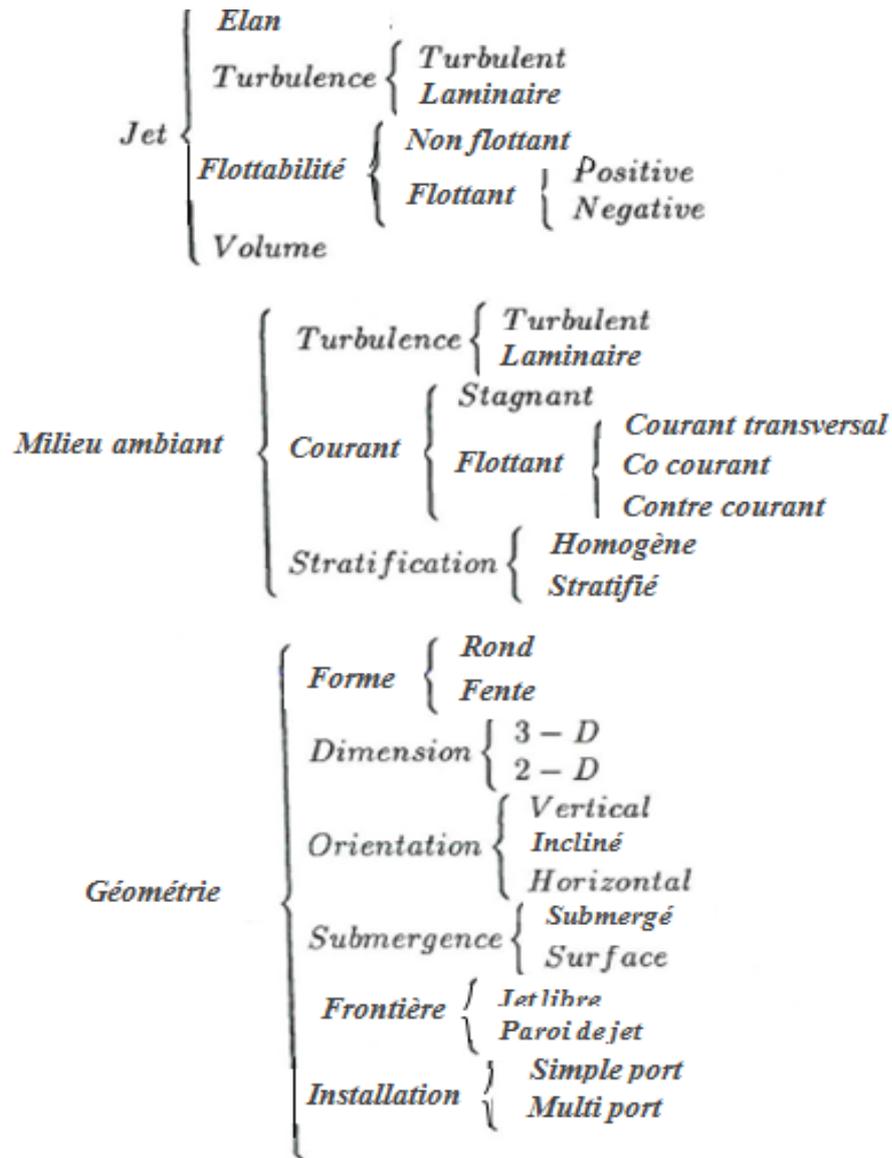


Figure V. 7: Paramètres liés aux jets [25]

V.4.1.3 Echelle de longueur et de temps :

Les jets flottants turbulents et les plumes engendrés dans la diffusion en mer ont une échelle de temps et de longueur typique avec $10^1 \sim 10^3$ m et $10^1 \sim 10^3$ s. Les divers processus et leur ordre de grandeur approximatifs de longueur et de temps sont présentés dans le tableau V.1. [25]

Tableau V. 1: Processus et ordre de grandeur. [25]

| Phase | Phénomène | Echelle de longueur (m) | Echelle de temps (s) |
|-------|--|-------------------------|----------------------|
| (1) | Jet de mélange initial | $< 10^2$ | $< 10^3$ |
| (2) | Création du champ d'épuration : propagation gravitationnel latérale | $10^1 \sim 10^3$ | $10^2 \sim 10^3$ |
| (3) | Dispersion et diffusion latérale naturelle | $10^2 \sim 10^4$ | $10^3 \sim 10^5$ |
| (4) | Advection par les courants | $10^3 \sim 10^5$ | $10^3 \sim 10^6$ |
| (5) | Grande échelle de remontée d'eau ou son jaillissement vers le bas, sédimentation | $10^4 \sim 10^6$ | $10^6 \sim 10^8$ |

Note: approximativement, 1 jour = 10^5 secondes; 1 mois = $10^{6.5}$ s; 1 ans = $10^{7.5}$ s.

Comme montré dans le tableau, d'un point de vue macroscopique, le processus de rejet des eaux usées en mer peut être considéré en cinq phases.

D'un point de vue microscopique, la première phase peut être encore divisée en trois étapes : la zone d'établissement de l'écoulement, l'étape du jet et l'étape intermédiaire.

Pendant la phase du mélange initial, l'effluent rejeté est fortement mélangé et considérablement dilué par le fluide ambiant, avec un ordre de 10^2 m dans l'espace et 10^3 s dans le temps. Le champ d'épuration, par exemple une plume en surface dans un milieu ambiant homogène ou une plume submergée dans un environnement de densité stratifiée sera établie et se produira immédiatement après, une propagation gravitationnelle latérale due à la différence de densité entre l'effluent et le milieu ambiant, résultant ainsi une diffusion latérale de la plume et deviendra plus mince, puis sera transporté par le courant ambiant.

En principe, les cinq phases peuvent être fusionnées en deux champs importants : le champ proche (phases 1 et 2) et le champ lointain (phases 3, 4 et 5).

Par conséquent les études du problème peuvent être effectuées en considérant les champs proches et lointains et la combinaison des deux champs. [26]

V.4.1.4 Analyse dimensionnelle des jets et plumes :

Physiquement, pour un jet flottant turbulent projeté dans un milieu ambiant, on peut supposer que la concentration de l'effluent $c(x, y, z)$ doit être déterminée par les possibles paramètres importants (figure V.8)

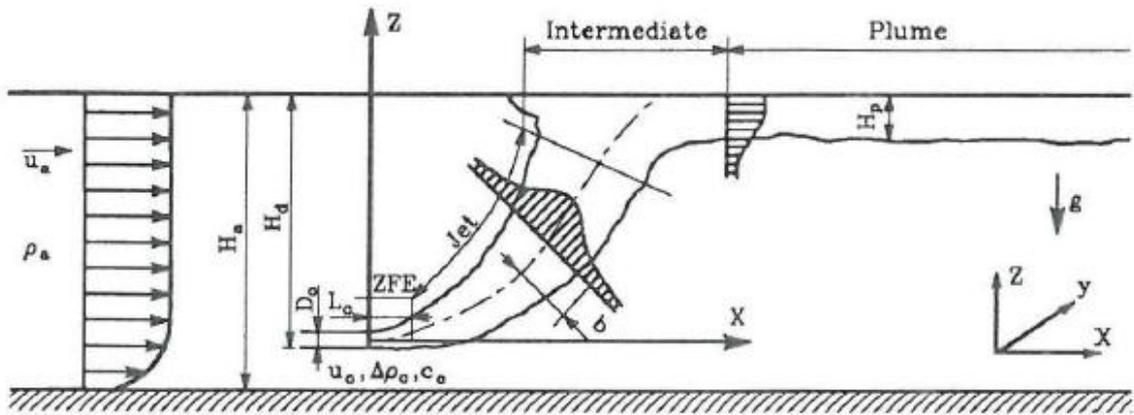


Figure V. 8: Un jet flottant turbulent diffusé dans un écoulement ambiant. [27]

$$c(x, y, z) = f_1 \{ g, \rho_0, \rho_a, H_d, D_0, u_0, u_a, \theta_0, v_0, c_0, x, y, z \}$$

Par analyse dimensionnelle, les combinaisons suivantes sont obtenues :

$$\frac{c_0}{c(x, y, z)} = f_2 \left\{ \frac{H_d}{D_0}, F_{\Delta_0}, \frac{u_0}{u_a}, R_e, \theta_0, \frac{x}{D_0}, \frac{y}{D_0}, \frac{z}{D_0} \right\}$$

Où : F_{Δ_0} est le nombre de Froude densimétrique du jet initial, défini comme

$$F_{\Delta_0} = u_0 / \sqrt{g \Delta \rho / \rho_a D_0}$$

R_e est le nombre de Reynolds du jet, défini comme $R_e = u_0 D_0 / v_0$

Afin de simplifier l'analyse et réduire le nombre de variables indépendantes à considérer, plusieurs hypothèses sont faites :

- L'écoulement du jet est proportionnellement grand au nombre de Reynolds.
- L'effet de l'angle de diffusion initiale est négligé en considérant seulement le jet horizontal ou vertical
- L'approximation de Boussinesq est présente

Avec les hypothèses supposées ci-dessus, le jet flottant turbulent peut être défini comme source de masse, d'élan et de flottabilité. Les flux indépendants basiques caractérisant le jet flottant turbulent sont définis comme suit :

$$Q = \int_A u_0 dA$$

$$M = \int_A u_0^2 dA$$

$$B = \int_A u_0 \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g dA$$

Pour un jet rond, le flux du volume $Q = u_0 \pi D_0^2 / 4$

$$\text{Le flux d'élan } M = u_0^2 \pi D_0^2 / 4$$

$$\text{Le flux de flottabilité } B = Q \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g$$

En utilisant ces trois flux Q, M et B, la dilution doit dépendre des variables suivantes :

$$\frac{c_0}{c(x,y,z)} = f_3 \{ Q, M, B, u_a, x, y, z \} \dots\dots (X)$$

Par analyse dimensionnelle, plusieurs échelles de longueur caractérisant le jet peuvent être formées par les flux Q, M et B, et sont définies comme :

$$L_q = \frac{Q}{M^{1/2}}$$

$$L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad \text{ou} \quad L_m = \frac{M^{1/2}}{u_a}$$

$$L_q = \frac{B}{u_a^3}$$

Pour un jet circulaire dans un courant ambiant :

$$\text{L'échelle de longueur du volume } L_q = \sqrt{\pi} D_0 / 2 ;$$

$$\text{L'échelle de longueur de l'élan } L_m = u_0 (\pi D_0^2 / 4)^{1/4} / \sqrt{\Delta\rho / \rho_a g} \quad \text{ou}$$

$$L_m = \sqrt{\pi} D_0 u_0 / 2 u_a$$

$$\text{L'échelle de longueur de la flottabilité } L_b = u_0 \pi D_0^2 \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g / 4 u_a^3$$

L_q proportionnel au diamètre du jet, est l'échelle de longueur appropriée près de l'orifice du jet. Pour $z/L_q \ll 1$, la géométrie initiale aura un effet significatif sur le comportement du jet ; pour $z/L_q \gg 1$, le flux du volume est d'une importance minime et le comportement du jet est dominé par l'élan près de la source, et par la flottabilité à une grande distance de la source.

L_m est la mesure de la distance à laquelle la flottabilité devient plus importante que l'élan du jet. Ainsi, pour un jet horizontal dans un environnement de Co-courant, l'échelle de longueur de l'élan est définie comme $L_m = M^{3/4}/B^{1/2}$, puisque la direction du jet est analogue à la direction du courant ambiant, il semble que la force de flottabilité est plus importante que l'élan ambiant en dominant le comportement de jet, donc il est plus approprié de définir l'échelle de longueur d'élan en prenant le flux de flottabilité en considération.

Dans le cas d'un jet vertical dans un courant transversal, l'échelle de longueur du flux est définie comme, $L_m = M^{1/2}/u_a$, parce que la direction du jet est perpendiculaire à la direction de la vitesse du courant ambiant, qui s'avère plus importante que la force de flottabilité en contrôlant la structure du jet. Ainsi il est plus raisonnable de considérer l'élan ambiant dans la définition de l'échelle de longueur de l'élan.

L_b , en présence du courant ambiant, représente la distance verticale à laquelle la vitesse présentée par la flottabilité (proportionnelle à $B^{1/3}z^{-1/3}$) est confondue avec la vitesse du courant ambiant u_a . [27]

En se basant sur l'équation (X), un groupement sans dimension peut être obtenu :

$$S = \frac{C_0}{C(x, y, z)} = f_4 \left\{ \frac{L_m}{L_q}, \frac{L_m}{L_b}, \left(\frac{x}{L_b}, \frac{y}{L_b}, \frac{z}{L_b} \right) \text{ ou } \left(\frac{x}{L_m}, \frac{y}{L_m}, \frac{z}{L_m} \right) \right\}$$

Où, S est la dilution au point dont les coordonnées sont (x, y, z) et

$$L_m/L_q = (4/\pi)^{1/4} F_{\Delta_0}.$$

Pour $L_m/L_q = (4/\pi)^{1/2}$, ($F_{\Delta_0} = 1.0$), la diffusion est comme une plume pure et l'orientation du jet est sans importance pour le comportement de l'écoulement.

Pour $L_m/L_q > (4/\pi)^{1/4}$, ($F_{\Delta_0} > 1.0$), l'élan du jet initial est de faire progresser le jet dans la direction initiale du jet de diffusion avant que le jet commence à se pencher et monter comme un panache.

Les écoulements peuvent être classés en deux types différents, à savoir l'écoulement dominé par flottabilité et l'écoulement dominé par l'élan, selon le ratio L_m/L_b .

Pour $L_m/L_b < 1$, l'écoulement est dominé par flottabilité.

Pour $L_m/L_b > 1$, l'écoulement est dominé par l'élan. [27]

➤ **L'analyse de la trajectoire du jet :**

Les analyses dimensionnelles impliquent que la trajectoire du jet dans le plan x-z peut dépendre de la relation impliquant les échelles de longueur de flottabilité ou de l'élan, selon le type d'écoulement.

Pour les écoulements dominés par flottabilité, on s'attend à ce que les trajectoires soient

$$\frac{z}{L_m} = C_1 \left(\frac{x}{L_m} \right)^m$$

Et pour les écoulements dominés par l'élan, $\frac{z}{L_b} = C_2 \left(\frac{x}{L_b} \right)^n$

Les exposants m et n, et les constantes C1, C2 et C3 sont à déterminer par des données expérimentales. [27]

➤ **L'analyse de la dilution :**

Dans l'analyse de la dilution, celle-ci peut être définie de plusieurs manières, par exemple, le rapport $S = c_0/c(x, y, z)$ donne la dilution locale spécifique à un point de coordonnées (x, y, z).

Le ratio $S_0 = Q_i/Q$ fournit la dilution moyenne, où Q_i est le flux du volume local.

Alternativement, la réduction de la gravité $g' = \Delta\rho/\rho_a g$ est la variable appropriée donnant la dilution d'une plume flottante puisqu'une plume pure n'a aucune diffusion initiale. L'une ou l'autre variable S_0 et g' peut être employé pour l'écoulement dominé par flottabilité et des résultats analogues peuvent être prévus.

Les considérations dimensionnelles impliquent cela, pour l'écoulement dominé par élan

$$\frac{SQ u_a}{M} = C_3 \left(\frac{z}{L_m} \right)^p$$

Et pour l'écoulement dominé par flottabilité

$$\frac{SQ}{u_a L_b^2} = C_4 \left(\frac{z}{L_b} \right)^q \quad \text{ou} \quad \frac{g' B}{u_a^5} = C_5 \left(\frac{z}{L_b} \right)^r$$

Les puissances p, q et r, et les constantes C3, C4 et C5 sont à déterminer par des données de laboratoire. [27]

V.4.2. Le champ proche :

Le champ proche est caractérisé par : la dynamique du mélange de jet submergé, les limites d'interactions et mélange de jet en surface. [22]

V.4.2.1. Dynamique du mélange de jet submergé :

L'écoulement d'un effluent à partir d'un port d'un diffuseur submergé engendre une discontinuité de vitesse entre le fluide diffusé et le milieu ambiant causant une action de cisaillement intense. Cette dernière se transforme rapidement en mouvement turbulent. La largeur de la zone de haute turbulence augmente en direction de l'écoulement en entraînant plus à l'extérieur, un fluide moins turbulent dans cette zone.

De cette manière, toutes les concentrations internes (par exemple : saumure, polluants) de l'effluent deviennent diluées par l'entraînement du milieu ambiant. Inversement, on peut parler du fait que les concentrations internes se diffusent dans le champ ambiant.

La discontinuité initiale de vitesse peut surgir dans différents modes : **jet pur** (également appelé jet non flottant), le flux d'élan initial sous forme d'injection à haute vitesse cause le mélange turbulent. Dans une **Plume pure**, le flux initial de flottabilité mène aux accélérations verticales locales qui mènent alors au mélange turbulent. Et dans le cas général d'un **jet flottant**, une combinaison du flux initial et du flux de flottabilité est responsable du mélange turbulent.

Ainsi, des jets flottants sont caractérisés par une zone liquide turbulente étroite dans laquelle le mélange vigoureux a lieu. En outre, selon l'orientation de diffusion et la direction de l'accélération de la flottabilité, des trajectoires incurvées sont généralement établies dans un environnement stagnant de densité uniforme illustrées dans la figure V.9. [22]

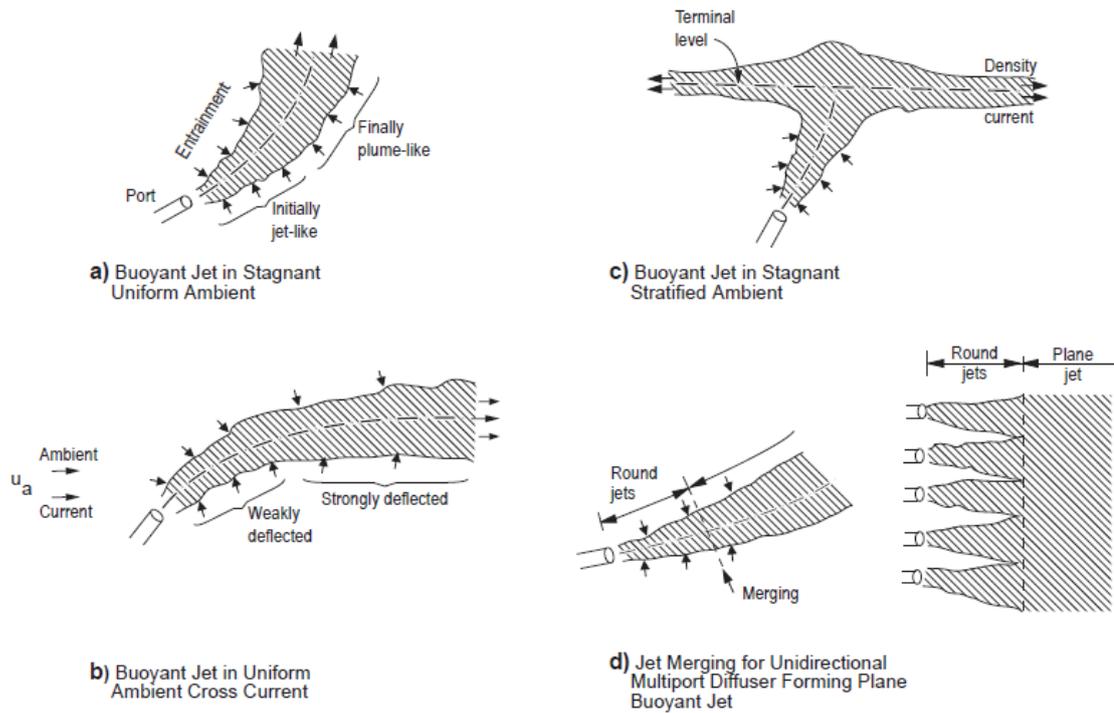


Figure V. 9: Types de modèles de jet flottant sous différentes conditions ambiantes. [22]

Le mélange du jet flottant est souvent affecté par les courants et la stratification de densité du milieu ambiant. Le rôle des courants ambiants est de guider graduellement le jet flottant dans la direction du courant comme illustré dans la figure V.9b et d'induire de ce fait un mélange supplémentaire.

Le rôle de la stratification de densité du milieu ambiant est de contrecarrer l'accélération verticale dans le jet flottant menant finalement à garder l'écoulement à un certain niveau. La figure V.9c montre une forme typique du jet flottant au niveau terminal.

Enfin, en cas de diffuseurs multiports, les différents jets flottants « round jet » se comportent indépendamment jusqu'à ce qu'ils fusionnent les uns avec les autres à une certaine distance des ports. Après fusion, une plume bidimensionnelle flottante est formée « plane jet » comme illustré dans la figure V.9.

Tous les jets flottants résultants de diffuseur multiport peuvent être affectés par les courants ambiants et par la stratification de densité comme évoqué dans le paragraphe précédent. [22]

V.4.2.2. Les limites d'interactions et la stabilité du champ proche :

Le milieu ambiant a toujours des frontières verticales, ceux-ci incluant la surface de l'eau et le fond. Mais en outre, des **frontières internes** peuvent exister telles **les pycnoclines**, qui sont des couches où la densité change rapidement. Selon les caractéristiques dynamiques et géométriques de diffusion, plusieurs phénomènes d'interaction peuvent se produire au niveau de ces limites.

Essentiellement, ces limites d'interactions fournissent une transition entre le processus de mélange de jet flottant dans le champ proche et la diffusion passive dans le champ lointain.

Ces frontières peuvent être progressives et douces, ou brusques menant à une transition et un mélange vigoureux. Elles peuvent également de manière significative influencer la stabilité des conditions de la diffusion de l'effluent.

L'évaluation de la stabilité du champ proche c'est à dire la distinction entre les conditions stables et instables, est un aspect clé de l'analyse de la dilution de l'effluent, il est particulièrement important pour comprendre le comportement des plumes bidimensionnelles résultante des diffuseurs multiport, comme représenté par quelques exemples dans la figure V.10.

Des conditions de **diffusion stable**, se produisant habituellement pour une combinaison de flottabilité forte, élan faible et eau profonde, sont souvent mentionnées comme **conditions d'eau profonde** (figure V.10 a et c).

Des conditions de **diffusion instables**, d'autre part, peuvent être synonymes de **conditions d'eau peu profonde**. (Figure V.10 b et d).

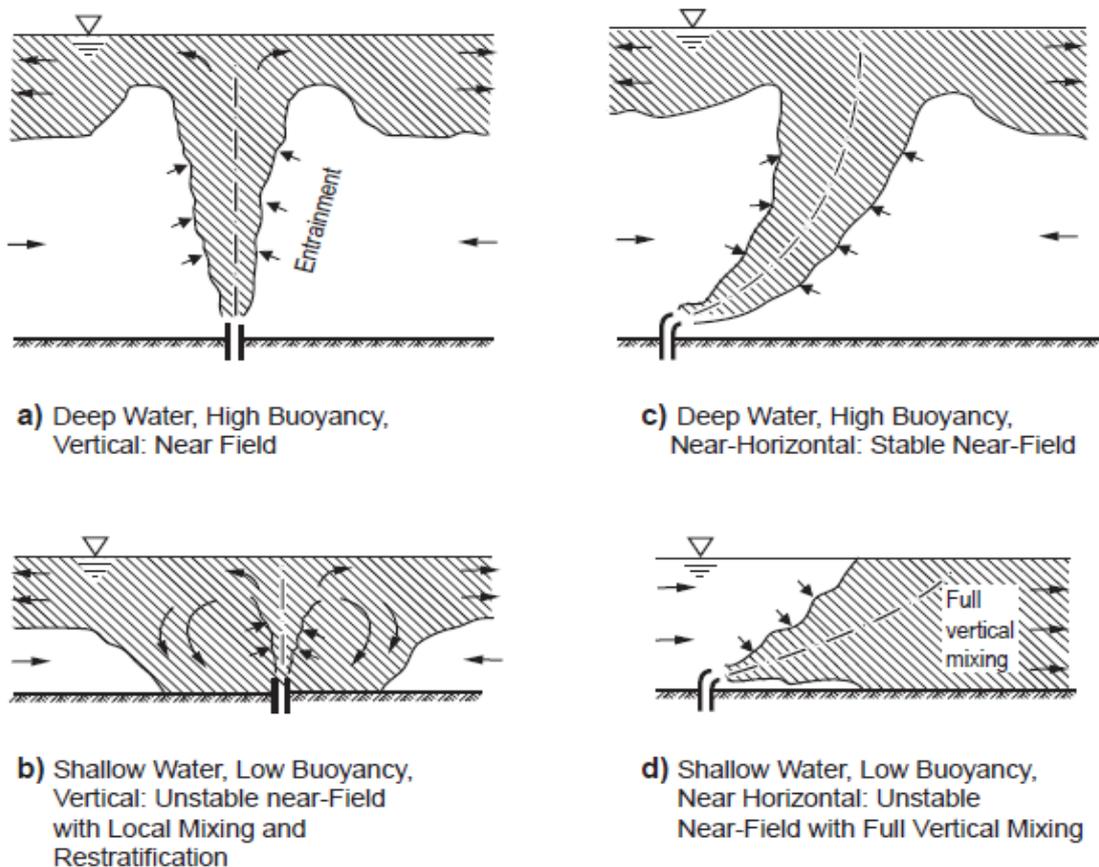


Figure V. 10: Exemples de conditions de stabilité et d'instabilité du champ proche pour des diffusions de flottabilité positive profondément immergé. [22]

Quelques exemples importants de frontière d'interaction pour un jet flottant sont illustrés dans la figure V.11.

Si un jet flottant coïncide avec un croisement de flux, il approchera graduellement la surface, le fond, ou le niveau terminal et subira une transition douce avec peu de mélange supplémentaire (figure V.10a).

Cependant un jet traversant normalement une frontière s'étendra rapidement dans toutes les directions. Les conditions de mélange à ce point d'impact peuvent prendre une des formes suivantes :

- ▶ Si l'écoulement a une flottabilité suffisante, une couche stable se formera à la surface (figure V.10b). En présence d'un écoulement ambiant faible, ceci mènera à une intrusion ascendante contre le courant ambiant.
- ▶ Si la flottabilité de l'effluent est faible ou son élan est très haut, un phénomène de recirculation instable peut se produire à proximité de la diffusion (figure V.10c). Cette recirculation locale mène au réentraînement de l'eau déjà mélangée, de nouveau dans la région du jet flottant.
- ▶ Dans un cas intermédiaire, une combinaison du mélange vertical localisé et de la propagation ascendante peut en résulter (figure V.10d).

Un autre type de processus d'interaction concerne les jets flottants submergés diffusant à proximité du fond dans un milieu ambiant.

Deux types de processus d'interaction dynamique peuvent se produire, qui mènent à l'attachement de la plume de l'effluent au fond comme illustré dans la figure V.11.

Ce sont l'**attachement de sillage** forcé par le croisement de flux, ou l'**attachement** forcé par la demande d'entraînement du jet de l'effluent lui-même. Ce dernier est dû aux effets de basse pression car le jet est proche du fond. [22]

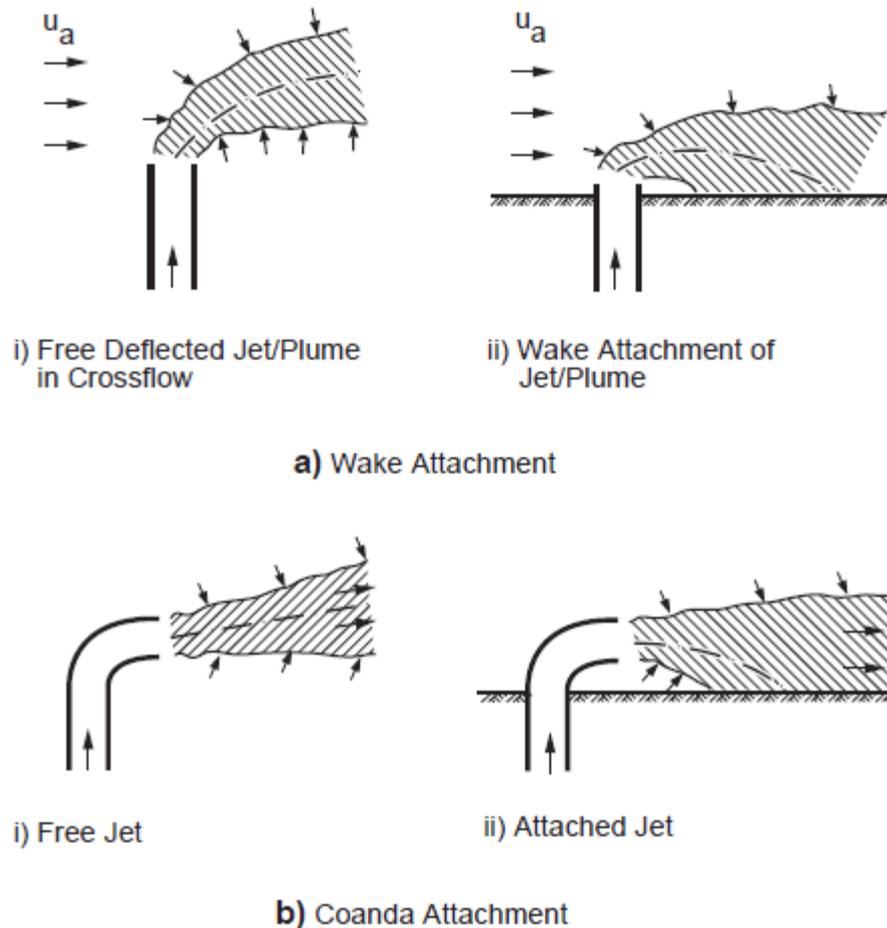


Figure V. 11: Exemples de conditions d'attachement de sillage et d'attachement pour des diffusions proche des limites profondes. [22]

V.4.2.3. Mélange de jet en surface:

Les jets flottants diffusant horizontalement le long de la surface de l'eau à partir d'un canal entrant latéralement (figure V.12), portent certaines similitudes avec les jets flottants submergés classiques. Pour une distance initiale relativement courte, l'effluent se comporte comme un jet d'élan propagé latéralement et verticalement en raison du mélange turbulent.

Après cette étape, la propagation verticale devient inhibée dû à l'atténuation flottable des mouvements turbulents, et la propagation latérale devient assez forte. Quand il ya des conditions du milieu ambiant stagnantes, une couche mince peut être formée sur la surface de l'eau.

En présence du croisement de flux ambiant, les jets flottants en surface peuvent montrer l'un des trois types de caractéristiques d'écoulement suivants. Ils peuvent former un jet faiblement guidé qui n'interagit pas avec le rivage (figure V.12b).

Quand le croisement de flux est fort, ils peuvent s'attacher à la frontière en aval formant une plume étreignante (figure V.12c).

Quand une diffusion avec une flottabilité élevée est combinée avec un croisement de flux faible, les effets de propagation peuvent être si forts, entraînant ainsi la formation d'une plume imposante qui reste également proche du rivage (figure V.12d). [22]

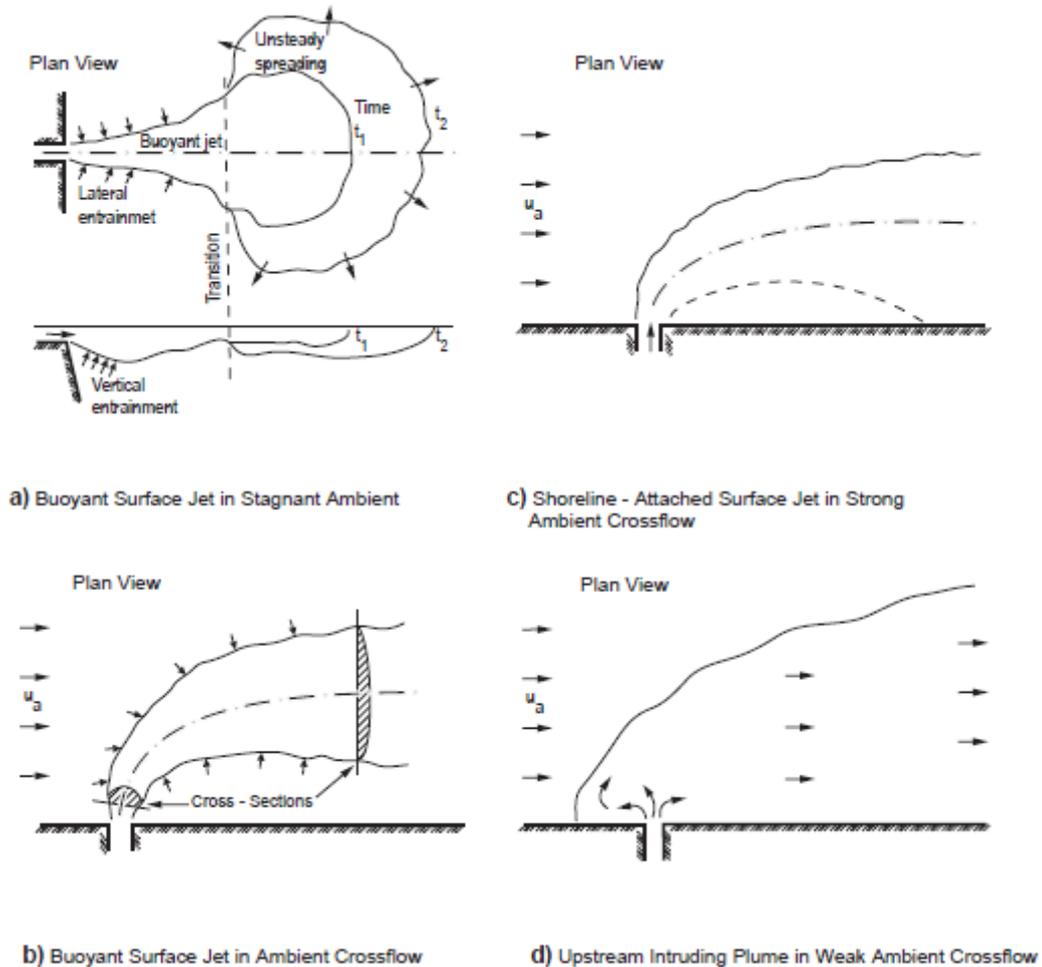


Figure V. 12: Types de modèles de mélange de jet en surface sous des conditions ambiantes stagnantes et fluctuantes. [22]

V.4.2.4. L'effet du champ intermédiaire sur la diffusion des diffuseurs multipoint :

Quelques installations de diffuseur multipoint induisent des écoulements en eau peu profonde qui se prolongent au delà de la région stricte du champ proche. Les plumes résultantes sont parfois mentionnées comme le **champ intermédiaire**, parce qu'elles interagissent avec le milieu récepteur à des distances qui sont sensiblement plus grandes que la profondeur de l'eau ; l'ordre de grandeur de la profondeur de l'eau est typiquement utilisé pour définir les dimensions de la région du champ proche.

Les champs intermédiaires peuvent se produire quand un diffuseur multiport représente une grande source d'élan avec un effet relativement faible de flottabilité. Un tel diffuseur aura un champ proche instable avec des conditions d'eau peu profonde. Pour certaines géométries de diffuseur (par exemple diffuseurs unidirectionnels et étagés), des mouvements forts peuvent être induits dans l'environnement d'eau peu profonde sous forme de courants verticalement mélangés qui entraînent latéralement le milieu ambiant et peuvent se prolonger au delà de longues distances avant qu'ils ne ré-stratifient ou absorbent leur élan. [22]

V.4.3. Le champ lointain :

Les procédés de mélange en champ lointain sont caractérisés par l'advection longitudinale de l'effluent mélangé par la vitesse ambiante. [22]

V.4.3.1. Processus de propagation de flottabilité :

La propagation de flottabilité est définie comme la propagation horizontale et transversale de la flottabilité de l'écoulement de l'effluent préalablement mélangé tandis que ce dernier subit une advection en aval par le courant ambiant.

De tels processus de propagation surgissent en raison de forces de flottabilités provoquées par la différence de densité entre l'écoulement de l'effluent mélangé et celle du milieu ambiant.

Ils peuvent être des mécanismes de transport efficaces qui peuvent rapidement répandre un effluent mélangé latéralement au-dessus de grandes distances dans la direction transversale, en particulier en cas de stratification ambiante forte.

Dans cette situation, l'effluent d'épaisseur verticale considérable au niveau terminal peut s'effondrer et se voir ainsi posséder une couche mince mais très large, à moins que ceci soit empêché par des frontières latérales.

Si la décharge est démunie de flottabilité ou peut flotter et que le milieu ambiant n'est pas stratifié alors il n'y a pas de région de propagation de flottabilité dans le champ lointain. En effet, dans ce cas, il y a seulement une région passive de diffusion.

Dépendamment du type d'écoulement dans le champ proche et de la stratification ambiante, plusieurs types de propagation de flottabilité peuvent se produire. Par ces derniers :

- ▷ Propagation sur la surface de l'eau ;
- ▷ Propagation au niveau du fond ;
- ▷ Propagation à une interface interne pointue (pycnoclyne) avec un saut de densité ;
- ▷ Propagation au niveau terminal dans un fluide ambiant continuellement stratifié.

Pour exemple, la définition du diagramme ainsi que la structure du processus de propagation de la flottabilité de surface légèrement en aval de la décharge dans le croisement d'un flux non-stratifié est schématisé dans la figure V.13. [22]

L'écoulement latéral de propagation se comporte comme un courant de densité et entraîne un certain fluide ambiant dans « la région principale » du courant. Pendant cette phase, le taux de mélange est habituellement relativement petit et l'épaisseur de la couche peut diminuer.

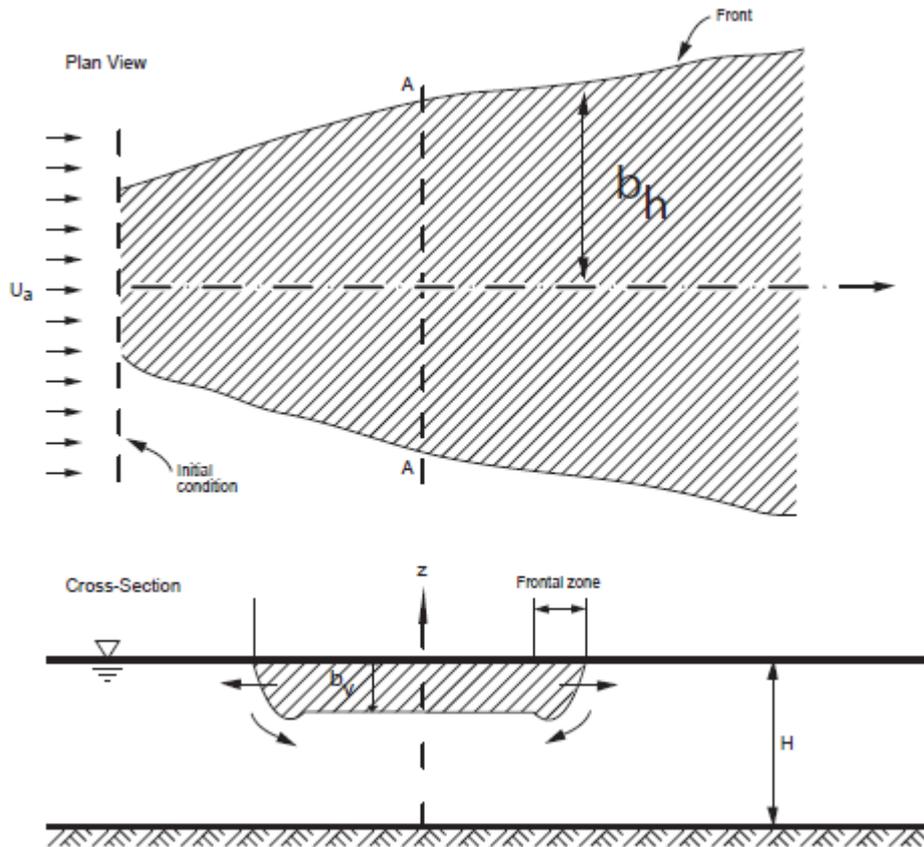


Figure V. 13: Exemple de propagation de flottabilité le long de la surface d'eau. [22]

V.4.3.2. Processus de diffusion passive dans le milieu ambiant :

La turbulence existante dans l'environnement ambiant devient le mécanisme de mélange dominant à des distances suffisamment larges du point de décharge.

En général, l'écoulement diffusé de manière passive se développe aussi bien en largeur et en épaisseur et ce jusqu'à ce qu'il rentre en interaction avec le fond du canal, comme il est illustré sur la figure V.14.

La force du mécanisme de diffusion ambiante dépend d'un certain nombre de facteurs qui dépendent principalement de la géométrie du cisaillement ambiant de l'écoulement ainsi que de la quantité de stratification ambiante.

Dans le contexte de la théorie de la diffusion classique, des procédés de diffusion de gradient dans les écoulements des rivières ou des estuaires étroits peuvent être décrits par des diffusivités constantes dans les directions verticale et horizontale qui dépendent aussi bien de l'intensité de la turbulence, de la profondeur du canal, de la largeur et de la longueur de l'échelle de mesure.

En revanche, les vastes canaux sans frontières ou les régions côtières ouvertes sont caractérisés par des diffusivités dépendantes de la taille de la plume, qui mènent vers l'accélération de la croissance décrite de la plume en question, par exemple, par la « loi $\frac{3}{4}$ » de diffusion.

En présence d'une stratification stable, le mélange diffusif vertical est généralement fortement atténué. [22]

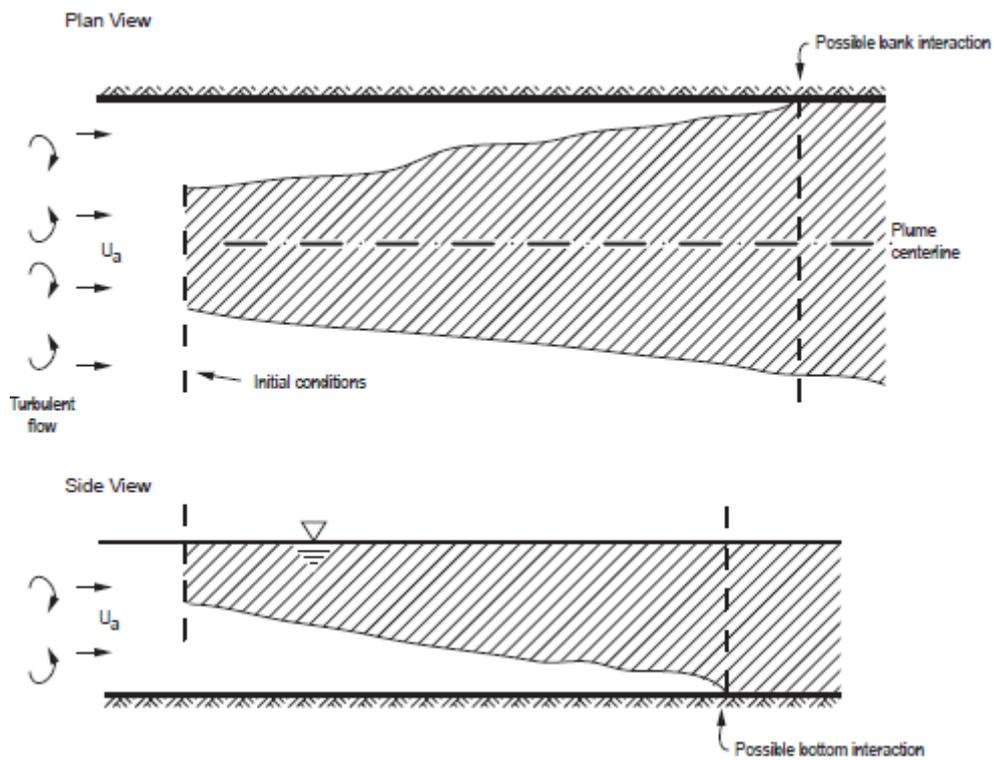


Figure V. 14: Processus de diffusion passive avec advection dans le champ lointain. [22]

Chapitre VI : Simulation des rejets en mer et optimisation des dimensions du diffuseur de saumure

VI.1 Introduction et problématique :

Les usines de dessalement rejettent la même charge de constituants de l'eau de mer que celle qu'elles ont reçue, mais dans un volume d'eau moindre, en effet, une usine de dessalement, notamment celle de « Magtâa », travaille en recueillant un volume déterminé d'eau de mer (1 millions de m³/j), récupérant ainsi la moitié de ce volume comme eau potable et dessalée (500.000 m³/j) et en rejetant approximativement l'autre moitié comme eau avec une salinité de l'ordre du double à celle initialement captée. Par conséquent un effluent d'eau de rejet de 1m³/s comporte un captage salin qui équivaut à 2m³/s.

De ce fait, un effluent comportant une quantité de saumure de haute salinité est produit et doit être rejeté dans le milieu marin avec un minimum d'impact sur l'environnement et dans cet optique là, les experts dans le domaine doivent assurer une bonne dispersion de cet effluent au niveau du milieu récepteur.

Pour ce faire, de nombreux paramètres, liés aussi bien au milieu récepteur (la mer) qu'à la décharge elle-même et donc du « diffuseur » doivent être pris en considération.

Dans ce chapitre, nous étudierons dans un premier temps le dimensionnement du diffuseur de rejet hyper-salin de la méga-station de dessalement de « Magtâa » en faisant varier ses différentes caractéristiques techniques par le biais de multiples simulations à l'aide d'un modèle spécialisé nommé « CORMIX » et ce dans le but d'étudier l'impact des différents paramètres sur la dispersion de la saumure et d'aboutir à un dimensionnement optimal.

Dans une seconde étape, nous étudierons l'impact sur l'environnement du diffuseur de la méga-station, en prenant en compte les différents scénarios pouvant survenir au niveau du milieu récepteur.

VI.2 Technique de simulation (Modèle CORMIX) :

Pour faire notre étude et résoudre notre problématique, nous avons utilisé la version 9.0 du logiciel CORMIX afin d'étudier le processus de dispersion en mer dans le domaine proche du rejet de l'usine de dessalement de Magtâa. En effet, le code CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) est un logiciel pour l'analyse, la prévision et la conception des déchets toxiques, salins, thermiques ou simplement de déchets flottants dans des corps d'eau.

Près du diffuseur, le processus de mélange dans la direction des bouches de sortie dû à la conception de ces dernières, de la vitesse de sortie du courant et du mélange verticale dû à la flottabilité, prévaut sur l'effet d'advection provoqué par les courants marins qui existent dans la zone. C'est donc pour cette raison que nous avons utilisé ce logiciel qui décrit de manière adéquate les processus de mélange dans ce domaine dit « proche ».

CORMIX est un modèle de type stationnaire qui fait partie de la catégorie des modèles *échelles de longueurs*. Ces modèles mesurent l'influence relative du débit de l'effluent, de sa quantité de mouvement (débit \times vitesse des eaux usées), de sa flottabilité et de la vitesse moyenne du courant du milieu récepteur sur la dispersion de l'effluent dans celui-ci. (Amitouche)

Le modèle CORMIX fournit une façon efficace de représenter en trois dimensions les processus de mélange et de transport d'un effluent dans différents types de milieux récepteurs avec un haut niveau de détail. Les équations du modèle sont basées sur l'analyse géométrique de l'effluent depuis son point de décharge puis de son panache en aval immédiat (*near field*) et en zone éloignée (*far field*). Chacune de ces zones sont traditionnellement modélisées en utilisant des équations intégrales. Le modèle compte sur des auto-similarités pour réduire des équations tridimensionnelles en équations unidimensionnelles. Il résout alors la trajectoire tridimensionnelle et la concentration maximale au centre du panache en utilisant des équations intégrales unidimensionnelles (Socolofsky et Jirka, 2004).

Pour représenter la zone de mélange, le modèle CORMIX a recours à des modules qui utilisent une distribution gaussienne (cloche) (comme représentée ci-dessous) des concentrations, latéralement. Il calcule une concentration maximale au centre du panache et donc une dilution minimale à cet endroit. On utilise l'appellation *hydrodynamic centerline dilution* pour désigner cette zone de dilution minimale.

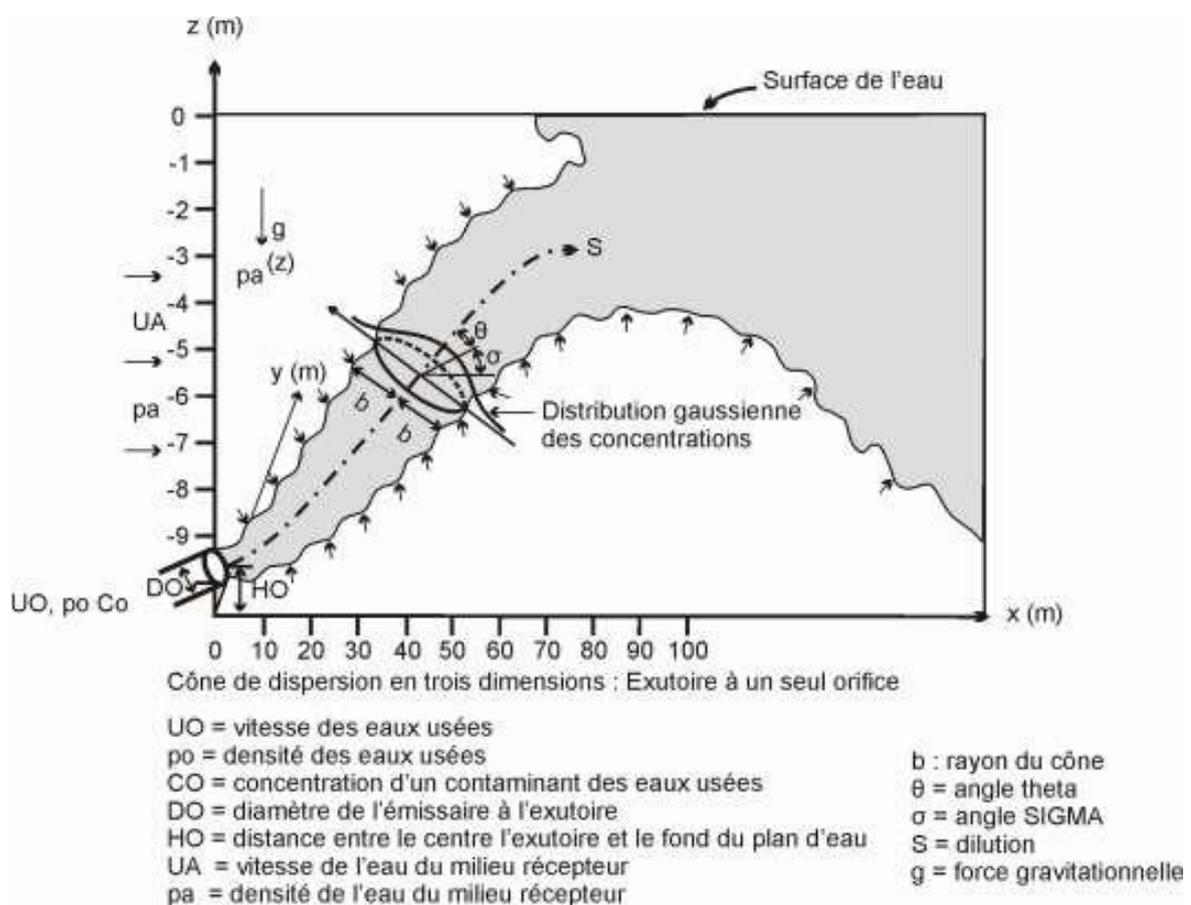


Figure VI. 1: Distribution gaussienne des concentrations [22]

➤ **Paramètres de simulation :**

Une série de paramètres communs à l'ensemble des scénarios, représentant les données et caractéristiques de la méga-station de dessalement d'eau de mer de Magtâa, a été établie afin de permettre de les comparer et les discuter. Il s'agit de paramètres relatifs à l'eau de mer, à la saumure ainsi qu'à l'émissaire.

Ces données sont les suivantes :

Tableau VI. 1: Caractéristiques de la méga-station de dessalement de Magtâa

| Caractéristiques de l'effluent : | |
|--|---------------------------|
| Débit maximal de rejet | 8,31 m ³ /s |
| Salinité | 62,60 g/l |
| Limité de salinité tolérée | 40 g/l |
| Accroissement de salinité | 25.6 |
| Densité (20°C) | 1046 kg/m ³ |
| Caractéristiques du milieu récepteur : | |
| | 37 g/l |
| Densité (20°C) | 1026,29 kg/m ³ |
| Vitesse du vent | 2 – 8 m/s |
| Vitesse du courant | 0.02 – 2 m/s |
| Caractéristiques du diffuseur : | |
| Distance par rapport à la côte | 600 m |
| Profondeur au point de versement | 8 m |
| Longueur de la section du diffuseur | 120 m |
| Nombre de ports | 60 unités |
| Distance entre les ports | 2 m |
| Hauteur du diffuseur | 0.6 m |
| Diamètre des ports | 0.15 m |
| Vitesse de sortie du débit | 7.8 m/s |
| Angle de décharge | 45° |

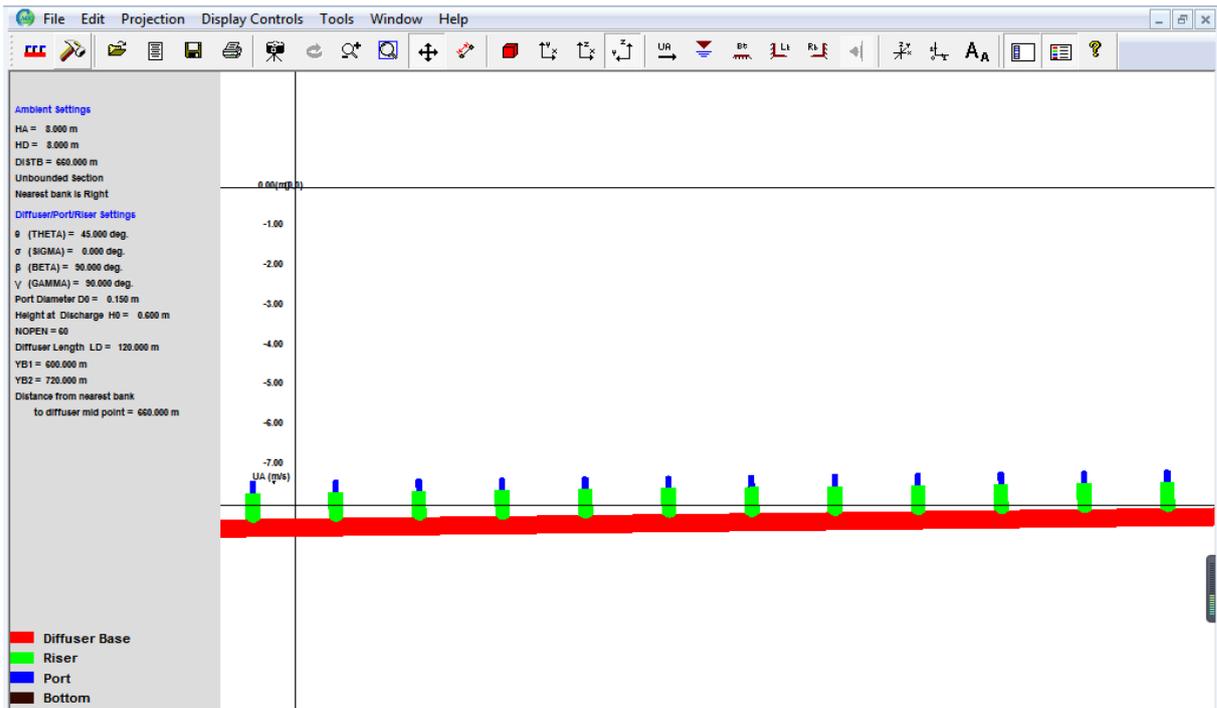


Figure VI. 2: Schéma descriptif du diffuseur de saumure de l'Usine de Magtâa

Grâce au modèle CORMIX qui prend en compte tous ces paramètres (comme le démontre la figure ci-dessous), nous étudierons et discuterons le dimensionnement de base du diffuseur de notre usine de dessalement et ce en faisant varier ses différentes caractéristiques.

Ceci nous permettra, par ailleurs, de comprendre comment chaque paramètre influe sur le rejet de l'effluent, la dispersion de la saumure et donc sur la protection de l'environnement marin.

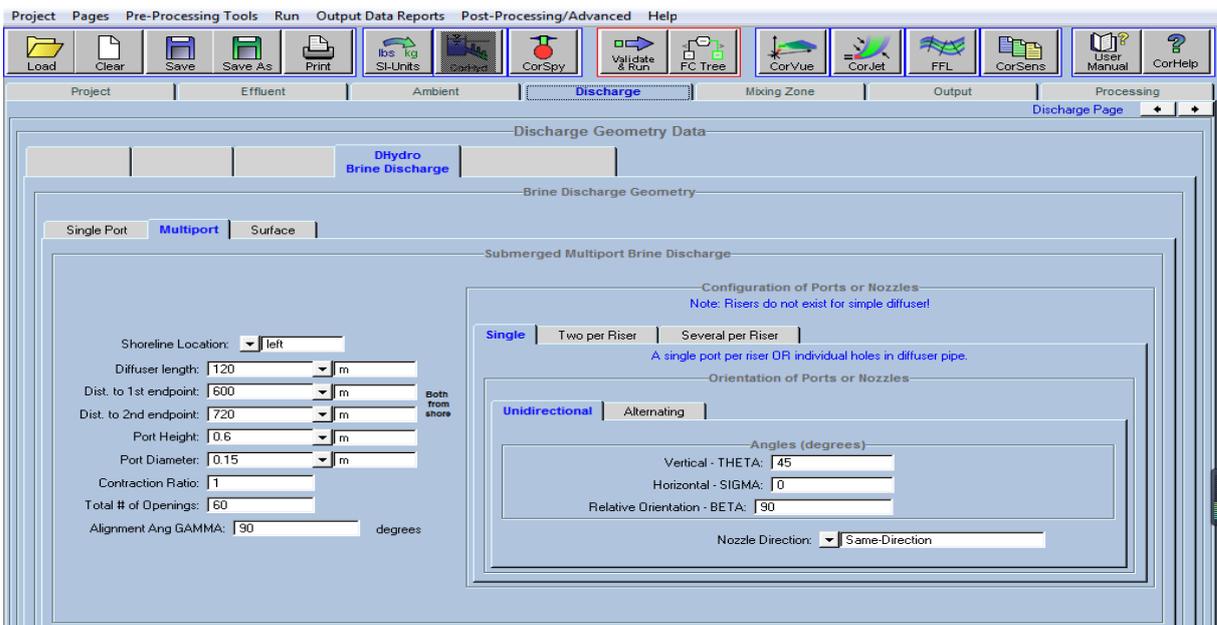


Figure VI. 3: Onglet destiné aux paramètres du diffuseur sur l'interface CORMIX

VI.3 Concepts généraux :

Avant d'entamer les simulations, il est important de connaître et de rappeler quelques concepts généraux qui vont nous permettre par la suite de juger si une combinaison de paramètres de dimensionnement d'un diffuseur est bonne ou pas.

La saumure est généralement déchargée comme un jet turbulent avec une densité qui est significativement plus élevée que la densité de l'eau de mer ambiante. Ainsi, un mélange rapide de la saumure évacuée est souhaitable afin d'assurer un minimum d'impact, ce qui exige une connaissance détaillée du développement d'un jet.

Autrement dit, la salinité tolérée du milieu ambiant (40 g/l), doit être atteinte au niveau du champ proche, à la plus petite distance possible du point de rejet. Par ailleurs, ce champ proche doit également être minimisé afin de consommer le moins d'énergie possible lors de la décharge.

Étant donné que la densité du jet est supérieure à la densité de l'eau réceptrice, le jet a une flottabilité négative et il va empiéter sur le fond à une certaine distance du point de décharge en fonction de la quantité de mouvement initiale, la flottabilité, l'angle de décharge, ainsi que les conditions bathymétriques.

Après la rencontre du jet avec le fond marin il se propagera comme un courant de gravité, avec un taux de mélange très faible. De ce fait, la décharge se doit d'atteindre une certaine salinité, qui une fois ajoutée à la salinité de l'eau ambiante, correspondra à celle tolérée et ce bien avant que cette dernière n'atteigne le fond, afin d'assurer un impact minime sur l'environnement.

Le taux de dilution requis de l'effluent est calculée et correspond à $S=20.8$. Autrement dit, la salinité de notre rejet, qui est égale à 62,6 g/l, doit être diluée un peu moins de 30 fois afin que le panache qui est engendré ne dépasse pas les 40 g/l tolérés, une fois mélangée à l'eau de mer.

Le taux de dilution requis est donc calculé comme suit :

$$S = \frac{\text{Salinité de l'effluent}}{\text{Salinité Tolérée} - \text{Salinité du milieu ambiant}} = \frac{62.6}{40 - 37} = 20.8$$

VI.4 Analyse et interprétation des résultats :

A. Optimisation des dimensions du diffuseur :

Dans cette partie nous analyserons les divers facteurs liés à la conception de l'émissaire, qui influent sur la dilution de la saumure. D'abord nous étudierons l'effet de l'angle de rejet, puis l'effet de la hauteur de l'émissaire, sa profondeur, la vitesse de rejet et pour finir, le nombre de ses ports.

La méthodologie de simulation étant de faire varier les valeurs de chaque paramètre à partir de ceux cités précédemment au niveau du Tableau VI.I, de le fixer pour la valeur la plus pertinente par rapport aux résultats obtenus, pour ensuite en faire varier un autre, jusqu'à l'aboutissement d'un dimensionnement optimal. Ceci dans le but de discuter le diffuseur déjà mis en place au niveau de l'usine de dessalement de Magtâa et d'y apporter des améliorations.

Dans cette partie, nous considérons uniquement les paramètres liés à la conception du diffuseur et nous fixerons les paramètres liés à l'environnement, autrement dit, la vitesse du vent ainsi que celle du courant. Pour ces dernières, nous considérons le cas le plus favorable et le plus fréquent en Méditerranée, en prenant une vitesse de vent égale à 8m/s ainsi qu'une vitesse de courant de 2m/s.

➤ Variation de l'inclinaison des bouches de sortie :

Sur la figure VI.4, nous pouvons voir les graphiques de la dilution de la saumure pour différentes inclinaisons possibles des bouches du diffuseur, sachant que notre champ proche prend fin à une distance $x = 60$ m.

La figure montre que plus l'angle de diffusion est grand, moins la dilution est bonne et qu'une meilleure dilution est présente pour des angles situés entre 0 et 45° (courbes pratiquement superposées), avec une diffusion très légèrement meilleure pour un angle de 30° sur une grande distance.

Néanmoins nous avons opté pour l'angle de 45° car le taux de dilution requis y est atteint à une distance plus proche du point de rejet, qui est égale à 23m.

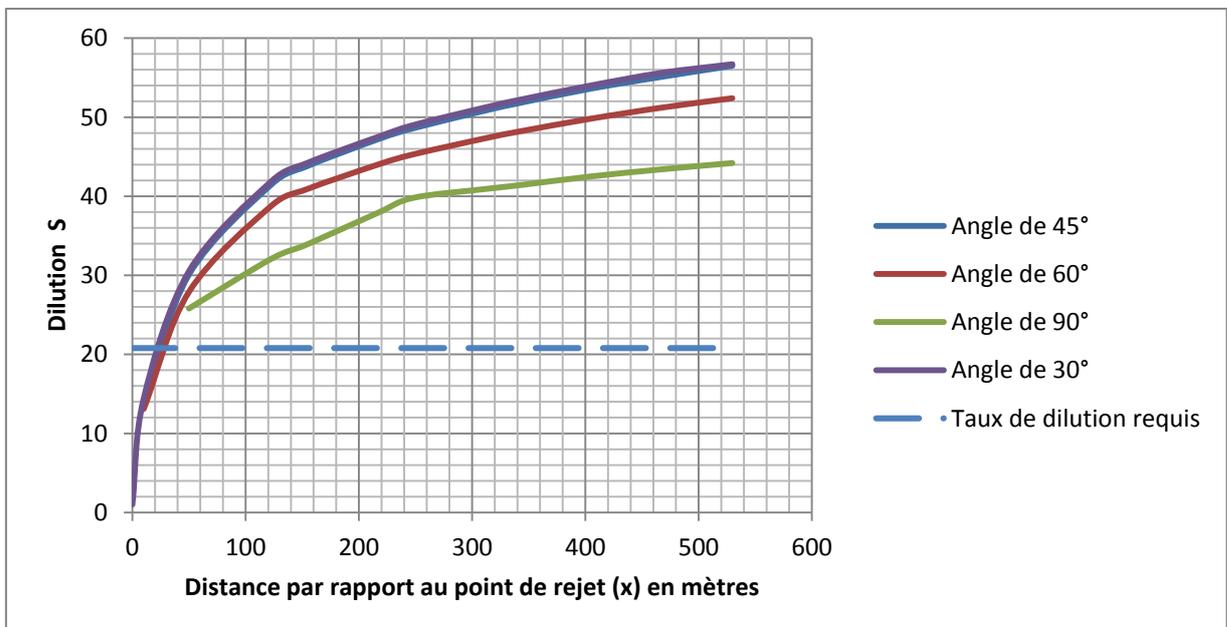


Figure VI. 4: Graphique des dilutions en fonction de différentes inclinaisons du diffuseur

➤ **Variation de la hauteur des bouches de versement :**

Sur la figure VI.5, nous pouvons voir les graphiques de la dilution de la saumure pour différentes hauteurs de bouches de versements, tout en gardant une profondeur de rejet de 8m.

Nous remarquons que la hauteur des bouches n'a aucune influence sur la dispersion de la saumure et sur la dilution de l'effluent. En effet, la figure montre clairement que les trois courbes sont totalement confondues.

La hauteur à choisir est donc en relation avec la bathymétrie du fond marin. Cette hauteur est prise en considération dans le but d'éviter l'enterrement des bouches de rejet et du diffuseur.

Dans cette optique là, nous préconisons la hauteur considérée par la station de dessalement de Magtâa et qui s'élève à 0.6 mètres.

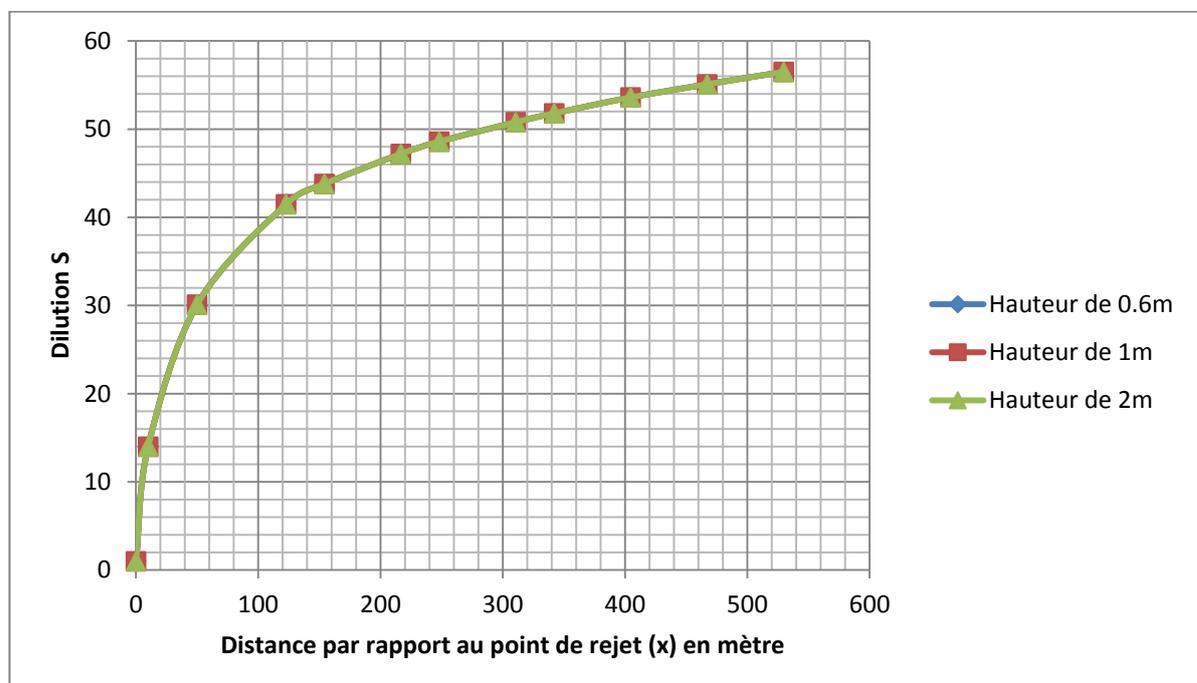


Figure VI. 5: Graphiques des dilutions en fonction des différentes hauteurs de la bouche de versement

➤ **Variation de la profondeur sur la décharge du déchet :**

Sur la figure VI.6, nous pouvons voir les graphiques de la dilution de la saumure pour différentes profondeurs au dessus des bouches de versements.

Nous voyons que plus la profondeur est grande, meilleure est la dilution. Pour une profondeur de 9m, le taux de dilution S est atteint à une distance $x = 19$ m. Néanmoins nous avons préconisé une profondeur de 8m bien que la taux de dilution n'est atteint qu'à une distance de 23m (ce qui est quand même très pertinent) pour des raisons liées à la topographie du fond marin.

En effet, comme on le voit sur les figures VI.7 et VI.8, qui reproduisent le profil topographique de la zone d'étude, on voit que de 0 à -9 mètres, les courbes de niveau du profil sont douces et parallèles en gradin, avec une pente de 1.16 %, par contre, à des profondeurs de -9 à -11 mètres, on observe un fond présentant des affleurements rocheux; ces morphologies donnent du relief au profil, par la succession d'élévations et de cuvettes, ce qui rend cette zone non praticable pouvant porter préjudice à notre émissaire.

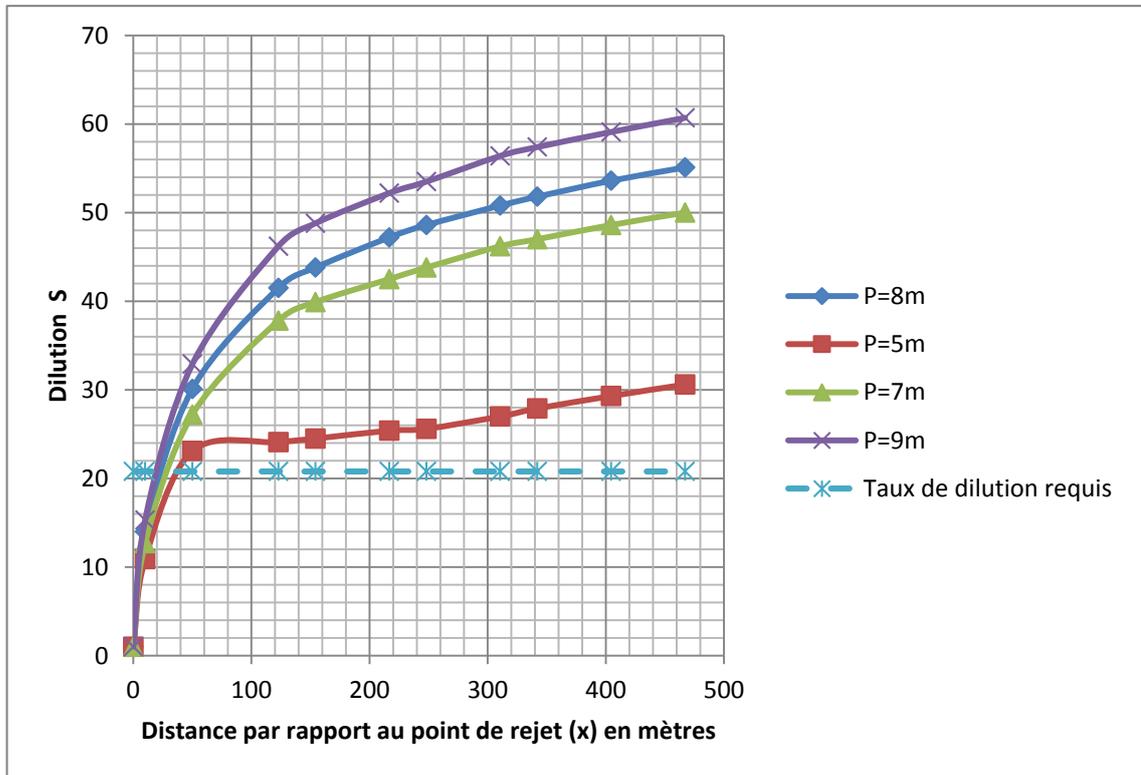


Figure VI. 6: Graphiques des dilutions en fonction des différentes profondeurs sur la décharge du rejet

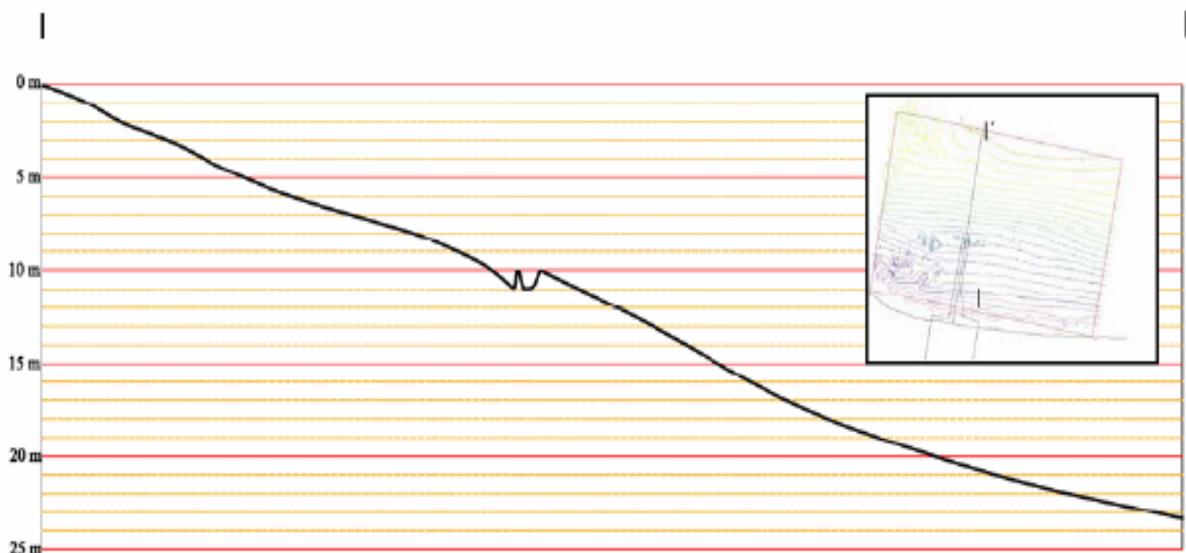


Figure VI. 7: Profil topographique du fond marin

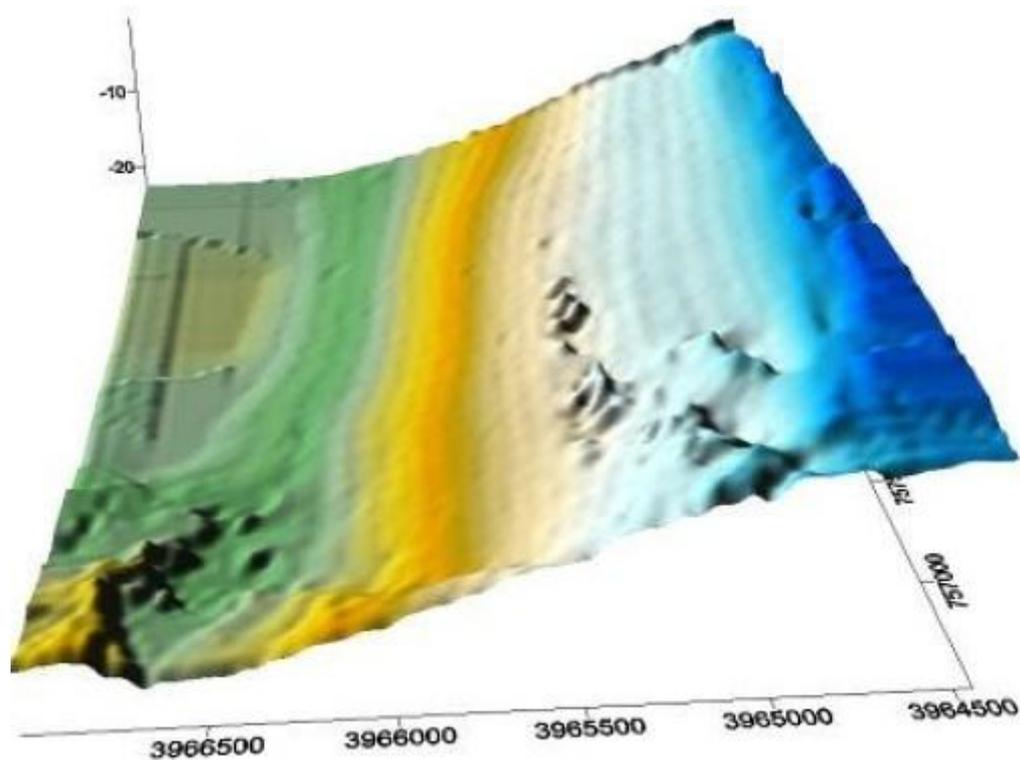


Figure VI. 8: Bathymétrie 3D du fond marin

➤ **Variation du diamètre des ports (vitesse de rejet) :**

Sur la figure VI.8 nous pouvons voir les graphiques de dilution pour 3 diamètres différents **D=0.1m (17,63m/s)**, **D=0.15m (7,8 m/s)** et **D=0.2m (4.4m/s)**.

Nous observons que la meilleure condition de dilution est donnée par des vitesses supérieures de sortie du débit du diffuseur et par conséquent par des diamètres inférieurs, en d'autres termes, plus la vitesse de sortie est grand, meilleure est la dilution.

Néanmoins, les grandes vitesses bien qu'elles améliorent la dilution, requièrent l'emploi de mesures très spéciales pour éviter des dommages au niveau des bouches de sortie, de plus, pour un diamètre de 0.1 m, nous obtenons un champ proche atteignant les 700 mètres, ce qui est énorme en terme d'énergie et significativement dangereux pour le diffuseur, sans compter que son utilité n'est que très légèrement prononcée étant donnée la faible différence en terme de dilution, comparé au diamètre inférieur de 0.15m.

C'est pourquoi le diamètre de 0.15 m est hautement préconisée.

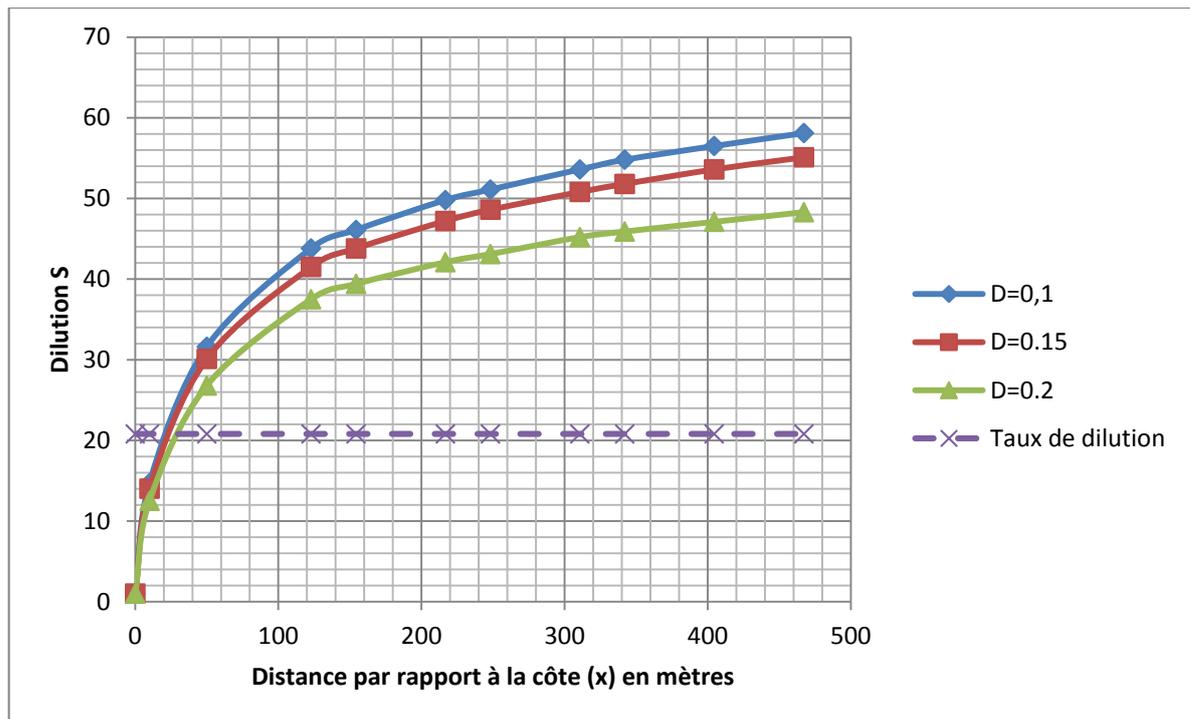


Figure VI. 9: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports

➤ **Variation du nombre de ports :**

Dans le but de comprendre l'influence du nombre de ports du diffuseur sur la dilution et la dispersion de la saumure, nous avons simulé cette influence de la manière suivante.

Nous avons fait varier le nombre de ports tout en accompagnant cela d'un changement de diamètre, afin de garder une vitesse de rejet identique et égale à 7,8 m/s.

Nous avons considéré les données suivantes, représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI. 2: Alternatives proposées de diffuseurs

| Type de diffuseur | Longueur (m) | Diamètres des bouches | Nombre de bouches | Vitesse de rejet (m/s) |
|-------------------|--------------|-----------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | 120 | 0.15 | 60 | 7.8 |
| 2 | 80 | 0.18 | 40 | 7.8 |
| 3 | 60 | 0.21 | 30 | 7.8 |
| 4 | 20 | 0.37 | 10 | 7.8 |

La figure VI.10 représente les différentes dilutions pour chaque type de diffuseur, nous remarquons que plus les ports de rejet sont nombreux, meilleure est la dispersion de la saumure et donc de la dilution de cette dernière.

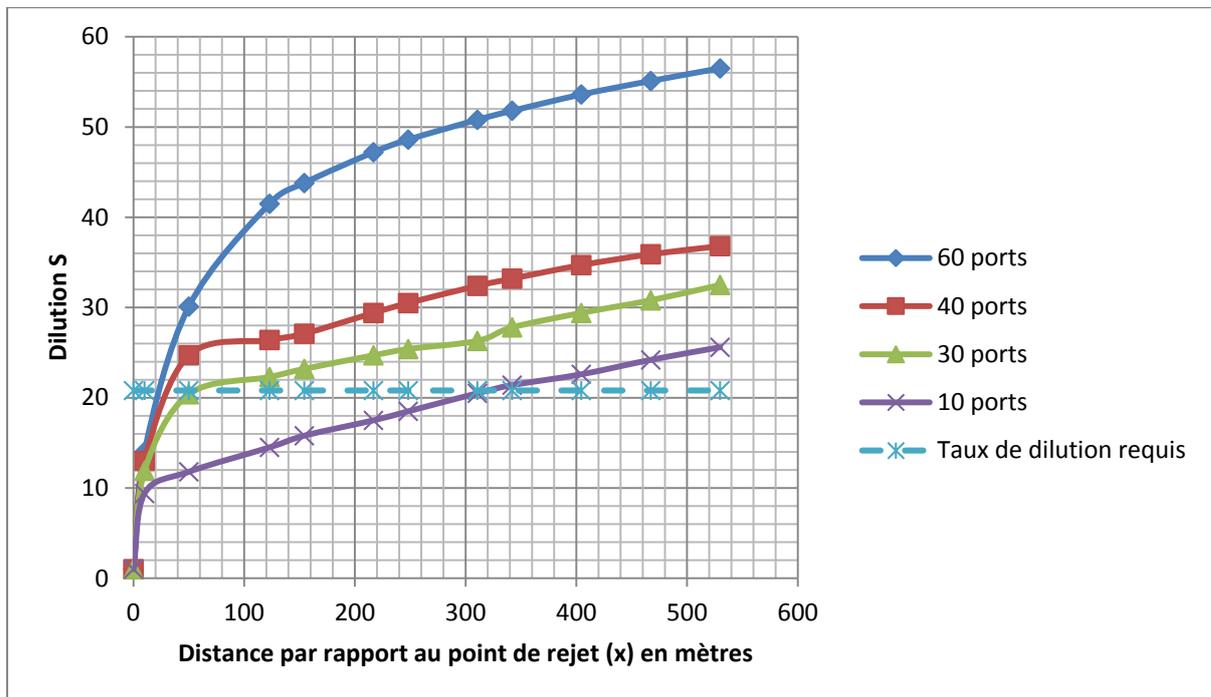


Figure VI. 10: Graphiques des dilutions en fonction des différents types de diffuseurs

Grâce à la figure VI.10 ainsi qu'à quelques autres résultats importants que procure le logiciel CORMIX et qui sont représentés sur le tableau VI.3 ci-dessous, nous arrivons à la conclusion que le diffuseur N°1 reste la meilleure alternative.

En effet, pour les diffuseurs 3 et 4 nous remarquons que le panache touche le sol avant que le taux de dilution requis ne soit atteint, ce qui est très mauvais pour la dilution et pour l'environnement marin. Quant au diffuseur 2, nous voyons que le champ proche est trop distant par rapport au point de rejet, tandis que le taux n'est atteint qu'à 28 m.

Tableau VI. 3: Résultats de simulations

| Type de diffuseur | Distance parcourue pour atteindre le taux de Dilution (m) | Distance parcourue avant que le panache empiète sur le sol (m) | Longueur du champ proche (m) |
|-------------------|---|--|------------------------------|
| 1 | 23 | 40 | 60 |
| 2 | 28 | 40 | 174 |
| 3 | 68 | 30 | 315 |
| 4 | 322 | 10 | 530 |

Après avoir étudié l'influence de chaque paramètre sur la dispersion et simulé une multitude de cas, nous arrivons à la conclusion que le dimensionnement général que nous avons préconisé est identique à celui adopté par l'usine de dessalement d'eau de mer de Magtâa.

B. Etude de comportement du diffuseur dans le milieu récepteur :

Après le dimensionnement du diffuseur de saumure, il est à présent important d'étudier son comportement par rapport aux nombreux changements climatiques pouvant survenir au niveau du milieu récepteur (eau de mer).

En effet, les vitesses environnementales liées aussi bien au vent qu'au courant jouent un rôle important dans le développement du panache et donc de la dilution de la saumure.

Pour ce faire nous avons étudié le comportement du diffuseur pour 3 couples de vitesses, un premier couple représentant un cas favorable, un second représentant un cas intermédiaire et enfin, un dernier, représentant un cas défavorable. Ces trois cas sont représentés dans le tableau VI.4 suivant :

Tableau VI. 4: Cas de vitesses environnementales étudiées

| Type de cas | Vitesse du courant (m/s) | Vitesse du vent (m/s) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Cas 1 : favorable | 0.2 | 8 |
| Cas 2 : intermédiaire | 0.14 | 6 |
| Cas 3 : défavorable | 0.002 | 2 |

La figure VI.11 ci-dessous, représente les différentes dilutions pour différents couples de vitesses environnementales. Nous observons que plus la vitesse augmente, meilleure est la dilution.

Concernant le cas le plus favorable, le taux de dilution requis est atteint après un parcours de 23 mètres, quant au cas intermédiaire, ce dernier est atteint à une distance de 33 mètres du point de rejet. Des résultats qui restent satisfaisants, compte tenu du fait que le champ proche atteint sa limite à une distance de 60 mètres et que le panache touche le sol après avoir parcourue 40 mètres, comme le montre la figure VI.12 représentant le profil vertical du panache.

Quant au cas le plus défavorable, le logiciel nous montre que le taux de dilution requis de salinité ne sera atteint qu'au-delà de 60 mètres, autrement dit, bien après que le panache ne

touche le sol. Ce qui est très dangereux pour l'environnement marin, ainsi que pour son écosystème.

Par ailleurs, les simulations nous montre que jusqu'à une vitesse de vent de **4,7 m/s** accompagnée d'une vitesse de courant de **0.12 m/s**, la saumure atteint son taux de dilution requis bien avant que le panache ne touche le fond. De ce fait, jusqu'à cette limite, le dimensionnement du diffuseur reste bon.

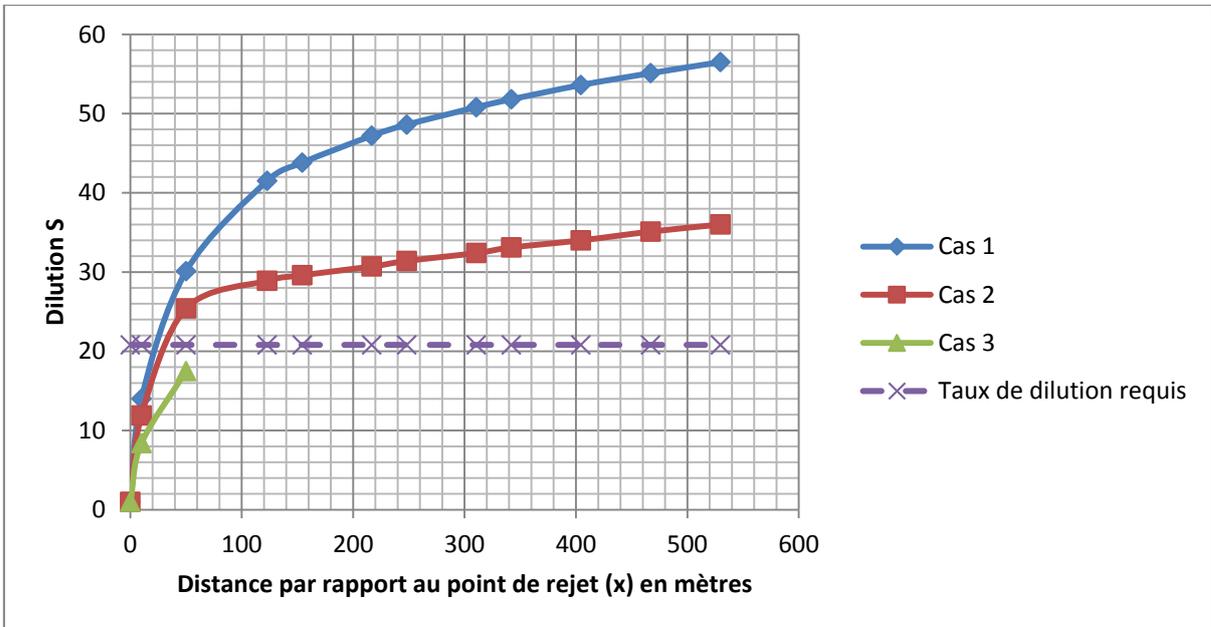


Figure VI. 11: Graphiques des dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales

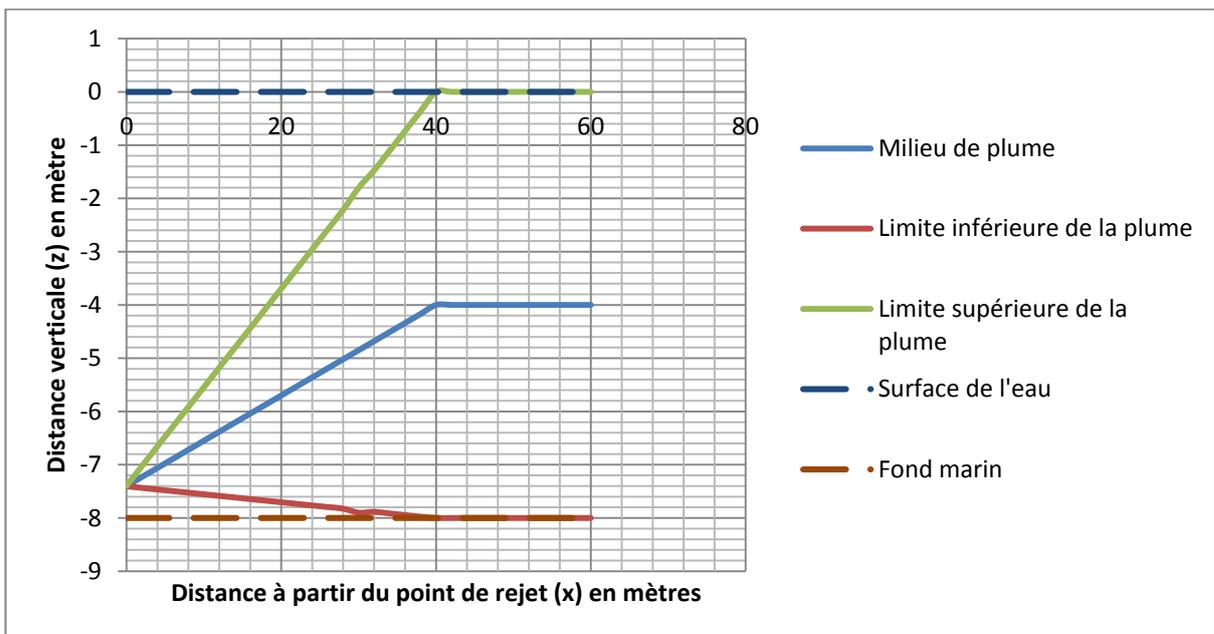


Figure VI. 12: Profil vertical du panache

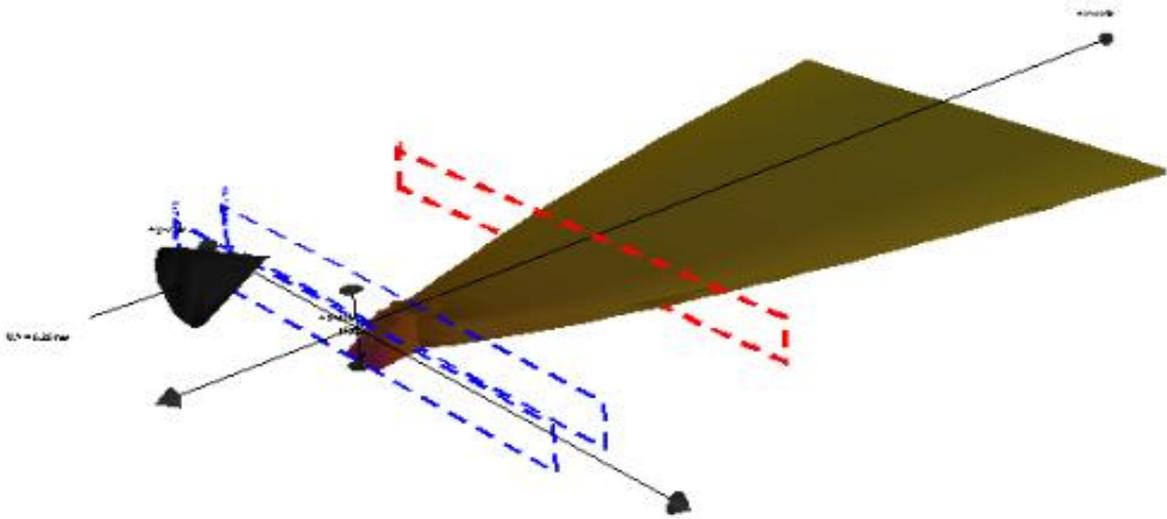


Figure VI. 13: Profil 3D du panache

VI.5 Conclusion :

Au terme de cette étude nous avons réalisé que chaque paramètre de dimensionnement joue un rôle primordial dans la dilution de la saumure en mer, que chacun d'eux doit être choisi de manière judicieuse afin de générer le minimum d'impact négatif possible sur le milieu aquatique et l'environnement marin.

Le choix du volume de saumure à rejeter ainsi que son emplacement, est un choix crucial étant donné qu'il est lié directement à la prévention de la pollution marine et la protection des écosystèmes aquatiques.

La longueur de l'émissaire, sa distance au rivage, son niveau au-dessus du fond de la mer, l'étude du diffuseur, ainsi que sa profondeur sous l'eau et les caractéristiques hydrodynamiques (courant, vagues,...) peuvent conditionner la dispersion de la saumure et par voie de conséquence, l'impact potentiel sur l'environnement.

En conclusion nous pouvons affirmer que la configuration adoptée par l'usine de dessalement de Magtâa est la plus complète qui soit. Cette dernière permet d'atteindre les dilutions nécessaires quelques soient les scénarios de vitesses environnementales qui agissent sur le littoral oranais et la mer méditerranéenne.

En effet, le diffuseur de Magtâa procure une dilution très pertinente, car il assure grâce à sa constitution et plus particulièrement à son angle et sa vitesse de déversement une certaine trajectoire parabolique permettant une dilution parfaite de la saumure bien avant qu'elle ne touche le fond marin.

CONCLUSION GENERALE :

Le dessalement d'eau de mer, considéré comme étant une technique non-conventionnelle d'approvisionnement en eau potable est une alternative qui semble pertinente et inévitable compte tenu de la pénurie d'eau mondiale actuelle.

Le nombre d'usines de dessalement ne cesse donc de s'accroître dans le monde et plus particulièrement sur le pourtour méditerranéen. En effet, plusieurs stations ont été installées et rejettent toutes des quantités conséquentes d'effluents saumâtres au niveau de la mer Méditerranée.

En plus d'être deux à trois fois plus chargés en sel que le bassin méditerranéen, ces rejets sont également constitués de différents métaux lourds et produits chimiques, qui à long terme, pourrait s'avérer nocifs pour l'écosystème marin.

Cet effluent est rejeté en mer dans le but d'être dilué à l'aide de diffuseurs spéciaux et la dilution dépend de la configuration de ces derniers.

Un dimensionnement optimal d'un diffuseur de saumure est donc primordial afin d'assurer une dilution admissible du rejet et minimiser au maximum son impact sur la faune et la flore marine.

Après avoir étudié l'influence de chaque paramètre de dimensionnement d'un diffuseur sur la dilution de la saumure, nous sommes arrivés à la conclusion que le dimensionnement général du diffuseur de la méga stationnement de dessalement de Magtâa est quasi-optimal et que se dernier respecte les normes de rejet en mer.

Le diffuseur de saumure de Magtâa possède également un bon comportement quelques soient les changements de vitesses de courant et de vent pouvant survenir au niveau du milieu récepteur.

Par ailleurs, afin de minimiser encore plus l'impact du rejet de saumure dans la mer, il serait intéressant, en perspective, d'installer un système de dilution en amont de l'émissaire de rejet, au niveau de la côte ou de la station de dessalement elle-même. Ce système pourrait être représenté par l'installation d'un bassin qui servirait à diluer, au préalable le rejet de la station de dessalement avec les effluents des stations d'épuration d'eau de mer se trouvant autour d'elle.

Pour la méga station de dessalement de Magtâa, nous recommandons de diluer le rejet, en amont de l'émissaire par le biais des effluents des stations d'épurations se trouvant autour et plus particulièrement la méga station d'El Kerma ainsi qu'avec les eaux de refroidissement rejetés par les centrales qui se trouvent à proximité.

Références bibliographiques :

- [1] **A.D.E (2008)**, « Dessalement en ALGERIE », situation actuelle et programme de développement.
- [2] **Akar et Jirka (1991)**, CORMIX2 : An expert system for hydrodynamic mixig zone analysis of conventional and toxic multiport diffuser discharges.
- [3] **Amitouche (2016)**, Thèse de Doctorat...
- [4] **A.N.R.H (2005)**, « Bilan des ressources d'eau en ALGERIE ».
- [5] **ARTE (2010)**, Les dessous des cartes, émission « La Mer à Boire ».
- [6] **Bissonnette. A (2008)**, Utilisation de nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation.
- [7] **Bleninger,T.Jirka,G.H. (2010)**, Environmental Planning, Prediction and Management of Brine Discharges from Desalination Plants, Final report, MEDREC Project: 07-AS-003, Muscat, Sultanate of Oman
- [8] **Bennet, T. and M. Cuccinello (1999)**, Saltwater desalination in Water Treatment Primer.
- [9] **BLUE PLAN (2000)**, Mediterranean vision on water, population and the environment for the 21st century
- [10] **BLUE PLAN (1992)**, Overview of the Mediterranean (Development and Environment)
- [11] **Bouros, O.K. (1992)**, Desalting Technologies. The ABCs of Desalting
- [12] **Brooks (1980)**, Synthesis of Stratified Flow Phenomen for Design of Outfalls, Second Inter. Symp.on Stratified Flows, Vol.2 pp 809-831, June, Norway.
- [13] **Chen et Schroder et al, (1989)**, The combination of Near and Far Field Mathematical Modelling of Waster Water Discharges into Receiving Water Bodies, XXIII Congress of IAHR, D-423-428, Aug. 21-25, Ottawa, Canada.
- [14] **Burashid, K. (1992)**, Desalination and Water Reuse, 2(2):44
- [15] **Bushnak,A. (2012)**, Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales. Rapport final, Gestion Intégrée Durable de l'Eau – Mécanisme de Soutien (SWIM - SM)
- [16] **Danis P (2003)**, Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J2 700.

[17] **Doneker et Jirka (2007)**, A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System of Pollutant Discharges into Surface Waters

[18] **Fernández-Torquemada, Y. González-Correa, J.M and Sánchez-Lizaso, J.L (2012)**, Echinoderms as indicators of brine discharge impacts, *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 567–573.

[19] **Fernández-Torquemada, Y. Sánchez-Lizaso, J.L. (2013)**, Effects of salinity on seed germination and early seedling growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 119, p. 64-70.

[20] **Jamaly , S. et al,(2014)**, A short review on reverse osmosis pretreatment technologies, *Desalination* volume 354, 1 December 2014, Pages 30–38

[21] **Jirka 1982**, Turbulent Buoyant Jets in Shallow Fluid Layers, *Turbulent Buoyant Jets and Plumes*, Edited by W.Rodi, Pergamon Press.

[22] **Levinton, J.S. (1996)**, Marine Biology Function. Biodiversity, Ecology. Oxford University Press, New York, U.S.A., 462 p.

[23] **Lattemann, S. (2010)**, development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants, Phd Thesis in Delft, The Netherlands.

[24] **Maurel . A., (2006)**, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2e edition TEC&DOC286p

[25] **National Eau & Environnement,**

[26] **PNUE (2001)**, dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens: évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure, UNEP (DEC)/ MED WG.183/Inf.6, Athènes

[27] **Zimmerman, R. (1999)**, The Larnaca seawater desalination plant. Environmental impact Assessment Report

[28] **Zhai-Bo Chen (1991)**, Turbulent buoyant jets and plumes in flowing ambient environments,

Annexe I : Résultats des simulations :

| Distance x (m) | Dilution 45° | Dilution 60° | Dilution 90° | Dilution 30° |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0 | 1 | 1 | | 1 |
| 10 | 14 | 13,1 | | 14,4 |
| 50 | 30,1 | 27,9 | 25,8 | 30,5 |
| 122,83 | 41,5 | 38,8 | 32,1 | 41,9 |
| 154,25 | 43,8 | 40,9 | 33,9 | 44,2 |
| 216,71 | 47,2 | 44 | 37,9 | 47,5 |
| 248,13 | 48,6 | 45,3 | 39,8 | 49 |
| 310,59 | 50,8 | 47,3 | 40,9 | 51,2 |
| 342,01 | 51,8 | 48,2 | 41,4 | 52,2 |
| 404,47 | 53,6 | 49,8 | 42,5 | 54 |
| 467,12 | 55,1 | 51,2 | 43,4 | 55,6 |
| 529,77 | 56,5 | 52,4 | 44,2 | 56,7 |

Tableau VII.1 : Dilutions en fonction des différentes inclinaisons des ports de sortie

| Distance x (m) | H = 0,6m | H = 1m | H = 2m |
|----------------|----------|--------|--------|
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 14 | 14 | 14 |
| 50 | 30,1 | 30,1 | 30,1 |
| 122,83 | 41,5 | 41,5 | 41,5 |
| 154,25 | 43,8 | 43,8 | 43,8 |
| 216,71 | 47,2 | 47,2 | 47,2 |
| 248,13 | 48,6 | 48,6 | 48,6 |
| 310,59 | 50,8 | 50,8 | 50,8 |
| 342,01 | 51,8 | 51,8 | 51,8 |
| 404,47 | 53,6 | 53,6 | 53,6 |
| 467,12 | 55,1 | 55,1 | 55,1 |
| 529,77 | 56,5 | 56,5 | 56,5 |

Tableau VII.2 : Dilutions en fonction des différentes hauteurs des ports de sortie

| Distance x (m) | P = 8m | P = 5m | P = 7m | P = 9m |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 14 | 10,9 | 12,7 | 15,3 |
| 50 | 30,1 | 23,1 | 27,2 | 32,9 |
| 122,83 | 41,5 | 24,1 | 37,8 | 46,2 |
| 154,25 | 43,8 | 24,5 | 39,9 | 48,8 |
| 216,71 | 47,2 | 25,4 | 42,5 | 52,2 |
| 248,13 | 48,6 | 25,6 | 43,8 | 53,5 |
| 310,59 | 50,8 | 27 | 46,2 | 56,4 |
| 342,01 | 51,8 | 27,9 | 47 | 57,4 |
| 404,47 | 53,6 | 29,3 | 48,6 | 59,1 |
| 467,12 | 55,1 | 30,6 | 50 | 60,7 |

Tableau VII.3 : Dilutions en fonction des différentes profondeurs des bouches de sortie

| Distance x (m) | D=0,1m (17,63m/s) | D=0,15m (7,81 m/s) | D=0,2 m (4,41 m/s) |
|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 14,7 | 14 | 12,5 |
| 50 | 31,6 | 30,1 | 26,8 |
| 122,83 | 43,8 | 41,5 | 37,5 |
| 154,25 | 46,1 | 43,8 | 39,4 |
| 216,71 | 49,8 | 47,2 | 42,1 |
| 248,13 | 51,1 | 48,6 | 43,1 |
| 310,59 | 53,6 | 50,8 | 45,2 |
| 342,01 | 54,8 | 51,8 | 45,9 |
| 404,47 | 56,5 | 53,6 | 47,1 |
| 467,12 | 58,1 | 55,1 | 48,3 |

Tableau VII.4 : Dilutions en fonction des différentes vitesses de rejet

| Distance x (m) | 60 ports | 40 ports | 30 ports | 10 ports |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 14 | 13 | 11,9 | 9,4 |
| 50 | 30,1 | 24,7 | 20,4 | 11,8 |
| 122,83 | 41,5 | 26,4 | 22,3 | 14,5 |
| 154,25 | 43,8 | 27,1 | 23,2 | 15,8 |
| 216,71 | 47,2 | 29,4 | 24,7 | 17,5 |
| 248,13 | 48,6 | 30,5 | 25,4 | 18,5 |
| 310,59 | 50,8 | 32,4 | 26,3 | 20,5 |
| 342,01 | 51,8 | 33,2 | 27,8 | 21,4 |
| 404,47 | 53,6 | 34,7 | 29,4 | 22,6 |
| 467,12 | 55,1 | 35,9 | 30,8 | 24,2 |
| 529,77 | 56,5 | 36,8 | 32,5 | 25,6 |

Tableau VII.5 : Dilutions en fonction des différents nombres de ports de sortie

| Distance x (m) | Cas favorable | Cas intermediaire | Cas défavorable |
|-------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 14 | 11,9 | 8,4 |
| 50 | 30,1 | 25,4 | 17,5 |
| 122,83 | 41,5 | 28,9 | |
| 154,25 | 43,8 | 29,6 | |
| 216,71 | 47,2 | 30,7 | |
| 248,13 | 48,6 | 31,4 | |
| 310,59 | 50,8 | 32,4 | |
| 342,01 | 51,8 | 33,1 | |
| 404,47 | 53,6 | 34 | |
| 467,12 | 55,1 | 35,1 | |
| 529,77 | 56,5 | 36 | |

Tableau VII.6 : Dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales

Uc = Local centerline excess velocity (above ambient)
 TT = Cumulative travel time

| | X | Y | Z | S | C | BV | BH | Uc |
|----|------------|------|-------|-----|-----------|------|-------|-------|
| TT | 0.00 | 0.00 | -7.40 | 1.0 | 0.626E+05 | 0.01 | 60.00 | 7.696 |
| | .00000E+00 | | | | | | | |

END OF MOD201: DIFFUSER DISCHARGE MODULE

BEGIN MOD271: ACCELERATION ZONE OF UNIDIRECTIONAL CO-FLOWING DIFFUSER

In this laterally contracting zone the diffuser plume becomes
 VERTICALLY FULLY

MIXED over the entire layer depth (HS = 8.00m).

Full mixing is achieved after a plume distance of about five
 layer depths from the diffuser.

Profile definitions:

BV = layer depth (vertically mixed)

BH = top-hat half-width, in horizontal plane normal to trajectory

S = hydrodynamic average (bulk) dilution

C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if
 any)

TT = Cumulative travel time

| | X | Y | Z | S | C | BV | BH | TT |
|--|------------|------|-------|------|-----------|------|-------|----|
| | 0.00 | 0.00 | -7.40 | 1.0 | 0.626E+05 | 0.01 | 60.00 | |
| | .00000E+00 | | | | | | | |
| | 2.00 | 0.00 | -7.23 | 6.8 | 0.919E+04 | 0.41 | 58.45 | |
| | .14814E+01 | | | | | | | |
| | 4.00 | 0.00 | -7.06 | 9.2 | 0.679E+04 | 0.81 | 57.04 | |
| | .38105E+01 | | | | | | | |
| | 6.00 | 0.00 | -6.89 | 11.1 | 0.565E+04 | 1.21 | 55.77 | |
| | .66088E+01 | | | | | | | |
| | 8.00 | 0.00 | -6.72 | 12.6 | 0.496E+04 | 1.61 | 54.61 | |
| | .97495E+01 | | | | | | | |
| | 10.00 | 0.00 | -6.55 | 14.0 | 0.447E+04 | 2.01 | 53.56 | |
| | .13163E+02 | | | | | | | |
| | 12.00 | 0.00 | -6.38 | 15.2 | 0.411E+04 | 2.41 | 52.59 | |
| | .16803E+02 | | | | | | | |
| | 14.00 | 0.00 | -6.21 | 16.4 | 0.382E+04 | 2.81 | 51.71 | |
| | .20639E+02 | | | | | | | |
| | 16.00 | 0.00 | -6.04 | 17.4 | 0.359E+04 | 3.21 | 50.90 | |
| | .24645E+02 | | | | | | | |
| | 18.00 | 0.00 | -5.87 | 18.4 | 0.339E+04 | 3.61 | 50.16 | |
| | .28804E+02 | | | | | | | |
| | 20.00 | 0.00 | -5.70 | 19.4 | 0.323E+04 | 4.01 | 49.47 | |
| | .33100E+02 | | | | | | | |
| | 22.00 | 0.00 | -5.53 | 20.3 | 0.309E+04 | 4.41 | 48.83 | |
| | .37520E+02 | | | | | | | |
| | 24.00 | 0.00 | -5.36 | 21.1 | 0.296E+04 | 4.81 | 48.23 | |
| | .42055E+02 | | | | | | | |
| | 26.00 | 0.00 | -5.19 | 22.0 | 0.285E+04 | 5.21 | 47.68 | |
| | .46695E+02 | | | | | | | |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|------|-----------|------|-------|
| 28.00 | 0.00 | -5.02 | 22.8 | 0.275E+04 | 5.61 | 47.17 |
| .51433E+02 | | | | | | |
| 30.00 | 0.00 | -4.85 | 23.5 | 0.266E+04 | 6.01 | 46.70 |
| .56263E+02 | | | | | | |
| 32.00 | 0.00 | -4.68 | 24.3 | 0.258E+04 | 6.41 | 46.27 |
| .61178E+02 | | | | | | |
| 34.00 | 0.00 | -4.51 | 25.0 | 0.251E+04 | 6.81 | 45.87 |
| .66173E+02 | | | | | | |
| 36.00 | 0.00 | -4.34 | 25.7 | 0.244E+04 | 7.21 | 45.51 |
| .71243E+02 | | | | | | |
| 38.00 | 0.00 | -4.17 | 26.3 | 0.238E+04 | 7.61 | 45.19 |
| .76385E+02 | | | | | | |
| 40.00 | 0.00 | -4.00 | 27.0 | 0.232E+04 | 8.00 | 44.90 |
| .81595E+02 | | | | | | |
| 42.00 | 0.00 | -4.00 | 27.6 | 0.226E+04 | 8.00 | 44.65 |
| .86870E+02 | | | | | | |
| 44.00 | 0.00 | -4.00 | 28.3 | 0.221E+04 | 8.00 | 44.44 |
| .92205E+02 | | | | | | |
| 46.00 | 0.00 | -4.00 | 28.9 | 0.217E+04 | 8.00 | 44.26 |
| .97600E+02 | | | | | | |
| 48.00 | 0.00 | -4.00 | 29.5 | 0.212E+04 | 8.00 | 44.11 |
| .10305E+03 | | | | | | |
| 50.00 | 0.00 | -4.00 | 30.1 | 0.208E+04 | 8.00 | 44.00 |
| .10855E+03 | | | | | | |
| 52.00 | 0.00 | -4.00 | 30.7 | 0.204E+04 | 8.00 | 43.90 |
| .11411E+03 | | | | | | |
| 54.00 | 0.00 | -4.00 | 31.2 | 0.201E+04 | 8.00 | 43.83 |
| .11971E+03 | | | | | | |
| 56.00 | 0.00 | -4.00 | 31.8 | 0.197E+04 | 8.00 | 43.78 |
| .12536E+03 | | | | | | |
| 58.00 | 0.00 | -4.00 | 32.3 | 0.194E+04 | 8.00 | 43.75 |
| .13106E+03 | | | | | | |
| 60.00 | 0.00 | -4.00 | 32.8 | 0.191E+04 | 8.00 | 43.72 |
| .13680E+03 | | | | | | |

Cumulative travel time = 136.8027 sec (0.04 hrs)

Plume centerline may exhibit slight discontinuities in transition to subsequent far-field module.

END OF MOD271: ACCELERATION ZONE OF UNIDIRECTIONAL CO-FLOWING DIFFUSER

BEGIN MOD251: DIFFUSER PLUME IN CO-FLOW

Phase 1: Vertically mixed, Phase 2: Re-stratified

Phase 2: The flow has RESTRATIFIED at the beginning of this zone.

This flow region is INSIGNIFICANT in spatial extent and will be bypassed.

END OF MOD251: DIFFUSER PLUME IN CO-FLOW

 ** End of NEAR-FIELD REGION (NFR) **

 BEGIN MOD310: BOTTOM DENSITY CURRENT

Profile definitions:

BV = top-hat thickness, measured vertically
 BH = top-hat half-width, measured horizontally in Y-direction
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)
 ZL = lower plume boundary (Z-coordinate)
 S = hydrodynamic average (bulk) dilution
 C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if any)
 TT = Cumulative travel time

| ZL | X | Y | Z | S | C | BV | BH | ZU |
|-------|------------|------|-------|------|-----------|------|--------|-------|
| | 60.00 | 0.00 | -8.00 | 32.8 | 0.191E+04 | 8.00 | 43.72 | 0.00 |
| -8.00 | .13680E+03 | | | | | | | |
| | 91.60 | 0.37 | -8.00 | 38.4 | 0.163E+04 | 5.02 | 87.46 | -2.98 |
| -8.00 | .22134E+03 | | | | | | | |
| | 122.83 | 0.71 | -8.01 | 41.5 | 0.151E+04 | 3.99 | 123.55 | -4.02 |
| -8.01 | .30907E+03 | | | | | | | |
| | 154.25 | 1.04 | -8.01 | 43.8 | 0.143E+04 | 3.41 | 155.94 | -4.60 |
| -8.01 | .39983E+03 | | | | | | | |
| | 185.48 | 1.35 | -8.02 | 45.7 | 0.137E+04 | 3.04 | 185.48 | -4.98 |
| -8.02 | .49183E+03 | | | | | | | |
| | 216.71 | 1.67 | -8.02 | 47.2 | 0.133E+04 | 2.77 | 213.01 | -5.25 |
| -8.02 | .58521E+03 | | | | | | | |
| | 248.13 | 1.97 | -8.02 | 48.6 | 0.129E+04 | 2.57 | 239.08 | -5.46 |
| -8.02 | .68031E+03 | | | | | | | |
| | 279.36 | 2.28 | -8.03 | 49.7 | 0.126E+04 | 2.41 | 263.65 | -5.62 |
| -8.03 | .77581E+03 | | | | | | | |

** REGULATORY MIXING ZONE BOUNDARY **

In this prediction interval the plume DOWNSTREAM distance meets or exceeds

the regulatory value = 300.00 m.

This is the extent of the REGULATORY MIXING ZONE.

| | | | | | | | | |
|-------|------------|------|-------|------|-----------|------|--------|-------|
| | 310.59 | 2.57 | -8.03 | 50.8 | 0.123E+04 | 2.28 | 287.07 | -5.75 |
| -8.03 | .87217E+03 | | | | | | | |
| | 342.01 | 2.87 | -8.03 | 51.8 | 0.121E+04 | 2.17 | 309.63 | -5.87 |
| -8.03 | .96986E+03 | | | | | | | |
| | 373.24 | 3.16 | -8.04 | 52.7 | 0.119E+04 | 2.08 | 331.18 | -5.96 |
| -8.04 | .10677E+04 | | | | | | | |
| | 404.47 | 3.44 | -8.04 | 53.6 | 0.117E+04 | 2.00 | 351.94 | -6.04 |
| -8.04 | .11661E+04 | | | | | | | |
| | 435.89 | 3.73 | -8.05 | 54.4 | 0.115E+04 | 1.93 | 372.13 | -6.12 |
| -8.05 | .12657E+04 | | | | | | | |
| | 467.12 | 4.01 | -8.05 | 55.1 | 0.114E+04 | 1.87 | 391.55 | -6.18 |
| -8.05 | .13652E+04 | | | | | | | |
| | 498.35 | 4.29 | -8.05 | 55.8 | 0.112E+04 | 1.81 | 410.39 | -6.24 |
| -8.05 | .14652E+04 | | | | | | | |
| | 529.77 | 4.57 | -8.06 | 56.5 | 0.111E+04 | 1.77 | 428.81 | -6.29 |
| -8.06 | .15664E+04 | | | | | | | |
| | 561.00 | 4.84 | -8.06 | 57.2 | 0.110E+04 | 1.72 | 446.63 | -6.34 |
| -8.06 | .16673E+04 | | | | | | | |
| | 592.23 | 5.11 | -8.06 | 57.8 | 0.108E+04 | 1.68 | 463.99 | -6.38 |
| -8.06 | .17687E+04 | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|--------|------------|-------|------|-----------|------|--------|-------|
| 623.65 | 5.38 | -8.07 | 58.4 | 0.107E+04 | 1.65 | 481.03 | -6.42 |
| -8.07 | .18711E+04 | | | | | | |
| 654.88 | 5.65 | -8.07 | 59.0 | 0.106E+04 | 1.61 | 497.58 | -6.45 |
| -8.07 | .19733E+04 | | | | | | |
| 686.12 | 5.92 | -8.07 | 59.6 | 0.105E+04 | 1.58 | 513.76 | -6.49 |
| -8.07 | .20759E+04 | | | | | | |
| 717.53 | 6.18 | -8.08 | 60.1 | 0.104E+04 | 1.56 | 529.68 | -6.52 |
| -8.08 | .21794E+04 | | | | | | |
| 748.77 | 6.45 | -8.08 | 60.6 | 0.103E+04 | 1.53 | 545.19 | -6.55 |
| -8.08 | .22827E+04 | | | | | | |
| 780.00 | 6.71 | -8.08 | 61.2 | 0.102E+04 | 1.51 | 560.40 | -6.58 |
| -8.08 | .23864E+04 | | | | | | |
| 811.41 | 6.97 | -8.08 | 61.7 | 0.101E+04 | 1.48 | 575.40 | -6.60 |
| -8.08 | .24909E+04 | | | | | | |
| 842.65 | 7.23 | -8.09 | 62.2 | 0.101E+04 | 1.46 | 590.05 | -6.62 |
| -8.09 | .25952E+04 | | | | | | |
| 873.88 | 7.48 | -8.09 | 62.7 | 0.999E+03 | 1.44 | 604.43 | -6.65 |
| -8.09 | .26998E+04 | | | | | | |
| 905.30 | 7.74 | -8.09 | 63.2 | 0.991E+03 | 1.43 | 618.66 | -6.67 |
| -8.09 | .28053E+04 | | | | | | |
| 936.53 | 8.00 | -8.10 | 63.6 | 0.984E+03 | 1.41 | 632.57 | -6.69 |
| -8.10 | .29105E+04 | | | | | | |
| 967.76 | 8.25 | -8.10 | 64.1 | 0.976E+03 | 1.39 | 646.25 | -6.71 |
| -8.10 | .30160E+04 | | | | | | |
| 998.99 | 8.50 | -8.10 | 64.6 | 0.969E+03 | 1.38 | 659.73 | -6.73 |
| -8.10 | .31218E+04 | | | | | | |

Cumulative travel time = 3121.7788 sec (0.87 hrs)

END OF MOD310: BOTTOM DENSITY CURRENT

 In absence of ambient stratification, plume will proceed down the slope without transition to far-field.
 SIMULATION STOPS.

D-CORMIX End of Prediction File