

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



Département Hydraulique

Mémoire de master

Réalisé par : Mohamed Salim SEBKI

En vue de l'obtention du master en Hydraulique

Thème :

**Diagnostic et amélioration des
performances du diffuseur de saumure de
la station de dessalement de FOUKA
Wilaya de TIPAZA**

Dirigé par :

Dr. M.AMITOUCHE

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2016

Composition du jury :

Président	Mr A.BERMAD	Professeur ENP
Promoteur	Mr M.AMITOUCHE	Docteur Univerisé de Boumerdes
Examineur	Mr K.HOUARI	Université de Boumerdes

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 là 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.

REMERCIEMENTS

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

J'adresse également mes vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur le docteur **M.AMITOUCHE**, qui m'a permis d'utiliser le logiciel CORMIX sans lequel ce projet n'aurait pu aboutir et de m'avoir aidé tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie aussi le professeur **A.BERMAD** et le docteur **A.LEFKIR** pour m'avoir apporté une aide précieuse dans l'élaboration de ce mémoire, ainsi que pour leurs conseils et leurs encouragements tout au long de ces derniers mois.

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 إجراء تقرير للناشر لتمديد محلول ملحي صادر عن محطة تحلية مياه البحر بفوكا، ودراسة سلوكه فيما يتعلق بالتغيرات المناخية مثل سرعة الرياح وسرعة التيار البحري، ويهدف هذا العمل أيضا من أجل توفير بدائل وحلول لتحسين أداء هذا الناشر.

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

Abstract :

The purpose of this master is to make diagnostic of a diffuser for diluting the brine generated by the desalination plant of FOUKA, and study its behavior in relation to climatic variations such as wind speed and current velocity, the purpose of this work also aims to suggest alternatives and solutions to improve the performances of this diffuser.

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

Résumé :

L'objectif de ce master est de faire un diagnostic du diffuseur pour la dilution de la saumure générée par l'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka et d'étudier son comportement par rapport aux variations climatiques tel que la vitesse du vent et vitesse du courant, ce travail a également pour but de proposer des alternatives et solutions pour améliorer les performances de ce diffuseur.

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

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE :	12
Chapitre I : Le dessalement dans le monde et en Algérie	14
I.1. Introduction :	14
I.2. La nécessité du dessalement de l'eau de mer :	15
I.3. Les pays producteurs d'eau douce dans le monde :	17
I.4. Le dessalement d'eau de mer en Algérie :	17
I.5. L'expérience algérienne dans le dessalement :	19
Chapitre II : Les différents procédés de dessalement	22
II.1. Introduction :	22
II.2. Généralités :	22
II.3. Procédés de distillation :	23
II.3.1. Distillation par détente à étages multiples (MSF) :	23
II.3.2. Distillation à effets multiples (MED) :	24
II.3.3. Distillation par compression de vapeur (VC) :	25
II.3.4. Perspectives de la distillation :	26
II.4. Procédés membranaires :	26
II.4.1. L'osmose inverse :	26
II.4.2. L'électrodialyse :	29
II.4.3. La nano-filtration par nano-membrane :	29
II.5. Comparaison des techniques de dessalement : osmose inverse, distillation et nano-membrane :	30
II.5.1. Aspects économiques :	30
II.5.2. Aspects techniques :	30
II.5.3. Aspects environnementaux :	31
II.5.4. Aspects sociaux :	31
II.6. Conclusion :	31
Chapitre III : Impacts sur l'environnement du dessalement de l'eau de mer.	32

III.1. Introduction :	32
III.2. Origine et type des émissions et rejets :	33
III.2.1. Emissions atmosphériques :	33
III.2.2. Rejets chimiques :	34
III.2.3. Saumure concentrée :	35
III.4.2. Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI :	36
III.3. Impacts sur l'environnement :	36
III.4. Effets de la saumure concentrée (conclusion) :	38
Chapitre IV : Description de la station de dessalement de FOUKA	40
IV.1. Localisation de la station :	40
IV.2. Installation et processus :	41
IV.3. Description du procédé :	42
Chapitre V : Hydrodynamique des rejets en mer	45
V.1. Introduction :	45
V.2. L'effet de la stratification :	46
V.3. Caractéristiques de la diffusion :	47
V.3.1. Géométrie du diffuseur :	47
V.3.2. Types de diffuseurs multiports :	49
V.4. Les processus hydrodynamique de mélange :	52
V.4.1. Les concepts de base du jet et de la plume :	52
V.4.2. Le champ proche :	58
V.4.3. Le champ lointain :	64
Chapitre VI : Simulation des rejets en mer et amélioration des performances du diffuseur de saumure	67
VI.1. Introduction et problématique :	67
VI.2. Technique de simulation (Modèle CORMIX) :	67
VI.3. Concepts généraux :	71
VI.4. Analyse et interprétation des résultats :	72
A. Diagnostic du comportement du diffuseur dans le milieu récepteur :	72
B. Améliorations et alternatives au diffuseur actuel :	78
VI.5. Conclusion :	81
CONCLUSION GENERALE :	82
Références bibliographiques :	83
Annexe	85

Liste des tableaux

Tableau I. 1: La disponibilité annuelle en eau par habitant en Algérie en 2020.....	18
Tableau I. 2: Répartition des eaux de surface en Algérie.....	18
Tableau I. 3: Stations réalisées par LINDE-KCA.....	20
Tableau I. 4: Stations réalisées par HYDRO-TRAITEMENT.....	20
Tableau I. 5: Les grandes stations de dessalement en Algérie.....	21
Tableau III. 1: Indicateurs de durabilité pour une usine MSF à production simple.....	33
Tableau III. 2: Indicateurs de durabilité pour une usine OI avec une source locale d'énergie électrique.....	33
Tableau III. 3: Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer.	36
Tableau III. 4: Grille d'impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement..	37
Tableau IV. 1: Capacité de la station (Fouka).....	41
Tableau V. 1: Processus et ordre de grandeur.....	53
Tableau VI. 1: Caractéristiques de la station de dessalement de FOUKA.....	69
Tableau VI. 2: Cas de vitesses environnementales étudiées.....	72
Tableau VI. 3: Alternatives proposées de diffuseurs.....	80
Tableau VI. 4: Résultats de simulations.....	81

Liste des figures

Figure I. 1: Densité de la population sur les côtes	14
Figure I. 2: Les Zones de Vulnérabilité Hydrique	16
Figure I. 3: Les Principaux pays producteurs d'eau douce dans le monde.	17
Figure I. 4: Emplacement des grandes stations de dessalement en Algérie.....	21
Figure II. 1: Les divers procédés de dessalement.....	22
Figure II. 2: Schéma d'une usine de distillation par détente à étages multiples (MSF).....	24
Figure II. 3: Schéma d'une usine de distillation à effets multiples (MED)	24
Figure II. 4: Schéma d'une usine de distillation par compression de vapeur (VC)	25
Figure II. 5: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	27
Figure II. 6: Membrane d'osmose inverse	28
Figure II. 7: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse	28
Figure II. 8: Principe de dessalement par l'électrodialyse	29
Figure IV. 1: Photo de la station de Fouka.....	40
Figure IV. 2: Description générale de la station de Fouka.....	44
Figure V. 1: Diffusion flottante côtière.	45
Figure V. 2: Types de stratification.....	47
Figure V. 3: Diffuseur multiport et sa configuration générale	48
Figure V. 4: Diffuseur unidirectionnel	49
Figure V. 5: Diffuseur multi-étages	50
Figure V. 6: Diffuseur alternatif.....	51
Figure V. 7: Paramètres liés aux jets.....	52
Figure V. 8: Un jet flottant turbulent diffusé dans un écoulement ambiant.....	54
Figure V. 9: Types de modèles de jet flottant sous différentes conditions ambiantes	59
Figure V. 10: Exemples de conditions de stabilité et d'instabilité du champ proche pour des diffusions de flottabilité positive profondément immergé	60
Figure V. 11: Exemples de conditions d'attachement de sillage et d'attachement pour des diffusions proche des limites profondes	62
Figure V. 12: Types de modèles de mélange de jet en surface sous des conditions ambiantes stagnantes et fluctuantes.....	63
Figure V. 13: Exemple de propagation de flottabilité le long de la surface d'eau.....	65
Figure V. 14: Processus de diffusion passive avec advection dans le champ lointain.....	66
Figure VI. 1: Distribution gaussienne des concentrations.....	69
Figure VI. 2: l'interface CORMIX.....	71
Figure VI. 3: Profil 3D du panache	73
Figure VI. 4: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet	73
Figure VI. 5: Profil 3D du panache	74

Figure VI. 6: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet	74
Figure VI. 7: Profil 3D du panache	
Figure VI. 8: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet	75
Figure VI. 9: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace	76
Figure VI. 10: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace	76
Figure VI. 11: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace	77
Figure VI. 12: Graphiques des dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales.....	78
Figure VI. 13: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports.....	79
Figure VI. 14: Graphiques des dilutions en fonction des différents types de diffuseurs	80

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

R_e : Nombre de Reynolds du jet

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

Q : Flux du volume

M : Flux d'élán

B : Flux de flottabilité

L_q : Échelle de longueur du volume

L_m : Échelle de longueur de l'élán

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

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 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 composés 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 FOUKA situé dans la wilaya de Tipaza a une capacité de 120 000 m³/j, a été réceptionnée en 2011. Cette station est dotée d'un diffuseur mono-port de 2.8m et un diamètre de 1.1 m.

L'objectif de ce travail est de faire un diagnostic de ce diffuseur et d'étudier son comportement par rapport aux variations climatiques tel que la vitesse du vent et vitesse du courant, nous avons ensuite proposer des alternatives et solutions pour améliorer les performances de ce diffuseur , 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).

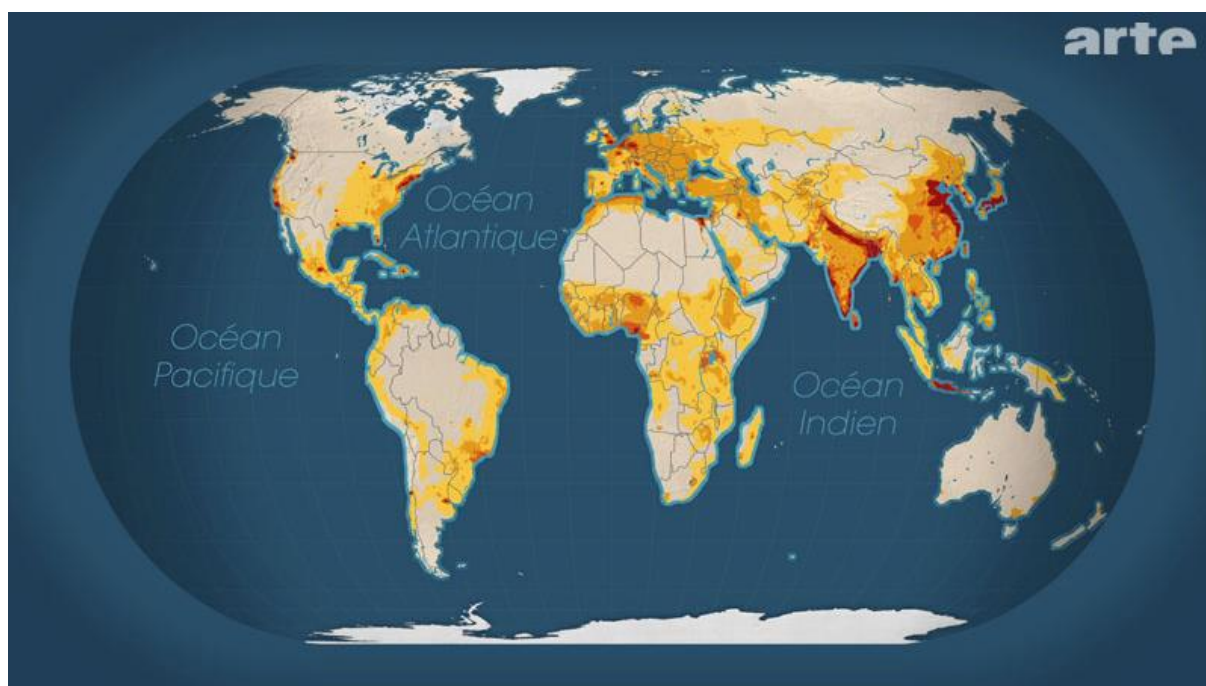


Figure I. 1: Densité de la population sur les côtes. [1]

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 paraît 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]

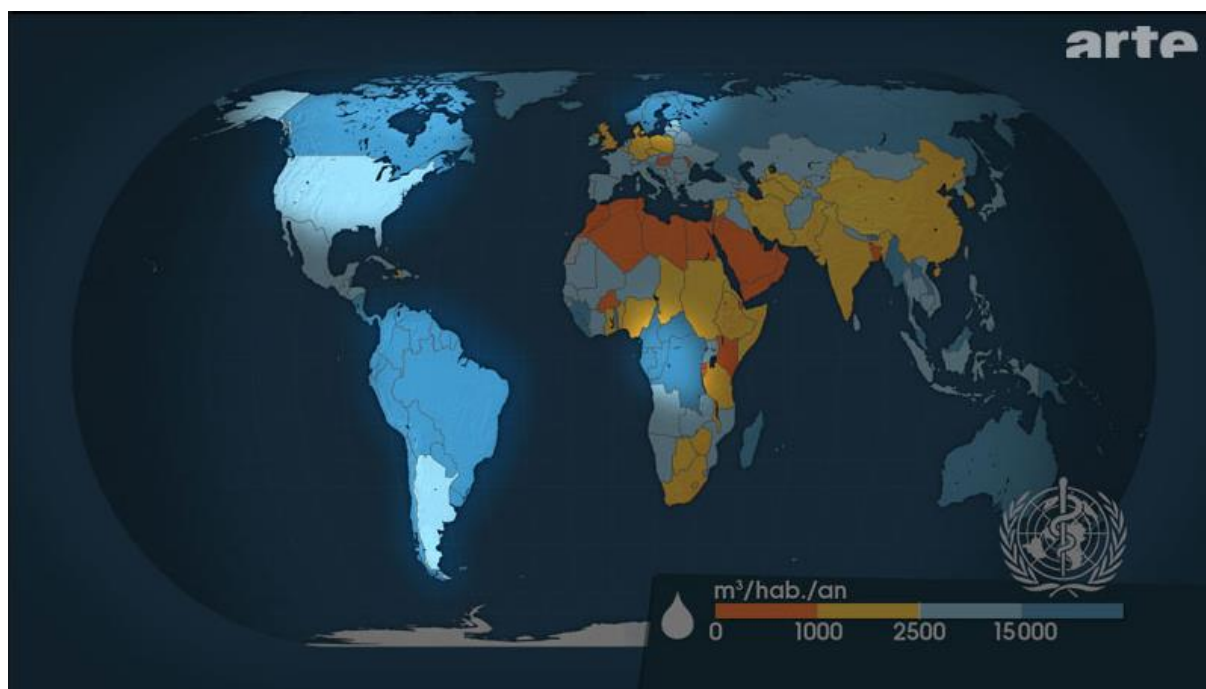


Figure I. 2: Les Zones de Vulnérabilité Hydrique. [1]

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.

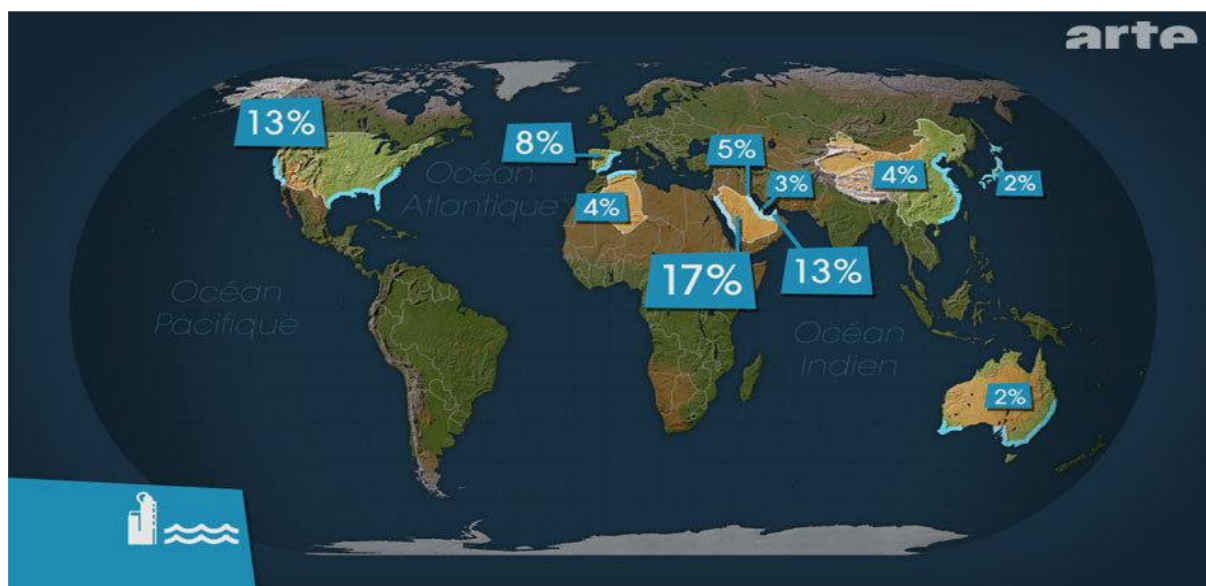


Figure I. 3: Les Principaux pays producteurs d'eau douce dans le monde. [1]

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.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'amoindrissent 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 utilisations 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'issu 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 station 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			22500

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.4, 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]

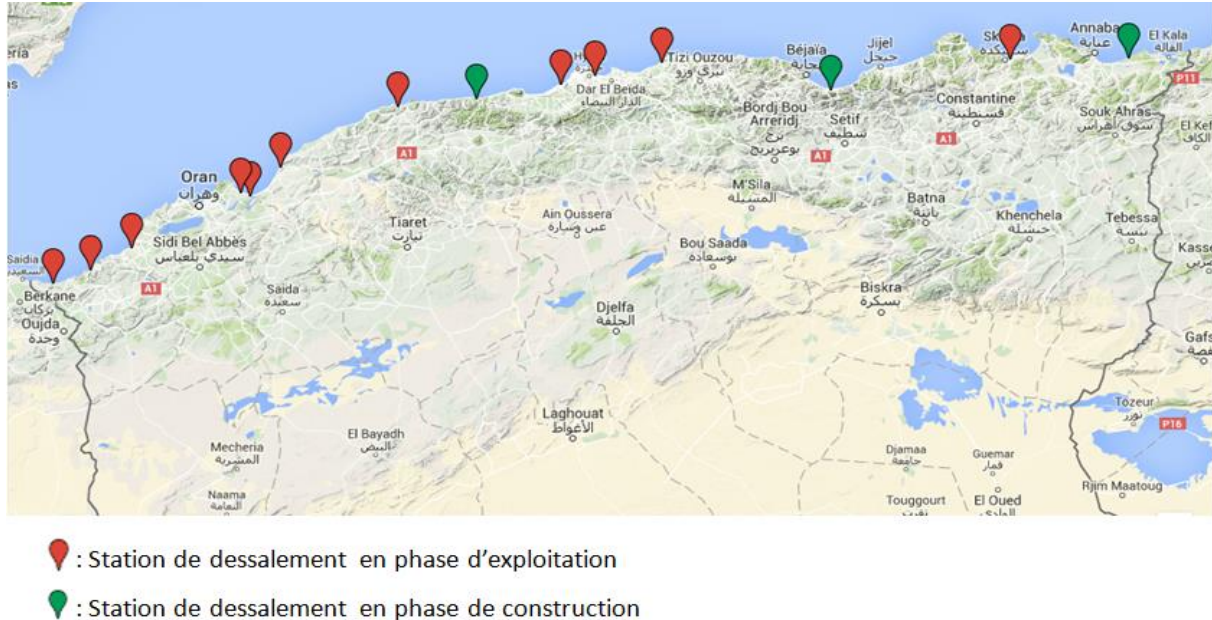


Figure I. 4: Emplacement des grandes stations de dessalement en Algérie

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 nanofiltration 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]

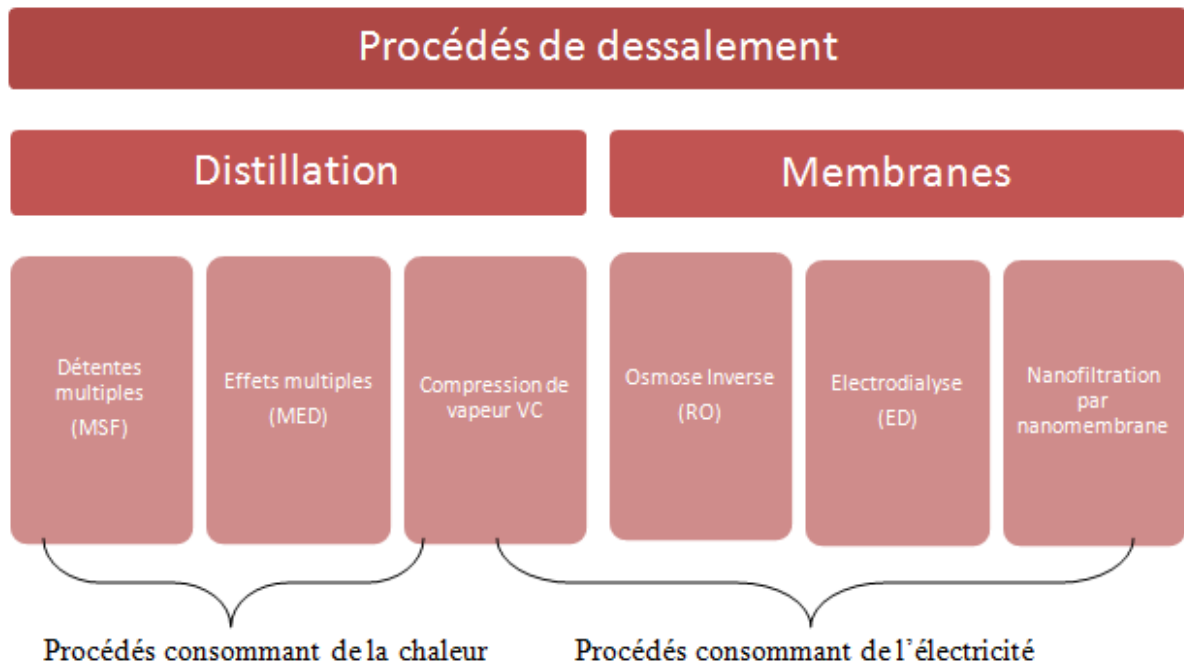


Figure II. 1: Les divers procédés de dessalement

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 donné 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]

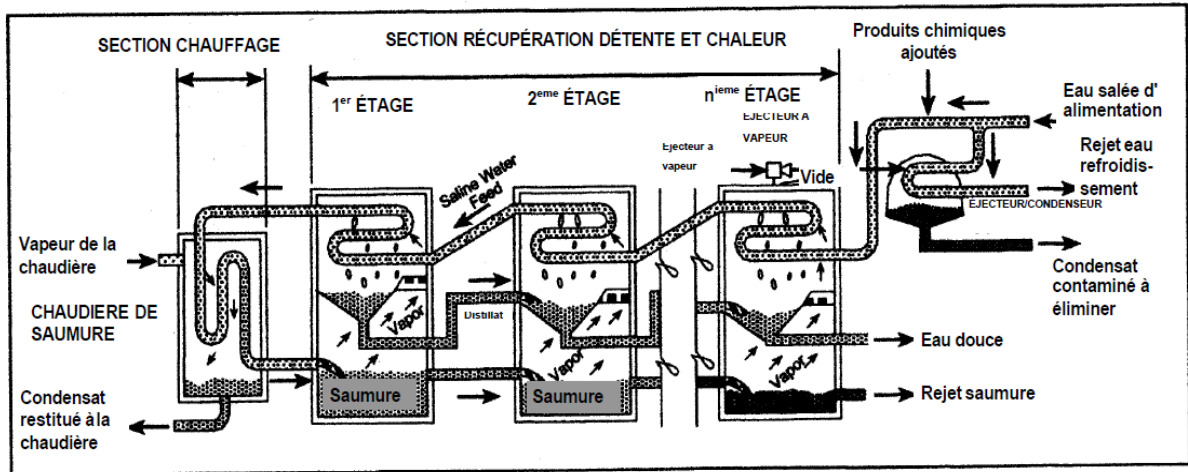


Figure II. 2: Schéma d'une usine de distillation par détente à étages multiples (MSF). [12]

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]

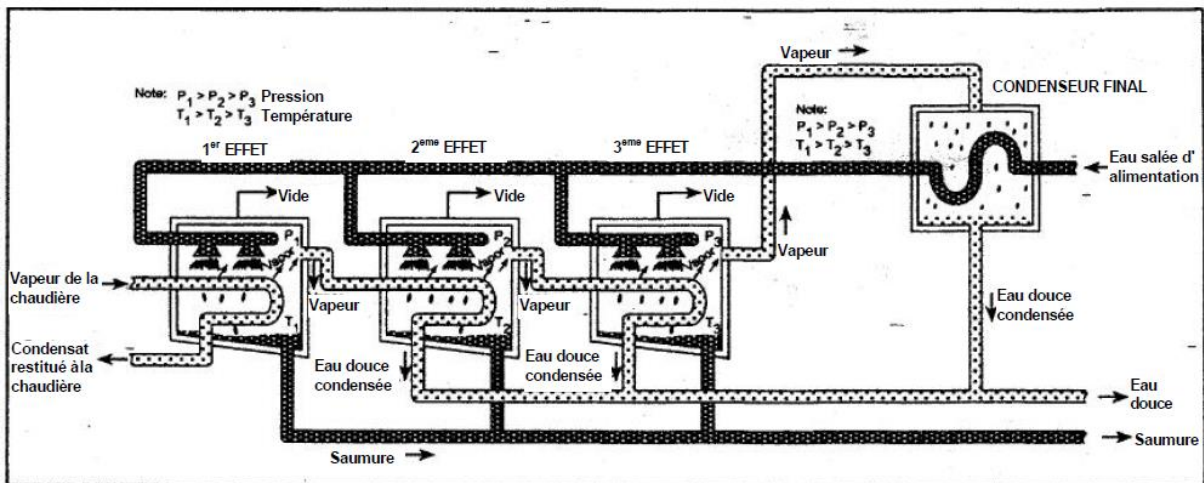


Figure II. 3: Schéma d'une usine de distillation à effets multiples (MED). [12]

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]

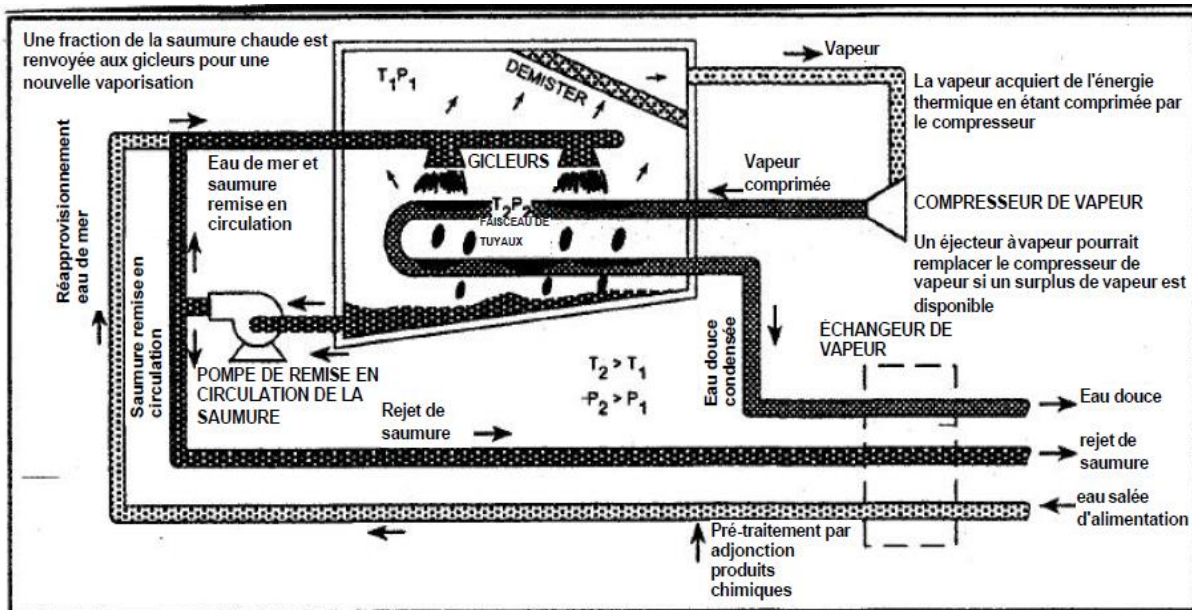


Figure II. 4: Schéma d'une usine de distillation par compression de vapeur (VC). [12]

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 a cout 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).

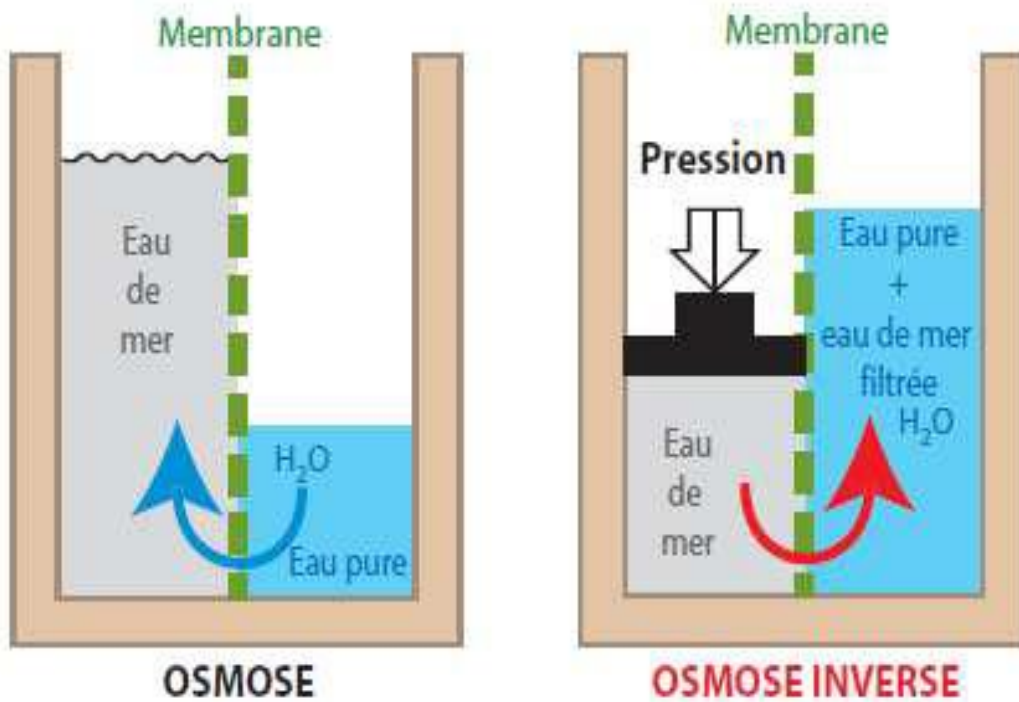


Figure II. 5: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse. [14]

L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement 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]

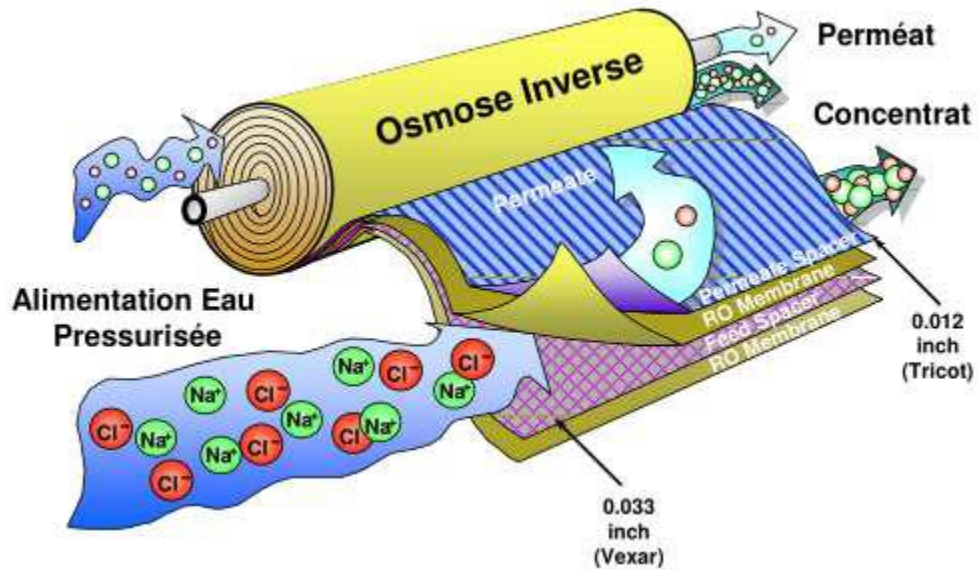


Figure II. 6: Membrane d'osmose inverse. [14]

➤ 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;

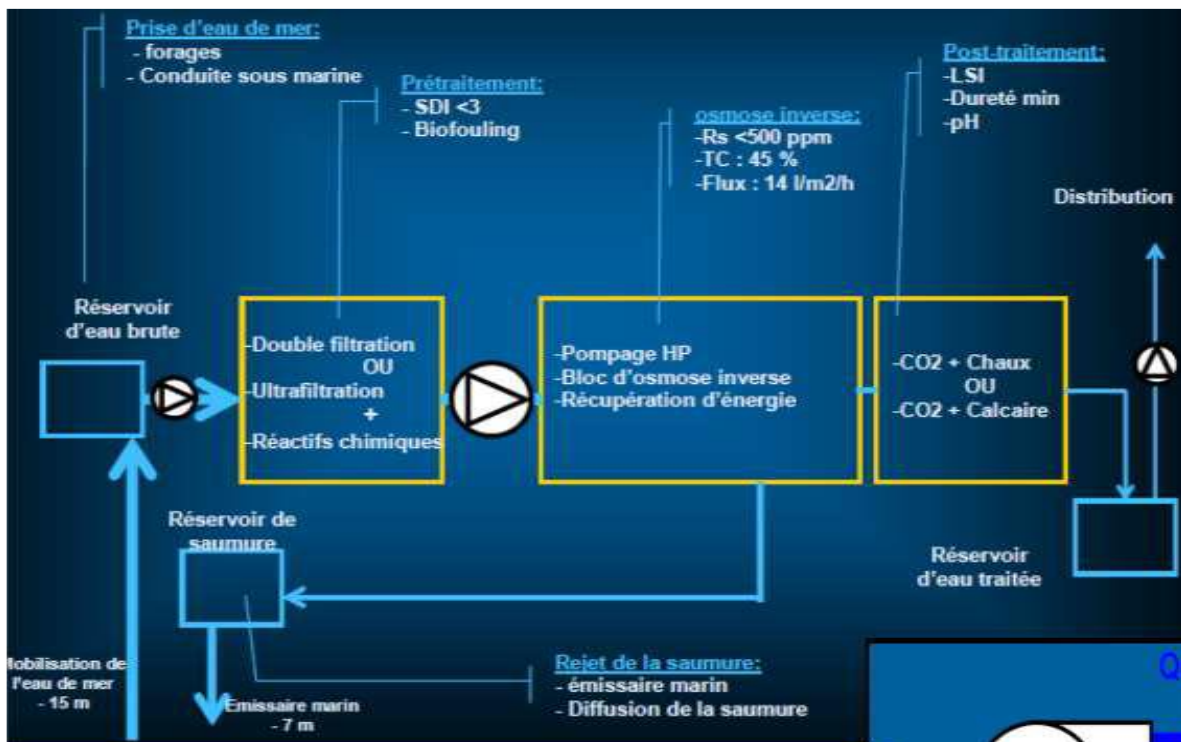


Figure II. 7: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. [8]

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).

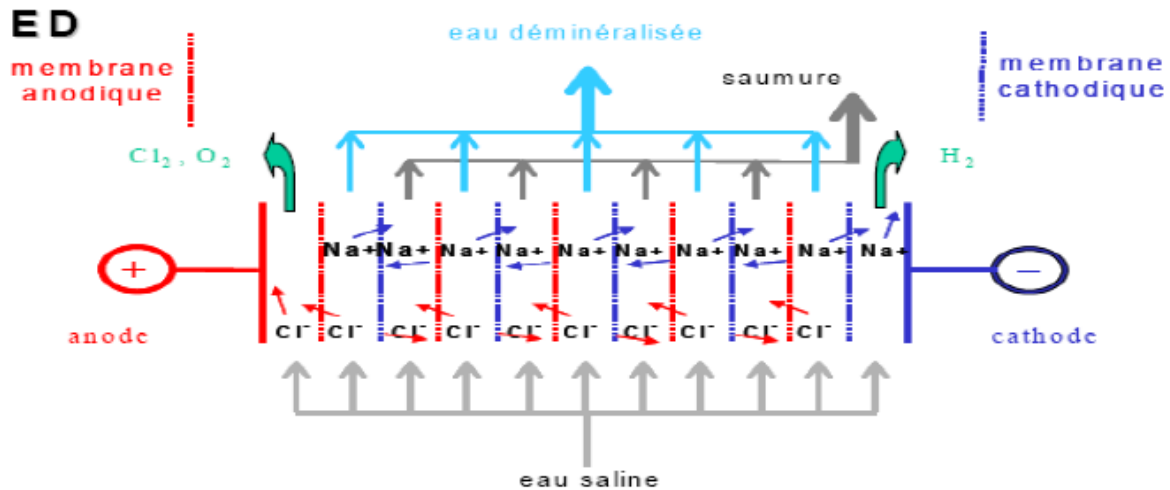


Figure II. 8: Principe de dessalement par l'électrodialyse. [14]

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 :

Une étude comparative entre ces trois techniques a été réalisée à l'Université de SHERBROOKE en 2008, où les aspects économiques, techniques, environnementaux et sociaux ont été pris en compte selon leurs impacts positifs, négatifs, inconnus ou incertains. Les résultats obtenus pour chacun des aspects évalués sont abordés dans les paragraphes suivants.

II.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.5.2. 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.5.3. 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 remarquer 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.5.4. 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 anti-salissures, 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 anti-salissures et anti-mousse :**

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, détritiques 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. La mousse est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui ne permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et phase vapeur.

Les agents anti-mousse 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 anti-mousse. [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	NA

III.4.2. 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 :		-Utilisation de combustibles et	-Utilisation d'énergies propres et renouvelables

-Plus acides	-F	activités	autant que possible.
-Effet de serre	-M	d'élimination.	
-Poussières	-M		-Application de systèmes mixtes et de production couplée.
			-Purification des gaz avant émission dans l'atmosphère.
-Sédiments	-M	-Perturbation des sables par des activités d'excavation et de dragage.	-Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage.
Turbidité et limitation de la Photosynthèse.			
	-M		
-Difficultés de respiration chez les animaux Aquatiques.			-Bonne maîtrise du ruissellement dans la zone du site.
-Bruit	-F	-Activités de Construction.	-Limitation des activités de construction aux seuls horaires de travail.
		-Pompes et autres appareils au cours de l'exploitation de l'usine.	-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 FOUKA

IV.1. Localisation de la station :

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka est localisé dans la wilaya de TIPAZA, Daïra de FOUKA, Commune de FOUKA à la sortie de la ville de Douaouda marine et à l'entrée de Fouka.

Situer à 20 km du chef lieu de wilaya et à environ 35 km à l'Ouest d'Alger, elle est sillonnée par la Route Nationale RN°11 en provenance d'Alger et en direction de Chlef et elle est relié à Koléa par le chemin de wilaya N°110 et à Bou-Ismaïl par le chemin de wilaya N°126 (Figure II.1).

La commune de Fouka s'étend sur une superficie de 1273 Ha et se situe au Nord- Est de la ville de Tipaza. Elle est limitée :

- ✓ Au Nord : Par la mer Méditerranée ;
- ✓ Au Sud : Par la commune de Koléa ;
- ✓ A l'Est : Par la commune de Douaouda ;
- ✓ A l'Ouest : Par la commune de Bou Ismaïl ;



Figure IV. 1: Photo de la station de Fouka, (Google Earth, 2010)

Le site considéré pour l'usine de dessalement offre une superficie de 4 hectares, et présente une longueur de 300 m et une largeur variant de 70-150 m.

Signalons aussi que l'Oued Mazafran se situe à environ 4 km du côté Est du site de la station de dessalement. [21]

La capacité de la station de traitement est de 120 000 m³/jour ou la production est étalée sur une période de 24 h/jour soit 5 000 m³/heure.

Le système d'osmose inverse est conçu de façon modulaire. Il est composé de six (6) unités d'osmose inverse (OI) d'une capacité unitaire de 20 000 m³/jour chacune (tableau II.1). Il n'y a pas d'unités en réserve. Il est possible de faire fonctionner l'usine afin de produire les gammes de débits journaliers suivantes :

Tableau IV. 1: Capacité de la station (Fouka, 2007). [21]

Nombre d'unité d'osmose inverse en service	Débit (m³/jour)	% du débit nominal
1	20 000	17 %
2	40 000	33 %
3	60 000	50 %
4	80 000	67 %
5	100 000	83 %
6	120 000	100 %

IV.2. Installation et processus :

1. Une prise d'eau de mer;
2. Un poste de prétraitement
3. L'unité d'osmose inverse;
4. Un poste de nettoyage en place CIP (cleaning in place);
5. Un poste de traitement et de reminéralisation;
6. Un laboratoire d'analyse;
7. Une station de contrôle.

IV.3. Description du procédé :

L'eau de mer arrive gravitairement via une conduite d'une longueur de 1100 m de la prise d'eau située à la courbe bathymétrique de 13 m. L'eau est ensuite soumise à un processus de prétraitement qui comprend :

- Un système de filtration primaire avec des filtres à sables, une faible quantité de chlorure ferrique est injectée en amont des filtres pour agglomérer les particules contenues dans l'eau brute et les retenir sur les filtres.

Dans le cas où l'eau de mer brute deviendrait extrêmement turbide un polyélectrolyte pourra également être injecté dans le but d'améliorer l'agglomération et de retenir les particules sur les filtres.

- Un deuxième filtrage avec des filtres à cartouches de 5 microns.

Ce système de filtration de l'eau de mer empêchera à l'entrée du système de pompage le passage des débris, des algues, des poissons et d'autres éléments de la flore et de la faune marine. [21]

IV.4. Traitement d'eau de mer :

- Pré-chloration

Une pré-chloration est prévue à l'eau brute (soit au chlore gazeux ; où l'hypochlorite de calcium ; où l'hypochlorite de sodium), ce dernier est utilisé comme traitement choc de l'eau à l'entrée de la station pour limiter la formation de biofilm dans les conduites de la prise d'eau et les filtres.

- Coagulant et polymère

Du Chlorure Ferrique (où sulfite ferrique) est ajouté à l'eau brute en amont des filtres pour agir en tant que coagulant et agglomérer les particules fines. Un coagulant à base de polymère pourra être injecté lorsque l'eau brute sera très turbide (ex : lors d'un orage).

- Le métabisulfite de sodium où Bisulfite sodium

Pour éliminer le chlore résiduel où de l'oxydant lorsqu'il y a une pré-chloration à l'eau brute.

Ces oxydants doivent être éliminés parce qu'ils peuvent détériorer de façon irrémédiable les membranes de polyamide aromatique.

- L'acide sulfurique

Pour réduire le pH =7 de l'eau de mer avant son entrée aux filtres.

L'objectif de cette réduction est de :

- Garantir l'effet bactéricide du chlore
 - Aider la performance du coagulant ;
 - Eviter la précipitation de CaCO_3 à l'intérieur des membranes.
-
- Inhibiteur, pour limiter l'encrassement des membranes

Après ces traitements, l'eau subit une microfiltration par osmose inverse : l'eau est envoyée par six (une de réserve) pompes (60 bars) vers les membranes de type (membrane Koch ou Filmtec), l'eau de mer à pression passe à travers les membranes, produisant deux courants à la sortie des membranes : l'eau osmotisée (perméat) et la saumure.

L'eau produite est stockée dans un réservoir d'une capacité de 5 000 m³ en béton. Ce volume représente 5% de la capacité de l'usine, ce qui est faible par rapport aux règles de l'art : 15% à 20%

L'eau produite est de nouveau traitée pour qu'elle soit potable avant d'être envoyée vers le réseau de distribution.

Le traitement est constitué d'une injection de CO_2 et de la dissolution de calcaire pour augmenter la dureté, suivi d'une injection de soude caustique pour le PH et d'une injection d'hypochlorite de calcium pour la stérilisation.

La saumure, conservant une pression de (50-60 bars) qui sera récupérée et transférée au courant d'eau de mer prétraitée avant les pompes, d'où un gain d'énergie.

La saumure passe dans un système de neutralisation à l'acide sulfurique et à l'hydroxyde de sodium avant le rejet en mer. Le lieu de déversement a été déterminé par les résultats de l'étude marine afin d'atténuer les impacts, [21].

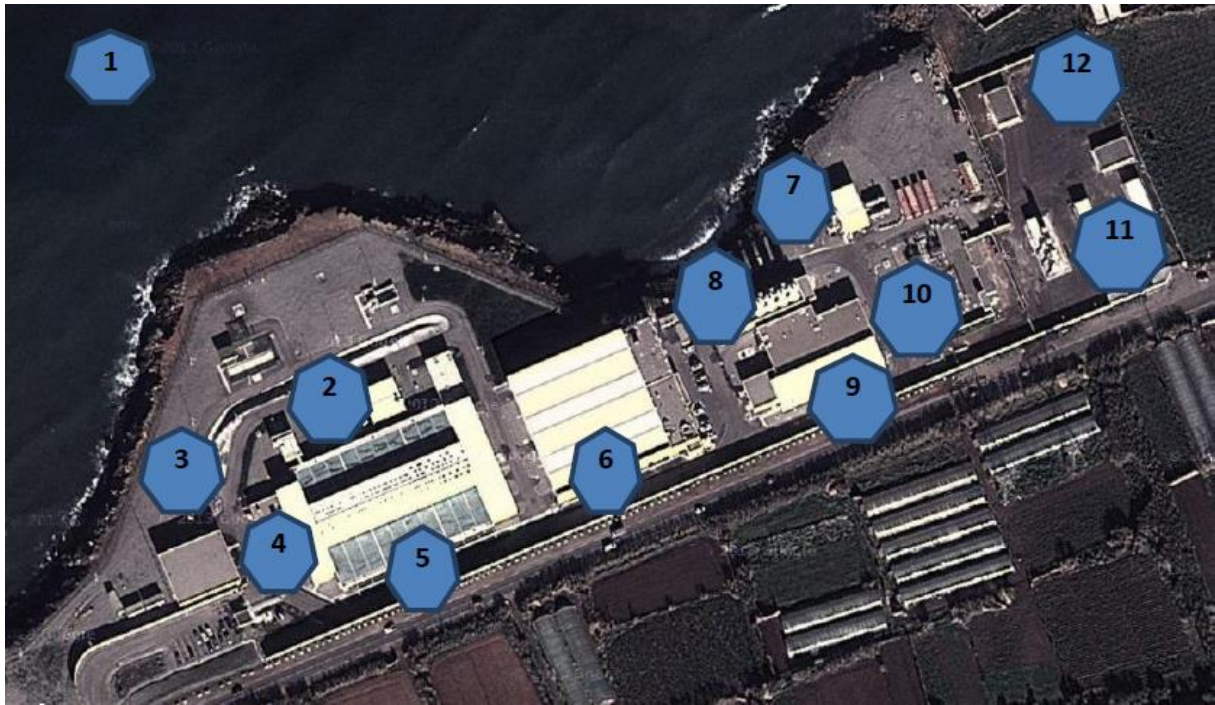


Figure IV. 2: Description générale de la station de Fouka

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1- Tour de captage ; | 7- Usine de CO ₂ ; |
| 2- Traitement chimique ; | 8- Saturateur de chaux ; |
| 3- Bâtiment de captage ; | 9- Réservoir d'eau produite ; |
| 4- Filtre à anthracite et sable ; | 10- Bâtiment de pompage d'eau produite ; |
| 5- Filtre à cartouche, | 11- Sous-station électrique ; |
| 6- Bâtiment d'osmose inverse; | 12- Station de pompage SEAAL. |

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.

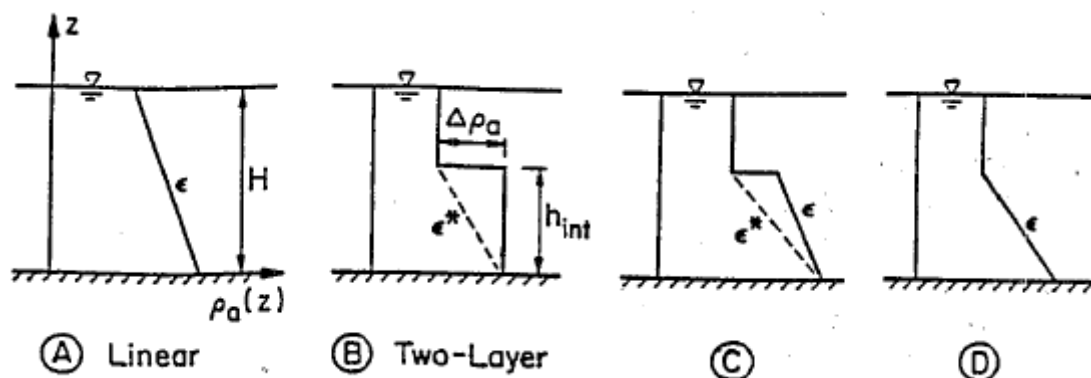


Figure V. 2: Types de stratification. [22]

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.

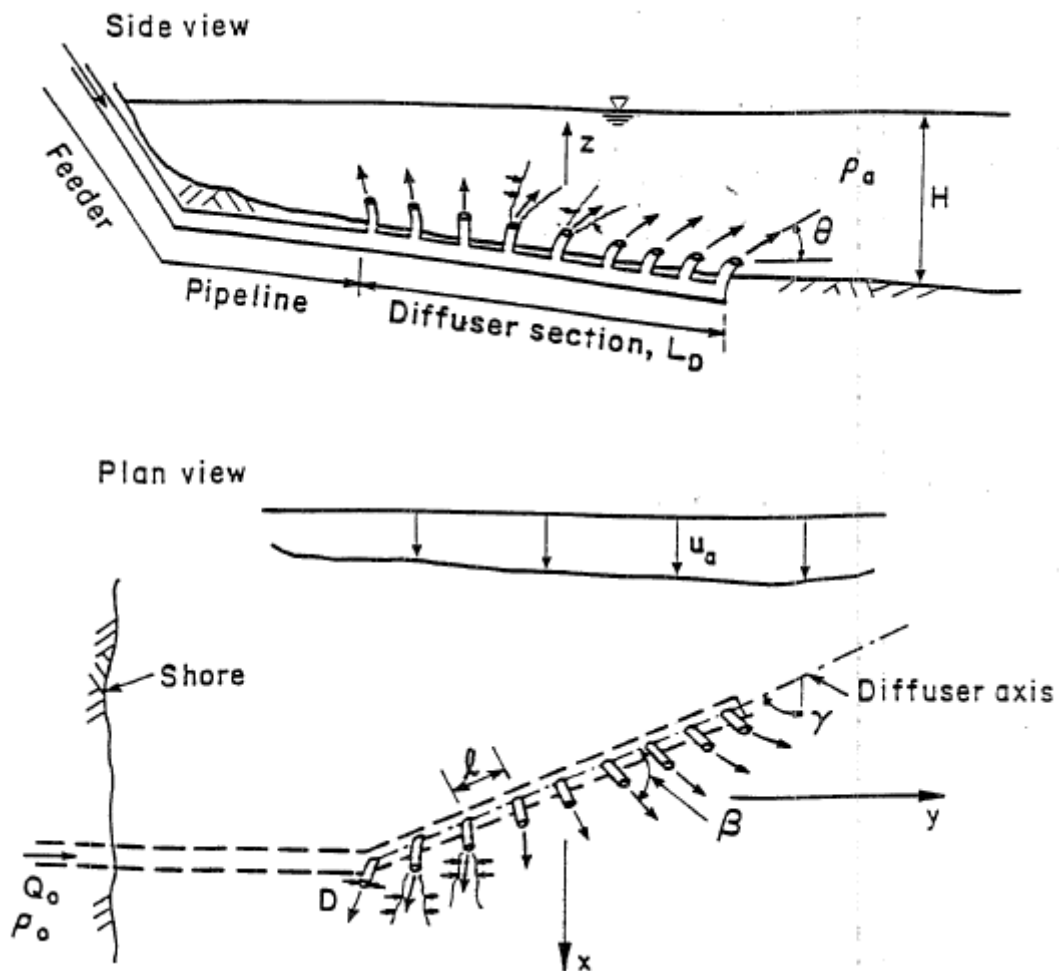


Figure V. 3: Diffuseur multiport et sa configuration générale. [24]

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. [23]

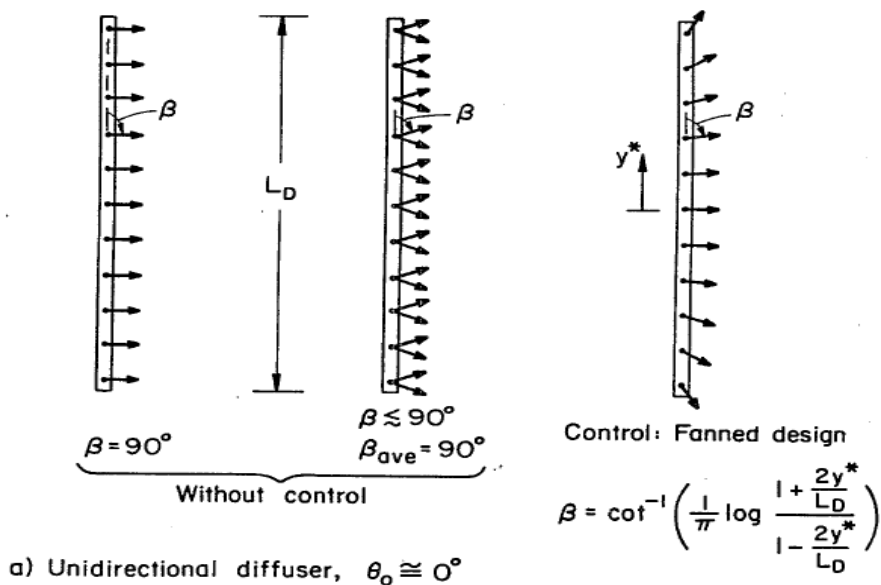
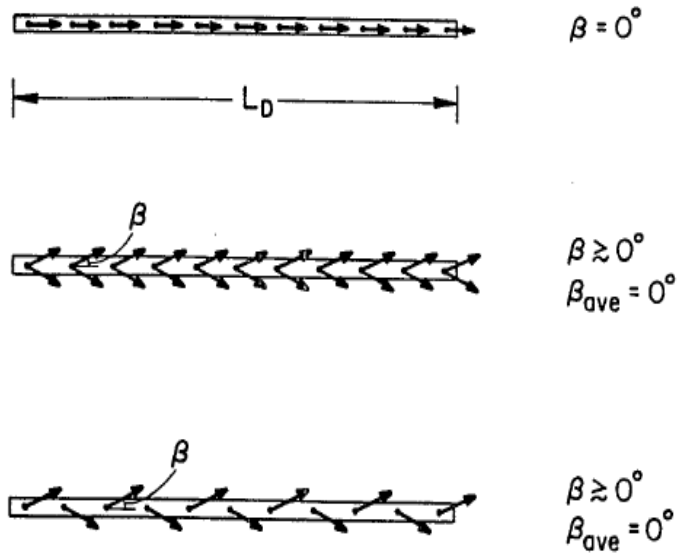


Figure V. 4: Diffuseur unidirectionnel. [24]



b) Staged diffuser, $\theta_0 \cong 0^\circ$

Figure V. 5: Diffuseur multi-étages. [24]

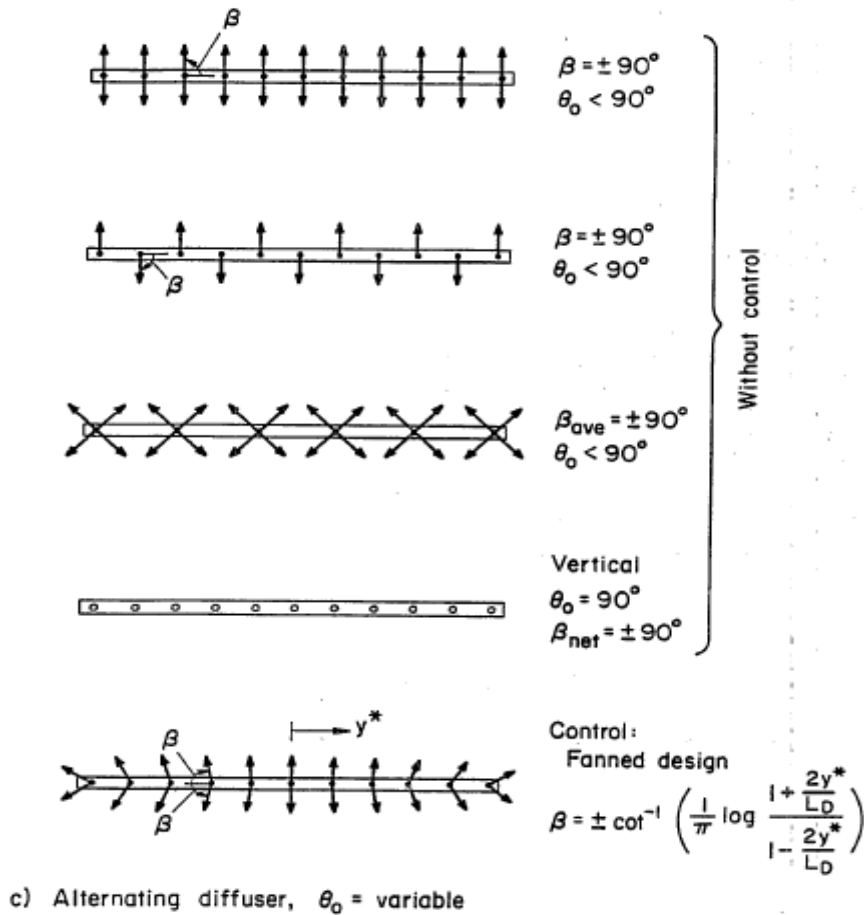


Figure V. 6: Diffuseur alternatif. [24]

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 susceptible 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.

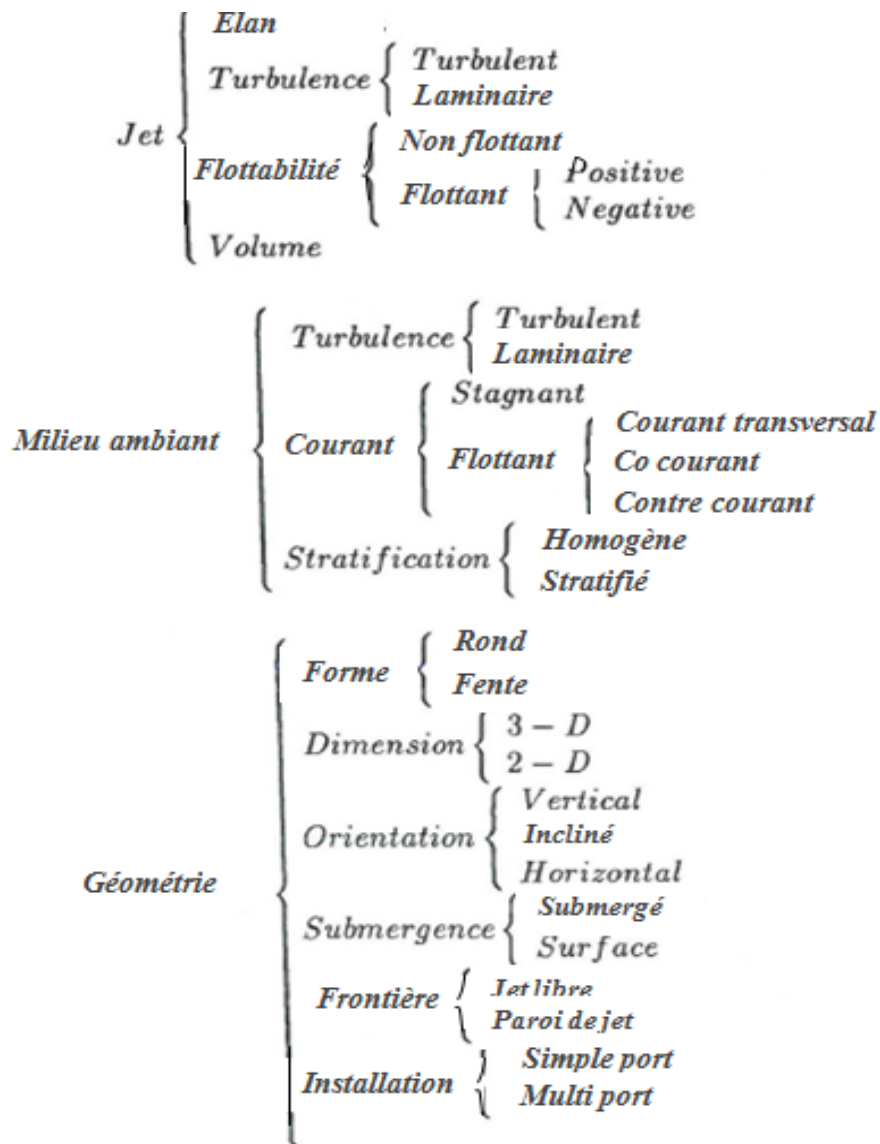


Figure V. 7: Paramètres liés aux jets. [25]

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)

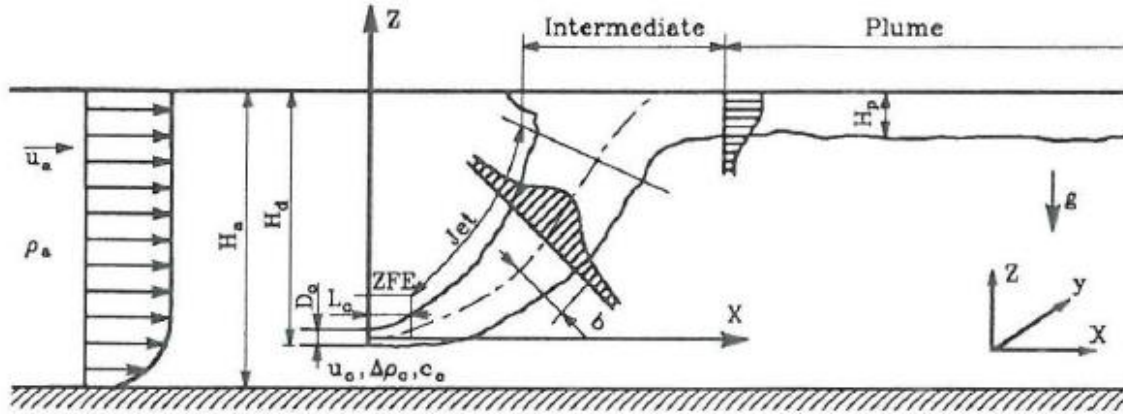


Figure V. 8: Un jet flottant turbulent diffusé dans un écoulement ambiant. [27]

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

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 $R_e = u_0 D_0 / \nu_0$

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

- a) L'écoulement du jet est proportionnellement grand au nombre de Reynolds.
- b) L'effet de l'angle de diffusion initiale est négligé en considérant seulement le jet horizontal ou vertical
- c) 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]

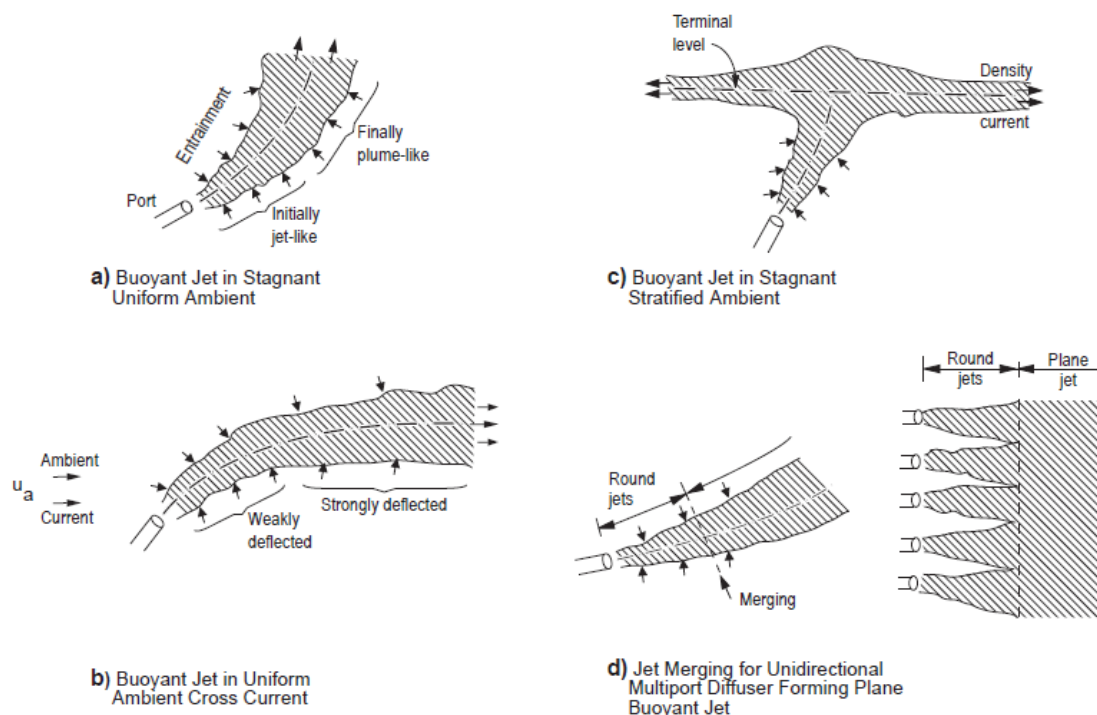


Figure V. 9: Types de modèles de jet flottant sous différentes conditions ambiantes. [22]

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).

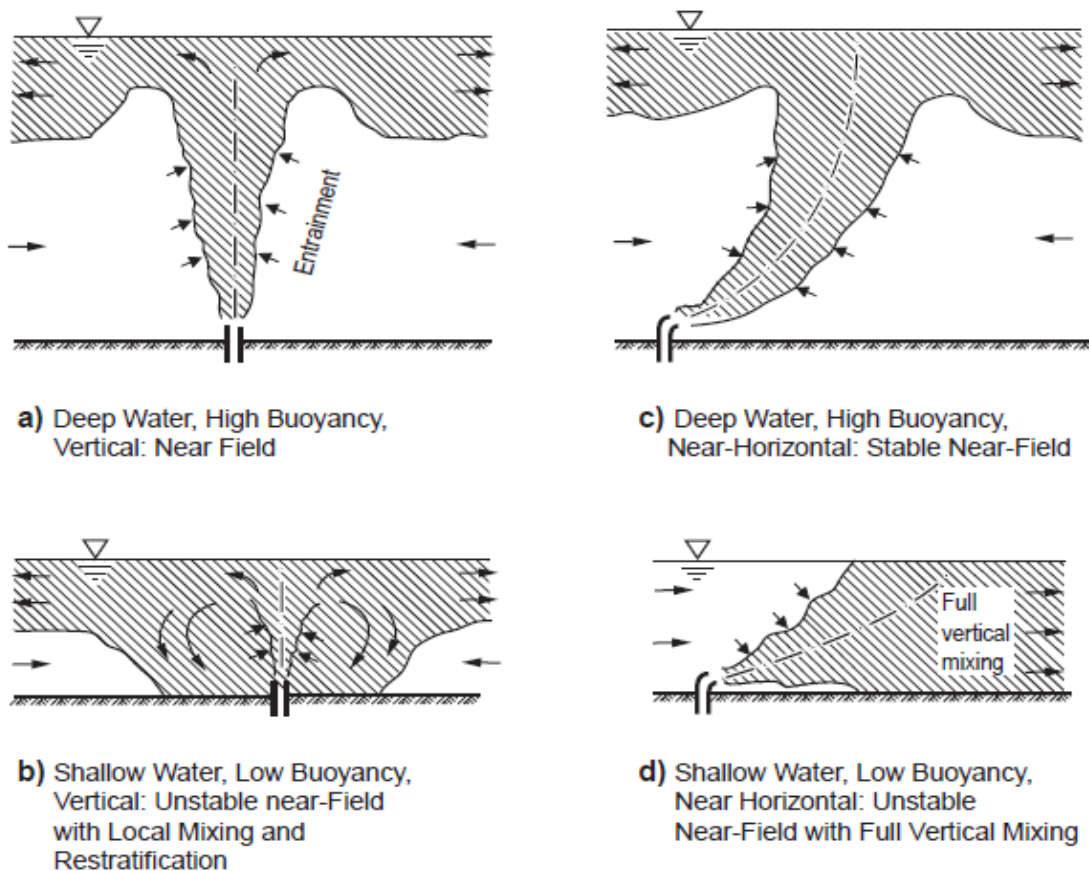


Figure V. 10: Exemples de conditions de stabilité et d'instabilité du champ proche pour des diffusions de flottabilité positive profondément immergé. [22]

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]

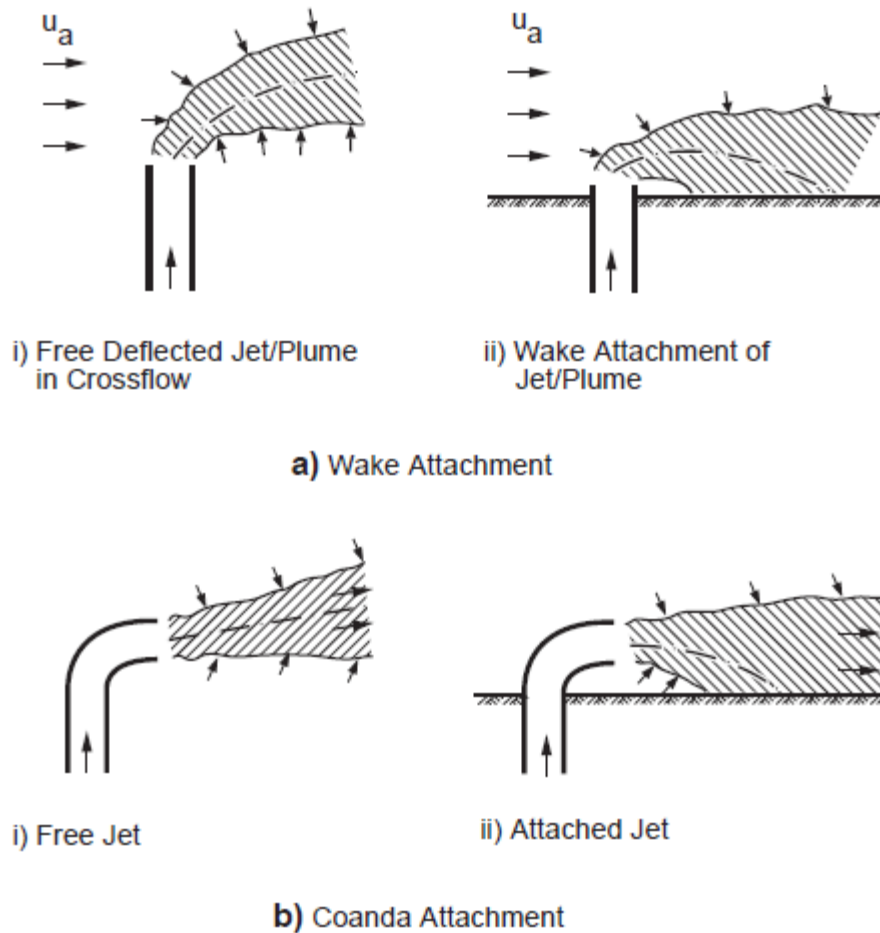


Figure V. 11: Exemples de conditions d'attachement de sillage et d'attachement pour des diffusions proche des limites profondes. [22]

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]

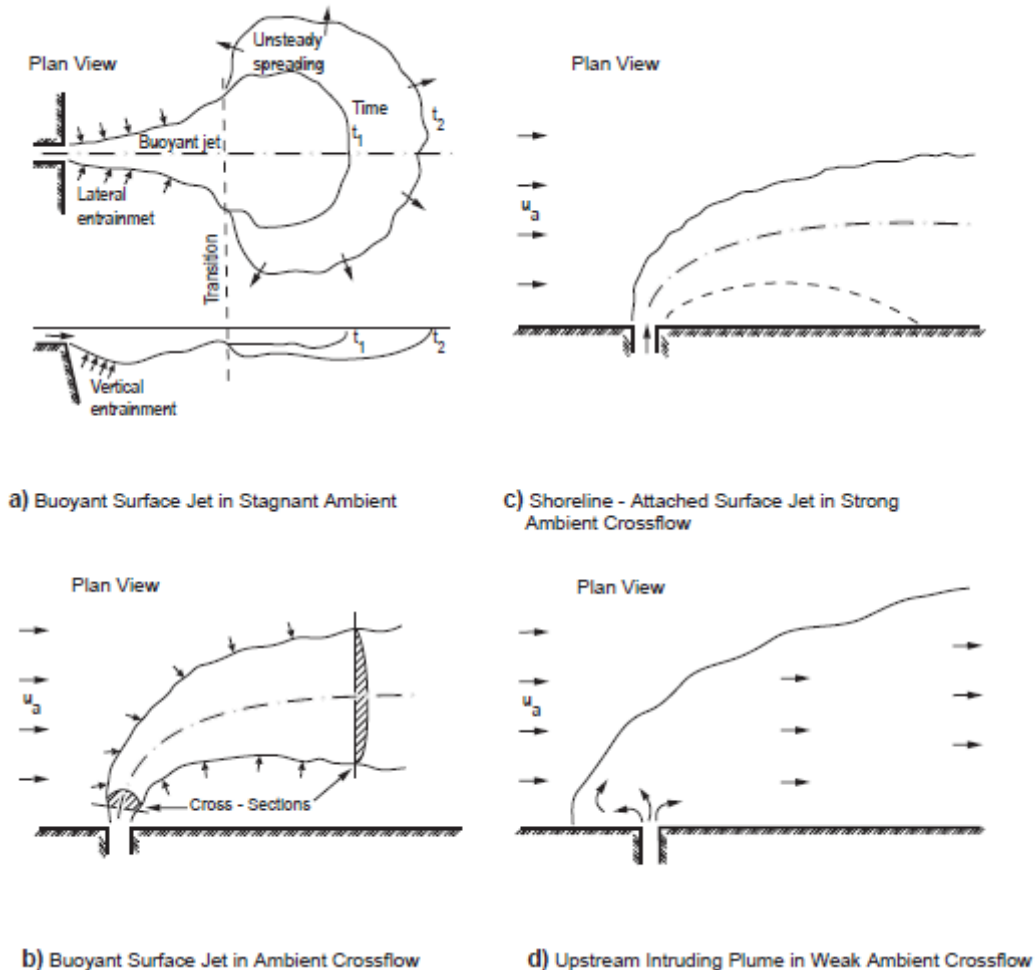


Figure V. 12: Types de modèles de mélange de jet en surface sous des conditions ambiantes stagnantes et fluctuantes. [22]

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

Quelques installations de diffuseur multiport 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.

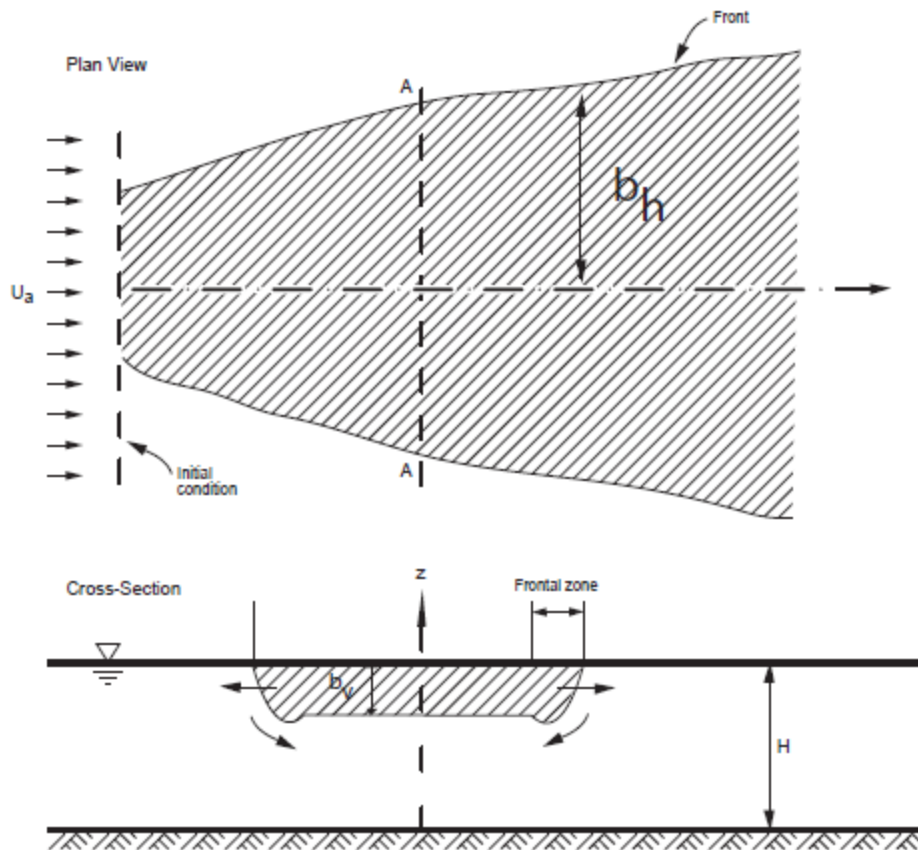


Figure V. 13: Exemple de propagation de flottabilité le long de la surface d'eau. [22]

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]

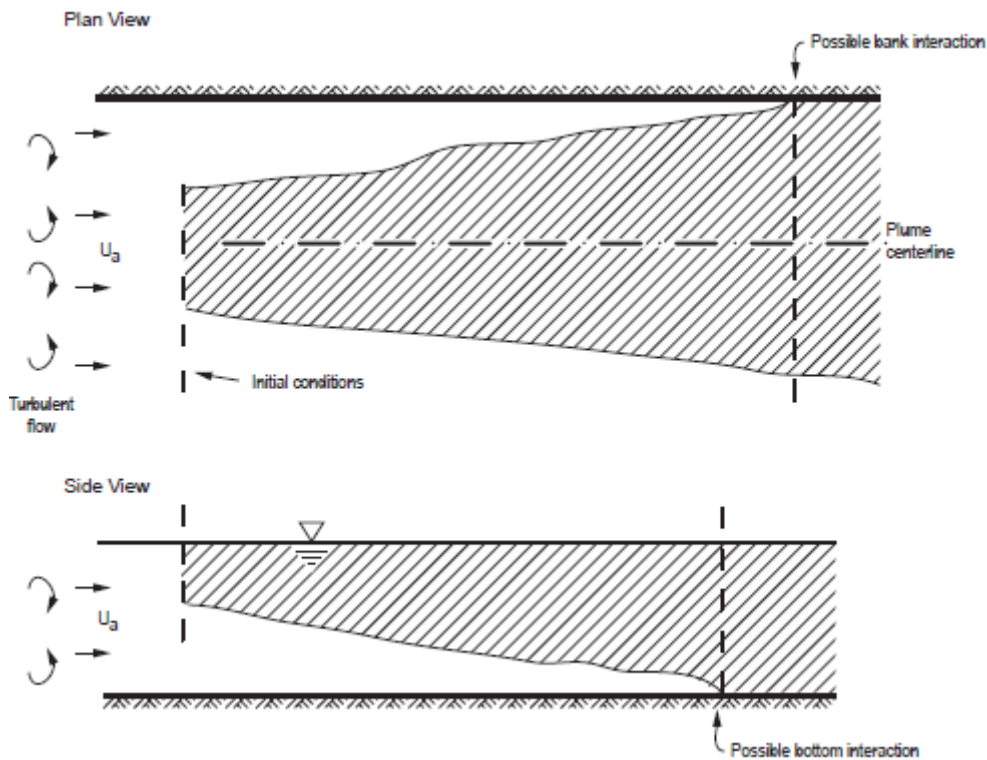


Figure V. 14: Processus de diffusion passive avec advection dans le champ lointain. [22]

Chapitre VI : Simulation des rejets en mer et amélioration des performances 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 Fouka, travaille en recueillant un volume déterminé d'eau de mer (plus de 200 000 de m³/j), récupérant ainsi la moitié de ce volume comme eau potable et dessalée (120.000 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 diffuseur actuel de rejet hypersalin de la station de dessalement de Fouka ainsi que son comportement par rapport aux variations climatiques par le biais de multiples simulations à l'aide d'un modèle spécialisé nommé « CORMIX » et ce dans le but de faire un diagnostic de ce diffuseur.

Dans une seconde étape, nous étudierons l'effet de la variation de la vitesse de rejet ainsi que la variation des nombres de ports, afin de déterminer les configurations adéquates et nécessaires pour une bonne dilution de la saumure dans le 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 Fouka. 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

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

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. [3]

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.

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

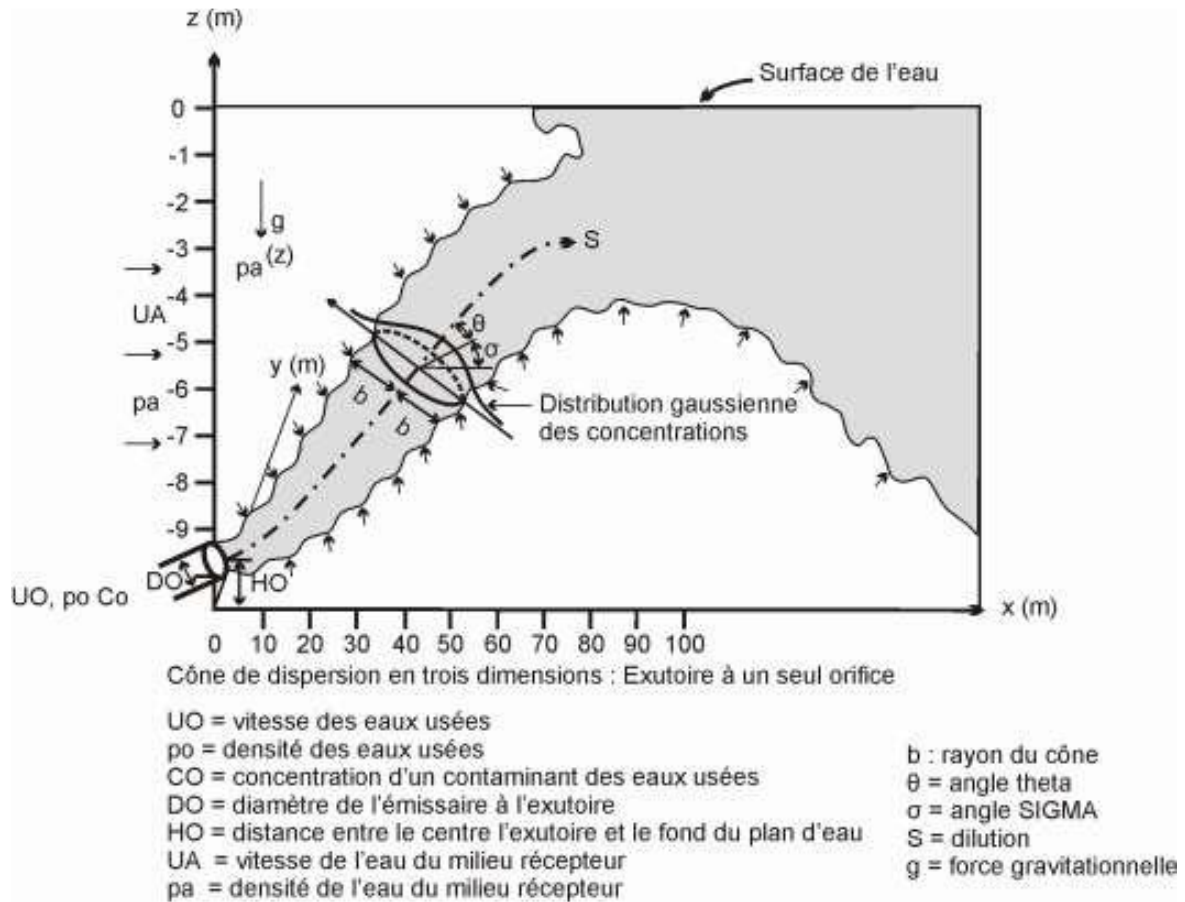


Figure VI. 1: Distribution gaussienne des concentrations. [22]

➤ Paramètres de simulation :

Une série de paramètres communs à l'ensemble des scénarios, représentant les données et caractéristiques de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka, 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 station de dessalement de FOUKA

Caractéristiques de l'effluent :	
Débit maximal de rejet	1.77 m ³ /s
Salinité	69 g/l
Accroissement de salinité	32.5 g/l
Densité (19.5°C)	1050.586 kg/m ³

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

Caractéristiques du milieu récepteur :	
Salinité	36.5 g/l
Densité (19.5°C)	1025,801 kg/m ³
Vitesse du vent	2 – 8 m/s
Vitesse du courant	0.02 – 0.4 m/s
Caractéristiques du diffuseur :	
Distance par rapport à la côte	370 m
Profondeur au point de versement	7 m
Longueur de la section du diffuseur	2.8 m
Nombre de ports	1
Hauteur du diffuseur	2 m
Diamètre des ports	1.1 m
Vitesse de sortie du débit	1.86 m/s
Angle de décharge	45°

➤ Dimensionnement du diffuseur :

Grâce au modèle CORMIX qui prend en compte tous les paramètres cités précédemment, le dimensionnement de base du diffuseur se fait en faisant varier ces différentes caractéristiques.

Les facteurs importants liés à la conception de l'émissaire, qui influent sur la dilution de la saumure et qui doivent se faire varier sont l'effet de l'angle de rejet, l'effet de la hauteur de l'émissaire, sa profondeur, la vitesse de rejet et le nombre de ses ports.

Les différentes simulations permettent 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.

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

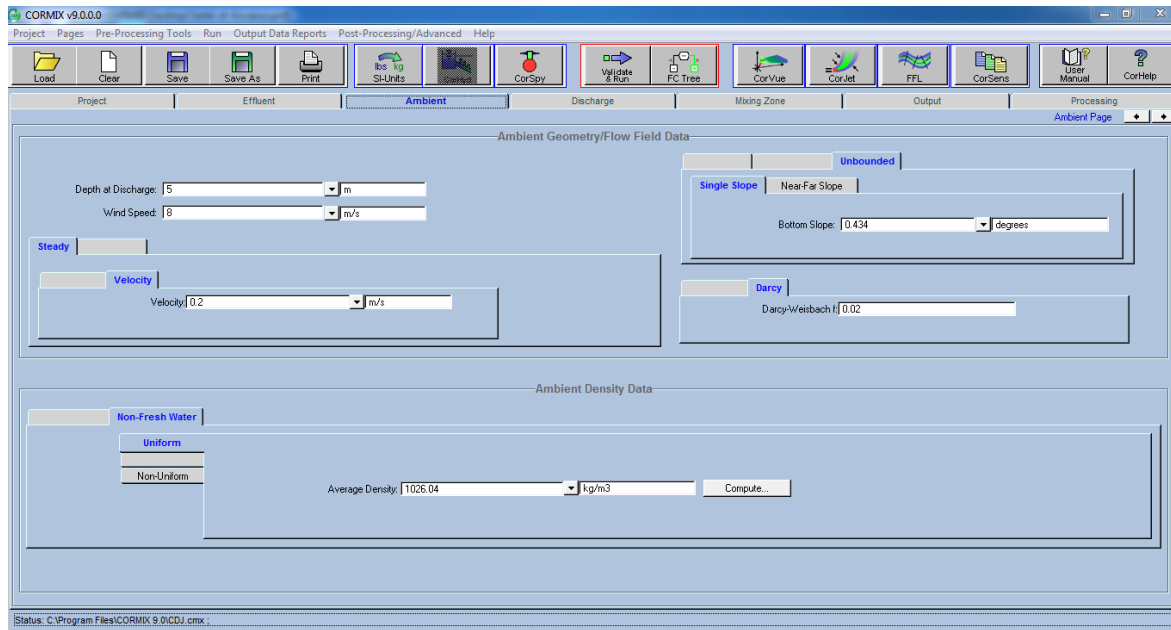


Figure VI. 2: l'interface CORMIX

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 (38.5 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.

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

Le taux de dilution requis de l'effluent est calculée et correspond à $S=34.5$. Autrement dit, la salinité de notre rejet, qui est égale à 69 g/l, doit être diluée un peu plus de 30 fois afin que le panache qui est engendré ne dépasse pas les 38.5 g/l tolérés, une fois mélangée à l'eau de mer.

Le taux de dilution requis est donc calculé comme suit :

$$S = \frac{\text{Salinité de l'effluent}}{\text{Salinité Tolérée} - \text{Salinité du milieu ambiant}} = \frac{69}{38.5 - 36.5} = 34.5$$

VI.4. Analyse et interprétation des résultats :

A. Diagnostic du comportement du diffuseur dans le milieu récepteur :

Dans cette partie, nous allons étudier le comportement du diffuseur actuel par rapport aux variations climatiques pouvant intervenir dans le milieu récepteur ainsi que le développement du panache dans ces différentes variations.

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.2 suivant :

Tableau VI. 2: Cas de vitesses environnementales étudiées

Type de cas	Vitesse du courant (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Cas 1 : favorable	0.4	8
Cas 2 : intermédiaire	0.2	6
Cas 3 : défavorable	0.02	2

- Pour le premier cas, la figure VI.3 et VI.4 représentent la forme du panache généré par les résultats de la simulation.

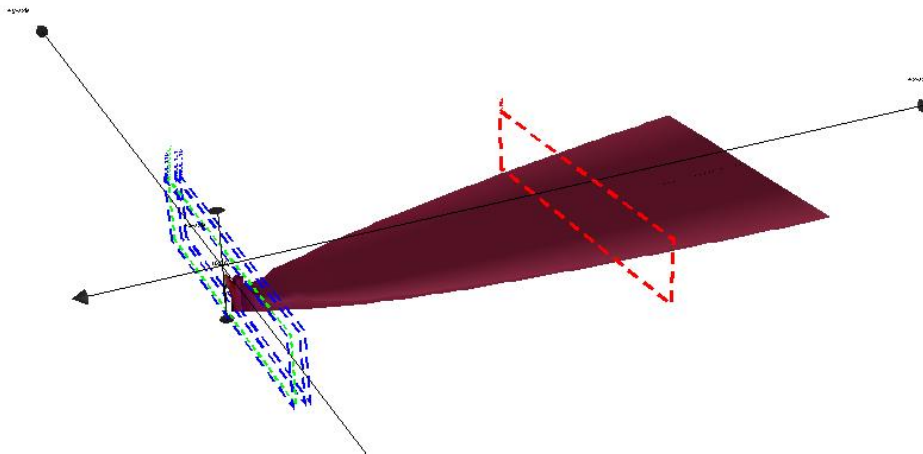


Figure VI. 3: Profil 3D du panache

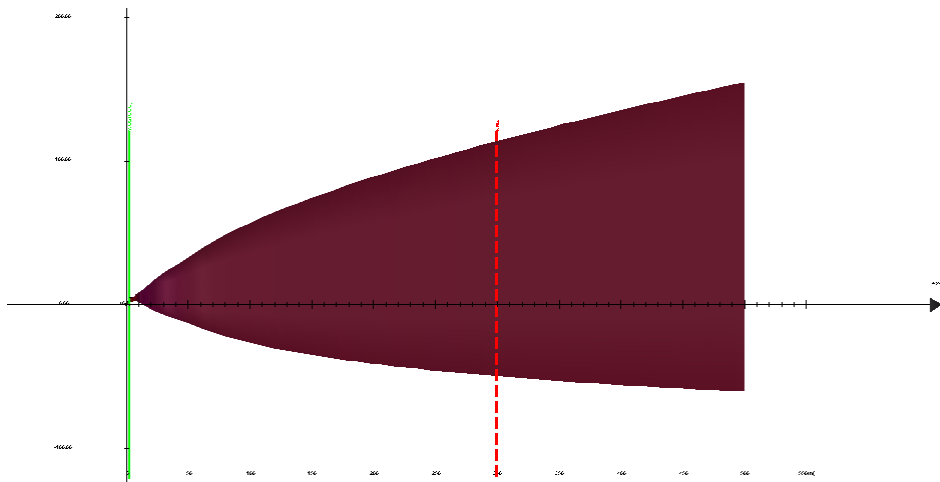


Figure VI. 4: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet

➤ Pour le deuxième cas

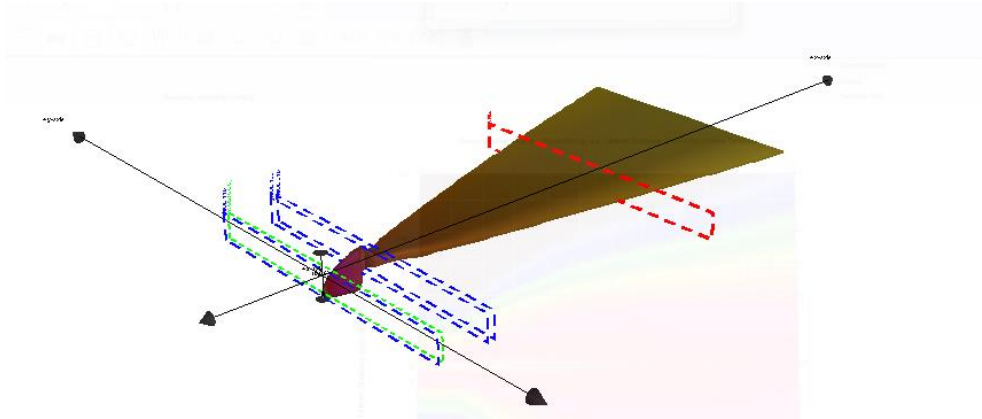


Figure VI. 5: Profil 3D du panache

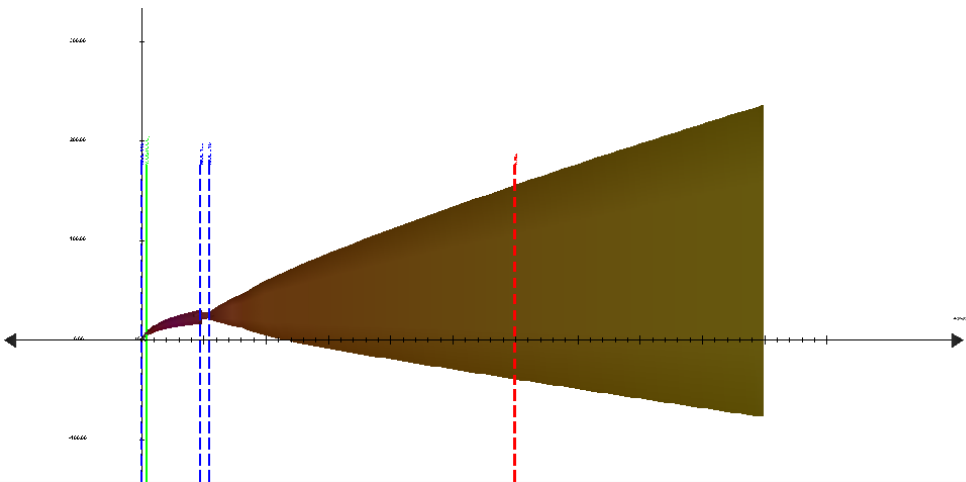


Figure VI. 6: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet

➤ Pour le troisième cas :

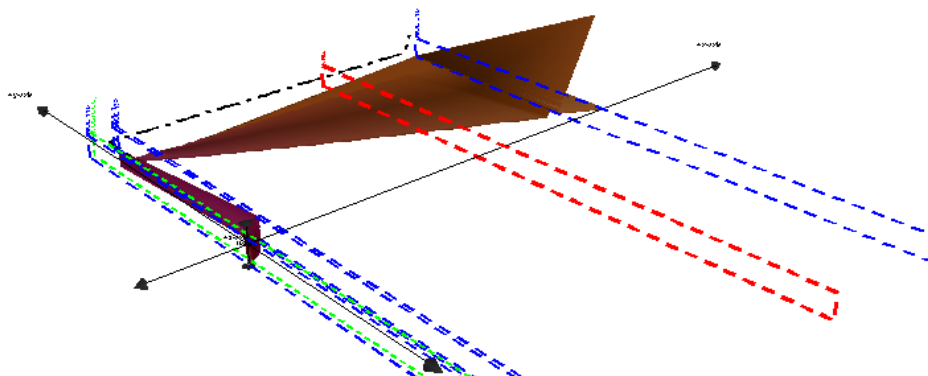


Figure VI. 7: Profil 3D du panache

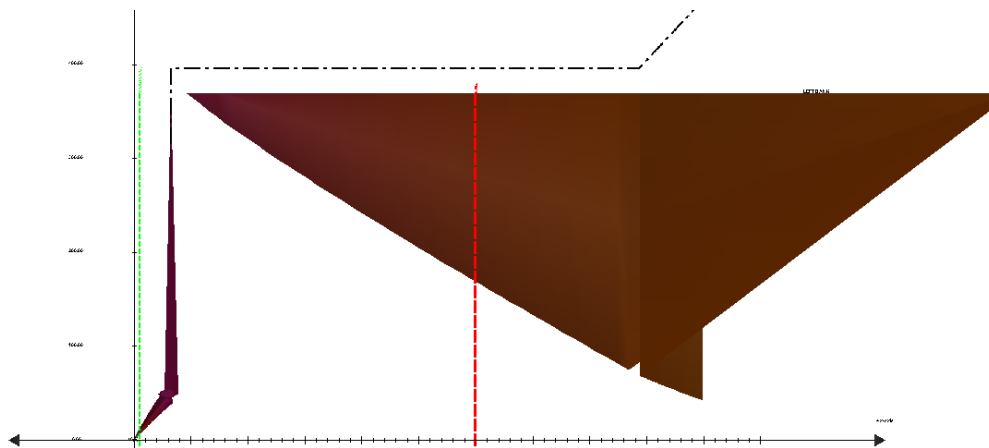


Figure VI. 8: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) à partir du point de rejet

Afin de mieux exploiter les résultats des simulations, nous avons tracé pour les trois cas cité précédemment, les profils du panache dans l'espace selon les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) en prenant en compte la position du point de prise d'eau, les résultats sont présentés dans les figures VI.9, VI.10 et VI.11.

- Pour le premier cas,

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

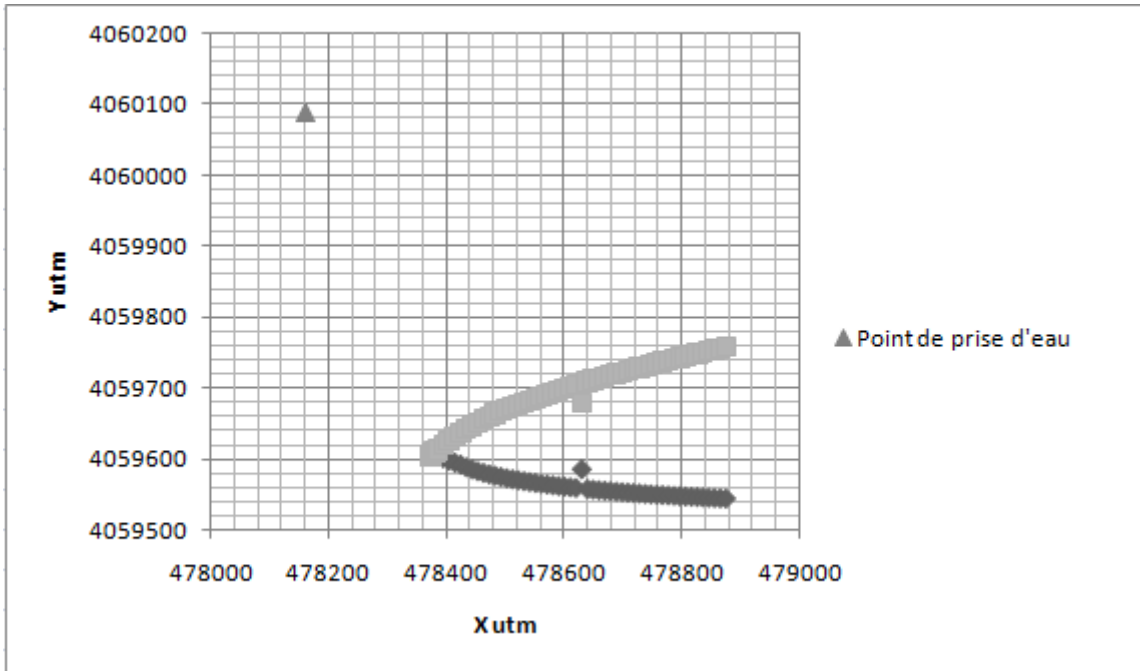


Figure VI. 9: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace

➤ Pour le deuxième cas,

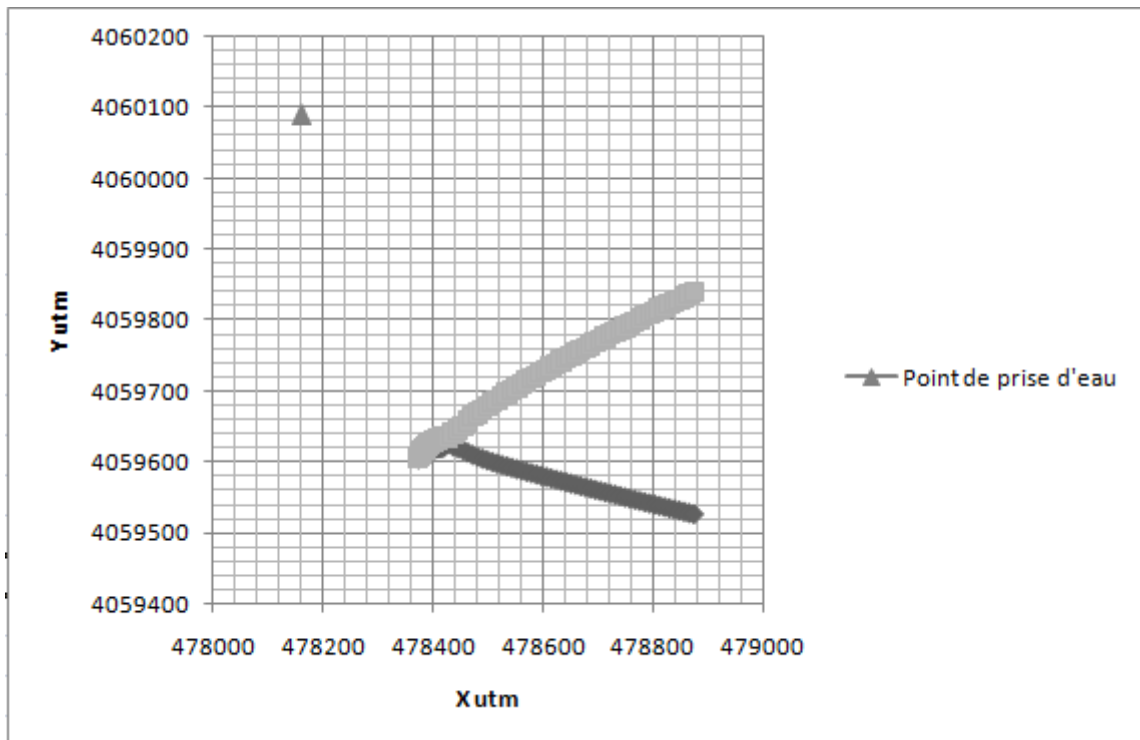


Figure VI. 10: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace

➤ Pour le troisième cas,

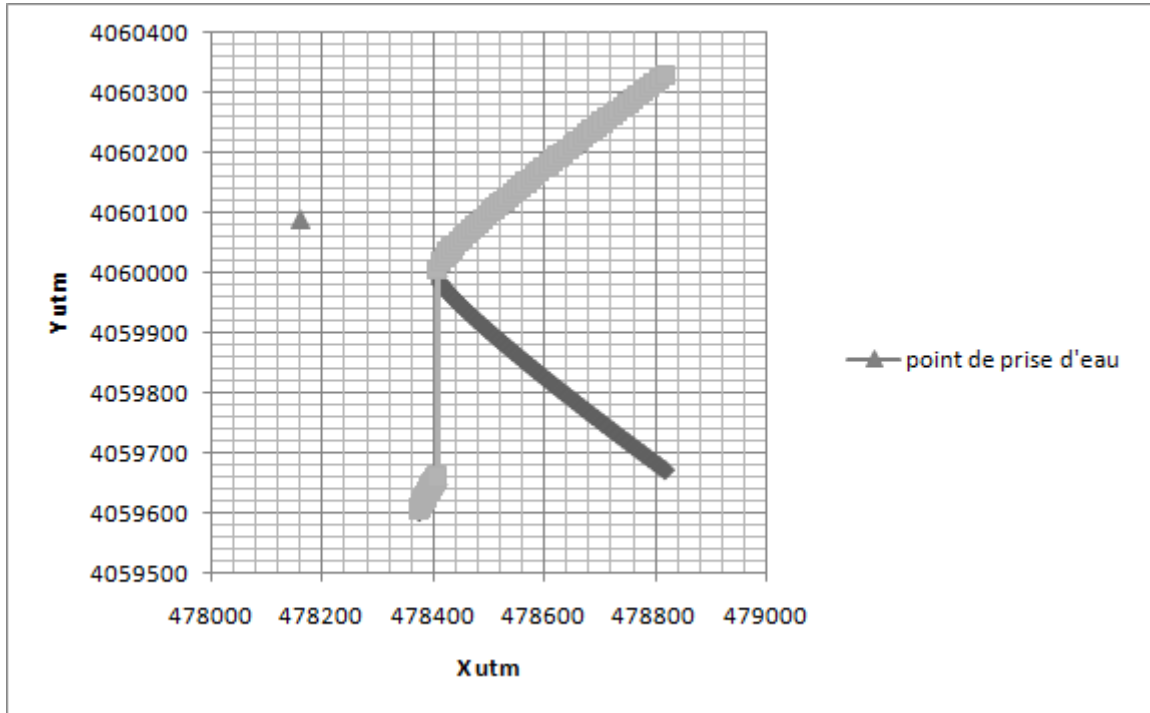


Figure VI. 11: Profil latéral du panache (Y en fonction de X) dans l'espace

La figure VI.12 ci-dessous représente les différentes dilutions pour les trois couples de vitesse du courant et du vent cité précédemment.

Concernant le premier et le troisième cas, le taux de dilution requis ne sera jamais atteint, c'est-à-dire que la saumure rejetée aura toujours une salinité nocive pour le milieu récepteur, ce qui est très mauvais pour l'écosystème marin.

Quand au deuxième cas, le taux de dilution est atteint après avoir parcouru une distance de 140 m, c'est-à-dire bien après le fin du champ proche ($X= 54.37$ m). Les résultats nous ont montré également que le panache touche le sol directement après sa sortie de la source de décharge, ce qui est très mauvais pour le fond marin.

D'après ces résultats, nous pouvons dire que le diffuseur actuel de la station de dessalement de FOUKA, n'est pas conforme car dans toutes les conditions possibles, il n'offre pas une bonne dilution de la saumure, et de ce fait l'impact négatif sur l'environnement sera élevé.

C'est pour cela que des modifications voir même des alternatives du diffuseur doivent être apportées.

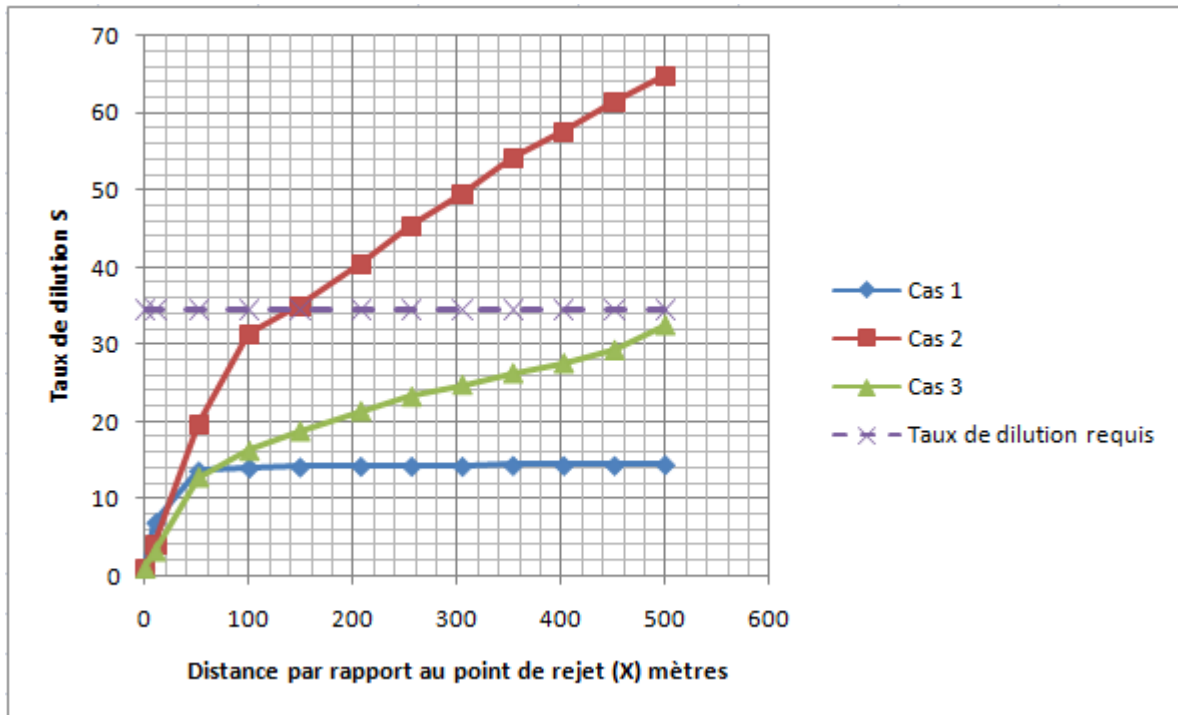


Figure VI. 12: Graphiques des dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales

B. Améliorations et alternatives au diffuseur actuel :

Dans cette, nous allons voir les résultats de dilution pour plusieurs diamètres de ports (vitesses de rejet), qui est un facteur très important pour la dilution de la saumure. Nous allons également voir l'effet de variation du nombre de ports (installation d'un diffuseur multiport) sur la dilution de la saumure.

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

Pour un angle de décharge de 45° , une hauteur du diffuseur de 2 m, à une profondeur de 7 m et à une vitesse environnementale du courant de 0.4 m/s, la figure VI.13 ci-dessous nous montrent les différentes dilutions pour les 5 différents diamètres $D= 0.5 \text{ m}$ (9 m/s) , $D= 0.8 \text{ m}$ (3.52 m/s), $D= 1.1 \text{ m}$ (1.86 m/s) , $D= 1.5 \text{ m}$ (1 m/s) et $D= 2 \text{ m}$ (0.56 m/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.

Nous observons clairement que pour les diamètres 1.1 m, 1.5 m et 2 m le taux de dilution requis n'est pas atteint, de ce fait ces trois diamètres sont à exclure, parmi eux le diamètre 1.1 m correspondant au diamètre du diffuseur actuel de la station de FOUKA.

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

Concernant les diamètres 0.5 m et 0.8 m, les deux configurations nous procurent une bonne dilution de la saumure et le taux de dilution requis est atteint dans le champ proche pour les deux diamètres, cependant pour le diamètre 0.5 m le taux de dilution requis est atteint après avoir parcouru une distance de 47.5 m (la fin du champ proche est à une distance 52.8 m du point de rejet) et pour le diamètre 0.8 le taux de dilution requis est atteint à une distance de 79.5 m du point de rejet (la fin du champ proche est à 83.43 m).

Donc les deux diamètres 0.5 m et 0.8 m sont préconisés avec un léger avantage pour le diamètre de 0.5 m.

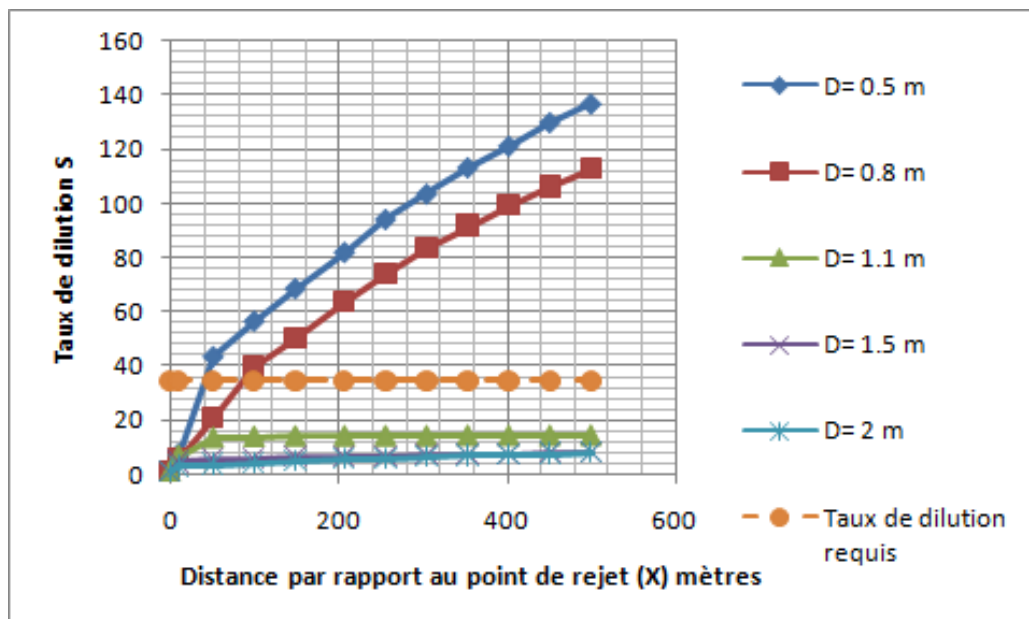


Figure VI. 13: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports

➤ Variation du nombre des ports :

Afin d'assurer une bonne dilution de la saumure rejetée par l'usine de dessalement de FOUKA, en d'autres termes améliorer/modifier le diffuseur mono-port actuel, installer un diffuseur multiport pourrait être une solution.

Pour ce faire, 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.

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

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

Tableau VI. 3: Alternatives proposées de diffuseurs

Type de diffuseur	Longueur (m)	Diamètres des bouches	Nombre de bouches
1	100	0.2	30
2	50	0.29	15
3	25	0.39	8
4	10	0.65	3

La figure VI.14 représente les différentes dilutions pour chaque type de diffuseur, nous remarquons que dans notre cas plus les ports de rejet sont nombreux, meilleure est la dispersion de la saumure et donc de la dilution de cette dernière.

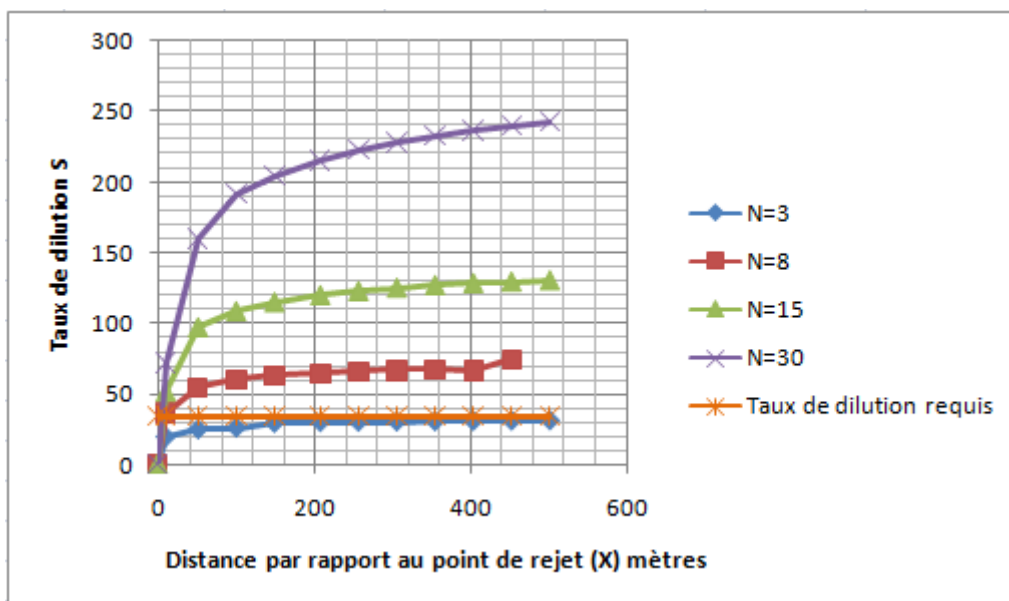


Figure VI. 14: Graphiques des dilutions en fonction des différents types de diffuseurs

Des résultats importants que nous a procuré les simulations sont présentés dans le tableau ci-dessous

CHAPITRE VI : SIMULATION DES REJETS EN MER ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DU DIFFUSEUR DE SAUMURE

Tableau VI. 4: 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	2.5	50	50
2	4.5	25	25
3	8.75	12.5	12.5
4	> 500	5	5

D'après ces résultats, pour la configuration du diffuseur à 3 ports, le taux de dilution requis n'est pas atteint donc cette configuration est exclue.

Les trois autres configurations de diffuseur sont acceptés cas le taux de dilution est atteint avant la fin du champ proche et avant que le panache ne touche le sol, mais la première configuration de 30 ports restent en tête car le taux de dilution est atteint à la distance la plus proche du point de rejet.

Le choix de l'une de ces trois configurations reviendra maintenant à des questions économiques.

VI.5. Conclusion :

Pour améliorer les performances du diffuseur, des modifications peuvent être apportées au niveau du diamètre des ports c'est-à-dire de la vitesse de rejet.

En effet, une grande vitesse de rejet peut augmenter d'une manière significative la dilution de la saumure.

Par ailleurs, l'installation d'un diffuseur multiport peut être également une solution pour assurer une bonne dilution et de ce fait éviter un impact négatif sur l'environnement 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 fait un diagnostic de l'installation actuelle du diffuseur de la station de dessalement de FOUKA et démontré que ce diffuseur est défaillant et qu'il ne répond pas au critère pour éviter un impact négatif sur l'environnement, nous avons fait des simulations afin de proposer des solutions pour l'amélioration des performances du diffuseur pour assurer une bonne dilution afin d'éviter un impact négatif sur l'écosystème marin.

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.

Références bibliographiques :

- [1] **ARTE (2010)**, Les dessous des cartes, émission « La Mer à Boire ».
- [2] **Danis P (2003)**, Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J2 700.
- [3] **Amitouche (2016)**, Thèse de Doctorat « impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur ».
- [4] **Bennet, T. and M. Cuccinello (1999)**, Saltwater desalination in Water Treatment Primer.
- [5] **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.
- [6] **BLUE PLAN (1992)**, Overview of the Mediterranean (Development and Environment)
- [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] **Lattemann, S. (2010)**, development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants, Phd Thesis in Delft, The Netherlands.
- [9] **A.D.E (2008)**, « Dessalement en ALGERIE », situation actuelle et programme de développement.
- [10] **A.N.R.H (2005)**, « Bilan des ressources d'eau en ALGERIE ».
- [11] **Maurel . A., (2006)**, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2e édition TEC&DOC286p.
- [12] **Bouros, O.K. (1992)**, Desalting Technologies. The ABCs of Desalting.
- [13] **Jamaly , S. et al,(2014)**, A short review on reverse osmosis pretreatment technologies, Desalination volume 354, 1 December 2014, Pages 30–38.
- [14] **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).
- [15] **Bissonnette. A (2008)**, Utilisation de nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation.
- [16] **Zimmerman, R. (1999)**, The Larnaca seawater desalination plant. Environmental impact Assessment Report.

- [17] **Burashid, K. (1992)**, Desalination and Water Reuse, 2(2):44.
- [18] **Levinton, J.S. (1996)**, Marine Biology Function. Biodiversity, Ecology. Oxford University Press, New York, U.S.A., 462 p.
- [19] **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.
- [20] **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.
- [21] **National Eau et Environnement (NEE)**, étude d'impact sur l'environnement de la réalisation et l'exploitation de l'usine de dessalement d'eau de mer de FOUKA, 2006.
- [22] **Doneker et Jirka (2007)**, A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System of Pollutant Discharges into Surface Waters.
- [23] **Akar et Jirka (1991)**, CORMIX2 : An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic multiport diffuser discharges.
- [24] **Jirka 1982**, Turbulent Buoyant Jets in Shallow Fluid Layers, Turbulent Buoyant Jets and Plumes, Edited by W.Rodi, Pergamon Press.
- [25] **Brooks (1980)**, Synthesis of Stratified Flow Phenomenon for Design of Outfalls, Second Inter. Symp.on Stratified Flows, Vol.2 pp 809-831, June, Norway.
- [26] **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.
- [27] **Hai-Bo Chen (1991)**, Turbulent buoyant jets and plumes in flowing ambient environments,

Annexe : Résultats des simulations

x	y	B	X=x+xr	Y=y+yr	Y-	Y+
0	0	0,55	478374	4059604	4059603,45	4059604,55
0,6	0,93	0,56	478374,6	4059604,93	4059604,37	4059605,49
0,69	1,05	0,59	478374,69	4059605,05	4059604,46	4059605,64
0,78	1,17	0,62	478374,78	4059605,17	4059604,55	4059605,79
0,89	1,29	0,65	478374,89	4059605,29	4059604,64	4059605,94
0,99	1,41	0,69	478374,99	4059605,41	4059604,72	4059606,1
1,08	1,5	0,72	478375,08	4059605,5	4059604,78	4059606,22
1,2	1,63	0,76	478375,2	4059605,63	4059604,87	4059606,39
1,32	1,75	0,8	478375,32	4059605,75	4059604,95	4059606,55
1,45	1,87	0,84	478375,45	4059605,87	4059605,03	4059606,71
1,59	1,99	0,88	478375,59	4059605,99	4059605,11	4059606,87
1,73	2,11	0,92	478375,73	4059606,11	4059605,19	4059607,03
1,88	2,23	0,96	478375,88	4059606,23	4059605,27	4059607,19
2,03	2,35	1	478376,03	4059606,35	4059605,35	4059607,35
2,19	2,46	1,04	478376,19	4059606,46	4059605,42	4059607,5
2,36	2,58	1,08	478376,36	4059606,58	4059605,5	4059607,66
2,52	2,69	1,11	478376,52	4059606,69	4059605,58	4059607,8
2,7	2,8	1,15	478376,7	4059606,8	4059605,65	4059607,95
2,87	2,9	1,18	478376,87	4059606,9	4059605,72	4059608,08
3,04	3	1,21	478377,04	4059607	4059605,79	4059608,21
3,22	3,1	1,24	478377,22	4059607,1	4059605,86	4059608,34
3,4	3,2	1,27	478377,4	4059607,2	4059605,93	4059608,47
3,58	3,29	1,29	478377,58	4059607,29	4059606	4059608,58
3,76	3,38	1,32	478377,76	4059607,38	4059606,06	4059608,7
3,94	3,47	1,34	478377,94	4059607,47	4059606,13	4059608,81
4,12	3,56	1,36	478378,12	4059607,56	4059606,2	4059608,92
4,3	3,64	1,39	478378,3	4059607,64	4059606,25	4059609,03
4,48	3,72	1,41	478378,48	4059607,72	4059606,31	4059609,13
4,66	3,79	1,43	478378,66	4059607,79	4059606,36	4059609,22
4,84	3,87	1,45	478378,84	4059607,87	4059606,42	4059609,32
5,01	3,94	1,47	478379,01	4059607,94	4059606,47	4059609,41
5,19	4,01	1,49	478379,19	4059608,01	4059606,52	4059609,5
5,37	4,07	1,51	478379,37	4059608,07	4059606,56	4059609,58
5,54	4,13	1,53	478379,54	4059608,13	4059606,6	4059609,66
5,72	4,19	1,56	478379,72	4059608,19	4059606,63	4059609,75
5,89	4,25	1,58	478379,89	4059608,25	4059606,67	4059609,83
6,06	4,31	1,6	478380,06	4059608,31	4059606,71	4059609,91
6,24	4,36	1,62	478380,24	4059608,36	4059606,74	4059609,98
6,41	4,41	1,64	478380,41	4059608,41	4059606,77	4059610,05
6,58	4,46	1,66	478380,58	4059608,46	4059606,8	4059610,12
6,75	4,51	1,68	478380,75	4059608,51	4059606,83	4059610,19
6,92	4,56	1,7	478380,92	4059608,56	4059606,86	4059610,26
7,09	4,61	1,73	478381,09	4059608,61	4059606,88	4059610,34
7,26	4,65	1,75	478381,26	4059608,65	4059606,9	4059610,4

7,43	4,69	1,77	478381,43	4059608,69	4059606,92	4059610,46
7,6	4,73	1,79	478381,6	4059608,73	4059606,94	4059610,52
7,76	4,77	1,82	478381,76	4059608,77	4059606,95	4059610,59
7,93	4,81	1,84	478381,93	4059608,81	4059606,97	4059610,65
8,1	4,85	1,86	478382,1	4059608,85	4059606,99	4059610,71
8,27	4,88	1,88	478382,27	4059608,88	4059607	4059610,76
8,44	4,92	1,91	478382,44	4059608,92	4059607,01	4059610,83
8,6	4,95	1,93	478382,6	4059608,95	4059607,02	4059610,88
8,99	5,33	2,79	478382,99	4059609,33	4059606,54	4059612,12
9,57	5,33	3,12	478383,57	4059609,33	4059606,21	4059612,45
10,15	5,33	3,42	478384,15	4059609,33	4059605,91	4059612,75
10,73	5,33	3,69	478384,73	4059609,33	4059605,64	4059613,02
11,3	5,33	3,95	478385,3	4059609,33	4059605,38	4059613,28
11,88	5,33	4,19	478385,88	4059609,33	4059605,14	4059613,52
12,46	5,33	4,42	478386,46	4059609,33	4059604,91	4059613,75
22,2	6,81	10,52	478396,2	4059610,81	4059600,29	4059621,33
31,92	8,06	15,23	478405,92	4059612,06	4059596,83	4059627,29
41,61	9,22	19,25	478415,61	4059613,22	4059593,97	4059632,47
51,35	10,32	23,07	478425,35	4059614,32	4059591,25	4059637,39
61,05	11,36	27,82	478435,05	4059615,36	4059587,54	4059643,18
70,8	12,36	31,84	478444,8	4059616,36	4059584,52	4059648,2
80,55	13,33	35,41	478454,55	4059617,33	4059581,92	4059652,74
90,26	14,28	38,64	478464,26	4059618,28	4059579,64	4059656,92
100,02	15,21	41,65	478474,02	4059619,21	4059577,56	4059660,86
109,73	16,12	44,44	478483,73	4059620,12	4059575,68	4059664,56
119,49	17,02	47,09	478493,49	4059621,02	4059573,93	4059668,11
129,26	17,91	49,6	478503,26	4059621,91	4059572,31	4059671,51
138,97	18,78	51,98	478512,97	4059622,78	4059570,8	4059674,76
148,74	19,65	54,27	478522,74	4059623,65	4059569,38	4059677,92
158,46	20,5	56,45	478532,46	4059624,5	4059568,05	4059680,95
168,22	21,35	58,57	478542,22	4059625,35	4059566,78	4059683,92
177,99	22,19	60,61	478551,99	4059626,19	4059565,58	4059686,8
187,71	23,02	62,58	478561,71	4059627,02	4059564,44	4059689,6
197,48	23,85	64,49	478571,48	4059627,85	4059563,36	4059692,34
207,2	24,67	66,34	478581,2	4059628,67	4059562,33	4059695,01
216,97	25,49	68,15	478590,97	4059629,49	4059561,34	4059697,64
226,73	26,3	69,91	478600,73	4059630,3	4059560,39	4059700,21
236,46	27,1	71,61	478610,46	4059631,1	4059559,49	4059702,71
246,23	27,89	73,29	478620,23	4059631,89	4059558,6	4059705,18
255,95	28,69	74,91	478629,95	4059632,69	4059558,78	4059680,6
265,72	29,47	76,51	478639,72	4059633,47	4059556,96	4059709,98
275,49	30,26	78,08	478649,49	4059634,26	4059556,18	4059712,34
285,22	31,04	79,6	478659,22	4059635,04	4059555,44	4059714,64
294,99	31,81	81,1	478668,99	4059635,81	4059554,71	4059716,91
304,72	32,58	82,57	478678,72	4059636,58	4059554,01	4059719,15
314,49	33,35	84,02	478688,49	4059637,35	4059553,33	4059721,37
324,26	34,12	85,44	478698,26	4059638,12	4059552,68	4059723,56

333,99	34,87	86,82	478707,99	4059638,87	4059552,05	4059725,69
343,76	35,63	88,2	478717,76	4059639,63	4059551,43	4059727,83
353,49	36,38	89,54	478727,49	4059640,38	4059550,84	4059729,92
363,26	37,13	90,87	478737,26	4059641,13	4059550,26	4059732
373,03	37,88	92,17	478747,03	4059641,88	4059549,71	4059734,05
382,76	38,62	93,46	478756,76	4059642,62	4059549,16	4059736,08
392,54	39,36	94,72	478766,54	4059643,36	4059548,64	4059738,08
402,27	40,1	95,97	478776,27	4059644,1	4059548,13	4059740,07
412,04	40,83	97,2	478786,04	4059644,83	4059547,63	4059742,03
421,81	41,57	98,42	478795,81	4059645,57	4059547,15	4059743,99
431,54	42,29	99,61	478805,54	4059646,29	4059546,68	4059745,9
441,32	43,02	100,8	478815,32	4059647,02	4059546,22	4059747,82
451,05	43,74	101,96	478825,05	4059647,74	4059545,78	4059749,7
460,82	44,47	103,12	478834,82	4059648,47	4059545,35	4059751,59
470,6	45,19	104,26	478844,6	4059649,19	4059544,93	4059753,45
480,33	45,9	105,38	478854,33	4059649,9	4059544,52	4059755,28
490,11	46,61	106,5	478864,11	4059650,61	4059544,11	4059757,11
499,84	47,32	107,6	478873,84	4059651,32	4059543,72	4059758,92

Tableau VII.1 : Forme du panache Y en fonction de X pour le cas favorable

x	y	B	X=x+xr	Y=y+yr	Y-	Y+
0	0	0,58	478374	4059604	4059603,42	4059604,58
0,42	0,71	0,69	478374,42	4059604,71	4059604,02	4059605,4
1	1,63	0,84	478375	4059605,63	4059604,79	4059606,47
1,61	2,54	0,99	478375,61	4059606,54	4059605,55	4059607,53
2,25	3,43	1,14	478376,25	4059607,43	4059606,29	4059608,57
2,93	4,3	1,3	478376,93	4059608,3	4059607	4059609,6
3,62	5,14	1,47	478377,62	4059609,14	4059607,67	4059610,61
4,35	5,96	1,63	478378,35	4059609,96	4059608,33	4059611,59
5,11	6,75	1,8	478379,11	4059610,75	4059608,95	4059612,55
5,89	7,52	1,98	478379,89	4059611,52	4059609,54	4059613,5
6,91	8,44	2,19	478380,91	4059612,44	4059610,25	4059614,63
7,74	9,14	2,37	478381,74	4059613,14	4059610,77	4059615,51
8,6	9,82	2,54	478382,6	4059613,82	4059611,28	4059616,36
9,48	10,48	2,71	478383,48	4059614,48	4059611,77	4059617,19
10,38	11,1	2,88	478384,38	4059615,1	4059612,22	4059617,98
11,29	11,71	3,05	478385,29	4059615,71	4059612,66	4059618,76
12,23	12,28	3,21	478386,23	4059616,28	4059613,07	4059619,49
13,17	12,84	3,37	478387,17	4059616,84	4059613,47	4059620,21
13,89	13,24	3,49	478387,89	4059617,24	4059613,75	4059620,73
14,85	13,76	3,65	478388,85	4059617,76	4059614,11	4059621,41
15,83	14,25	3,8	478389,83	4059618,25	4059614,45	4059622,05
16,81	14,73	3,95	478390,81	4059618,73	4059614,78	4059622,68
17,81	15,19	4,09	478391,81	4059619,19	4059615,1	4059623,28
18,81	15,63	4,23	478392,81	4059619,63	4059615,4	4059623,86

19,82	16,06	4,37	478393,82	4059620,06	4059615,69	4059624,43
20,84	16,47	4,51	478394,84	4059620,47	4059615,96	4059624,98
21,86	16,87	4,64	478395,86	4059620,87	4059616,23	4059625,51
22,88	17,25	4,76	478396,88	4059621,25	4059616,49	4059626,01
23,91	17,62	4,89	478397,91	4059621,62	4059616,73	4059626,51
24,95	17,98	5,01	478398,95	4059621,98	4059616,97	4059626,99
25,99	18,33	5,12	478399,99	4059622,33	4059617,21	4059627,45
27,03	18,67	5,24	478401,03	4059622,67	4059617,43	4059627,91
28,07	18,99	5,35	478402,07	4059622,99	4059617,64	4059628,34
29,12	19,31	5,46	478403,12	4059623,31	4059617,85	4059628,77
30,17	19,62	5,57	478404,17	4059623,62	4059618,05	4059629,19
31,49	19,99	5,7	478405,49	4059623,99	4059618,29	4059629,69
32,55	20,28	5,8	478406,55	4059624,28	4059618,48	4059630,08
33,61	20,57	5,9	478407,61	4059624,57	4059618,67	4059630,47
34,67	20,84	5,99	478408,67	4059624,84	4059618,85	4059630,83
35,73	21,11	6,09	478409,73	4059625,11	4059619,02	4059631,2
36,79	21,37	6,18	478410,79	4059625,37	4059619,19	4059631,55
37,86	21,63	6,27	478411,86	4059625,63	4059619,36	4059631,9
38,92	21,88	6,36	478412,92	4059625,88	4059619,52	4059632,24
39,99	22,12	6,45	478413,99	4059626,12	4059619,67	4059632,57
41,06	22,36	6,53	478415,06	4059626,36	4059619,83	4059632,89
42,13	22,59	6,62	478416,13	4059626,59	4059619,97	4059633,21
43,2	22,82	6,7	478417,2	4059626,82	4059620,12	4059633,52
44,28	23,05	6,78	478418,28	4059627,05	4059620,27	4059633,83
45,35	23,26	6,86	478419,35	4059627,26	4059620,4	4059634,12
46,42	23,48	6,94	478420,42	4059627,48	4059620,54	4059634,42
47,5	23,69	6,99	478421,5	4059627,69	4059620,7	4059634,68
48,82	25,03	3,16	478422,82	4059629,03	4059625,87	4059632,19
50,21	25,03	3,41	478424,21	4059629,03	4059625,62	4059632,44
51,6	25,03	3,64	478425,6	4059629,03	4059625,39	4059632,67
52,98	25,03	3,87	478426,98	4059629,03	4059625,16	4059632,9
54,37	25,03	4,07	478428,37	4059629,03	4059624,96	4059633,1
63,27	26,54	9,49	478437,27	4059630,54	4059621,05	4059640,03
72,12	27,99	13,49	478446,12	4059631,99	4059618,5	4059645,48
80,98	29,39	17,14	478454,98	4059633,39	4059616,25	4059650,53
89,85	30,77	22,47	478463,85	4059634,77	4059612,3	4059657,24
98,72	32,11	27,04	478472,72	4059636,11	4059609,07	4059663,15
107,59	33,43	31,15	478481,59	4059637,43	4059606,28	4059668,58
116,47	34,73	34,97	478490,47	4059638,73	4059603,76	4059673,7
125,35	36,01	38,58	478499,35	4059640,01	4059601,43	4059678,59
134,23	37,27	42,05	478508,23	4059641,27	4059599,22	4059683,32
143,12	38,52	45,4	478517,12	4059642,52	4059597,12	4059687,92
152	39,76	48,67	478526	4059643,76	4059595,09	4059692,43
160,89	40,98	51,87	478534,89	4059644,98	4059593,11	4059696,85
169,78	42,18	55,01	478543,78	4059646,18	4059591,17	4059701,19
178,68	43,37	58,1	478552,68	4059647,37	4059589,27	4059705,47
187,57	44,55	61,16	478561,57	4059648,55	4059587,39	4059709,71

196,47	45,71	64,18	478570,47	4059649,71	4059585,53	4059713,89
205,36	46,86	67,18	478579,36	4059650,86	4059583,68	4059718,04
214,26	48	70,15	478588,26	4059652	4059581,85	4059722,15
223,16	49,13	73,09	478597,16	4059653,13	4059580,04	4059726,22
232,07	50,24	76,02	478606,07	4059654,24	4059578,22	4059730,26
240,97	51,35	78,92	478614,97	4059655,35	4059576,43	4059734,27
249,88	52,44	81,81	478623,88	4059656,44	4059574,63	4059738,25
258,78	53,52	84,68	478632,78	4059657,52	4059572,84	4059742,2
267,69	54,59	87,54	478641,69	4059658,59	4059571,05	4059746,13
276,6	55,65	90,38	478650,6	4059659,65	4059569,27	4059750,03
285,51	56,7	93,2	478659,51	4059660,7	4059567,5	4059753,9
294,42	57,74	96,01	478668,42	4059661,74	4059565,73	4059757,75
303,33	58,78	98,8	478677,33	4059662,78	4059563,98	4059761,58
312,25	59,8	101,58	478686,25	4059663,8	4059562,22	4059765,38
321,16	60,82	104,35	478695,16	4059664,82	4059560,47	4059769,17
330,07	61,82	107,1	478704,07	4059665,82	4059558,72	4059772,92
338,99	62,82	109,84	478712,99	4059666,82	4059556,98	4059776,66
347,91	63,81	112,56	478721,91	4059667,81	4059555,25	4059780,37
356,83	64,79	115,28	478730,83	4059668,79	4059553,51	4059784,07
365,75	65,77	117,98	478739,75	4059669,77	4059551,79	4059787,75
374,66	66,73	120,66	478748,66	4059670,73	4059550,07	4059791,39
383,59	67,69	123,34	478757,59	4059671,69	4059548,35	4059795,03
392,51	68,65	126	478766,51	4059672,65	4059546,65	4059798,65
401,43	69,59	128,65	478775,43	4059673,59	4059544,94	4059802,24
410,35	70,53	131,29	478784,35	4059674,53	4059543,24	4059805,82
419,27	71,46	133,92	478793,27	4059675,46	4059541,54	4059809,38
428,2	72,39	136,53	478802,2	4059676,39	4059539,86	4059812,92
437,12	73,31	139,13	478811,12	4059677,31	4059538,18	4059816,44
446,05	74,22	141,72	478820,05	4059678,22	4059536,5	4059819,94
454,97	75,13	144,3	478828,97	4059679,13	4059534,83	4059823,43
463,9	76,03	146,87	478837,9	4059680,03	4059533,16	4059826,9
472,83	76,92	149,43	478846,83	4059680,92	4059531,49	4059830,35
481,76	77,81	151,97	478855,76	4059681,81	4059529,84	4059833,78
490,68	78,7	154,51	478864,68	4059682,7	4059528,19	4059837,21
499,61	79,58	157,03	478873,61	4059683,58	4059526,55	4059840,61

Tableau VII.2 : Forme du panache Y en fonction de X pour le cas intermédiaire

x	y	B	X=x+xr	Y=y+yr	Y-	Y+
0	0	0,58	478374	4059604	4059603,42	4059604,58
0,4	0,69	0,67	478374,4	4059604,69	4059604,02	4059605,36
0,93	1,6	0,79	478374,93	4059605,6	4059604,81	4059606,39
1,46	2,51	0,91	478375,46	4059606,51	4059605,6	4059607,42
2	3,43	1,03	478376	4059607,43	4059606,4	4059608,46
2,53	4,34	1,15	478376,53	4059608,34	4059607,19	4059609,49
3,07	5,25	1,28	478377,07	4059609,25	4059607,97	4059610,53
3,61	6,16	1,39	478377,61	4059610,16	4059608,77	4059611,55
4,16	7,07	1,51	478378,16	4059611,07	4059609,56	4059612,58
4,7	7,97	1,63	478378,7	4059611,97	4059610,34	4059613,6
5,25	8,88	1,75	478379,25	4059612,88	4059611,13	4059614,63
5,8	9,78	1,87	478379,8	4059613,78	4059611,91	4059615,65
6,35	10,68	2	478380,35	4059614,68	4059612,68	4059616,68
6,9	11,59	2,12	478380,9	4059615,59	4059613,47	4059617,71
7,45	12,49	2,24	478381,45	4059616,49	4059614,25	4059618,73
8,01	13,39	2,37	478382,01	4059617,39	4059615,02	4059619,76
8,71	14,51	2,52	478382,71	4059618,51	4059615,99	4059621,03
9,27	15,41	2,65	478383,27	4059619,41	4059616,76	4059622,06
9,83	16,3	2,77	478383,83	4059620,3	4059617,53	4059623,07
10,4	17,19	2,9	478384,4	4059621,19	4059618,29	4059624,09
10,97	18,09	3,03	478384,97	4059622,09	4059619,06	4059625,12
11,54	18,98	3,15	478385,54	4059622,98	4059619,83	4059626,13
12,11	19,87	3,28	478386,11	4059623,87	4059620,59	4059627,15
12,68	20,76	3,41	478386,68	4059624,76	4059621,35	4059628,17
13,26	21,64	3,53	478387,26	4059625,64	4059622,11	4059629,17
13,84	22,53	3,66	478387,84	4059626,53	4059622,87	4059630,19
14,42	23,41	3,79	478388,42	4059627,41	4059623,62	4059631,2
15	24,3	3,92	478389	4059628,3	4059624,38	4059632,22
15,58	25,18	4,05	478389,58	4059629,18	4059625,13	4059633,23
16,17	26,06	4,18	478390,17	4059630,06	4059625,88	4059634,24
16,76	26,94	4,31	478390,76	4059630,94	4059626,63	4059635,25
17,35	27,81	4,44	478391,35	4059631,81	4059627,37	4059636,25
17,94	28,69	4,57	478391,94	4059632,69	4059628,12	4059637,26
18,54	29,57	4,71	478392,54	4059633,57	4059628,86	4059638,28
19,13	30,44	4,84	478393,13	4059634,44	4059629,6	4059639,28
19,73	31,31	4,97	478393,73	4059635,31	4059630,34	4059640,28
20,34	32,18	5,1	478394,34	4059636,18	4059631,08	4059641,28
20,94	33,05	5,24	478394,94	4059637,05	4059631,81	4059642,29
21,55	33,91	5,37	478395,55	4059637,91	4059632,54	4059643,28
22,15	34,78	5,5	478396,15	4059638,78	4059633,28	4059644,28
22,76	35,64	5,64	478396,76	4059639,64	4059634	4059645,28
23,38	36,51	5,77	478397,38	4059640,51	4059634,74	4059646,28
23,99	37,37	5,91	478397,99	4059641,37	4059635,46	4059647,28
24,61	38,22	6,05	478398,61	4059642,22	4059636,17	4059648,27
25,23	39,08	6,18	478399,23	4059643,08	4059636,9	4059649,26

25,69	39,72	6,29	478399,69	4059643,72	4059637,43	4059650,01
26,32	40,58	6,42	478400,32	4059644,58	4059638,16	4059651
26,94	41,43	6,56	478400,94	4059645,43	4059638,87	4059651,99
27,57	42,28	6,7	478401,57	4059646,28	4059639,58	4059652,98
28,2	43,13	6,84	478402,2	4059647,13	4059640,29	4059653,97
28,83	43,98	6,98	478402,83	4059647,98	4059641	4059654,96
29,67	49,59	5,04	478403,67	4059653,59	4059648,55	4059658,63
30,79	49,59	5,38	478404,79	4059653,59	4059648,21	4059658,97
31,91	49,59	5,71	478405,91	4059653,59	4059647,88	4059659,3
33,02	49,59	6,02	478407,02	4059653,59	4059647,57	4059659,61
33,02	396,87	5,34	478407,02	4060000,87	4059995,53	4060006,21
39,3	396,87	17,47	478413,3	4060000,87	4059983,4	4060018,34
45,69	396,87	25,32	478419,69	4060000,87	4059975,55	4060026,19
52,19	396,87	32,36	478426,19	4060000,87	4059968,51	4060033,23
58,8	396,87	39,01	478432,8	4060000,87	4059961,86	4060039,88
65,52	396,87	45,44	478439,52	4060000,87	4059955,43	4060046,31
72,34	396,87	51,73	478446,34	4060000,87	4059949,14	4060052,6
79,26	396,87	57,94	478453,26	4060000,87	4059942,93	4060058,81
86,26	396,87	64,08	478460,26	4060000,87	4059936,79	4060064,95
93,36	396,87	70,19	478467,36	4060000,87	4059930,68	4060071,06
100,55	396,87	76,27	478474,55	4060000,87	4059924,6	4060077,14
107,83	396,87	82,33	478481,83	4060000,87	4059918,54	4060083,2
115,19	396,87	88,39	478489,19	4060000,87	4059912,48	4060089,26
122,63	396,87	94,45	478496,63	4060000,87	4059906,42	4060095,32
130,15	396,87	100,51	478504,15	4060000,87	4059900,36	4060101,38
137,75	396,87	106,58	478511,75	4060000,87	4059894,29	4060107,45
145,42	396,87	112,65	478519,42	4060000,87	4059888,22	4060113,52
153,17	396,87	118,74	478527,17	4060000,87	4059882,13	4060119,61
160,99	396,87	124,83	478534,99	4060000,87	4059876,04	4060125,7
168,89	396,87	130,94	478542,89	4060000,87	4059869,93	4060131,81
176,86	396,87	137,07	478550,86	4060000,87	4059863,8	4060137,94
184,89	396,87	143,21	478558,89	4060000,87	4059857,66	4060144,08
193	396,87	149,36	478567	4060000,87	4059851,51	4060150,23
201,17	396,87	155,53	478575,17	4060000,87	4059845,34	4060156,4
209,4	396,87	161,72	478583,4	4060000,87	4059839,15	4060162,59
217,71	396,87	167,92	478591,71	4060000,87	4059832,95	4060168,79
226,07	396,87	174,14	478600,07	4060000,87	4059826,73	4060175,01
234,5	396,87	180,37	478608,5	4060000,87	4059820,5	4060181,24
242,99	396,87	186,62	478616,99	4060000,87	4059814,25	4060187,49
251,55	396,87	192,89	478625,55	4060000,87	4059807,98	4060193,76
260,16	396,87	199,18	478634,16	4060000,87	4059801,69	4060200,05
268,83	396,87	205,48	478642,83	4060000,87	4059795,39	4060206,35
277,57	396,87	211,79	478651,57	4060000,87	4059789,08	4060212,66
286,36	396,87	218,13	478660,36	4060000,87	4059782,74	4060219
295,21	396,87	224,48	478669,21	4060000,87	4059776,39	4060225,35
304,11	396,87	230,85	478678,11	4060000,87	4059770,02	4060231,72
313,08	396,87	237,23	478687,08	4060000,87	4059763,64	4060238,1

322,09	396,87	243,63	478696,09	4060000,87	4059757,24	4060244,5
331,17	396,87	250,04	478705,17	4060000,87	4059750,83	4060250,91
340,29	396,87	256,47	478714,29	4060000,87	4059744,4	4060257,34
349,48	396,87	262,92	478723,48	4060000,87	4059737,95	4060263,79
358,71	396,87	269,38	478732,71	4060000,87	4059731,49	4060270,25
368	396,87	275,86	478742	4060000,87	4059725,01	4060276,73
377,34	396,87	282,35	478751,34	4060000,87	4059718,52	4060283,22
386,73	396,87	288,86	478760,73	4060000,87	4059712,01	4060289,73
396,17	396,87	295,38	478770,17	4060000,87	4059705,49	4060296,25
405,66	396,87	301,92	478779,66	4060000,87	4059698,95	4060302,79
415,21	396,87	308,47	478789,21	4060000,87	4059692,4	4060309,34
424,8	396,87	315,04	478798,8	4060000,87	4059685,83	4060315,91
434,45	396,87	321,62	478808,45	4060000,87	4059679,25	4060322,49
444,14	396,87	328,21	478818,14	4060000,87	4059672,66	4060329,08

Tableau VII.3 : Forme du panache Y en fonction de X pour le cas intermédiaire

Distance X	cas fav	cas inter	cas def
0	1	1	1
10,15	6,9	4	3,2
51,35	13,6	19,7	12,8
100,02	14	31,4	16,2
148,74	14,1	34,9	18,7
207,2	14,2	40,4	21,3
255,95	14,2	45,4	23,2
304,72	14,2	49,6	24,7
353,49	14,3	54,2	26,2
402,27	14,3	57,6	27,5
451,05	14,3	61,5	29,2
499,84	14,4	64,8	32,4

Tableau VII.4 : Dilutions en fonction des différentes vitesses environnementales

Distance X	0,5m	0,8m	1,1m	1,5m	2m
0	1	1	1	1	1
10,15	7,3	5,4	6,9	4,6	3
51,35	43,4	20,7	13,6	5,5	3,7
100,02	56,5	39,4	14	5,7	4,2
148,74	68,6	50	14,1	6,3	4,9
207,2	82	63,7	14,2	6,5	5,5
255,95	94,2	74	14,2	6,7	5,9
304,72	103,6	83,2	14,2	7,1	6,4
353,49	113,4	91,5	14,3	7,3	6,9
402,27	121,4	99,2	14,3	7,7	7,2
451,05	130,1	105,8	14,3	8	7,6
499,84	137	112,5	14,4	8,2	8

Tableau VII.5 : Dilutions en fonction des différentes vitesses de rejet (diamètres)

Distance X	N=3	N=8	N=15	N=30
0	1	1	1	1
10,15	19,9	37,1	51,5	72,1
51,35	25,1	55,4	96,9	159,9
100,02	26,3	60,8	108,3	191,8
148,74	29,6	63,5	114,6	204,7
207,2	30,2	65,3	119,6	215,4
255,95	30,4	66,3	122,5	222,7
304,72	30,6	67	124,8	227,9
353,49	30,8	67,6	126,7	232,8
402,27	31	66,9	128,1	236,6
451,05	31,2	74,7	129,1	239,9
499,84	31,4	75,9	130,1	242,6

Tableau VII.6 : Dilutions en fonction des différentes configurations de nombres de ports