

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la construction

Département de génie Mécanique

## **Mémoire de fin d'études de master académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Mécanique**

Spécialité : **Energétique**

*Présenté par*

**LAMRI Lyes**

**GANOUN Ziri**

**BOUNOUAL Mohand**

Mémoire proposé et dirigé par Mr. **AMOKRANE Mounir**.

**Thème**

***Etude des rejets de saumures provenant des usines de  
dessalement de l'eau de mer.***

## *Remerciements*

*Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions vivement et chaleureusement Monsieur **AMOKRANE Mounir** notre promoteur et Monsieur **AITHAMADOUCHE** notre co-encadreur, D'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité, pour sa patience, pour leurs soutiens et pour nous avoir guidés tout au long de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.*

*Nous exprimons aussi nos remerciements pour Mr **MOKHTARI Mehdi**, **TOUADI M<sup>ed</sup> Amine** et **BOURMEL Mustapha** pour leurs disponibilités, leurs conseils, leurs aides précieuses et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et ceux qui ont fait l'honneur de jurer ce mémoire.*

*Nous ne laisserons pas cette occasion passer sans remercier tous les professeurs et personnels de l'Université Mouloud **MAMMERI** de Tizi-Ouzou qui travaillent dur pour faire de cette Université ce qu'elle est aujourd'hui.*

*Merci à vous tous.*

# *Je dédie cet humble travail à*

*Ma mère Sadjia*

*La plus chère et précieuse personne dans ma vie, la femme la plus courageuse au monde, la femme que je ne saurais récompenser pour toutes les sacrifices que tu as faits et ne cesses de faire pour moi et mes frères, pour ton grand amour et pour l'éducation que tu nous as donnée. Ce que je suis aujourd'hui est grâce à toi maman, j'espère que tu sois fière de moi.*

*Je t'aime plus que tout.*

*Mon cher père Mohand Saïd pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard.*

*Ma chère sœur, Dilia, tu es mon épaule la plus solide, franche puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

*Toute la famille GANOUN et LOUNIS, Sadek, en particulier*

*Mes amis et camarades de promotion spécialement Ahmed, Mourad 7w2, Khaled, Ghiles, Dani, Alilouch, Mazigh, Amine twd, Mahdi, Mustapha, Nassim chili et Ramos*

*Mes binômes et mes chères amis Mohand et Lyes ainsi qu'à toutes leurs famille.*

*Merci à vous.*

*ZIRI*

# *Je dédie cet humble travail à*

*Ma mère Fatima*

*La plus chère et précieuse personne dans ma vie, la femme la plus courageuse au monde, la femme que je ne saurais récompenser pour toutes les sacrifices que tu as faits et ne cesses de faire pour moi et mes frères, pour ton grand amour et pour l'éducation que tu nous as donnée. Ce que je suis aujourd'hui est grâce à toi maman, j'espère que tu sois fière de moi.*

*Je t'aime plus que tout.*

*Mon cher père Rachid pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard.*

*Mes très chers frères, Idir et sa femme Amani, Alaa et sa femme Sadjia, Wanis, Ahmed L.3id. Vous êtes mon épaulé la plus solide. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

*Toute la famille Lamri et Boucheriguenne.*

*Mes amis et camarades de promotion spécialement Amine, Ramos, Mustapha, Samir, Mehdi, Ali, Nassim, Assalas, B13, Madjid, Hakim, Soso Sofiane et Rafik,*

*Une spécial dédicace pour ma chère femme Amel pour tout l'encouragement, le respect, le soutien et optimisme que tu m'as offert.*

*Mes binômes et mes chères amis Mohand et Ziri ainsi qu'à toutes leurs famille.*

*Merci à vous.*

*L'YES*

# *Je dédie cet humble travail à*

*Ma mère Alhija*

*La plus chère et précieuse personne dans ma vie, la femme la plus courageuse au monde, la femme que je ne saurais récompenser pour toutes les sacrifices que tu as faits et ne cesses de faire pour moi et mes frères, pour ton grand amour et pour l'éducation que tu nous as donnée. Ce que je suis aujourd'hui est grâce à toi maman, j'espère que tu sois fière de moi.*

*Je t'aime plus que tout.*

*Mon cher père Mokran pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard.*

*Mon cher frère, Farid et ma chère sœur Dyhia. Vous êtes mon épaule la plus solide  
Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

*La mémoire de ma grand-mère Ouardia et ma cousine Zakja, puisse Dieu, le tout puissant, vous avoir en sa miséricorde*

*Toute la famille BOUNOUAL.*

*Mes amis et camarades de promotion spécialement Amine, Mustapha, Samir, Mehdi, Ali,  
Noureddine, Fatah, B13 et Madjid.*

*Une spécial dédicace pour ma chère femme Nawel et toute sa famille pour tout l'encouragement, le respect, le soutien et optimisme que tu m'as offert.*

*Mes binômes et mes chères amis Lyes et Ziri ainsi qu'à toutes leurs famille.*

*Merci à vous.*

*Mohand*

## Liste des Figures

<b>Figure I.1 :</b> Répartition de l'eau douce et salée sur la planète [7] .....	4
<b>Figure I.2 :</b> schéma descriptif d'une usine de dessalement [8].....	5
<b>Figure I.3 :</b> Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3étages.....	6
<b>Figure I.4 :</b> Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) [12] .....	7
<b>Figure I.5 :</b> Osmose et osmose inverse.....	8
<b>Figure I.6 :</b> Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. ....	9
<b>Figure I.7 :</b> l'effet de flottabilité. [9].....	10
<b>Figure I.8 :</b> l'effet du courant. [10].....	10
<b>Figure I.10 :</b> Résultats du modèle de jet flottant sur un lieu 2D à travers le domaine. Modèle de k-ε turbulence et maillage fin. [11].....	12
<b>Figure I.12 :</b> Dilutions en vrac en fonction de l'angle de décharge $\theta_0$ : Comportement du jet à flottabilité négative pour la gamme complète d'angles de décharge $0^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$ et avec des pentes variables $\theta_b$ de $0^\circ$ à $30^\circ$ . Une hauteur de décharge nulle, $h_0 = 0$ , est supposée [12]. ....	12
<b>Figure II.1 :</b> Caractéristiques géométriques générales du jet incliné (vue de profile). [24] .....	13
<b>Figure II.2 :</b> Modèle à étudier en 2D. ....	18
<b>Figure III.1 :</b> feuille de calcul pour le cas de la variation de la température ambiante. [24].....	19
<b>Figure III.2 :</b> feuille 2 de calcul pour la fixation de l'angle de décharge et le nombre d'ouverture. [24].....	20
<b>Figure III.3 :</b> visualisation des résultats. [24].....	21
<b>Figure III.4 :</b> feuille de calcul pour un cas d'essai de débit d'eau douce à $Q_{(boire)}=6m^3/s$ [24].....	22
<b>Figure III.5 :</b> feuille 2 de calcul pour la fixation de l'angle de décharge et le nombre d'ouverture pour la variation de débit d'eau douce $Q_{boire}$ [24] .....	22

<b>Figure III.6 :</b> résultats obtenus des caractéristiques géométriques du jet et la dilution pour un débit d'eau douce $Q_{(boire)}=6m^3/s$ [24] .....	23
<b>Figure III.7 :</b> <i>la géométrie</i> .....	24
<b>Figure III.8 :</b> Créations des lignes .....	24
<b>Figure III.9 :</b> Création des faces.....	24
<b>Figure III.10 :</b> Création de la buse. ....	25
<b>Figure III.11 :</b> Positionnement de la buse .....	25
<b>Figure III.12 :</b> Orientation de la buse .....	26
<b>Figure III.13 :</b> Maillage des lignes .....	26
<b>Figure III.14 :</b> Maillage de face.....	27
<b>Figure III.15 :</b> les conditions aux limites.....	27
<b>Figure III.16 :</b> vérification du maillage .....	28
<b>Figure III.17 :</b> Choix de régime k-epsilon.....	29
<b>Figure III.18 :</b> Choix de type de fluide .....	30
<b>Figure III.19 :</b> Application des Conditions initial .....	30
<b>Figure III.20 :</b> <i>velocity-inlet</i> .....	30
<b>Figure III.21 :</b> Choix d'ordre des équations .....	31
<b>Figure III.22 :</b> Les calculs des critères de convergence.....	31
<b>Figure III.23 :</b> L'évolution des résidus et calcule de convergence. ....	32
<b>Figure IV.1:</b> <i>variation de la hauteur maximale d'élévation (<math>Z_{max}</math>) en fonction de la salinité</i> .....	33
<b>Figure IV.2:</b> variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction de la salinité.....	34
<b>Figure IV.3:</b> variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction de la salinité.....	34
<b>Figure IV.4:</b> variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ) en fonction de la salinité. ....	35
<b>Figure IV.5:</b> variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction de la salinité .....	35
<b>Figure IV.6:</b> variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	36

<b>Figure IV.7:</b> variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	37
<b>Figure IV.8:</b> variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	37
<b>Figure IV.9:</b> variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i=-Z'_i$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	38
<b>Figure IV.10:</b> variation de la Dilution minimale de la ligne centrale au point d'impact ( $S_m/F_r$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	38
<b>Figure IV.11:</b> variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	39
<b>Figure IV.12:</b> variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction de débit d l'eau douce ( $Q_{boire}$ ) $m^3/s$ .....	40
<b>Figure IV.13:</b> variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction de débit d l'eau douce ( $Q_{boire}$ ) .....	40
<b>Figure IV.14:</b> variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction de débit d l'eau douce ( $Q_{boire}$ ) .....	40
<b>Figure IV.15:</b> variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i=-Z'_i$ ) en fonction de débit d l'eau douce ( $Q_{boire}$ ).....	41
<b>Figure IV. 16 :</b> variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction de débit d l'eau douce ( $Q_{boir}$ ) .....	41
<b>Figure IV.17:</b> variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction température ambiante $T_a$ .....	42
<b>Figure IV.18:</b> <i>variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale (<math>X_{max}</math>) en fonction température ambiante <math>T_a</math> .....</i>	42
<b>Figure IV.19:</b> variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction température ambiante $T_a$ .....	43
<b>Figure IV.20:</b> variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ) en fonction température ambiante $T_a$ .....	43
<b>Figure IV.21:</b> variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction température ambiante $T_a$ .....	44
<b>Figure IV.22:</b> Contours de vitesse pour :(a), (b), (c), (d) .....	45
<b>Figure IV.23:</b> Contours de vitesse pour:(a), (b), (c), (d) .....	46
<b>Figure IV.24:</b> <i>Contours de vitesse pour:(a), (b), (c), (d).....</i>	47
<b>Figure IV.25:</b> <i>Contours des vitesses pour:(a), (b), (c), (d).....</i>	48

## Nomenclature

Symboles	Descriptions	Unités
$Z_{\max}$	Hauteur maximale d'élévation	m
$X_{\max}$	Position horizontale de la crête de la ligne centrale	m
$X_i$	Position horizontale au point d'impact	m
$H_{a0}$	Profondeur moyenne au point de rejet.	m
$U_0$	Vitesse initiale de décharge du jet.	$m.s^{-1}$
$\rho_a$	Masse volumique ambiante.	$kg.m^{-3}$
$\rho_0$	Masse volumique de l'effluent	$kg.m^{-3}$
$D$	Diamètre du la buse de décharge	m
$H_0$	Hauteur du port.	m
$\theta_0$	Angle de décharge du jet	Deg
$\theta_B$	Pente en mer	Deg
$g$	Accélération gravitationnelle	$m.s^{-2}$
$Q_0$	Flux volumique initial de décharge	$m^3.s^{-1}$
$A_0$	Section transversale de décharge	$m^2$
$C_0$	La masse initiale	kg
$Q_{C_0}$	Le flux de masse initiale	$kg.m^3.s^{-1}$
$M_0$	Flux de quantité initiale	$m^4.s^{-1}$
$J_0$	Flux de flottabilité initiale	$m^4.s^{-1}$
$g'_0$	Accelération de la flotabilité du jet	$m.s^{-2}$
$L_M$	La distance à laquelle a lieu la transition	m
$L_m$	Échelle de longueur jet/écoulement transversal	m
$L_b$	Échelle de longueur entre le panache et l'écoulement transversal	-
$F_r$	Le nombre de Froude	-
$r_0$	Rayon de la buse de décharge	-
$R_e$	Le nombre de Reynolds	-
$U_0$	Vitesse caractéristique du fluide	$m.s^{-1}$
$\vartheta$	Viscosité cinématique du fluide	$m^2.s^{-1}$
$u$	Vitesse axiale	$m.s^{-1}$
$v$	Vitesse radiale	$m.s^{-1}$
$T_a$	Température ambiante	C
$Sal_a$	Salinité ambiante	ppt
$Q_{boire}$	Débit d'eau douce	$m^3/s$

$Q_{\text{efflex}}$	<b>Débit des effluent mélange externe</b>	$\text{m}^3/\text{s}$
<b>r</b>	<b>Taux de réceptrice</b>	-
<b>n</b>	<b>Nombre d'ouverture de la saumure</b>	-
$S_m$	<b>Dilution minimale de la ligne médiane au point de retour</b>	-
$S_m/$	<b>Dilution minimale de la ligne centrale au point impacte</b>	-

## Table des matières

Liste des Figures

Nomenclature

**Introduction générale** ..... 1

### **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER ET LES REJETS DE SAUMURE**

I.1 : Définition et caractéristiques de l'eau de mer ..... 3

I.1.1 Définition..... 3

I.2. Répartition de l'eau douce et l'eau salée ..... 3

I.3 Généralités sur le dessalement..... 4

I.4 : Les principales technologies de dessalement des eaux et principes de fonctionnement : .. 5

I.4.1 Les procédés de distillation ..... 5

I.4.1.1 Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)  
..... 6

I.4.1.2 Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED) ..... 6

I.4.2 Les techniques de filtration membranaire ..... 7

I.4.2.1 L'osmose inverse ..... 8

I.4.2.2. Principe de fonctionnement ..... 8

I.4.2.3. Avantages ..... 9

I.4.2.4. Inconvénients..... 9

I.5. Rejets de saumures ..... 9

I.5.1. Définition..... 9

I.5.2. Paramètres qui affectent un rejet de saumure ..... 10

I.5.2.1 Effets de flottabilité ..... 10

I.5.2.2 Effet des courants et des marées ..... 10

I.5.3. Conception de la décharge de saumure ..... 11

I.6. Travaux antérieurs ..... 11

I.6.1 Etude de robinson ..... 11

I.6.2. Les études de Tobias Bleninger G.H. Jirka .....	12
--	----

## **CHAPITRE II : FORMULATION MATHEMATIQUE**

II.1 : Analyse des rejets de saumure .....	13
II.2 : Etude des rejets de saumure en utilisant l'analyse par échelle de longueur .....	14
II.3 Etude des rejets de saumure en utilisant la mécanique des fluides numériques 'CFD' ....	16
II.4 Propriétés du fluide Le fluide est supposé newtonien et incompressible.....	17

## **CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES**

III.1 Étapes de la simulation sur la feuille de calcul développée par bleninger.....	19
III.1.1 : étude de l'effet de température ambiante .....	19
III.1.2 : étude de l'effet de la salinité ambiante .....	21
III.1.3 : étude de l'effet de débit d'eau douce .....	21
III.1.4 : étude de l'effet de l'angle de décharge du jet .....	23
III.2. Étapes de la simulation sur Gambit/Fluent .....	23
III.2.1 Esquisse et maillage de la géométrie sur le logiciel GAMBIT.....	23
IV.2.2 Etapes de la simulation numérique sur logiciel Fluent.....	28

## **CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION**

IV.1: Résultats de la simulation sur la feuille de calcul développée par bleninger .....	33
IV.1.1: Effet de salinité ambiante (sala).....	33
IV.1.2: Effet d'angle de décharge du jet $\theta_0$ .....	36
IV.1.3 Effet de débit d'eau douce (Q boire) .....	39
IV.1.4 Effet de température ambiante $T_a$ .....	42
IV.2 Résultats obtenus avec la CFD .....	44
IV.2.1 Buse verticale non apparente et positionnée à $y = 0,52$ m.....	44
IV.2.2 Buse apparente et positionnée à $y = 0.52$ m.....	45
<b>Conclusion générale</b> .....	49

Références bibliographiques

# **INTRODUCTION GENERALE**

L'eau ne résout rien mais rend tout possible, éternelle, mais de plus en plus rare, composant fondamental et essentielle pour l'existence de tout les êtres vivants, sans cet élément la terre ne serait qu'un astre mort, semblable à ce que la lune est demeurée depuis sa création.

De nos jour, l'eau représente 71% de l'espace sur la planète, mais 3% de l'or bleu est douce, seulement 0.7 % est accessible à la consommation humaine [1]. Cette quantité d'eau est estimée suffisante. Malgré cette abondance de l'eau, elle est inégalement répartie et Inégalement accessible, puisque moins de 10 pays partagent 60 % des ressources en eau naturelle, avec un pourcentage très faible 3% située dans des régions quasi-inatteignables par l'homme. Les 2/3 de cette eau douce est sous forme de glace alors que le reste est sous forme de liquide [2].

Les besoins en eau potable sont en évolution, ceci est dû à la croissance démographique dans le monde. En plus, l'industrialisation, l'irrigation des sols et l'élévation des niveaux de vie se traduisent par un accroissement supplémentaire de la consommation d'eau douce par habitant.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de purification des eaux saumâtres sont mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante.

Une des solutions prometteuses est le dessalement de l'eau de mer qui est opérationnelle depuis de nombreuses années. Parmi les techniques utilisées pour le dessalement de l'eau de mer, l'Osmose Inverse est le procédé le plus répandu dans ce domaine.

Les impacts du rejet d'une usine de dessalement sur l'environnement marin dépendent des propriétés physiques et chimiques des flux de rejet de l'usine de dessalement, et de la susceptibilité des écosystèmes côtiers à ces rejets en fonction de leurs caractéristiques hydrographiques et biologiques. Par conséquent, une bonne connaissance des propriétés des effluents et des milieux récepteurs est nécessaire pour évaluer les impacts potentiels des usines de dessalement sur le milieu marin.

Dans ce travail, nous nous intéressons à étudier avec une simulation numérique le comportement d'un rejet de saumure dans un milieu marin. Le présent manuscrit s'organise en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la partie théorique où nous abordons des généralités sur l'eau de mer et ces caractéristiques, on parlera par la suite sur les principales technologies du dessalement et leur mode de fonctionnement, en fin nous définirons un rejet de saumure citer ses caractéristiques et présenter brièvement quelques travaux antérieurs.

Le second chapitre nous ratifions les caractéristiques géométriques générales d'un rejet à flottabilité négative, par l'échelle de longueur. En suite par les méthodes de la mécanique des fluides numériques.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter les étapes suivies pour l'étude d'un rejet de saumure en se basant en premier temps sur l'outil développé par belingier, puis sur le logiciel de simulation numérique par méthode des volumes finis Fluent.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus. La première partie est dédiée aux résultats obtenus avec l'outil Excel, tandis que la seconde partie est consacrée aux résultats obtenus grâce à la CFD.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LE**  
**DESSALEMENT DE L'EAU DE**  
**MER ET LES REJETS DE**  
**SAUMURE**

## I.1 : Définition et caractéristiques de l'eau de mer

Ce chapitre sera consacré à définir l'eau de mer.

En premier temps, nous allons rappeler certaines définitions sur l'eau de mer et les rejets de saumure. En premier temps nous allons rappeler quelques notions et caractéristiques sur l'eau de mer comme la salinité, la viscosité, la densité et la température. En deuxième temps, nous allons aborder le sujet du dessalement de l'eau de mer, ces techniques et les principes de fonctionnement.

Enfin, nous allons finir par traiter le sujet de la saumure qui est rejetée par les usines de dessalement de l'eau de mer

### I.1.1 Définition

On dit que l'eau de mers et des océans sur terre est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer, parmi ces caractéristiques on site.

Et afin d'étudier les rejets sous-marins on s'intéresse à connaître ces caractéristiques, on site :

**La salinité :** Le caractère essentiel de l'eau de mer. La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencées de manière significative. Un aspect important de l'eau de mer est que si la concentration totale des sels dissous varie en fonction du lieu, la proportion des composants les plus importants reste à peu près constante. [3]

**La viscosité :** La viscosité décroît rapidement en fonction de la température et dépend également de la salinité. [4]

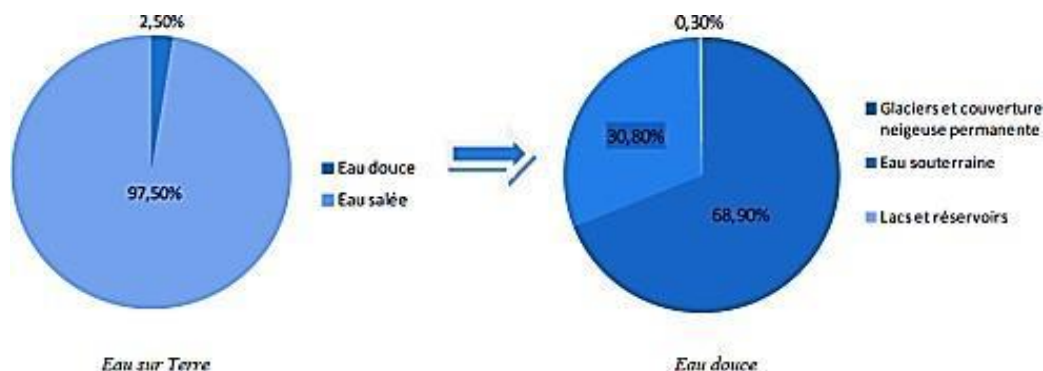
**La densité :** Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1.035 0 1.036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression. [5]

**La température :** Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique et dans la détermination du PH.

## I.2. Répartition de l'eau douce et l'eau salée

Dans notre planète, l'eau douce ne représente que 2.5% du volume totale d'eau, 68.9% de ce dernier est difficilement accessible (glace, neige...) et moins de 1% est donc véritablement

disponible pour les êtres vivants ce qui pose une véritable problématique à l'échelle nationale. Le changement climatique joue un rôle très important sur la situation et la répartition des ressources en eau mondiale. [6]



**Figure I.1 :** Répartition de l'eau douce et salée sur la planète [7]

### I.3 Généralités sur le dessalement

Face aux besoins d'eau douce dans le monde, pour la consommation des populations, l'irrigation, et le développement touristique. Il paraît séduisant et logique d'avoir recours au dessalement de l'eau de mer. Quelle que soit la technologie utilisée dans le dessalement, dans tous les cas on produit un effluent d'eau douce et un effluent résiduel ou de rejet. Ce dernier aura une concentration de sels élevée, qui dépendra de l'eau brute que l'on dessale et du rendement de la séparation, laquelle dépend de la technique utilisée. Ce résidu ne doit pas retourner à l'environnement sans traitement à cause de l'impact important qu'il aurait, de plus, cela supposerait une augmentation progressive des coûts de dessalement en conséquence directe de l'augmentation des niveaux salins des eaux d'origine.

Donc, en prenant en compte l'alternative la plus appropriée, les techniques qui obtiennent un rendement élevé de séparation produiront un rejet plus concentré en sels.

Si on parle de l'organisation générale de ces installations La plupart des usines sont organisées selon le schéma suivant. [7]

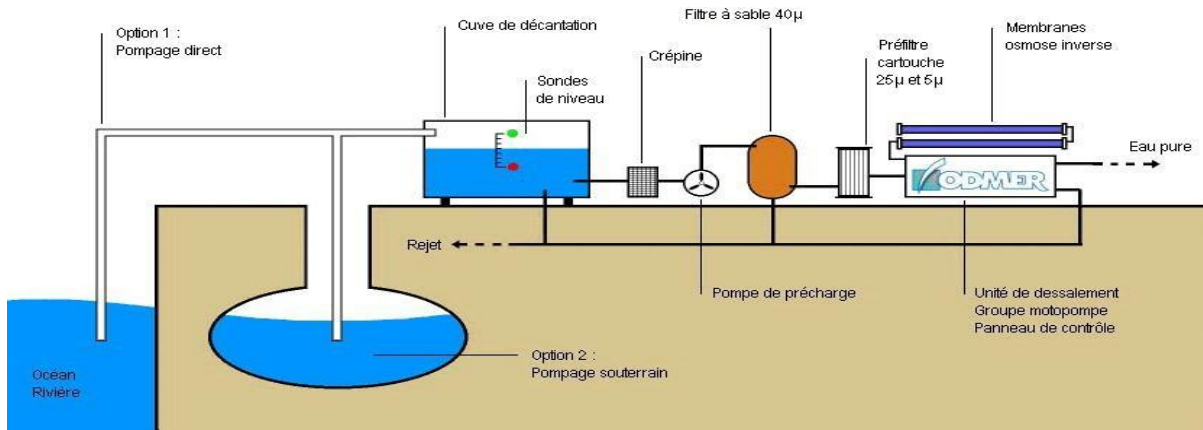


Figure I.2 : schéma descriptif d'une usine de dessalement [8]

- **Une unité de pompage** : La plupart du temps, on pompe l'eau de mer mais parfois, des eaux souterraines peuvent présenter une salinité qui les rend impropres à la consommation.
- **Une unité de décantation** : constituée de grandes cuves permettant le dépôt des impuretés les plus denses.
- **Une pompe de pré charge** : avec crépine, filtre
- **Une unité de désalinisation** : qui peut fonctionner selon trois principes physiques différents : la distillation - l'osmose inverse - l'électrodialyse.
- **Une unité de traitement des eaux usées** : généralement par floculation et filtration qui sont des procédés qui facilitent l'élimination des matières en suspension et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation ou filtration.

Il peut exister d'autres voies de gestion différentes en fonction des caractéristiques de chaque cas.

#### **I.4 : Les principales technologies de dessalement des eaux et principes de fonctionnement :**

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

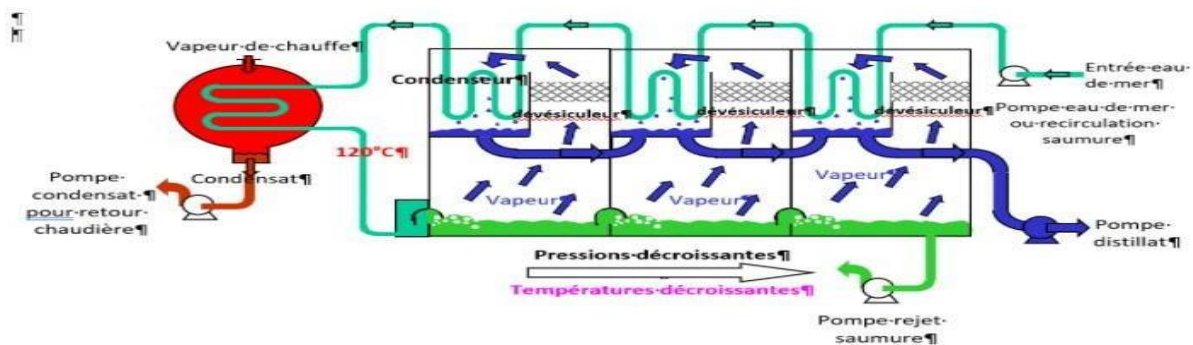
##### **I.4.1 Les procédés de distillation**

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour

obtenir de l'eau douce liquide, Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En ce qui suit on site brièvement les deux procédés qui dominent le marché du dessalement thermique de l'eau de mer :

#### I.4.1.1 Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.



**Figure I.3 :** Principe de fonctionnement d'un système par détente successive (MSF) à 3 étages

#### I.4.1.2 Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. [9] [10] [11]

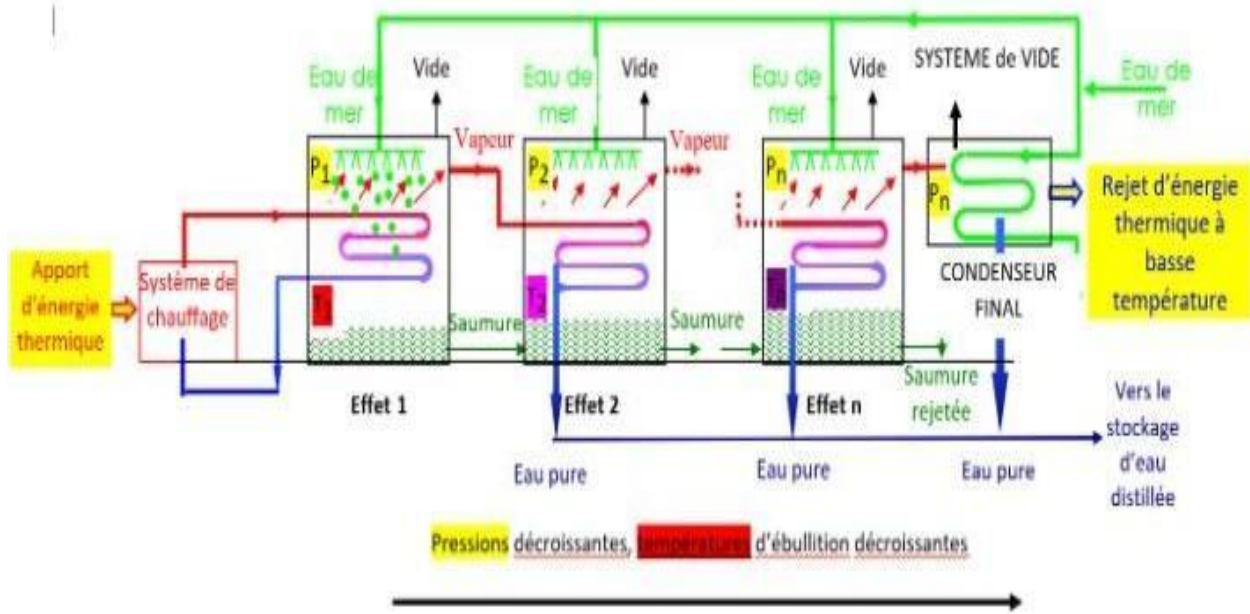


Figure I.4 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) [12]

#### I.4.2 Les techniques de filtration membranaire

On distingue quatre techniques de filtration selon le gradient de pression et la taille des pores, qui sont organisées sous forme du tableau explicatif suivant :

	La microfiltration	L'Ultrafiltratio n	La Nanofiltration
<b>Taille des pores (µm)</b>	De 0,1 à 10	De 0.001 à 0.1	0,001
<b>La pression ou opère(bar)</b>	De 0,1 à 2	De 1 à 5	De 5 à 20
<b>Objectif</b>	Permet de séparer des composés à grand poids moléculaire des solides dissous	Utilisé pour purifier les composés de poids moléculaire moyen ou fort	Elle est conçue pour obtenir une séparation très spécifique des composés à faible poids moléculaire

Tableau I.1 : techniques de filtration selon le gradient de pression et la taille des pores.

Vu que la technique de l'osmose inverse est la plus rentable parlant de la filtration membranaire, on va se pencher un peu plus sur sa définition, son mode de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients. [13]

#### I.4.2.1 L'osmose inverse

La technique de l'osmose inverse est une technologie dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer.

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

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de  $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ . [13]

#### I.4.2.2. Principe de fonctionnement

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure 1). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. [13]

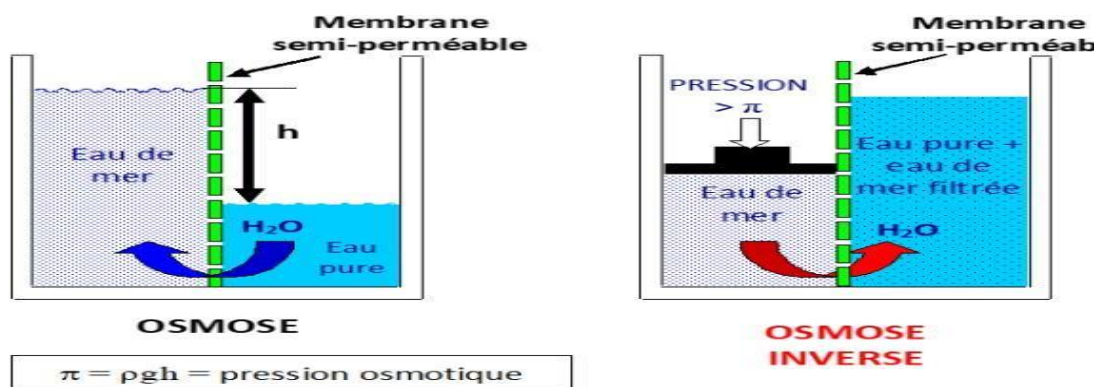
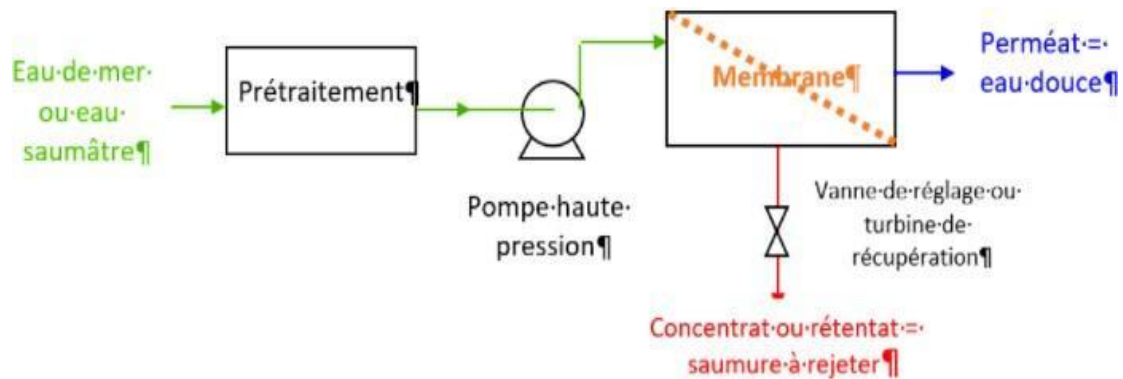


Figure I.5 : Osmose et osmose inverse.

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (voir figure 1.5), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse. Pour le bon

fonctionnement d'une usine à osmose inverse elle doit comporter les éléments schématisés sur la figure suivante.



**Figure I.6 :** *Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.*

### I.4.2.3. Avantages

Parmi les avantages de la technique de l'osmose inverse : la faible consommation d'énergie car il suffit juste d'appliquer une pression sur l'eau, pour cela il est donc possible d'avoir un osmoseur domestique chez soi, ou sur un bateau. Ceci peut permettre l'approvisionnement en eau dans des lieux ou endroits qui en sont dépourvus, L'eau produite est libérée de tous produits qui peuvent être nocifs, elle dépourvue de tout sels minéraux, ce qui est idéale pour la peau, en cas d'utilisation sanitaire. [14]

### I.4.2.4. Inconvénients

Malgré les avantages de cette technique, il y a aussi des inconvénients. La membrane doit être continuellement nettoyée ou changée après son usage. Enfin, comme l'eau est déminéralisée, elle est agressive et corrosive pour les tuyauteries. En effet, l'eau perd tous ses minéraux y compris les minéraux bénéfiques comme certains alcalins, notamment le calcium et le magnésium, son PH sera alors plus acide. Il est donc préférable de reminéraliser l'eau avant de la boire. Le point critique de l'osmose inverse est le prétraitement. Une mauvaise qualité de l'eau prétraitée réduit la durée de vie des membranes (environ 3 ans pour une membrane bien entretenue) qui représentent une part importante de l'investissement. [14]

## I.5. Rejets de saumures

### I.5.1. Définition

Les rejets de saumure, qu'ils soient directs via les rivières et oueds, ou indirects via les émissaires sous-marins après un prétraitement, sont devenus au fil des années l'un des problèmes majeurs des villes côtières dans le monde entier. La dispersion insuffisante des

polluants mène à des graves contaminations de l'environnement côtier. Le contrôle de tels problèmes de pollution nécessite la bonne compréhension des écoulements liés au processus de dispersion. La pratique récente consiste à décharger les eaux usées en jets simples ou multiséculaires comme indiqué par [15]. Le mélange initial du jet avec le milieu récepteur (l'eau de mer) est induit par le mouvement, souvent turbulent, du jet.

### I.5.2. Paramètres qui affectent un rejet de saumure

Parmi les paramètres qui affectent un rejet de saumure, on cite :

#### I.5.2.1 Effets de flottabilité

La densité de l'effluent est différente de celle du milieu récepteur, en général de l'ordre de 2.5% plus faible que l'eau de mer à cause de la salinité de celle-ci. Bien que cette différence soit faible, la flottabilité a un effet drastique sur le comportement du jet.

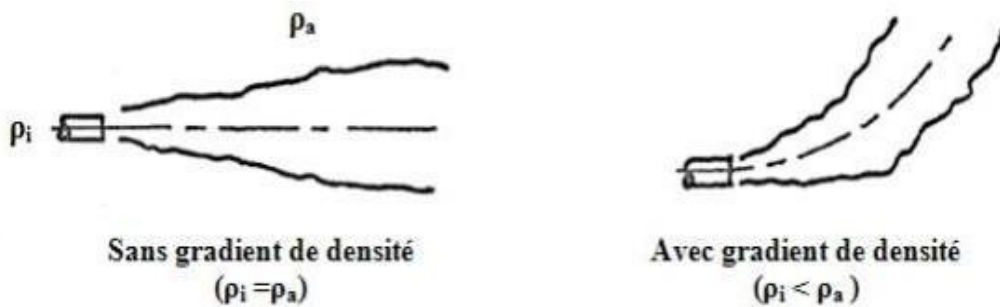


Figure 1.7 : l'effet de flottabilité. [16]

#### I.5.2.2 Effet des courants et des marées

La mer, comme l'atmosphère, est rarement stable. Les courants marins et les marées régulières n'affectent pas uniquement la dynamique de l'écoulement des rejets, mais aussi les caractéristiques du mélange initial du jet. L'effet des courants transversaux ne peut pas être négligé même si la vitesse du courant est faible par rapport à la vitesse d'injection du jet. Ceci est particulièrement critique près des côtes pour des raisons évidentes de pollution du littoral.

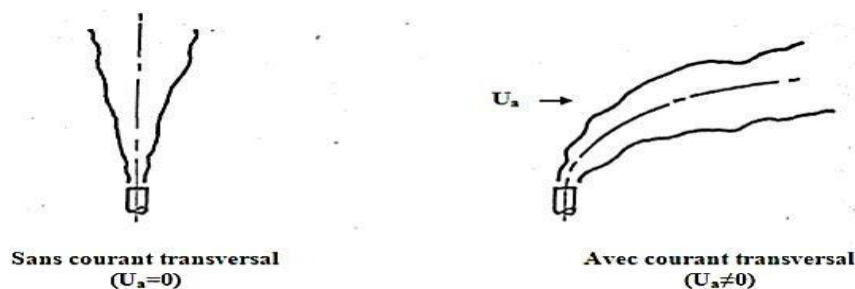


Figure I.8 : l'effet du courant. [16]

### I.5.3. Conception de la décharge de saumure

La conception d'une structure de décharge doit suivre les principes généraux suivants concernant

- **L'emplacement de la décharge**, où le lieu de décharge doit être choisi dans des régions côtières moins sensibles. Aucune autorisation de rejet ne devrait être accordée pour des rejets prévus dans des sites où des impacts directs et immédiats sont à prévoir, par exemple entre des structures de protection contre l'érosion ou des brise-vagues, des ports ou des eaux très peu profondes avec de faibles vitesses de courant, comme dans des sites écologiquement sensibles ou même protégés

Le lieu de rejet doit être choisi dans des régions côtières présentant de bonnes caractéristiques de transport et de rinçage afin d'éviter l'accumulation et de permettre un mélange ultérieur

- **La conception de la décharge**, où la structure de décharge doit être conçue de manière à éviter tout impact direct ou immédiat sur les limites voisines. Par conséquent, les conceptions doivent être orientées vers le plan d'eau ouvert et non contre le lit ou la surface de l'eau, ne pas provoquer de fortes interactions avec le lit ou la surface.

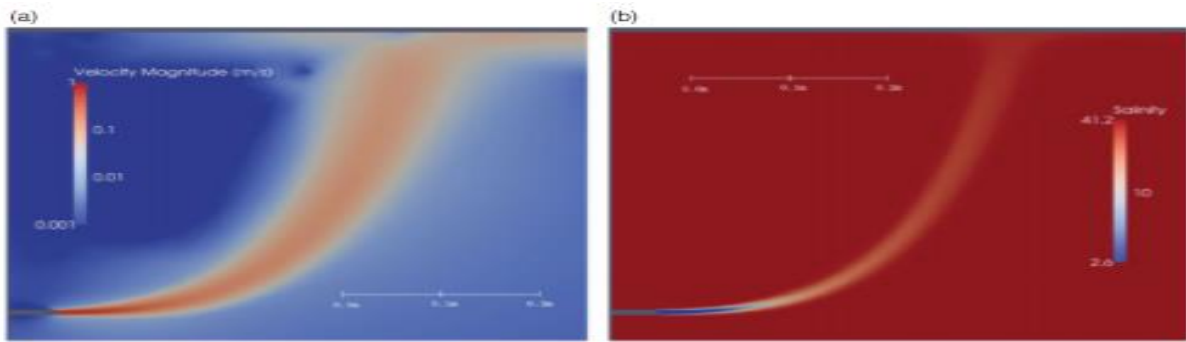
La structure de décharge doit être conçue pour améliorer le mélange des effluents. Par conséquent, les conceptions devraient prévoir des décharges énergétiques pour permettre un fort mélange initial, être orientées perpendiculairement ou dans le même sens que les courants ambiants prédominants et distribuer l'effluent de façon optimale dans le plan d'eau. [17] [18] [19] [20]

## I.6. Travaux antérieurs

Dans cette partie, nous allons exposer certains des travaux de recherche liés à l'étude des rejets de saumure.

### I.6.1 Etude de robinson

Robinson [21] est étudié les rejets denses inclinés et les rejets flottants horizontaux, et les modèles décrits dans cette étude ont été créés à l'aide du code CFD open-source. Trois maillages adaptatifs déferents ont été testés avec une résolution effectivement doublée entre chaque test pour établir la convergence des maillages. Les simulations ont été exécutées pendant ~20 secondes pour permettre au jet de se développer et d'établir un équilibre approximatif.



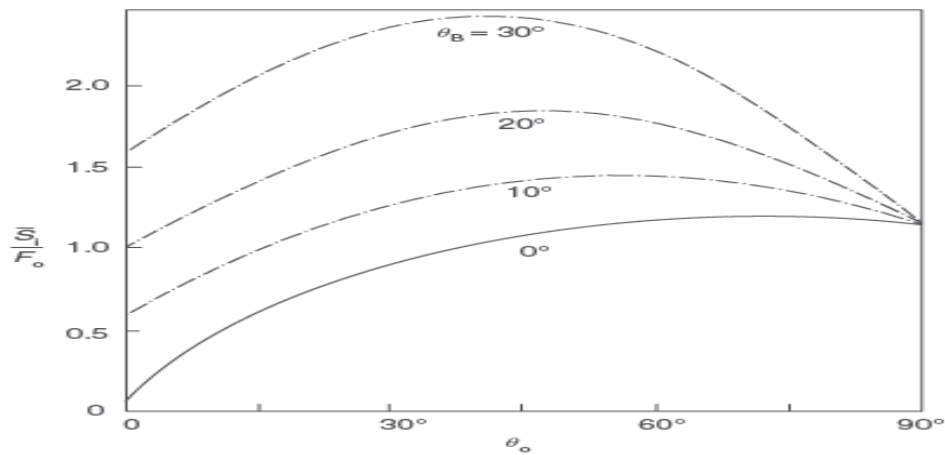
**Figure I.10** : Résultats du modèle de jet flottant sur un lieu 2D à travers le domaine. Modèle de  $k-\varepsilon$  turbulence et maillage fin. [22]

### I.6.2. Les études de Tobias Bleninger G.H. Jirka

Bleninger a fait des études sur les comportements des rejets de saumure lorsqu'on modifie son angle d'inclinaison et les températures [22]

Il a trouvé d'abord que l'angle d'impact la plus plat, fournit plus d'élan vers le large pour le courant de densité du fond qui s'ensuit.

Ensuite, que la gamme d'angles de décharge de  $30^\circ$  à  $45^\circ$  est préférable pour les décharges de jet à flottabilité négative situés dans un environnement proche du rivage car elle produit les dilutions les plus élevées au point d'élévation maximale ainsi sur le point de l'impact.



**Figure I.12** : Dilutions en vrac en fonction de l'angle de décharge  $\theta_0$  : Comportement du jet à flottabilité négative pour la gamme complète d'angles de décharge  $0^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$  et avec des pentes variables  $\theta_b$  de  $0^\circ$  à  $30^\circ$ . Une hauteur de décharge nulle,  $h_0 = 0$ , est supposée [23].

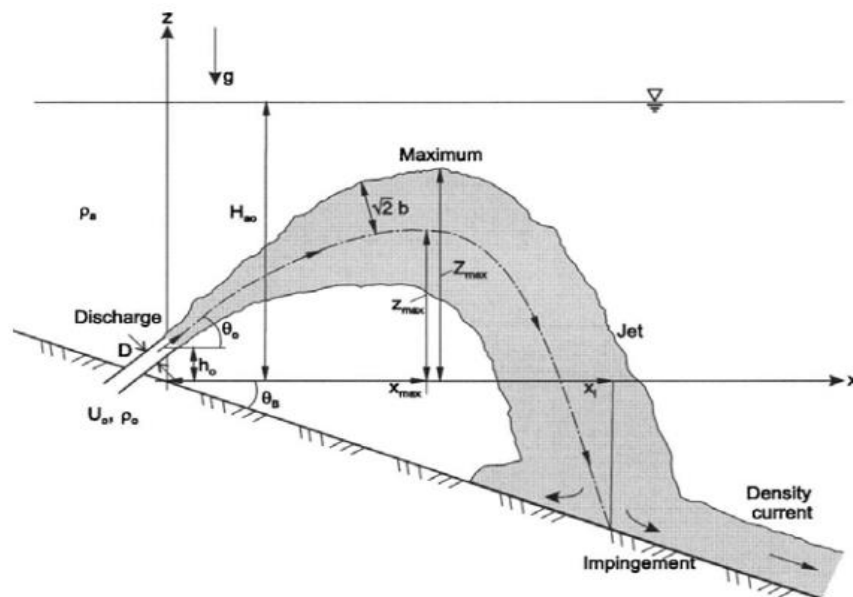
**CHAPITRE II**  
**FORMULATION MATHÉMATIQUE**

Pour étudier un rejet de saumure, on doit connaître les principes d'analyses des rejets de saumure en utilisant les modèles à échelle de longueur et la modélisation par la mécanique des fluides numériques. Dans ce chapitre, nous allons décrire globalement le principe de ces méthodes

## II.1 : Analyse des rejets de saumure

Les impacts du rejet d'une usine de dessalement sur l'environnement marin dépendent des propriétés physiques et chimiques des flux de rejet de l'usine de dessalement, et de la susceptibilité des écosystèmes côtiers à ces rejets en fonction de leurs caractéristiques hydrographiques et biologiques. Par conséquent, une bonne connaissance des propriétés des effluents et des milieux récepteurs est nécessaire pour évaluer les impacts potentiels des usines de dessalement sur le milieu marin. [23]

Le problème physique que nous souhaitons modéliser numériquement consiste en un écoulement bidimensionnel d'un rejet de saumure d'un fluide visqueux. La Figure IV.1 montre les caractéristiques géométriques générales d'un jet à flottabilité négative, rejeté avec un angle de  $\theta_0$  par rapport à l'horizontale.



**Figure II.1 :** Caractéristiques géométriques générales du jet incliné (vue de profile). [23]

Avec :

$Z_{\max}$  : Hauteur maximale d'élévation (hauteur maximale de la limite supérieure ou du bord supérieur du jet).

$X_{\max}$  : Position horizontale de la crête de la ligne centrale.

$X_i$ : Position horizontale au point d'impact (point où l'axe du jet heurte le fond).

$H_{a0}$ : Profondeur moyenne au point de rejet.

$\rho_a$ : Masse volumique ambiante.

$\rho_0$ : masse volumique de l'effluent.

$U_0$ : Vitesse initiale de décharge du jet.

$D$ : Diamètre du port.

$h_0$ : Hauteur du port.

$\theta_0$ : Angle de décharge du jet (angle vertical par rapport au fond).

$\theta_B$ : pente en mer.

$g$ : Accélération gravitationnelle à n'importe quel point de la décharge.

## II.2 : Etude des rejets de saumure en utilisant l'analyse par 'échelle de longueur'

L'analyse par échelle de longueur 'length scale' permet de classer l'écoulement d'un jet se déversant à travers une section transversale  $A_0$  avec un profil de vitesse  $U_0$  en utilisant les paramètres suivants: [24]

*Le débit volumique initial  $Q_0$*  : le débit volumique initial est défini comme suit :

$$Q_0 = U_0 \cdot A_0 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{II.1})$$

$A_0$  : Section transversale de décharge [ $\text{m}^2$ ]

$U_0$ : Vitesse initiale de décharge du jet [ $\text{m/s}$ ].

*Le débit de masse initial  $Qc_0$*  : le débit de masse initial est défini comme suit :

$$Qc_0 = U_0 \cdot C_0 \cdot A_0 \quad [\text{kg./s}]. \quad (\text{II.2})$$

$C_0$  : est la concentration [ $\text{kg/m}^3$ ]

Pour une analyse plus approfondie du comportement du jet on doit connaître les flux de masse initiaux  $M_0$ , et  $J_0$ , ainsi que l'échelle de longueur  $L_M$ .

*Le flux de quantité de mouvement initial ( $M_0$ )*: il est défini comme suit :

$$M_0 = U_0^2 A_0 \quad [\text{m}^4/\text{s}^2] \quad (\text{II.3})$$

**Le flux de flottabilité initial ( $J_0$ )** : Calculable en utilisant l'équation suivante

$$J_0 = U_0 \cdot g'_0 A_0 \quad [\text{m}^4/\text{s}^3]. \quad (\text{II.4})$$

$g'_0$  : représente la flottabilité du jet, calculable en utilisant la formule suivante :

$$g'_0 = g(\rho_0 - \rho_a)/\rho_0 \quad [\text{m/s}^2] \quad (\text{II.5})$$

Où :

$g$  est accélération terrestre  $[\text{m/s}^2]$ .

$\rho_0$  est la masse volumique de l'effluent au point de rejet  $[\text{kg/m}^3]$ .

$\rho_a$  est la masse volumique ambiante  $[\text{kg/m}^3]$ .

**La distance à laquelle a lieu la transition ( $L_M$ )** : Elle représente l'échelle de longueur définissant le jet idéal et définie comme suit :

$$L_M = \frac{M_0^{\frac{3}{4}}}{J_0^{\frac{1}{2}}} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.6})$$

**Échelle de longueur jet/écoulement transversal ( $L_m$ )** : Elle représente la distance au-delà de laquelle le jet est fortement dévié par l'écoulement transversal et définie comme suit :

$$L_m = \frac{M_0^{\frac{1}{2}}}{U_0} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.7})$$

**Échelle de longueur entre le panache et l'écoulement transversal  $L_b$**  : Elle représente la distance au-delà de laquelle le panache est fortement dévié par l'écoulement transversal Elle est définie comme suit :

$$L_b = \frac{J_0}{U_0^3} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.8})$$

**Le nombre de Froude  $F_r$**  : Il représente le rapport entre la vitesse d'une particule et la force de pesanteur est définie comme suit :

$$F_r = \frac{U_0}{\sqrt{g'_0 \cdot r_0}} \quad (\text{II.9})$$

Où :

$$U_0 = \frac{Q_0}{\pi r_0^2} \quad (\text{II.10})$$

$g'_0$  : Accélération de la flottabilité de décharge[m/s<sup>2</sup>].

$r_0$  : Rayon de la buse de décharge[m].

### ***Le nombre de Reynolds***

Le nombre de Reynolds noté  $R_e$ , est un rapport sans dimension qui caractérise un écoulement, représente le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux. Il définit la nature laminaire, transitoire ou turbulente d'un écoulement. Un écoulement laminaire est caractérisé par de faibles nombres de Reynolds et par des effets d'inertie faibles devant les effets visqueux. Un écoulement turbulent est caractérisé par des effets visqueux négligeables devant les effets d'inertie. [25]

Le nombre de Reynolds généralisé est défini par l'équation :

$$R_e = \frac{UD}{\vartheta} \quad (\text{II.11})$$

$U$  : vitesse caractéristique du fluide [m/s].

$D$  : diamètre de la buse de décharge[m].

$\vartheta$  : viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ].

## **II.3 Etude des rejets de saumure en utilisant la mécanique des fluides numériques 'CFD'**

La CFD consiste à étudier un problème physique en résolvant les équations de mécanique des fluides et en appliquant des conditions aux frontières. Pour étudier un rejet de saumure avec de la CFD, on doit commencer par poser des hypothèses, qui sont dans notre cas :

- Ecoulement bidimensionnel (selon les axes  $x$  et  $y$ ) d'un fluide visqueux, incompressible, isotherme et sans transfert de masse .
- Ecoulement stationnaire
- Ecoulement turbulent.

Suivant ces hypothèses, les équations qui régissent le problème physique peuvent s'écrire comme suit :

**Equation de continuité** : Cette équation peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.12})$$

Où  $u$  et  $v$  étant les composantes du champ de vitesse, ( $u$ ) suivant ( $ox$ ) et ( $v$ ) suivants ( $oy$ )

**Équations de conservation de la quantité de mouvement :S**

Suivant l'axe x:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.13})$$

Suivant l'axe y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - g \frac{(\rho_0 - \rho a)}{\rho_0} \quad (\text{II.14})$$

**Équations de la turbulence :**

Nous utilisons le modèle (k-ε) comporte deux équations de transport l'une pour l'énergie cinétique turbulente k, et l'autre pour le taux de sa dissipation ε. L'équation de la dissipation ε est basée sur une hypothèse équilibre production- dissipation. Bien que ce modèle soit basé sur des constantes empiriques inspirées des observations expérimentales et intuitives, il est considéré comme modèle universel largement utilisé dans tous les secteurs [26] :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{C}) = \text{div} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \overrightarrow{\text{grad}} k \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{II.15})$$

Et

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \vec{C}) = \text{div} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \overrightarrow{\text{grad}} \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

k est l'énergie cinétique turbulent

C est une constante empirique

$\frac{\partial}{\partial t}$  est la dérivée partielle par rapport au temps

$\mu$  est la viscosité turbulent

$\sigma$  est le nombre de Prandtl

$E_{ij}$  est la contrainte de Reynolds

$\varepsilon$  est le temps moyen de dissipation de l'énergie cinétique

### II.4 Géométrie, conditions aux limites et propriétés du fluide

La géométrie de référence consiste en un domaine bidimensionnel (milieu récepteur) de longueur 6,5 m et hauteur 1m, muni d'une buse qui rejette de la saumure comme montré sur la figure II.2. Les conditions aux limites sont aussi représentées sur la figure II.3, où on voit qu'un flux de saumure est injecté à une vitesse ' $U_0$ ' à partir d'une buse de diamètre ' $D$ '

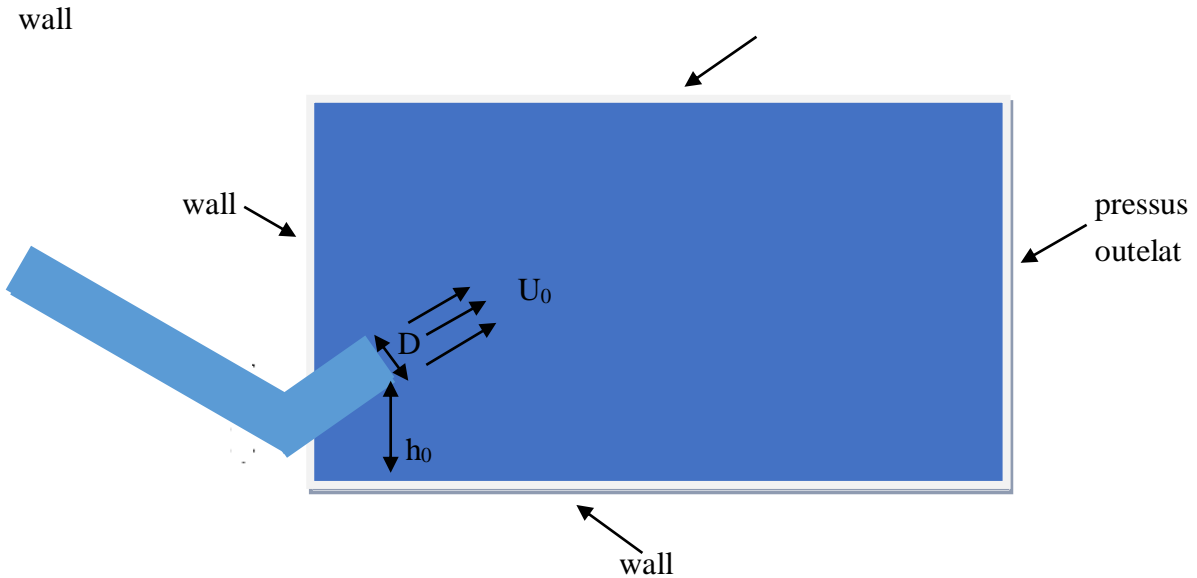


Figure II.2 :Modèle à étudier en 2D.

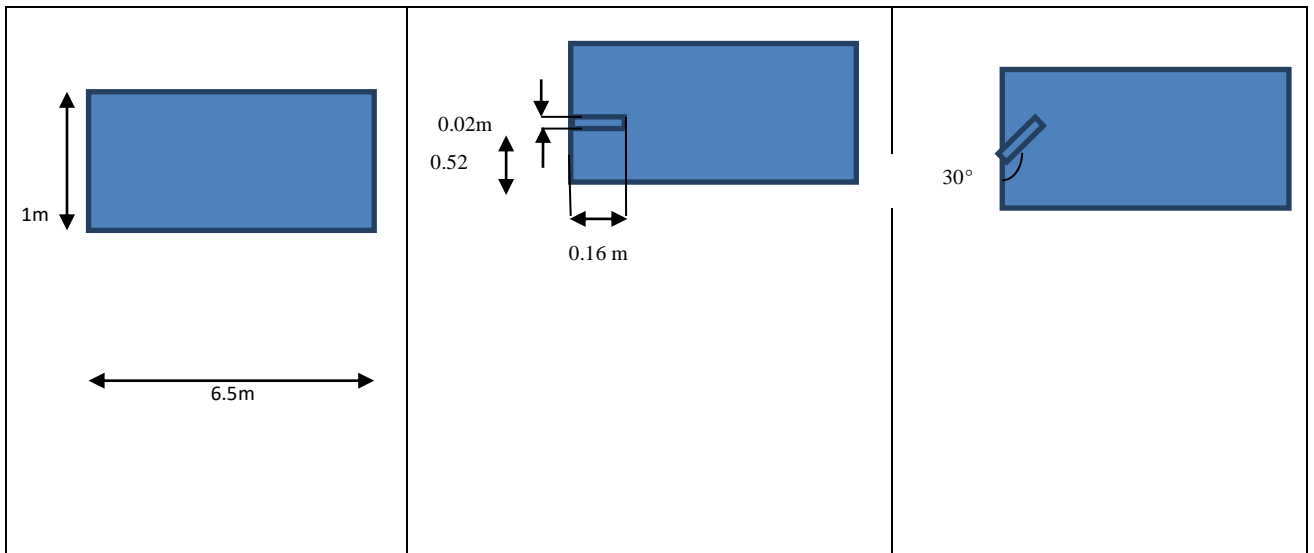


Figure II.3 : la géométrie du modèle à étudier.

Dans notre cas, on se contente d'étudier l'hydrodynamique (sans transfert de masse), par conséquent, les caractéristiques physico-chimiques du fluide sont comme suit :

La masse volumique du fluide (eau de mer) est calculée suivant la formule proposée par la référence [24], c'est-à-dire :

$$\rho = (A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + A_4F_4) \cdot 10^3 [kg/m^3] \text{ (II.17)}$$

Où :

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.5 & G_1 &= 0.5 & A_1 &= 4.032219G_1 + 0.115313G_2 + 3.26 \cdot 10^{-4}G_3 \\ F_2 &= A & G_2 &= B & A_2 &= -0.108199G_1 + 1.571 \cdot 10^{-3}G_2 - 4.32 \cdot 10^{-4}G_3 \\ F_3 &= 2A^2 - 1 & G_3 &= 2B^2 - 1 & A_3 &= -0.012247G_1 + 1.74 \cdot 10^{-3}G_2 - 9 \cdot 10^{-6}G_3 \\ F_4 &= 4A^3 - 3A & & & A_4 &= 6.92 \cdot 10^{-4}G_1 - 8.7 \cdot 10^{-5}G_2 - 5.3 \cdot 10^{-5}G_3 \\ A &= (2T - 200) / 160 & & & B &= (2Sal - 150) / 150 \text{ et } T \text{ en } C^0 \text{ et } Sal \text{ en ppt.} \end{aligned}$$

La viscosité du fluide est calculée en utilisant la relation suivante prise à partir de la référence [24] :

$$\mu = \mu_W \cdot \mu_R \cdot 10^{-3} [kg/m.s] \quad \text{(II.18)}$$

Où :

$$\begin{aligned} \ln(\mu_W) &= -3.79418 + 604.129 / (139.18 + T) \\ \mu_R &= 1 + A \cdot Sal + B \cdot Sal^2 \\ A &= 1.474 \cdot 10^{-3} + 1.5 \cdot 10^{-5}T - 3.927 \cdot 10^{-8}T^2 \\ B &= 1.0734 \cdot 10^{-5} - 8.5 \cdot 10^{-8}T + 2.23 \cdot 10^{-10}T^2 \end{aligned}$$

**CHAPITRE III**

**MATERIELS ET METHODES**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes suivies pour l'étude d'un rejet de saumure en se basant en premier temps sur le calculateur développé par Bleninger et al [23], puis sur les logiciels de génération de maillage et de CFD, à savoir Gambit 2.4 et Fluent 6.3.26.

### III.1 Étapes suivies pour étudier un rejet de saumure en utilisant le calculateur développé par Bleninger et al. [23]

Dans la première feuille du calculateur (effluent characteristics), nous nous intéressons à faire des calculs sur l'effet de quelques paramètres tel que la température ambiante, la salinité ambiante et l'effet du débit d'eau douce. Dans la deuxième feuille du calculateur on s'intéresse seulement sur l'angle de décharge pour étudier l'effet de l'angle. Pour la troisième feuille du calculateur on prend les résultats des caractéristiques géométriques du jet  $z_{max}$ ,  $x_{max}$ ,  $z_i$  et la dilution  $sm$  et  $sm/fr$ , tous ces résultats sont présentés dans le chapitre IV sous forme d'histogramme.

#### III.1.1 Etude de l'effet de température ambiante

Pour étudier l'effet de la température sur les caractéristiques géométriques du jet et la dilution, on fait varier les valeurs de la température de 0°C jusqu'à 180°C avec un pas de 20°C dans la case jaune, et ce en fixant la valeur de la salinité ambiante à  $sal_a = 35 \text{ ppt}$ , et dans la deuxième partie de la feuille on fixe le débit d'eau douce à  $Q_{(boie)} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  et le taux de réceptrice 50%, puis dans la 4ème partie (blended effluent) on fixe le débit des effluents mélangé externe  $Q_{efflex} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ . voir la figure III.1 et III.2.

#### Flowrates & Effluent Characteristics RO

##### - ambient characteristics (seawater)

ambient temperature	$T_a =$	10,00	°C
ambient salinity	$Sal_a =$	35,00	ppt
ambient density	$\rho_a =$	1027,08	kg/m <sup>3</sup>
ambient kin. viscosity	$\nu_a =$	1,34E-06	m <sup>2</sup> /s

##### - fresh water (permeate)

flowrate	$Q_{drink} =$	2	m <sup>3</sup> /s
recovery rate	$r =$	50	%
intake flowrate	$Q_{in} =$	2,00	m <sup>3</sup> /s

##### - brine characteristics (effluent from desalination process)

plant effluent flowrate	$Q_{desal} =$	1,00	m <sup>3</sup> /s
temperature	$T_{desal} =$	22,00	°C
salinity	$Sal_{desal} =$	70,00	ppt
density	$\rho_{desal} =$	1050,56	kg/m <sup>3</sup>
substance concentration	$c_{desal} =$	20,00	ppm

##### - blended effluent - external - (e.g. waste water or others)

flowrate	$Q_{efflex} =$	0,00	m <sup>3</sup> /s
temperature	$T_{efflex} =$	20,00	°C

annotations/limitations:

$T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$   
 $Sal = 0$  to  $160$  ppt (ppt = g/kg)  
 allowed ranges for viscosity calculation:  
 $Sal = 0$  to  $130$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$  (El-Dessouky, Ettouney (2002))

recovery rate:  
 percentage of intake water converted into permeate;  
 plant characteristic; following Lattemann:  $r = 40$ - $65\%$

usually ambient or  $1^\circ\text{C}$  above  
 with  $Sal_{drink} = 0$  ppt  
 e.g. coagulants, anti-scalants, ....  
 (has no effect on density or mixing characteristics)

**Figure III.1** :feuille de calcul pour le cas de la variation de la température ambiante. [23]

Dans la deuxième partie de la feuille 2 du calculateur on fixe l'angle de décharge à 15° et le nombre d'ouvertures à n=1 (figure III.2), puis on clic entrée sur notre clavier et le calculateur donne les résultats des propriétés géométriques du jet et la dilution dans la feuille 3.(Figure III.3)

### Discharge Characteristics RO

**- ambient characteristics**

ambient density  $\rho_o = 1022,44 \text{ kg/m}^3$   
 buoyant acceleration  $g'_o = -0,00281 \text{ m/s}^2$   
 offshore slope  $\theta_B = 10^\circ$

**- effluent characteristics**

flowrate  $Q_o = 2,00 \text{ m}^3/\text{s}$   
 discharge density  $\rho_o = 1022,73 \text{ kg/m}^3$   
 kin. viscosity  $\nu_o = 1,02\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$

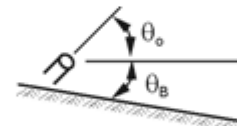
**- discharge characteristics**

Choose a discharge angle (recommended: 45°) :

discharge angle  $\theta_o = 15^\circ$   
 discharge angle ok!  
 port discharge velocity  $U_o = 5,00 \text{ m/s}$   
 number of openings  $n = 1$   
 port diameter  $D = 0,29 \text{ m}$

dens. Froude Number  $Fr_o = 174,75$   
 Reynolds Number  $Re_o = 1,43\text{E}+06$

annotations:



$[0^\circ \leq \theta_o \leq 90^\circ]$  only integer!

recommended:  $U_o = 4\text{-}6 \text{ m/s}$   
 start with one opening!

$$Fr_o = U_o / (g'_o \cdot D)^{1/2} = Q_o / (D^2 p / 4) / (g'_o \cdot D)^{1/2}$$

$$Re_o = U_o \cdot D / \nu_o$$

**Figure III.2** :feuille 2 de calcul pour la fixation de l'angle de décharge et le nombre d'ouverture. [23]

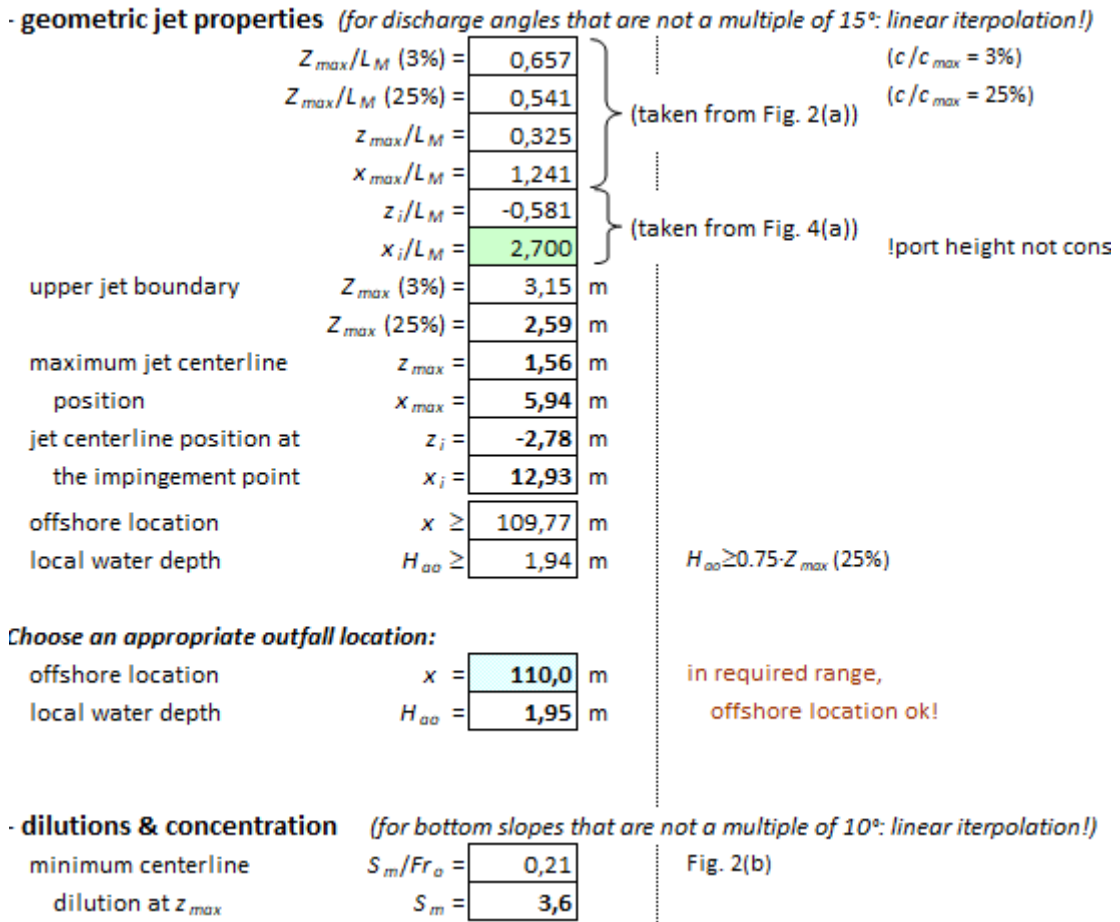


Figure III.3 :visualisation des résultats.[23]

### III.1.2 Etude de l'effet de la salinité ambiante

Pour étudier l'effet de la salinité ambiante, on fait varier la valeur de cette dernière de 0 à 100 ppt avec un pas de 20, tout en fixant les valeurs de la température à 22°C, le débit d'eau douce à  $Q_{(boire)} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  et le débit des effluents mélangé externe à  $Q_{efflex} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ , dans la deuxième feuille on fixe l'angle de décharge de jet à 15°C, le nombre d'ouvertures à  $n=1$ .

### III.1.3 Etude de l'effet de débit d'eau douce

Pour étudier l'effet du débit d'eau douce, dans la deuxième partie de feuille 1 (dans la case jaune) on fait varier les valeurs du débit d'eau douce de 0 à 10  $\text{m}^3/\text{s}$  avec un pas de 2, tout en fixant la valeur de la température ambiante à 22°C, la salinité ambiante à 35 ppt et le débit des effluents mélangé externe à  $Q_{efflex} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'angle de décharge de jet et toujours fixé à 15° ainsi que le nombre d'ouverture à  $n=1$ . (Voir figures III.4 et III.5).

**Flowrates & Effluent Characteristics RO**

- ambient characteristics (seawater)

ambient temperature	$T_a =$	22,00 °C
ambient salinity	$Sal_a =$	35,00 ppt
ambient density	$\rho_a =$	1023,94 kg/m <sup>3</sup>
ambient kin. viscosity	$\nu_a =$	1,00E-06 m <sup>2</sup> /s

annotations/limitations:

$T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$   
 $Sal = 0$  to  $160$  ppt (ppt = g/kg)  
 allowed ranges for viscosity calculation:  
 $Sal = 0$  to  $130$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$  (El-Dessouky, Ettouney (2002))

- fresh water (permeate)

flowrate	$Q_{drink} =$	6,00 m <sup>3</sup> /s
recovery rate	$r =$	50 %
intake flowrate	$Q_{in} =$	12,00 m <sup>3</sup> /s

recovery rate:  
 percentage of intake water converted into permeate;  
 plant characteristic, following Lattemann:  $r = 40-65\%$

- brine characteristics (effluent from desalination process)

plant effluent flowrate	$Q_{desal} =$	6,00 m <sup>3</sup> /s
temperature	$T_{desal} =$	22,00 °C
salinity	$Sal_{desal} =$	70,00 ppt
density	$\rho_{desal} =$	1050,56 kg/m <sup>3</sup>
substance concentration	$C_{desal} =$	20,00 ppm

usually ambient or  $1^\circ\text{C}$  above  
 with  $Sal_{drink} = 0$  ppt  
 e.g. coagulants, anti-scalants, ...  
 (has no effect on density or mixing characteristics)

- blended effluent - external - (e.g. waste water or others)

flowrate	$Q_{eff,ex} =$	0,00 m <sup>3</sup> /s
temperature	$T_{eff,ex} =$	20,00 °C
salinity	$Sal_{eff,ex} =$	0,00 ppt
density	$\rho_{eff,ex} =$	998,40 kg/m <sup>3</sup>

$Sal = 0$  to  $160$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$

**Discharge Characteristics RO**

- ambient characteristics

ambient density	$\rho_a =$	1023,94 kg/m <sup>3</sup>
buoyant acceleration	$g'_a =$	-0,25498 m/s <sup>2</sup>
offshore slope	$\theta_B =$	10 °

- effluent characteristics

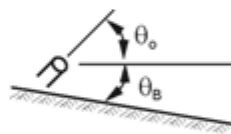
flowrate	$Q_a =$	6,00 m <sup>3</sup> /s
discharge density	$\rho_a =$	1050,56 kg/m <sup>3</sup>
kin. viscosity	$\nu_a =$	1,06E-06 m <sup>2</sup> /s

- discharge characteristics

Choose a discharge angle (recommended:  $45^\circ$ ):

discharge angle	$\theta_a =$	15 °
discharge angle ok!		
port discharge velocity	$U_a =$	5,00 m/s
number of openings	$n =$	1
port diameter	$D =$	0,50 m
dens. Froude Number	$Fr_a =$	13,94
Reynolds Number	$Re_a =$	2,37E+06

annotations:



$[0^\circ \leq \theta_a \leq 90^\circ]$  only integer!

recommended:  $U_a = 4-6$  m/s  
 start with one opening!

$$Fr_a = U_a / (g'_a \cdot D)^{1/2} = Q_a / (D^2 \pi / 4) / (g'_a \cdot D)^{1/2}$$

$$Re_a = U_a \cdot D / \nu_a$$

Figure III.4: feuille de calcul pour un cas d'essai de débit d'eau douce à  $Q_{(boire)} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  [23]

**Figure III.5 :** feuille 2 de calcul pour la fixation de l'angle de décharge et le nombre d'ouverture pour la variation de débit d'eau douce  $Q_{boire}$ [23]

Pour un débit d'eau douce  $Q_{boire}=6 \text{ m}^3/\text{s}$  les résultats des paramètres géométriques du jet et la dilution sont présenté dans la figure III.6.

<b>- geometric jet properties</b> (for discharge angles that are not a multiple of 15°: linear interpolation!)		
	$Z_{max}/L_M$ (3%) =	0,599
	$Z_{max}/L_M$ (25%) =	0,482
	$z_{max}/L_M$ =	0,267
	$x_{max}/L_M$ =	1,241
	$z_i/L_M$ =	-0,522
	$x_i/L_M$ =	2,700
upper jet boundary	$Z_{max}$ (3%) =	6,49 m
	$Z_{max}$ (25%) =	5,23 m
maximum jet centerline position	$z_{max}$ =	2,89 m
	$x_{max}$ =	13,45 m
jet centerline position at the impingement point	$z_i$ =	-5,66 m
	$x_i$ =	29,25 m
offshore location	$x \geq$	221,60 m
local water depth	$H_{oo} \geq$	3,92 m
		$H_{oo} \geq 0.75 \cdot Z_{max}$ (25%)
<b>Choose an appropriate outfall location:</b>		
offshore location	$x =$	230,0 m
local water depth	$H_{oo} =$	4,07 m
		in required range, offshore location ok!
<b>- dilutions &amp; concentration</b> (for bottom slopes that are not a multiple of 10°: linear interpolation!)		
minimum centerline dilution at $z_{max}$	$S_m / Fr_o =$	0,21
	$S_m =$	2,1
bulk dilution at	$S_i / Fr_o =$	1,00

**Figure III.6 :** résultats obtenus des caractéristiques géométriques du jet et la dilution pour un débit d'eau douce  $Q_{(boire)}=6 \text{ m}^3/\text{s}$  [23]

### III.1.4 Etude de l'effet de l'angle de décharge du jet

Pour étudier l'effet de l'angle de décharge du jet on fait fixer la température ambiante à  $t_a=22^\circ\text{C}$  et la salinité à  $sal=35 \text{ ppt}$  et le débit d'eau douce à  $Q_{boire}=2 \text{ m}^3/\text{s}$  le taux de réceptrice à  $r=50\%$  et le débit des effluents mélangé externe à  $Q_{efflex}=0 \text{ m}^3/\text{s}$ , dans la feuille 2 en fixe le nombre d'ouverture à  $n=1$ , tout en faisant varier l'angle de décharge de jet de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  avec un pas de  $15^\circ$ .

## III.2. Étapes de la simulation sur Gambit/Fluent

### III.2.1 Esquisse et maillage de la géométrie sur le logiciel GAMBIT

Dans ce qui suit, nous allons exposer les étapes suivies pour l'esquisse et le maillage de la géométrie d'intérêt, qui en rappel consiste à un domaine fluide bidimensionnel de forme rectangulaire de longueur 6.5 m et de largeur 1 m et muni d'une buse de longueur 0.16m et largeur 0.02m comme montré ci-dessous :

**Création des points :** On positionne les points avec leurs coordonnées pour définir les frontières et les dimensions de la géométrie, voir figure III.7.

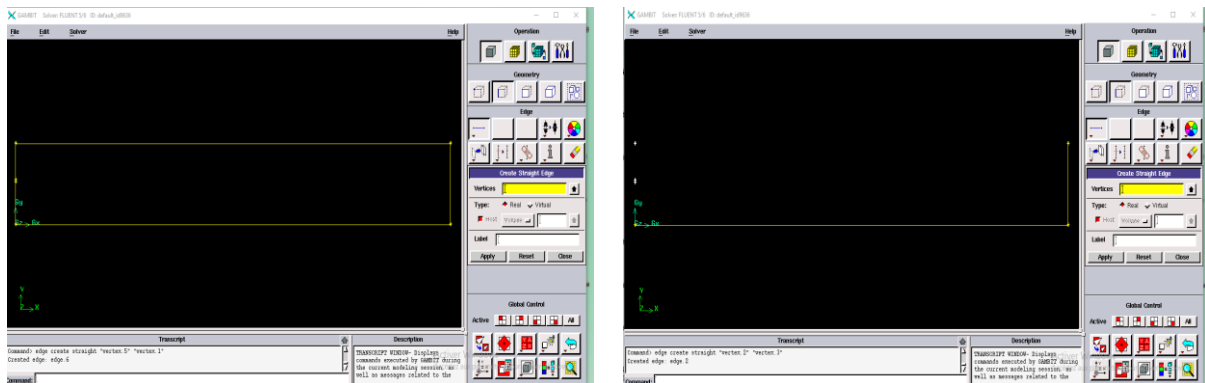


Figure III.7: Créations des lignes

**Création des faces :** On façonne les faces à partir des lignes existantes (figure III.8)

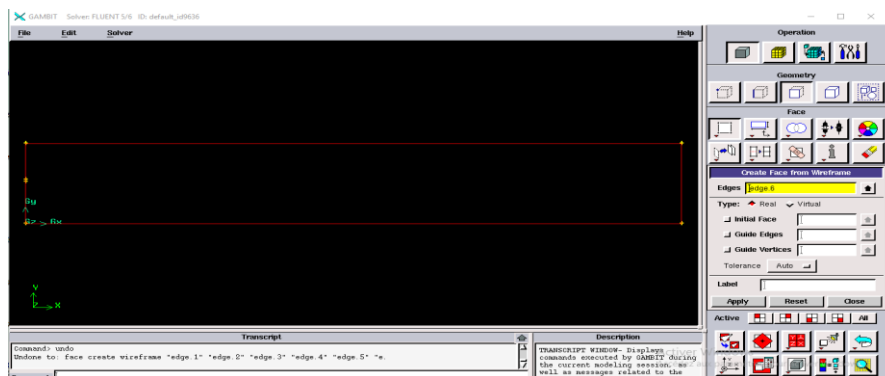
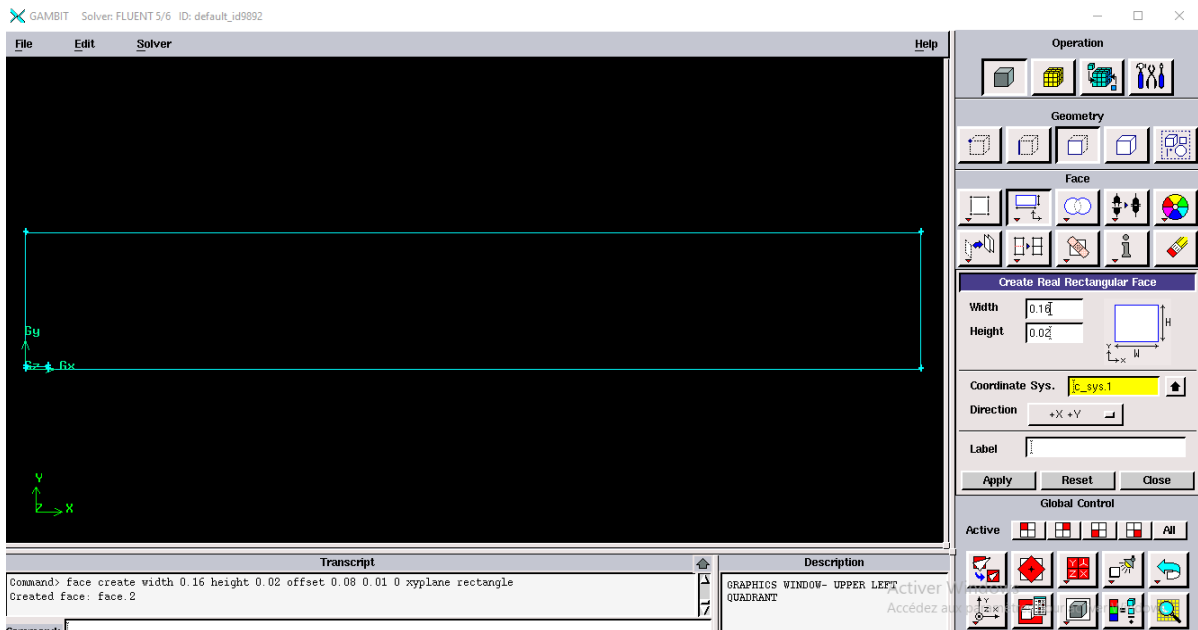


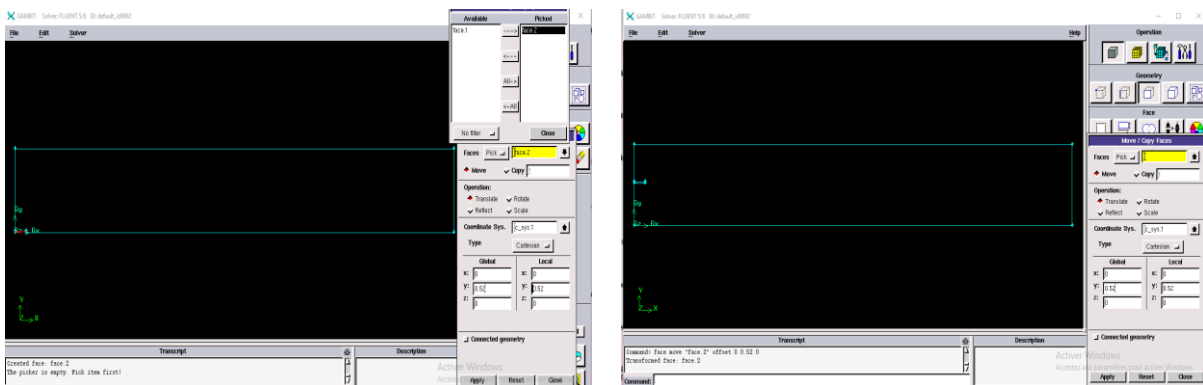
Figure III.8: Création des faces.

**Création de la buse :** Pour créer la face de la buse, on utilise l'outil de création des faces direct et on procède comme suit :



**Figure III.9 :** *Création de la buse.*

On utilise l’outil (move /translate) faces pour positionner notre buse à la hauteur de 0.50m par rapport à l’axe (Figure III.10)



**Figure III.10 :** *Positionnement de la buse*

On utilise l’outil (move /rotate) faces pour orienter notre buse dans des différents angles (Figure 12)

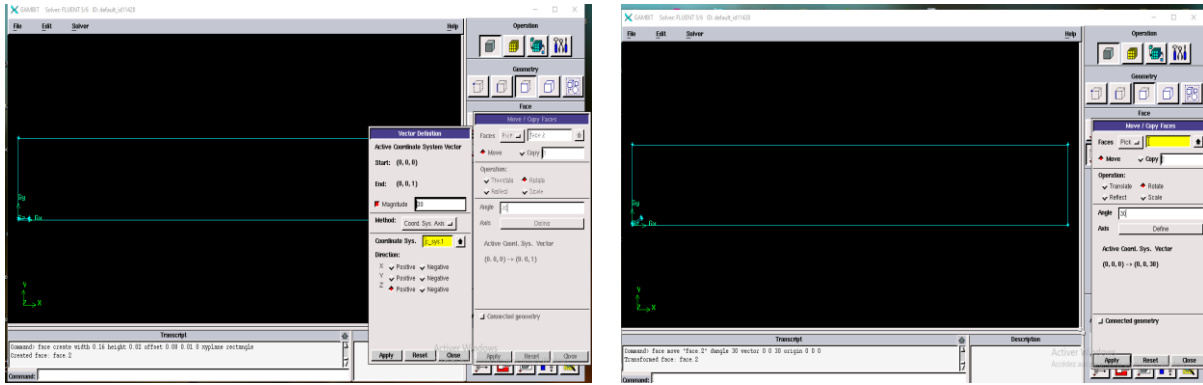


Figure III.11 :Orientation de la buse

**Maillage des lignes :** On subdivise chaque ligne en sous-domaines et on augmente la densité des nœuds afin d’atteindre un nombre de nœuds suffisant (Figure III.12).

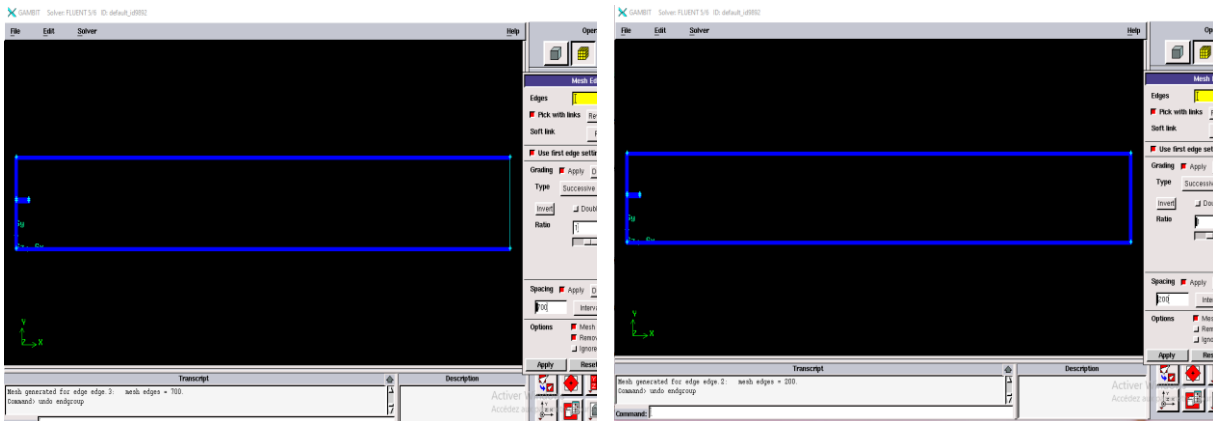


Figure III.12:Maillage des lignes

Nous avons varié le nombre de nœuds de certaines sections comme suit :

- La sortie de la buse entre 100 et 250 ;
- Les murs de la buse entre 10 et 80 ;
- Les murs gauches et droits (la sortie) entre 200 et 500 ;
- Les murs bas et haut entre 500 et 2000.

A partir de ces tests, nous n’avons considéré que les maillages suivants :

- La sortie de la buse : 160 nœuds ;
- Les murs de la buse : 20 nœuds ;
- Les murs gauche et droit (la sortie) : 300 nœuds ;
- Les murs bas et haut : 850 nœuds.

**Maillage des faces:** On maille les faces en utilisant un maillage non uniforme.

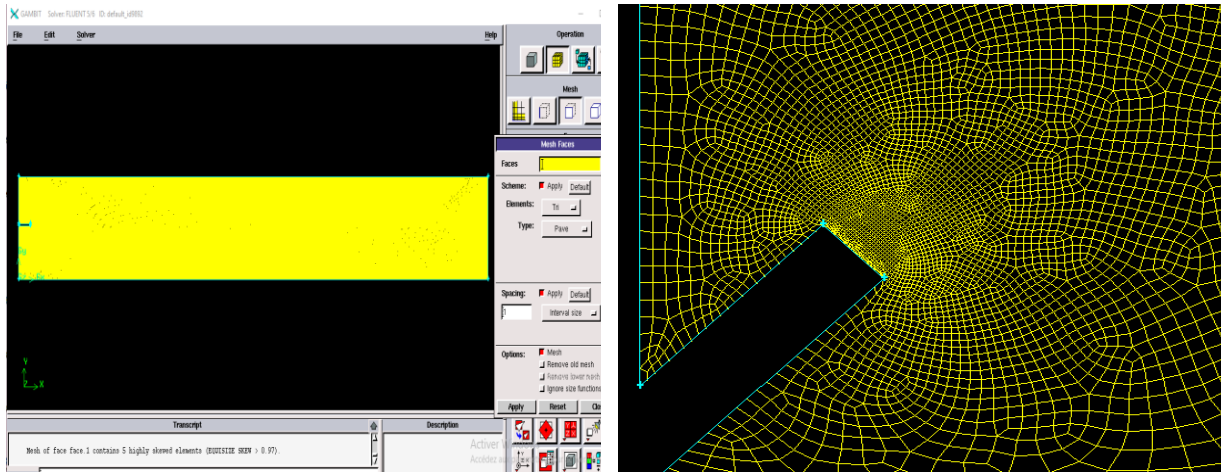


Figure III.13 :Maillage de face

**Application des conditions aux limites:** Après avoir terminé le maillage du domaine, on applique des conditions aux limites comme suit :

Entrée → velocity inlet

Les murs de buse et les murs gauche, bas et haut → wall

Le mur droit → sortie

Et on a déclaré la surface étant un fluide.

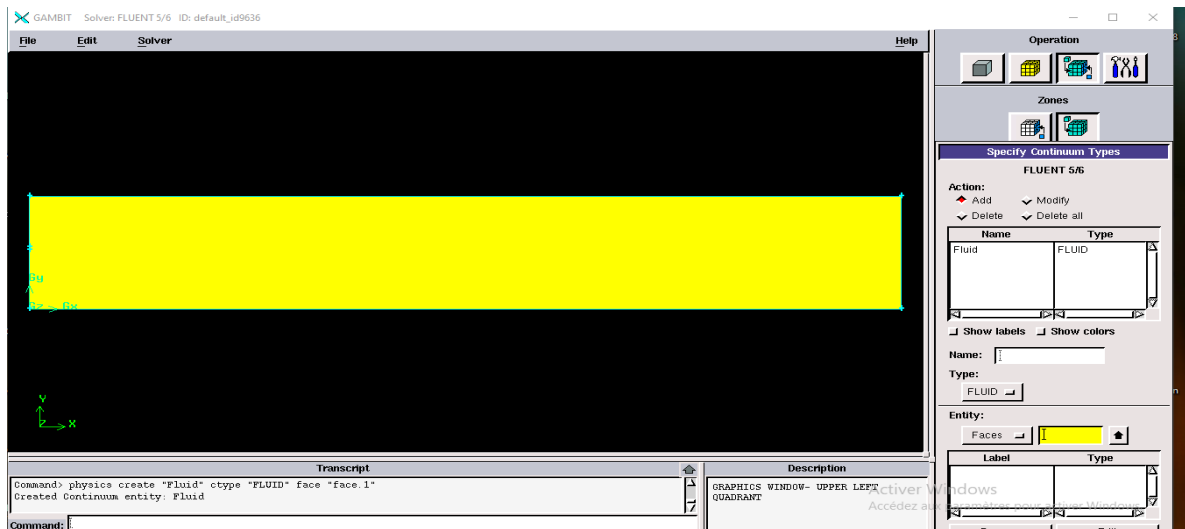


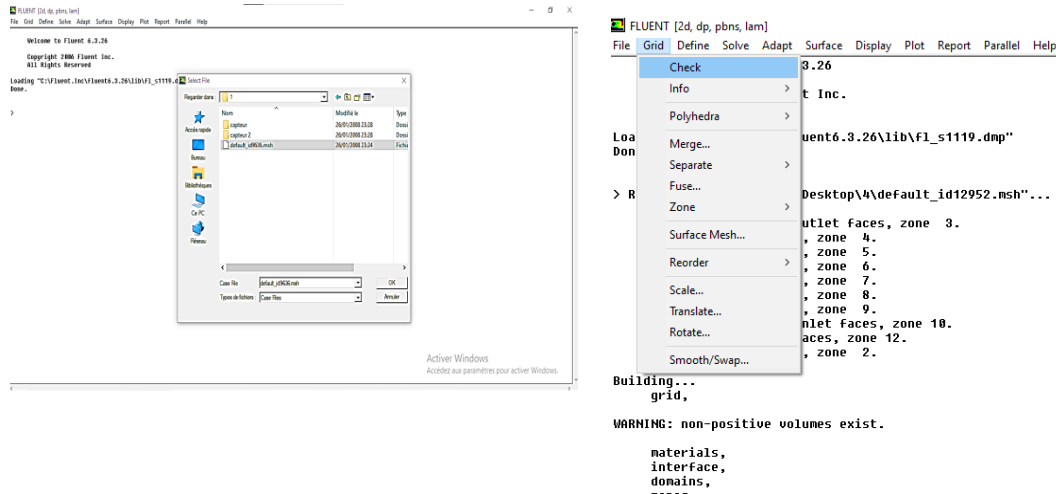
Figure III.14: les conditions aux limites

**Enregistrement et exportation du fichier maillé:** Une fois, la géométrie a été créée et les conditions aux limites définies, on exporte le fichier maillé vers Fluent 6.3.26 et donne un nom pour enregistrer.

### III.2.2 Etapes de la simulation numérique sur logiciel Fluent

Dans ce qui suit, on présente les étapes suivies pour simulation de notre problème physique sur le code Fluent 6.3.26.

**Importation de la géométrie et vérification du maillage :** Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit, puis vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs (Figure III.15).



a) importation de la géométrie

b) check

Figure III.15 : vérification du maillage

**Choix du solveur:** on choisit le régime turbulent (modèle :k-epsilon), puisque les vitesses utilisées sont très élevées  $Re = \frac{U_0.D}{\nu} = \frac{\rho.U_0.D}{\mu}$  (Figure III.16)

$\rho$ : densité 1023 kg /m<sup>3</sup> (constant)

$\mu$ : viscosité 0.001 kg /m.s (constant)

D : Diamètre 0.02m (constant)

$U_0$  : Vitesse d'entrée variée 0.68,0.86,0.96,1.16 m /s

Pour  $U_0=0.68\text{m/s}$   $\longrightarrow Re = \frac{\rho.U_0.D}{\mu} = \frac{1023*0.02*0.68}{0.001} = 13912$

Pour  $U_0=0.86\text{m/s}$   $\longrightarrow Re = 17595.6$

Pour  $U_0=0.96\text{m/s}$   $\longrightarrow Re=19641.6$

Pour  $U_0=1.16\text{m/s}$   $\longrightarrow$   $Re=23733.6$

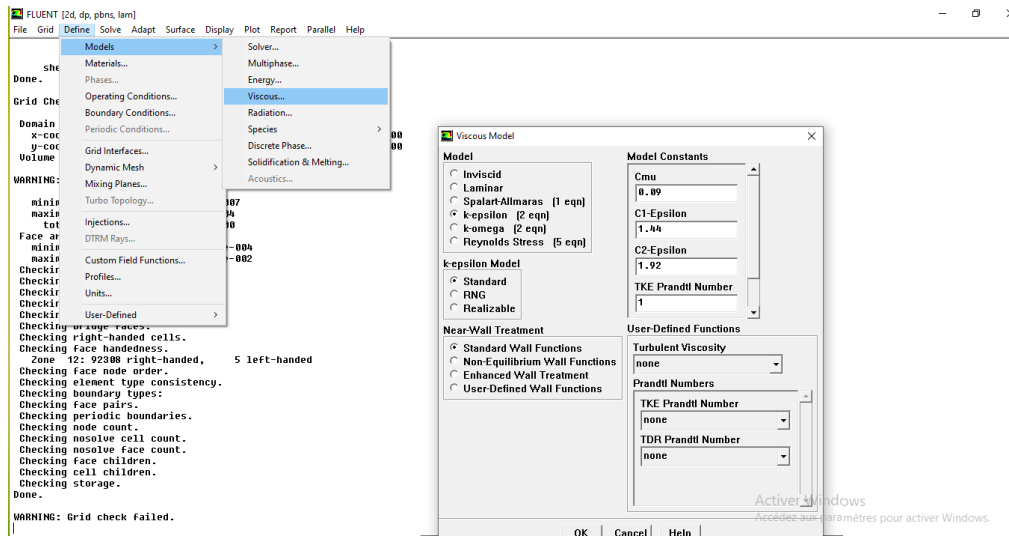


Figure III.16 : Choix de régime k-epsilon

**Définition des caractéristiques du fluide :** On choisit les caractéristiques du fluide qui sont dans notre cas la densité  $\rho=1023$  (kg / m<sup>3</sup>) et la viscosité dynamique  $\mu=0.001\text{kg}/(\text{m}.\text{s})$ , viscosité cinématique  $\nu=9.8.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (figure III.17)

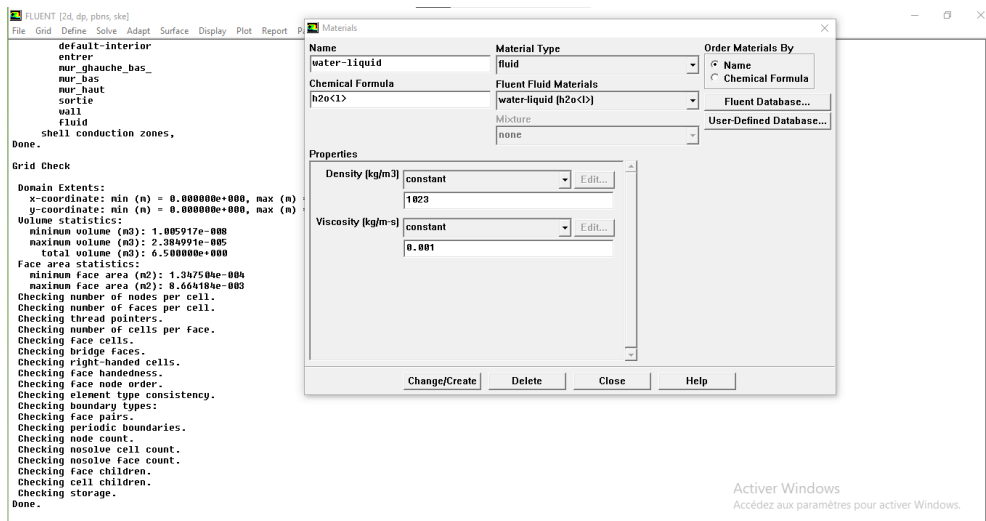


Figure III.17: Choix de type de fluide

**Application des Conditions opérationnelles (operating conditions) :** On fixe la valeur de la gravité selon l'axe y  $g = -9,8 \text{ m/s}^2$ .

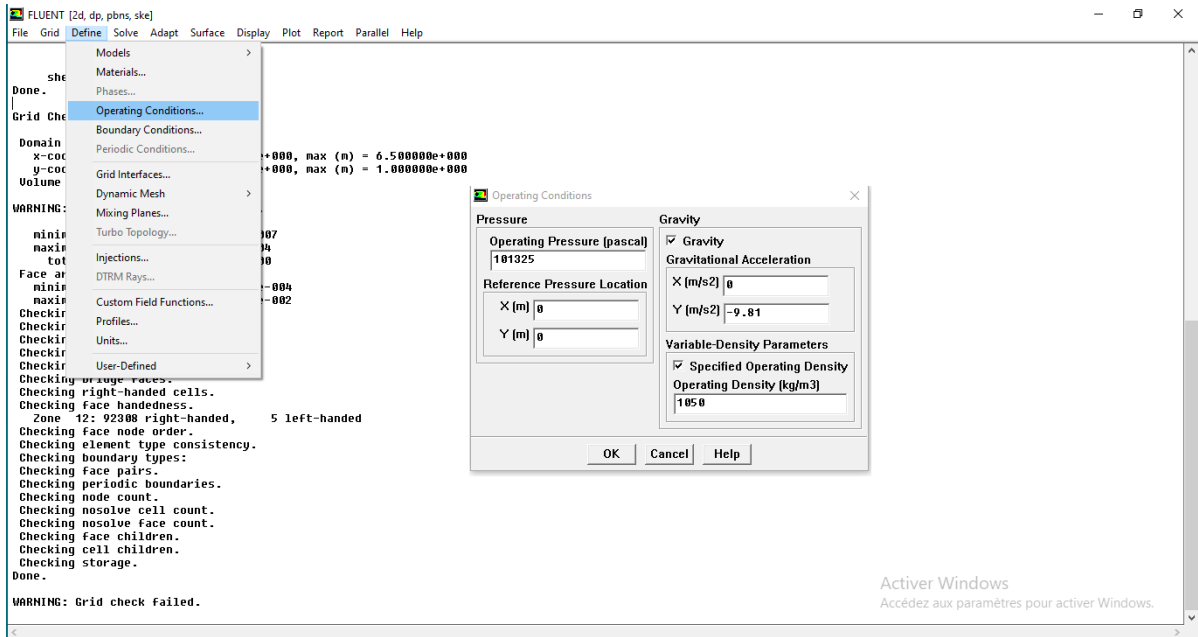


Figure III.18 : Application des Conditions initial

**Application des Conditions aux limites (boundary conditions) :** On applique les conditions aux limites pour la vitesse d'entrée au niveau de la buse ( $U_0$ ), on applique les valeurs suivantes : 0.68 ; 0.86 ; 0.96 ; 1.16 m/s.(Figure III.19)

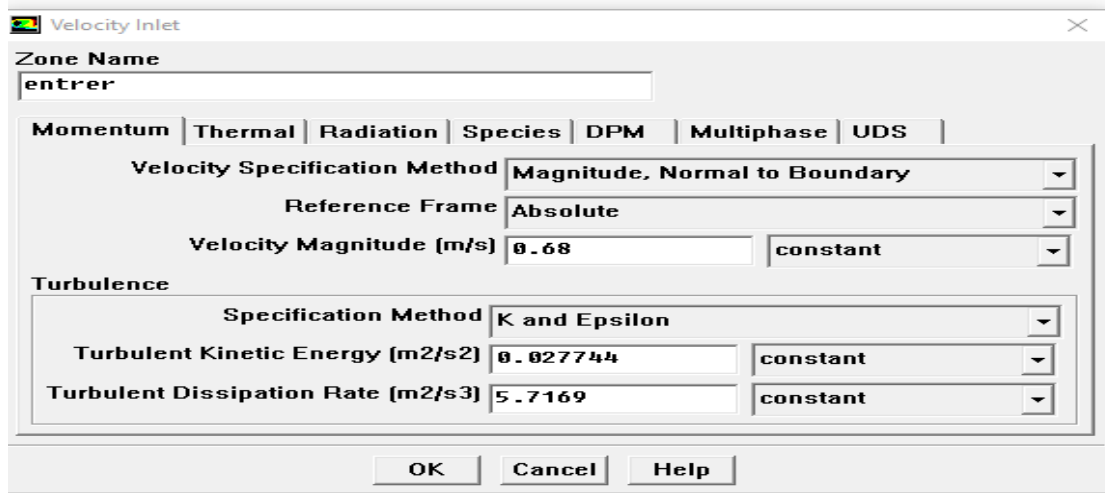


Figure III.19 : velocity-inlet

**Contrôle de la solution :** On sélectionne les schémas amont du deuxième ordre et on utilise l'algorithme SIMPLE pour le couplage vitesse-pression.(Figure III.20)

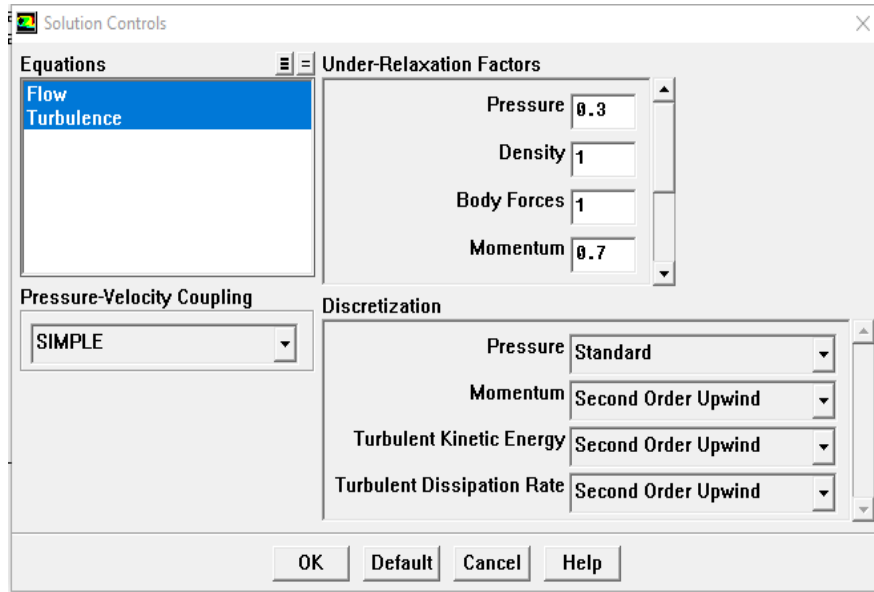
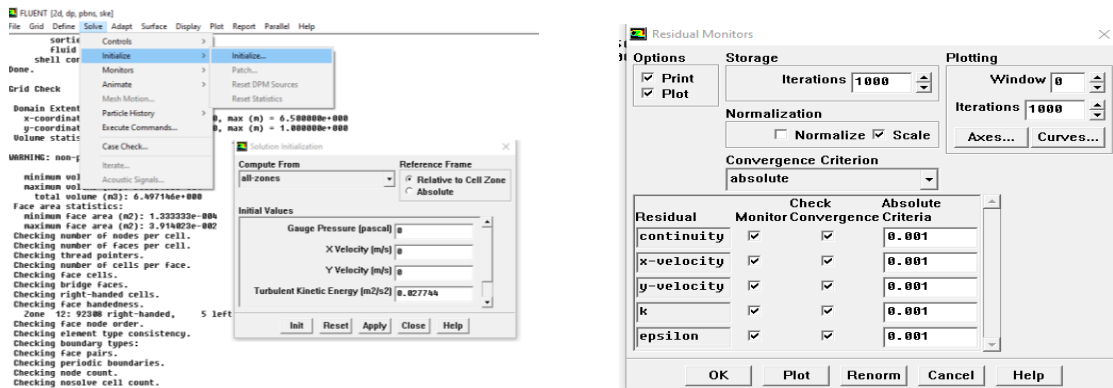


Figure III.20 : Choix d'ordre des équations

**Initialisation du calcul et choix des critères de convergence :** On initialise le calcul, tout en choisissant des critères de convergences pour chaque équation (figure III.21)



a) Solution Initialisation pour lancer les calculs

b) plot

Figure III.21 : Les calculs des critères de convergence

Une fois le calcul lancé, les résidus sont calculés et affichés comme montré ci-dessous. Après ces étapes, on passe à la visualisation des résultats et à leur interprétation.

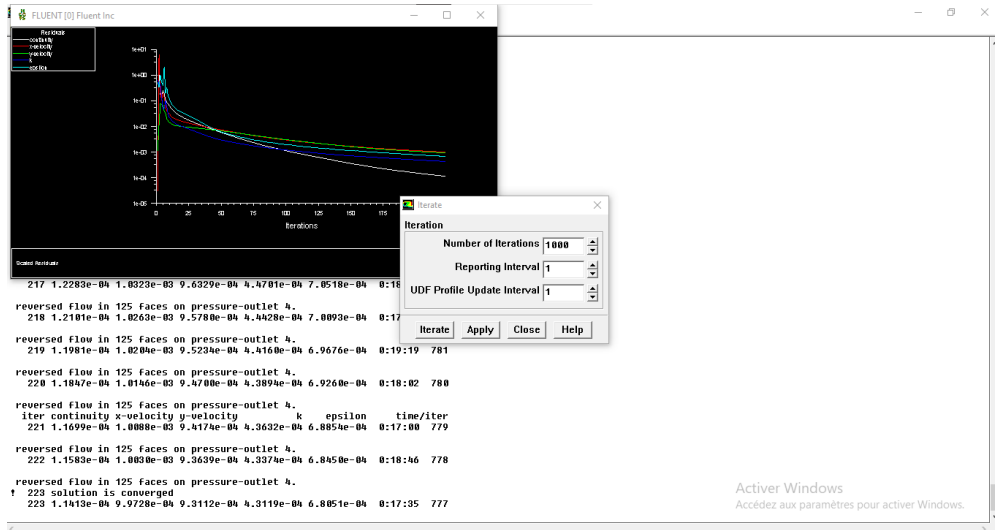


Figure III.22: L'évolution des résidus et calcul de convergence.

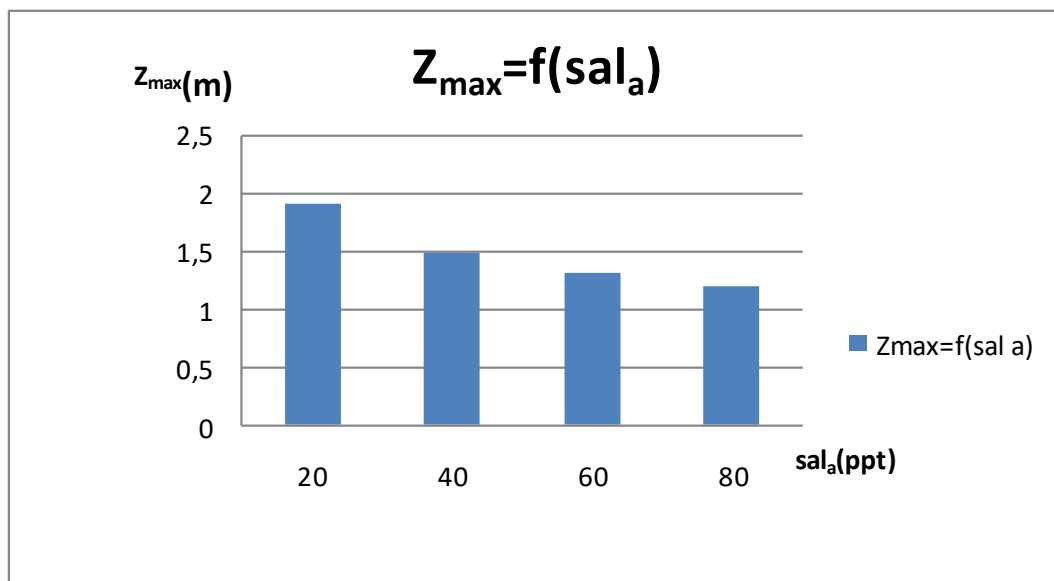
***CHAPITRE IV***  
***RESULTATS ET DISCUSSIONS***

## IV.1: Résultats de la simulation sur la feuille de calcul développée par bleninger

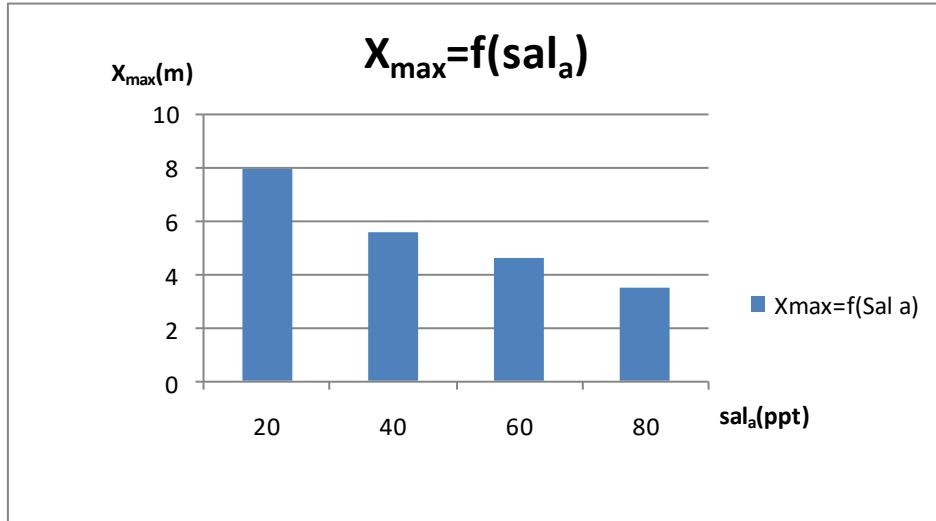
### IV.1.1: Effet de salinité ambiante ( $sal_a$ )

Dans ce qui suit, on étudie l'effet de salinité ambiante ( $sal_a$ ) sur les propriétés géométriques du jet, et ce en fixant la température ambiante, le débit d'eau douce, l'angle de décharge du jet et la dilution.

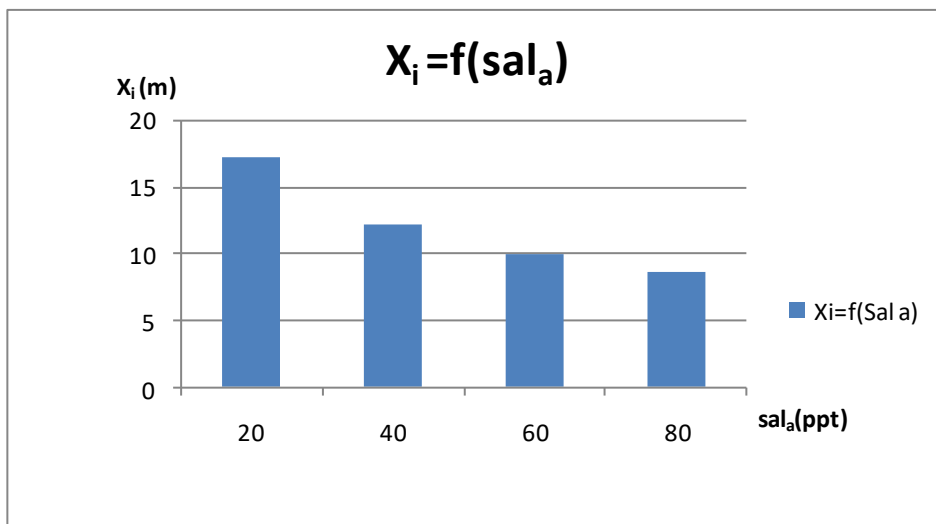
Les figures 1,2,3,4,5 montrent respectivement, la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ), la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ), la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ), la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ), la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ), en fonction de la salinité ambiante ( $sal_a$ )



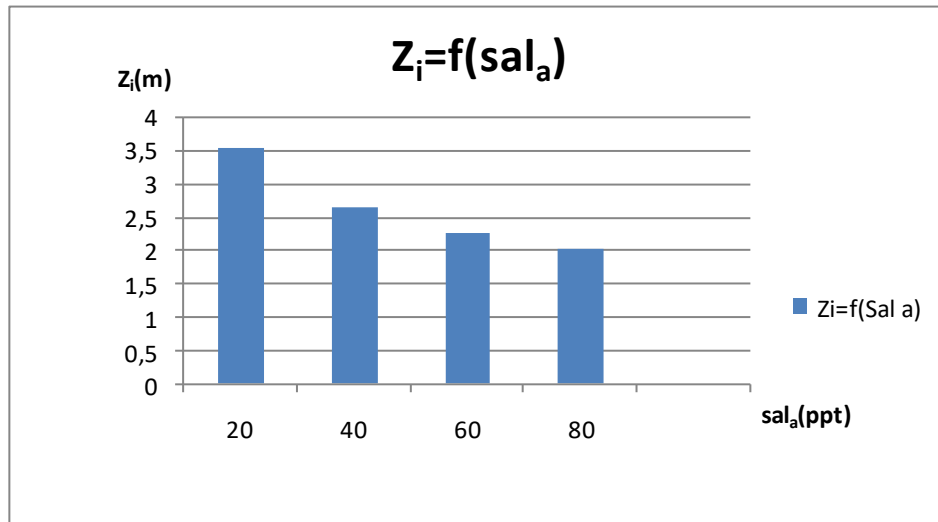
**Figure IV.1:** variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction de la salinité.



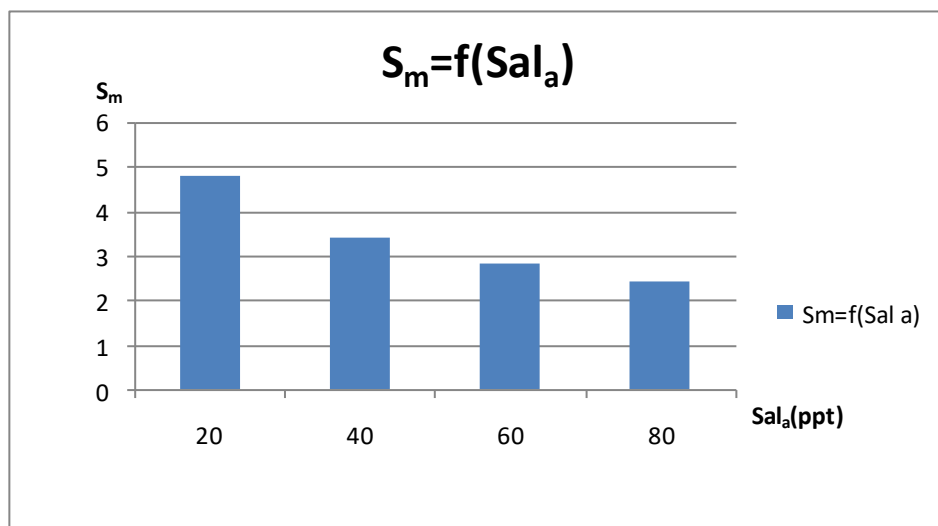
**Figure IV.2:** variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction de la salinité.



**Figure IV.3:** variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction de la salinité.



**Figure IV.4:** variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ) en fonction de la salinité.



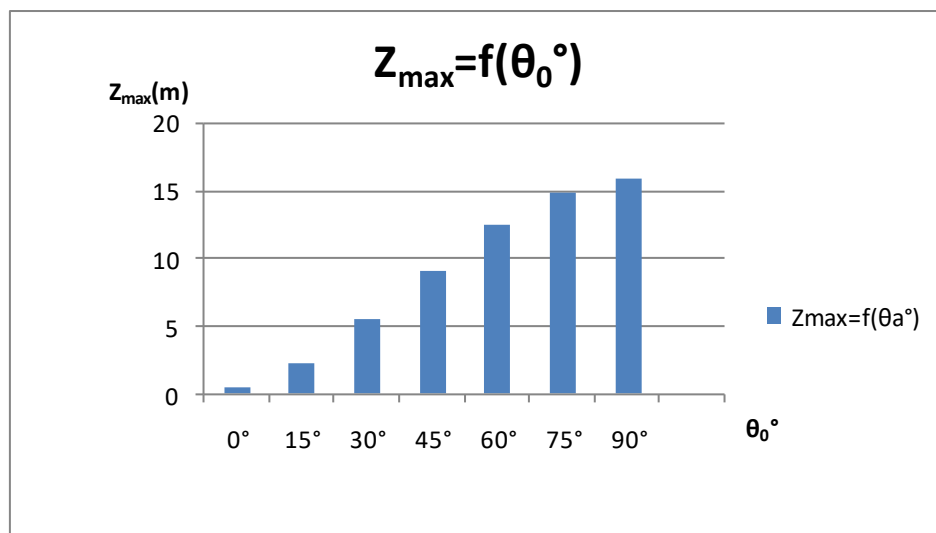
**Figure IV.5:** variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction de la salinité

D'après ces histogrammes, on remarque que l'augmentation de la salinité (Sal) provoque une diminution de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{\max}$ ), de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{\max}$ ), de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ), de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ), de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ),

### IV.1.2: Effet d'angle de décharge du jet $\theta_0$

Dans cette partie, on s'intéresse à quantifier l'effet d'angle de décharge du jet  $\theta_0$  sur les paramètres géométriques du jet ( $Z_{max}$ ,  $X_{max}$ ,  $Z_i$ ,  $X_i$ ,  $S_m$ ), tout en fixant la température  $T_a$ , le débit  $Q_{boire}$  et la salinité  $Sal_a$ .

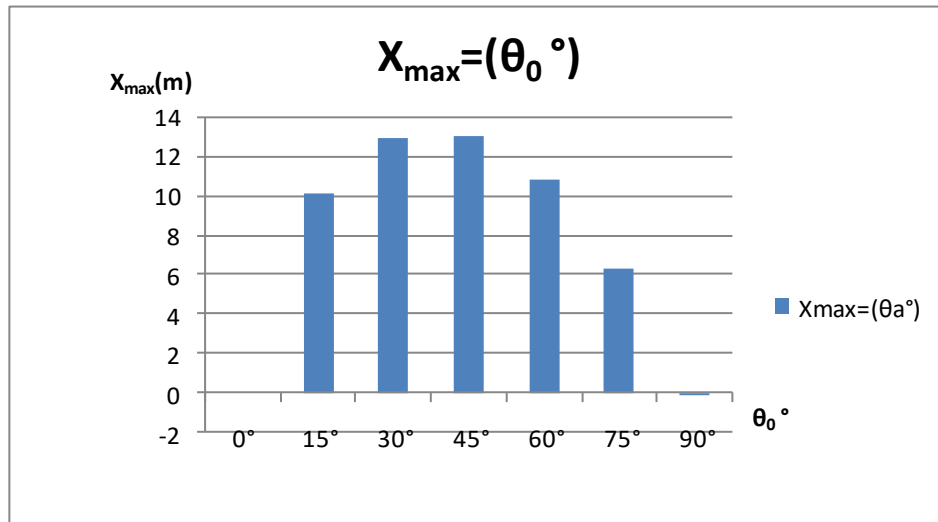
La figure 6 montrant la variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$ . On remarque que l'augmentation d'angle de décharge du jet  $\theta_0$  fait augmenter la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ).



**Figure IV.6:** variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$

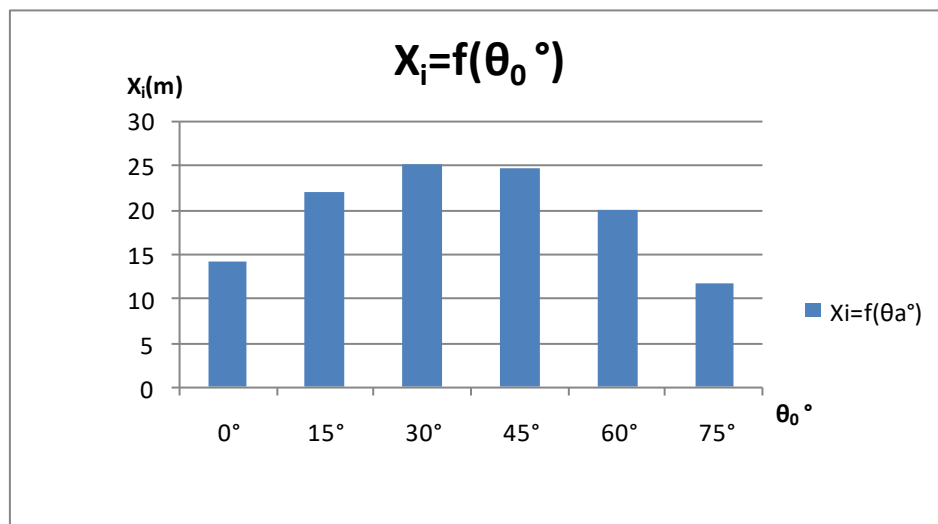
La figure 7 montre l'histogramme de la variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$ .

On remarque d'après la figure 7 que l'augmentation de l'angle de décharge du jet  $\theta_0$  de 0 à 45° provoque l'augmentation de la position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ), puis sa diminution pour les angles  $\theta_0=60^\circ 75^\circ$  et devient négatif pour l'angle  $\theta_0=90^\circ$ .

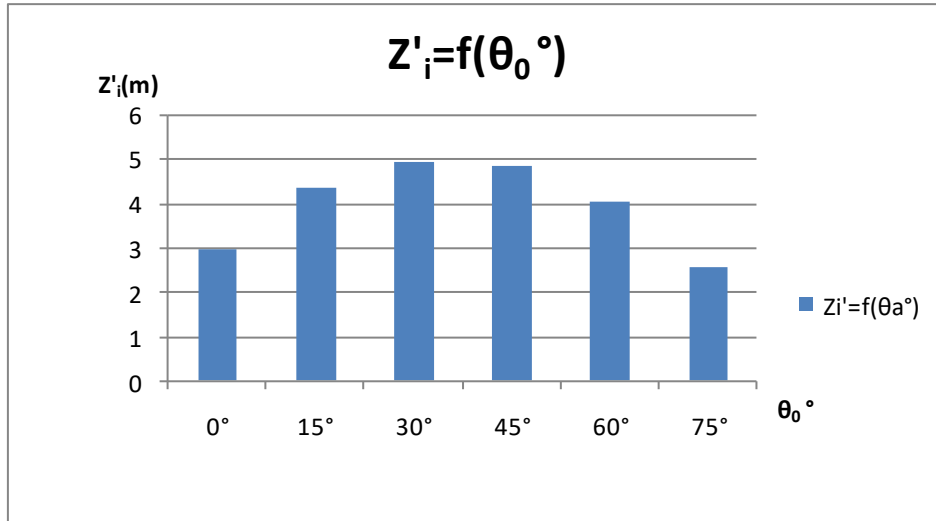


**Figure IV.7:** variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$

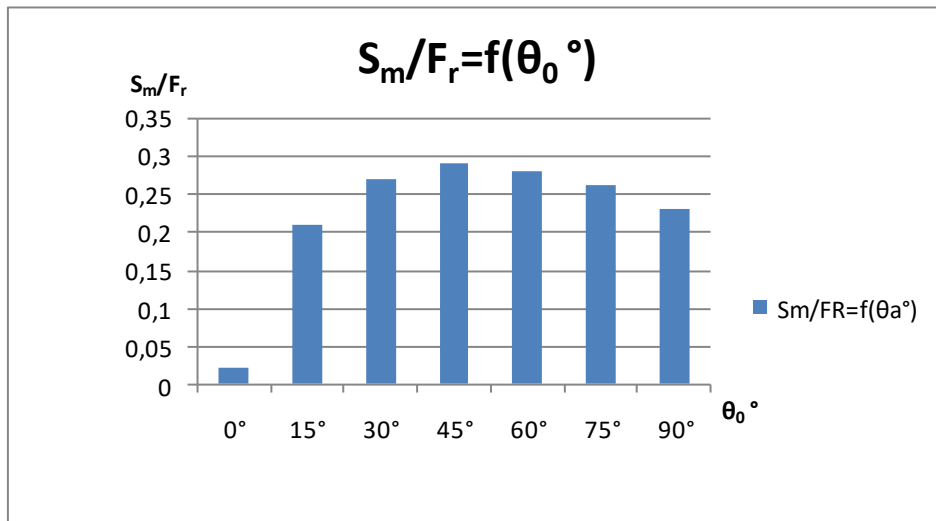
Les figures 8, 9, 10, 11 montrent respectivement, la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ), la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ), la dilution minimale de la ligne centrale au point d'impact ( $S_m/F_r$ ) la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ), en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$ .



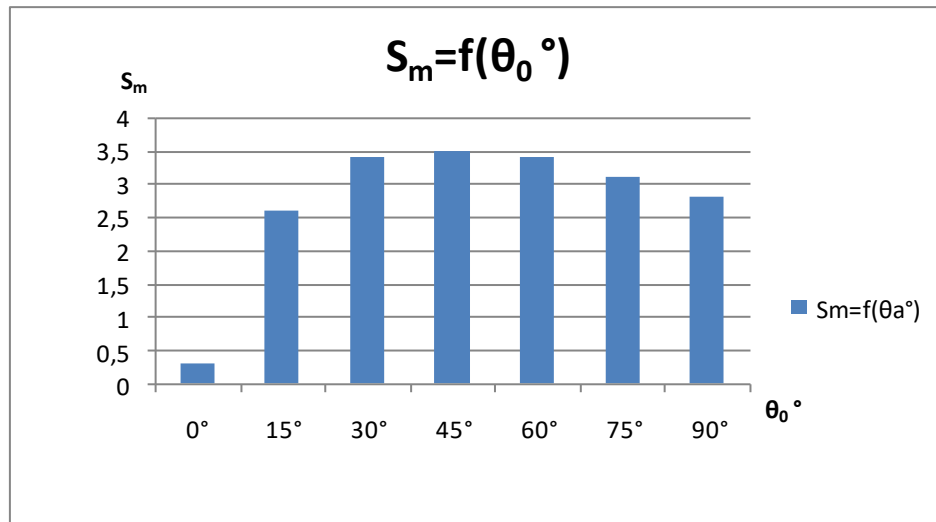
**Figure IV.8:** variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$



**Figure IV.9:** variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i = -Z'_i$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$



**Figure IV.10:** variation de la Dilution minimale de la ligne centrale au point d'impact ( $S_m/F_r$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$



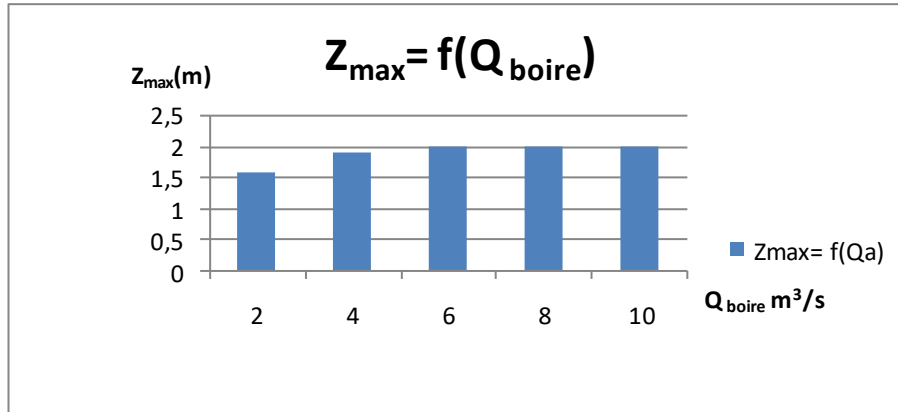
**Figure IV.11:** variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction d'angle de décharge du jet  $\theta_0$ .

D'après les figures 8, 9, on remarque que la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) et la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i = -Z'_i$ ) augmente avec l'augmentation de l'angle de 0 à 30, par contre pour des angles supérieurs à 30 on remarque leur diminution.

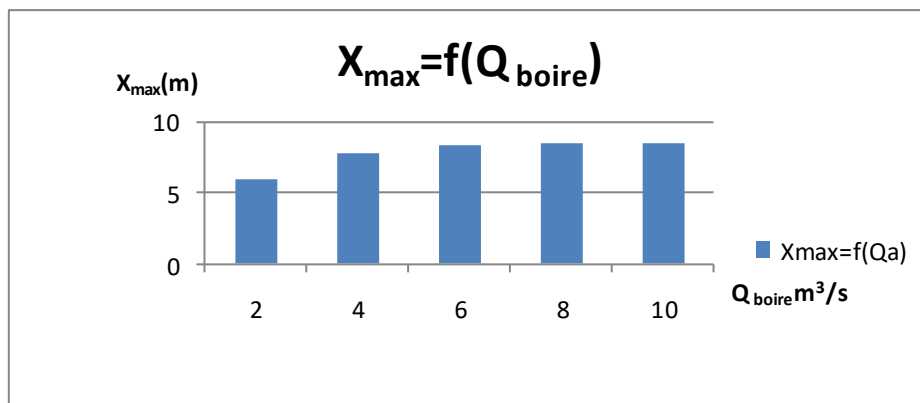
D'après les figures IV.10, IV.11, on remarque que la Dilution minimale de la ligne centrale au point d'impact ( $S_m/F_r$ ) et la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) augmente avec l'augmentation de l'angle de 0 à 45, par contre pour des angles supérieurs à 45 on remarque leur diminution.

#### IV.1.3 Effet de débit d'eau douce ( $Q_{\text{boire}}$ )

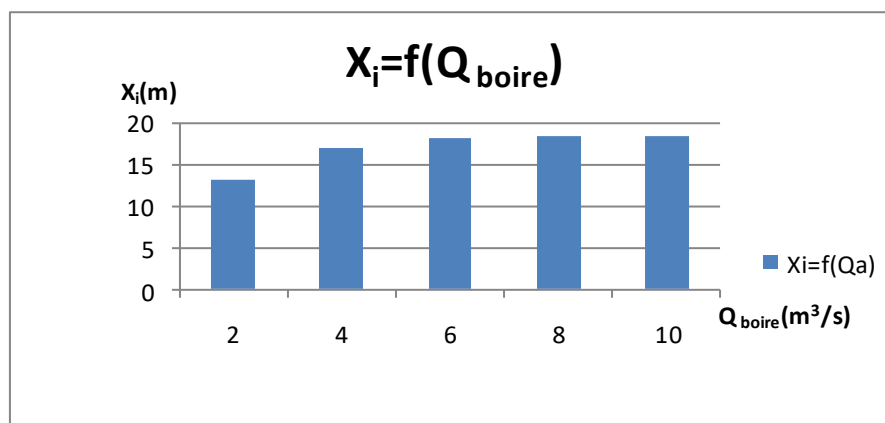
Les figures 12,13,14,15,16 montrent respectivement la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{\text{max}}$ ), la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{\text{max}}$ ), la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ), la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ), la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ), en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{\text{boire}}$ ).



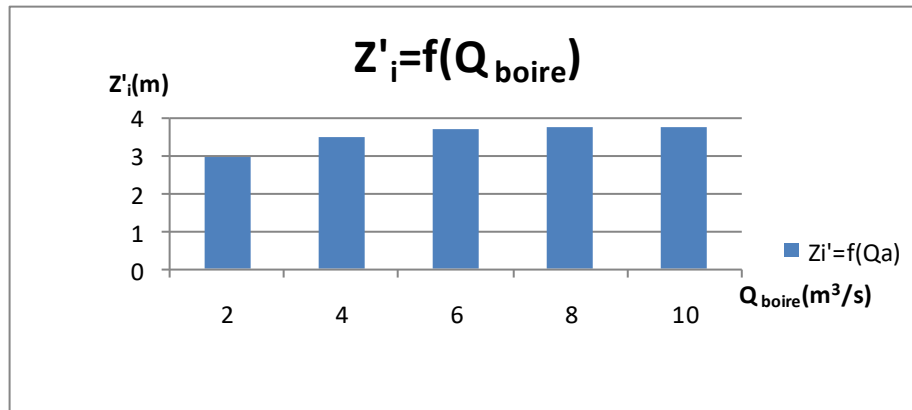
**Figure IV.12:** variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ )  $\text{m}^3/\text{s}$



**Figure IV.13:** variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ )

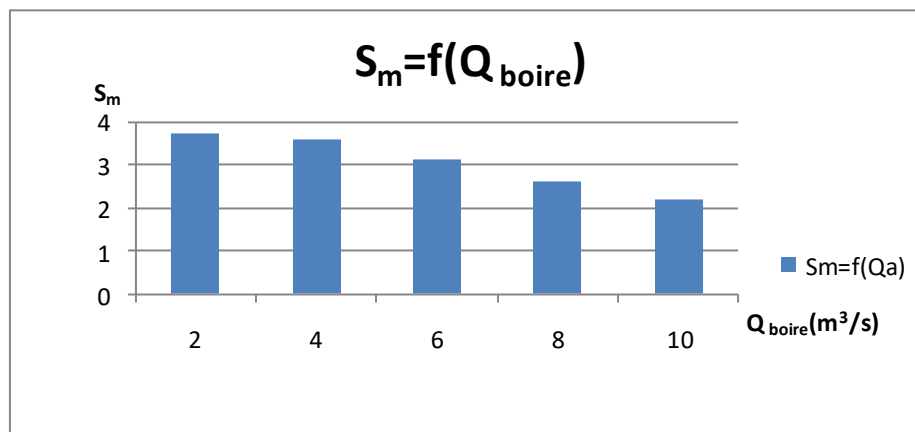


**Figure IV.14:** variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ )



**Figure IV.15:** variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i = -Z'_i$ ) en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ )

D'après les figures 12,13,14,15, on remarque que l'augmentation du débit de l'eau douce ( $Q_{boire}$ ) provoque l'augmentation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ), de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ), de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) et de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ).

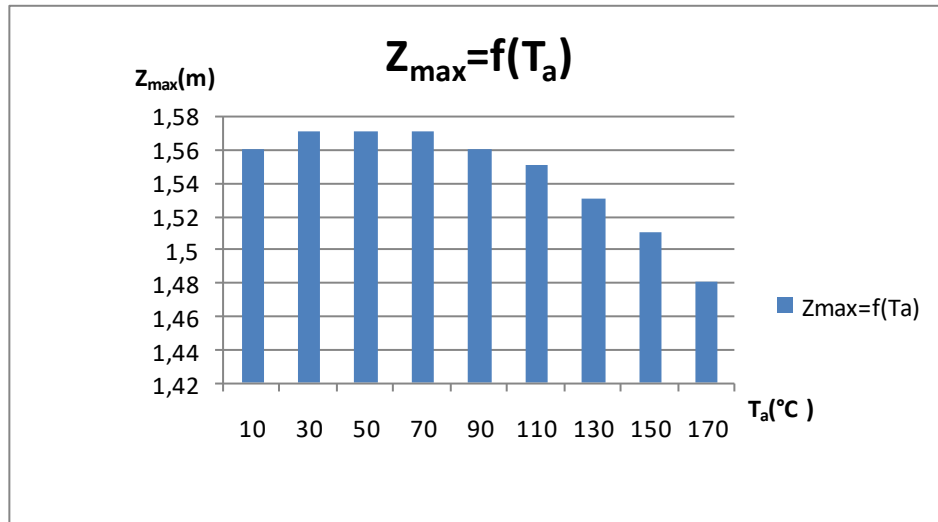


**Figure IV. 16 :** variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction de débit d'eau douce ( $Q_{boir}$ )

D'après la figure 16, on remarque l'augmentation du débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ ) provoque la diminution de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ).

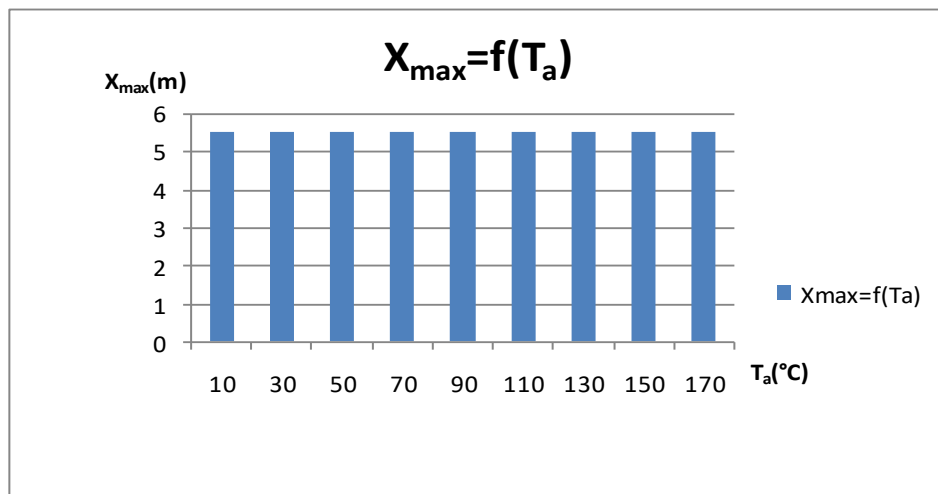
#### IV.1.4 Effet de température ambiante $T_a$

Les figures 17,18,19,20,21 montrent respectivement la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ), la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ), la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ), la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ), la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ), en fonction de la température ambiante  $T_a$ .



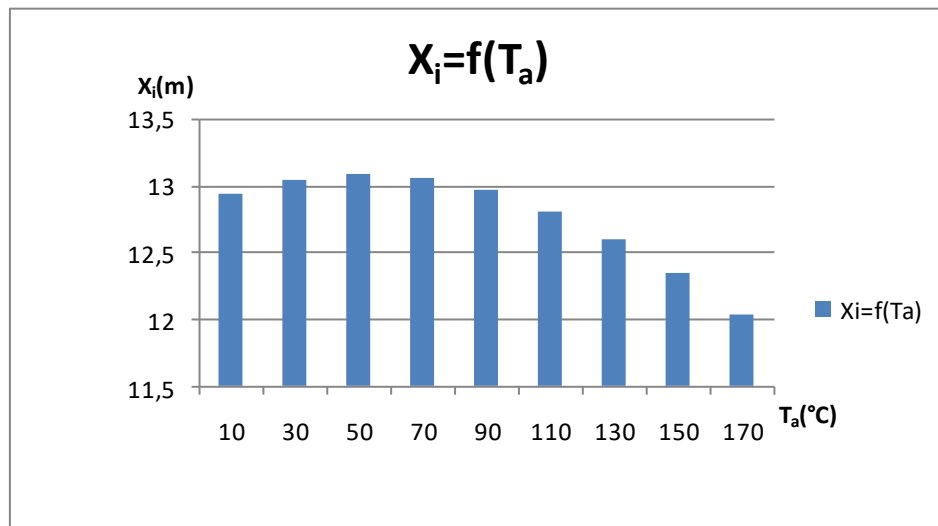
**Figure IV.17:** variation de la hauteur maximale d'élévation ( $Z_{max}$ ) en fonction température ambiante  $T_a$

La figure 17 on remarque que la hauteur d'élévation ( $Z_{max}$ ) augmente pour l'élévation de la température jusqu'à 70°C, par contre au-delà de cette température la hauteur commence à diminuer.

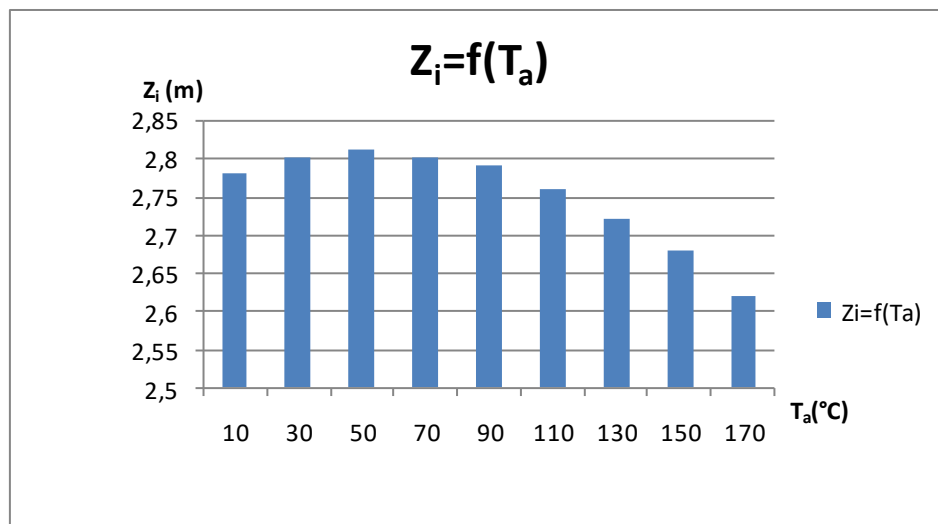


**Figure IV.18:** variation de la Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ) en fonction température ambiante  $T_a$

D'après la figure 18, on remarque que la variation de la température ambiante n'influe pas sur Position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{\max}$ ).

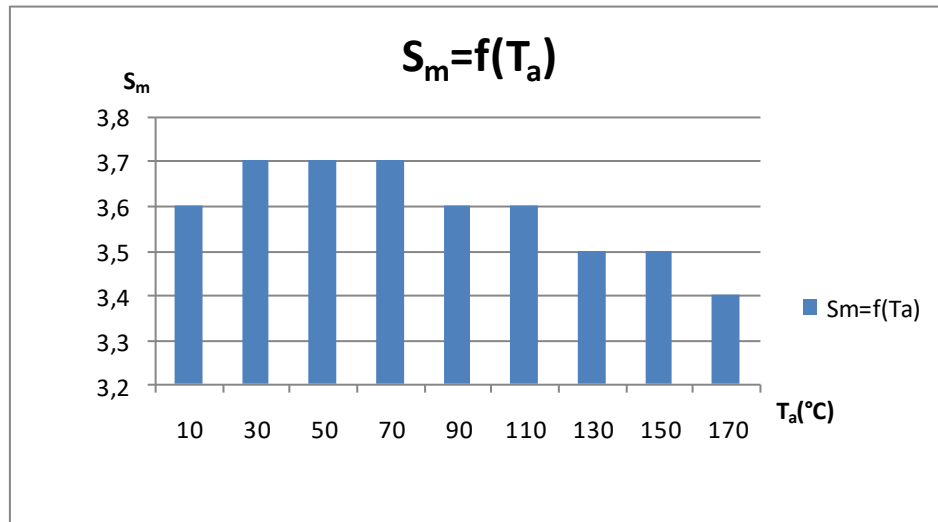


**Figure IV.19:** variation de la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) en fonction température ambiante  $T_a$



**Figure IV.20:** variation de la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ) en fonction température ambiante  $T_a$

D'après la figure 19, 20, on remarque que la Position horizontale au point d'impact ( $X_i$ ) et la Position verticale du pic de la ligne centrale ( $Z_i$ ) augmente pour l'élévation de la température jusqu'à 70°C, par contre au-delà de cette température ces derniers commencent à diminuer.



**Figure IV.21:** variation de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) en fonction température ambiante  $T_a$

D'après la figure 21, on remarque que pour des températures allant de 0 à 30 dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) augment jusqu'à atteindre la valeur 3.7, puis pour des températures allant 30 à 70 la dilution reste constante, enfin pour des températures supérieures à 70 la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ) diminue.

## IV.2 Résultats obtenus avec la CFD

Plusieurs simulations sont effectuées pour étudier certains paramètres d'intérêts, comme la géométrie de la buse, positionnement de la buse et vitesse de circulation du rejet au niveau de la buse.

### IV.2.1 Buse verticale non apparente et positionnée à $y = 0,52$ m

Dans cette partie, on s'intéresse à présenter le comportement du fluide (l'hydrodynamique), lorsque la buse est intégrée à la paroi. Plusieurs vitesses d'entrée sont testées :  $U_0=0.68, 0.86, 0.96, 1.16$  m/s

La figure IV.22 montre les contours de la vitesse obtenus avec différentes vitesses d'entrée au niveau de la buse. On remarque que pour une faible vitesse d'entrée (0.68 m/s), le jet semble être instable, cependant, en augmentant la vitesse d'entée, il devient plus stable, ou il descend vers le bas de manière logique.

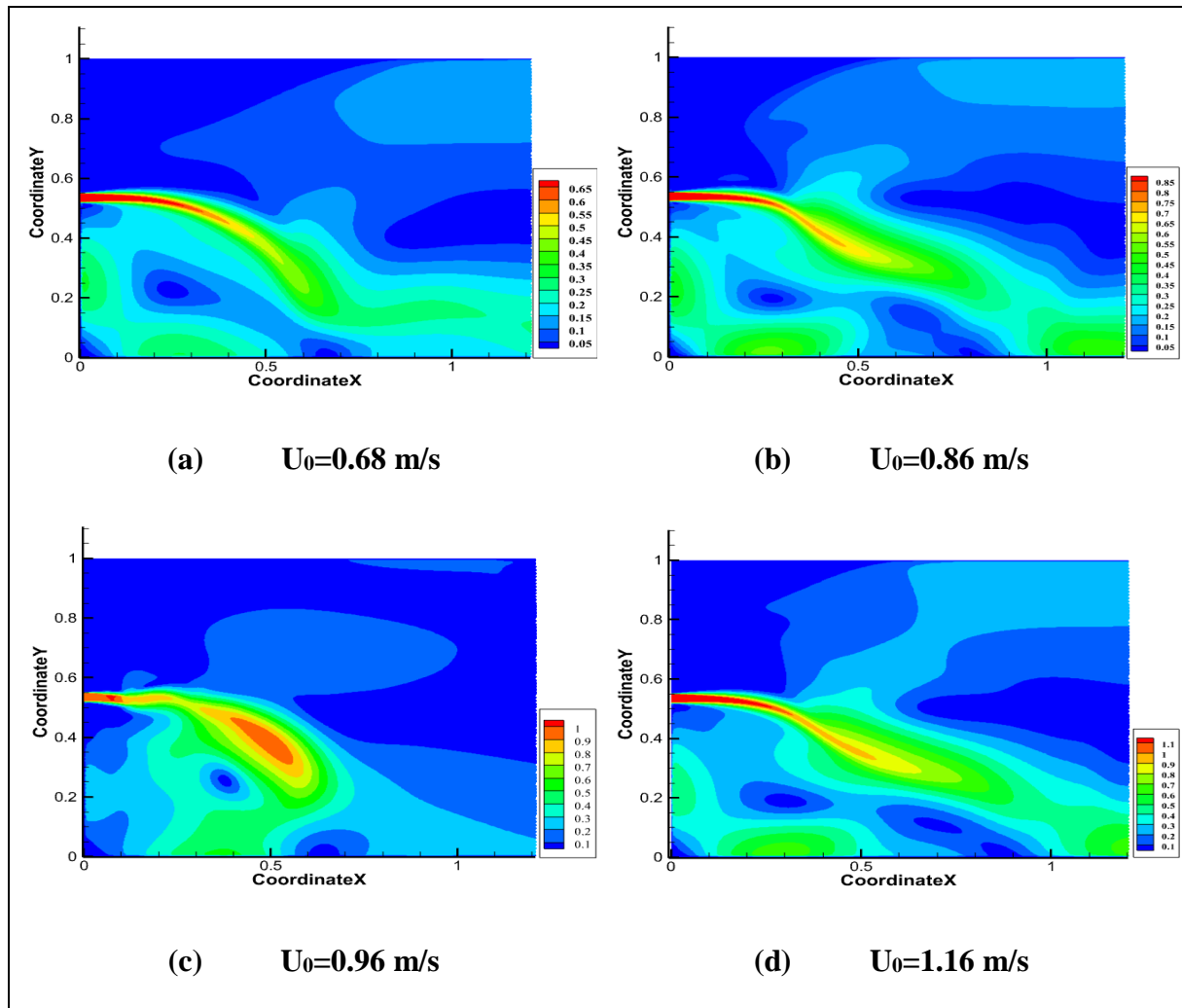


Figure IV.22: Contours de vitesse pour :(a), (b), (c), (d)

#### IV.2.2 Buse apparente et positionnée à $y = 0.52$ m

Ici, on présente les résultats de la simulation effectuées pour une buse apparente dont l'angle varie de  $0$  à  $60^\circ$  selon l'axe horizontal et cela pour différentes vitesses d'entrée ( $0.68$ ,  $0.86$ ,  $0.96$ ,  $1.16$  m/s).

- **Buse apparente horizontale ( $0^\circ$ )**

La figure IV.23 représente les champs de vitesse obtenus pour  $U_0=0.68$  ;  $0.86$  ;  $0.96$  ;  $1.16$  m/s, où on remarque que le comportement hydrodynamique du jet est quasi-identique et cela quel que soit la vitesse d'entrée du jet.

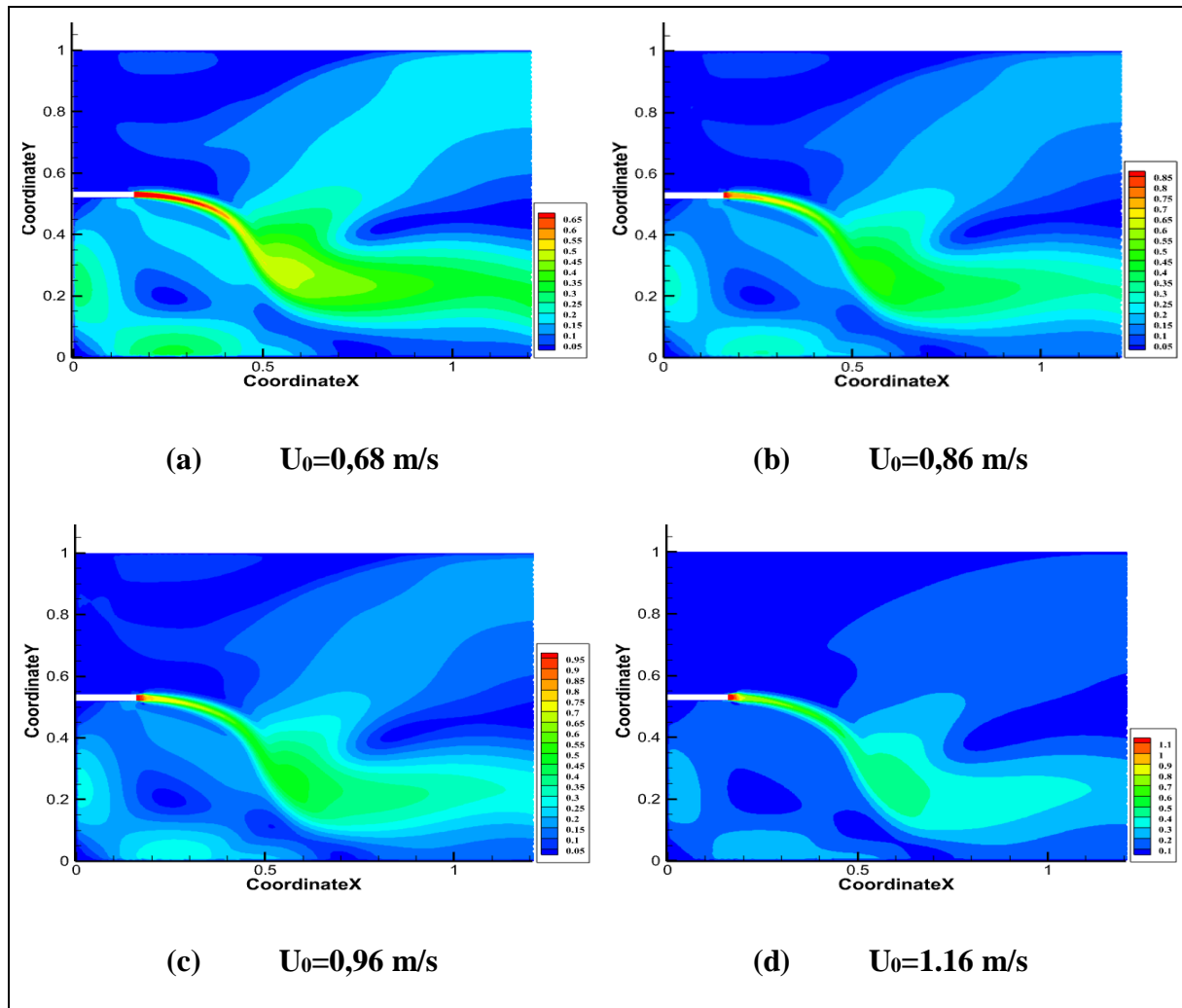
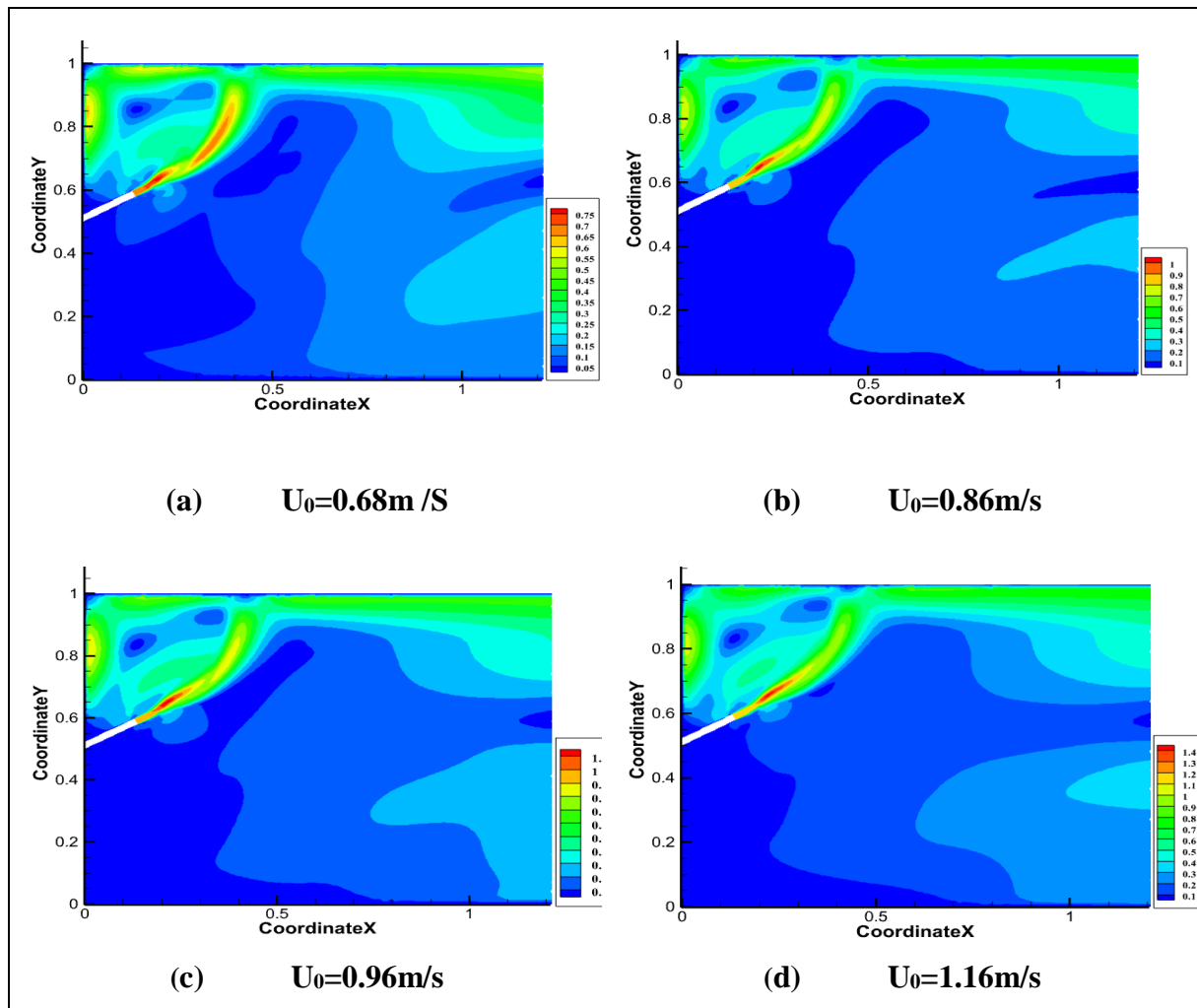


Figure IV.23: Contours de vitesse pour:(a), (b), (c), (d)

- **Buse apparente inclinée de  $30^\circ$  par rapport à l'axe horizontal et positionnée à  $y=0,50\text{m}$**

Les champs de vitesse montrés sur la figure IV.24 pour une inclinaison de  $30^\circ$  par rapport à l'axe horizontal indique une flottabilité positive du jet, et cela quel que soit la vitesse d'entrée, c'est-à-dire un jet qui monte vers le haut et qui ne redescend pas.

Ce comportement des champs hydrodynamiques est un phénomène inhabituel cela peut s'expliquer de différentes manières, comme le choix des conditions aux limites, la manière dont la gravité a été implémentée dans le code, le modèle de turbulence choisi, les dimensions du domaine ou bien le mode stationnaire adopté dans cette étude.



**Figure IV.24:** *Contours de vitesse pour:(a), (b), (c), (d)*

Cependant, il est intéressant de noter que lorsque la buse apparente est positionnée à l'axe  $y=0$  m, on obtient un comportement logique du jet et qui concorde avec ceux obtenus dans plusieurs références [21]. Comme montré dans la figure suivante obtenue pour un angle de  $30^\circ$  par rapport à l'axe horizontal.

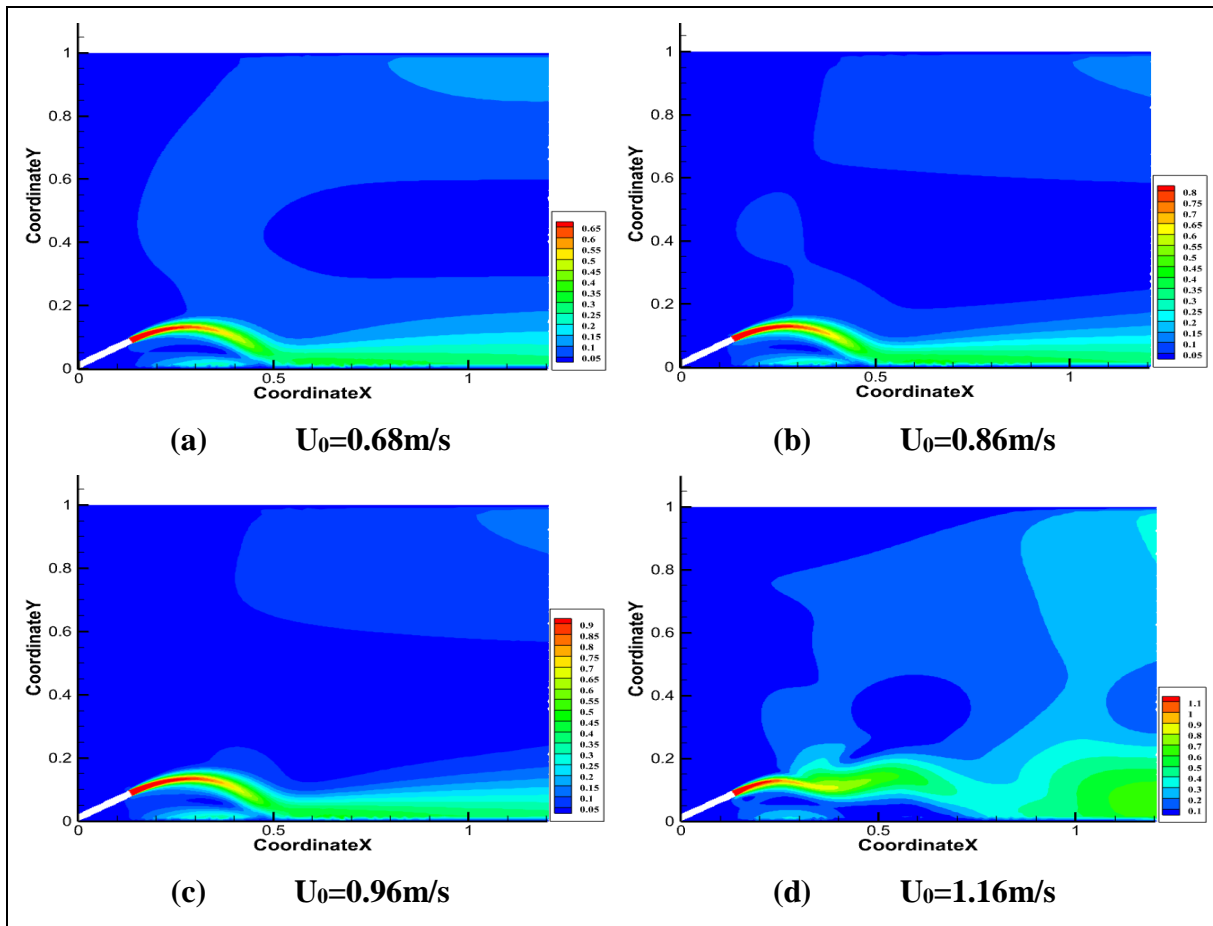


Figure IV.25: Contours des vitesses pour:(a), (b), (c), (d)

### Conclusion générale

Ce manuscrit se focalise sur l'étude des rejets de saumure des usines de dessalement de l'eau de mer en utilisant l'approche à échelle de longueur et la mécanique des fluides numériques.

Pour ce faire, on a étudié ces rejets en utilisant le calculateur développé par Bleninger et al afin d'obtenir les caractéristiques des jets, plusieurs paramètres ont été étudiés et nous avons remarqué que :

- L'augmentation de la salinité ( $Sal_a$ ) provoque une diminution des caractéristiques géométriques du jet.
- L'augmentation de l'angle de décharge du jet  $\theta_0$  de 0 à 45° provoque l'augmentation de la position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ), puis sa diminution pour les angles  $\theta_0=60^\circ$ ,  $75^\circ$  et devient négatif pour l'angle  $\theta_0=90^\circ$
- L'augmentation du débit de l'eau douce ( $Q_{boire}$ ) provoque l'augmentation des caractéristique géométrique du jet.
- L'augmentation du débit d'eau douce ( $Q_{boire}$ ) qui provoque la diminution de la dilution minimale de la ligne médiane au point de retour ( $S_m$ ).
- La variation de la température ambiante n'influe pas sur la position horizontale de la crête de la ligne centrale ( $X_{max}$ ).

Dans la partie simulation numérique, après avoir élaboré le modèle mathématique, Nous avons testés les configurations suivantes :

Lorsque la buse est intégrée à la paroi, plusieurs vitesses d'entrée sont testées :  $U_0=0.68$ , 0.86, 0.96, 1.16 m/s, Buse apparente horizontale ( $0^\circ$ ) et positionnée à  $y = 0.52m$  pour  $U_0=0.68$  ; 0.86 ; 0.96 ; 1.16 m/s, buse apparente horizontale ( $0^\circ$ ) et positionnée à  $y = 0.52m$  pour  $U_0=0.68$  ; 0.86 ; 0.96 ; 1.16 m/s, Buse apparente inclinée de  $30^\circ$  par rapport à l'axe horizontal et positionnée à  $y=0,50m$ , la buse apparente est positionnée à l'axe  $y=0m$  et nous avons constaté respectivement que :

- L'augmentation de la vitesse d'entrée dans le premier cas entraîne l'instabilité de l'écoulement, à faible nombre de Reynold  $Re < 1500$ , le jet semble être instable. Puis à partir de  $Re > 1500$  l'écoulement devient plus stable, ou il descend vers le bas de manière logique
- On remarque dans le deuxième cas que le comportement hydrodynamique du jet est quasi-identique et cela quel que soit la vitesse d'entrée du rejet.
- Les champs de vitesse montrés dans le troisième cas indique une flottabilité positive du jet, et cela quel que soit la vitesse d'entrée, c'est-à-dire un jet qui monte vers le haut et qui ne

redescend pas.

Ce comportement des champs hydrodynamiques est un phénomène inhabituel cela peut s'expliquer de différentes manières, comme le choix des conditions aux limites, la manière dont la gravité a été implémentée dans le code, le modèle de turbulence choisi, les dimensions du domaine ou bien le mode stationnaire adopté dans cette étude.

- Cependant, il est intéressant de noter que lorsque la buse apparente est positionnée à l'axe  $y=0m$ , on obtient un comportement logique du jet et qui concorde avec ceux obtenus dans plusieurs références [21]. Obtenue pour un angle de  $30^\circ$  par rapport à l'axe horizontal.

## Références bibliographiques

- [1]: Le dessalement de l'eau de mer [en ligne]. Disponible sur :  
« <https://dessalementdeleaudemerblog.wordpress.com/2017/02/04/introduction/> ». (Consulté en décembre 2021).
- [2]: Publié par Mousteau, article : le dessalement de l'eau de mer [en ligne]. Disponible sur :  
« <https://dessalement.wordpress.com> ». (Consulté en décembre 2021).
- [3]: (Degremont, 2005 : Mémento technique de l'eau, 10èmeEd., Edition Lavoisier, Paris, vol.1 : pp. 575-581.)
- [4]: (Horne. R. A, 1969: Marine chemistry the structure of water and the chemistry of the hydrosphere, Wiley-Interscience.)
- [5]: (Rejsek. M, 2002 : Analyse des eaux, aspect réglementaire et technique, série science et technique de l'environnement, Paris.)
- [6]: (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : Le changement climatique et l'eau, Document technique rédigé sous la responsabilité de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II du GIEC.
- [7]: :«<https://condorchem.com/fr/blog/traitement-des-eaux-salines-ou-saumures-dans-lindustrie/> ». (Consulter le 17 janvier 2022).
- [8]: «[http://eduterre.enslyon.fr/ressources/scenario1/planetebleue/techniques\\_desalinisation](http://eduterre.enslyon.fr/ressources/scenario1/planetebleue/techniques_desalinisation) », (Consulter le 17 novembre 2021).
- [9]: C. Galus, *Les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor*, extrait du Monde, 12 Janvier 2000, p.24.
- [10]: J. Matricon. *Vive l'eau*. Découvertes Gallimard. 2000.
- [11]: P. Danis. *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J 2700. Juin 2003
- [12]: <https://tpedessalementmaroc.weebly.com/distillation-agrave-effets-multiples.html>
- [13]: Dr Mehdi METAICHE « TECHNOLOGIE MEMBRANAIRE » 'Conférence'. Université de Bouira Juin 2014.
- [14]: Samaké. O, 2016 : Analyse thermo-économique d'un système de dessalement par thermocompression de vapeur et conception de l'éjecteur, Sherbrooke (Québec) Canada, PHD.
- [15]: Rawn, A.M., Bowerman, F.R. and Brooks, N.H., (1961), «Diffusers for disposal of sewage in sea water», Trans. ASCE., 126, 344-388

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [16]: Fan, L.N. et Brooks, N.H.0, (1967), «Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids», W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science California Institute of Technology, Report N° KH-R-15, Pasadena, California
- [17]: El-Dessouky and Ettouney (2002): Fundamentals of Sea Water Desalination (Appendix A: Thermodynamic Properties)
- [18]: Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979, Mixing in Inland and Coastal Waters”, Academic Press, New York
- [19]: Genthner, K., 2005, “Research and Development in Desalination – Current Activities and Demand”, Berlin, June 2005
- [20]: Holley, E.R. and Jirka, G.H., 1986, "Mixing and Solute Transport in Rivers", Field Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
- [21]: David Robinson, Matthew Wood Piggot et Gerard Gorman, " CFD modeling of marine discharge mixing and dispersion», Septembre 2015.
- [22]: G.H. Jirka, T. Bleninger, R. Burrows and T. Larsen, Environmental Quality Standards in the C-Water Framework Directive: Consequences for Water Pollution Control for Point Sources, European Water Management Online (EWMO), January 26, 2004.]
- [23]: G.H. Jirka, Optimal discharge configuration for brine effluents from desalination plants, J. Hydraul. Eng., submitted.
- [24]: Tobias Bleninger, Anne Niepelt, Gerhard Jirka (2009), article, «Desalination plant discharge calculator », Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe.
- [25] : L. MARAR, R. MOUAS, (2019), mémoire fin d'étude, « modélisation numérique d'un écoulement a l'intérieure d'un modèle membranaire.
- [26]: Spalding. D. B, (1979), Mathematical Model of Turbulent Transport Processes, Imperial College, Mechanical Engineering Department.