

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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 de cycle*

*En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Mécanique*

*Option :*

*Energétique*

# Thème

*Simulation numérique de l'écoulement à  
l'intérieur d'un module membranaire*

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>r</sup>. AMOKRANE Mounir**

**Réalisé par :**

**M<sup>r</sup>. REZAOUI Malik**

**M<sup>r</sup>. TALEB Mohamed-Ouali**

Promotion: 2020/2021



## ***Remerciements***

*Tout travail dans la vie nécessite en premier lieu la bénédiction de dieu, et ensuite l'aide et le support de plusieurs personnes.*

*Nous tenons donc à remercier vivement notre encadreur, Mr Amokrane Mounir, pour avoir proposé et dirigé ce travail. Son aide et sa disponibilité nous ont été d'une grande utilité.*

*Nos sincères remerciements aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire.*

*Enfin, nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué, par un soutien scientifique et/ou technique au parachèvement de cette étude.*

## ***Dédicaces***

***Je dédie ce modeste travail :***

*A mon grand-père que dieu l'accueille en paradis*

*A mes parents, et bien sûr à mes frères,*

*A toute ma famille, et mes ami(e)s,*

*A mon binôme Mohamed Ouali.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation*

*De ce projet, je vous dis merci*

*Et à toutes la promotion de Génie Mécanique 2020/2021.*

***REZAOUI Malik***

## ***Dédicaces***

***Je dédie ce modeste travail :***

*A toutes ma famille, et mes amis*

*A mon binôme Malik*

*A tous camarades et profs de mon parcours scolaire et universitaire et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, je vous dis merci.*

***TALEB Mohamed-Ouali***

## Résumé

Ce travail, a pour objectif d'étudier le comportement hydrodynamique d'un écoulement bidimensionnel en régime laminaire (stationnaire), pour un fluide (eau de mer) incompressible avec transfert de masse à l'intérieur d'un canal membranaire du module spiralé d'osmose inverse. Nous avons esquissé et maillé la géométrie d'intérêt avec le logiciel de génération de maillage Gambit 2.4.6. Pour les simulations, nous avons utilisé le logiciel CFD Fluent 6.3.26 basé sur la méthode des volumes finis, afin de résoudre le système géométries ( ellipses de différents diamètres 0.5, 1 et 1.5 mm), quatre nombres de Reynolds ( 100, 120, 240 et 380) et différents fraction massique en sel à l'entrée  $m_{A0}$  ( 0.002,0.004 et 0.05 kg/kg) . Les résultats obtenus, montrent que le développement de la couche de polarisation de concentration est un phénomène compliqué qui est influencé par toutes les principales variables du processus étudié : hydrodynamique (vitesse), fraction massique en sel à l'entrée, la dimension du l'ellipses.

**Mots clés :** Dessalement, Osmose Inverse, Module membranaire, simulation numérique.

## Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>i</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenclature.....</b>	<b>xiv</b>
<b><i>Introduction générale.....</i></b>	<b><i>1</i></b>

## Chapitre I : Généralités sur le dessalement membranaire

<b><i>Introduction .....</i></b>	<b><i>3</i></b>
<b><i>I.1. . Le dessalement .....</i></b>	<b><i>3</i></b>
I.1.1. Définition .....	3
I.1.2. Techniques de dessalement .....	3
I.I.2.1 Procédés de distillation .....	4
I.I.2.2 Procédés membranaires .....	4
I.1.3. Différents systèmes de dessalement .....	4
I.1.4. Les techniques de filtrations membranaires .....	5
• Microfiltration .....	5
• Ultrafiltration .....	5
• Nano filtration .....	5

---

• Osmose inverse .....	5
<i>I.2. L'osmose inverse</i> .....	5
I.2.1. Principe .....	6
I.2.2. Utilisation .....	6
✓ Désalinisation .....	6
✓ Filtration pour ménages .....	7
✓ Aquariophilie .....	8
✓ Utilisations industrielles .....	8
I.2.3. Inconvénients .....	9
<i>I.3. Procédés membranaires</i> .....	9
I.3.1. Caractérisation des membranes .....	9
I.3.1.1. Définition du taux de conversion .....	9
I.3.1.2. Définition de la sélectivité .....	10
I.3.1.3. La pression osmotique .....	12
I.3.1.4. Transfert de solvant et de soluté .....	13
I.3.1.4.1 Flux de solvant .....	13
I.3.1.4.2 Flux de soluté .....	13
I.3.2. Structure des membranes .....	14
I.3.2.1. Membranes organiques .....	14
I.3.2.2. Membranes minérales ou inorganiques .....	14
I.3.2.3. Membranes composites .....	15
I.3.2.4. Membranes échangeuses d'ions .....	15
I.3.3. Les modules membranaires .....	15
I.4.1. Les modules tubulaires.....	16
I.4.2. Les modules fibres creuses.....	17
I.4.3. Les modules plans .....	17
I.4.4. Les modules spiralés .....	18
 <i>Etude bibliographiques</i> .....	 20

---

*Conclusion* .....21

## Chapitre II : Formulation mathématique

*Introduction* ..... 22

*II.1. Description mathématique du problème physique.*..... 22

*II.2. Equations de transport* ..... 23

II.2.1.1. Equation de continuité.....23

II.2.1.2. Equations de Navier-Stokes.....24

II.2.1.3. Equation de transfert de masse (transport d'espèces).....25

*II.3. Propriétés du fluide et conditions aux limites* ..... 26

II.3.1. Propriétés du fluide .....26

II.3.2. Conditions aux limites .....26

*II.4. Paramètres d'intérêt* ..... 27

II.4.1. Le nombre de Reynolds.....27

II.4.2. Le cisaillement .....27

II.4.3. La perte hydraulique par unité de longueur .....27

II.4.4. La polarisation de concentration. ....28

*Conclusion* ..... 29

## Chapitre III: Processus de la simulation

*Introduction* ..... 30

*III.1. Présentation du logiciel Gambit 2.4.6* ..... 30

<i>III.2. Présentation du logiciel Fluent 6.3.26</i> .....	31
<i>III.3. Etapes de la simulation sous Gambit et Fluent</i> .....	32
<i>III.4. Esquisse de la géométrie sur Gambit 2.4.6</i> .....	33
a) Création des points .....	33
b) Création des lignes .....	34
c) Création des ellipses .....	34
d) Soustraction des faces .....	35
e) Création des faces .....	35
III.4.1. Maillage de la géométrie .....	36
III.4.1.1. Maillage des lignes .....	36
III.4.1.2. Maillage des faces .....	36
III.4.2. Conditions aux limites et définition du domaine .....	37
<i>III.5. Simulation sous Fluent 6.3.26</i> .....	38
III.5.1. Vérification de la géométrie importée .....	39
III.5.2. Définition du régime d'écoulement .....	40
III.5.3. Définition de l'équation de transport du sel .....	40
III.5.4. Propriétés du fluide utilisé .....	41
III.5.5. Les conditions aux limites .....	41
III.5.6. Contrôle de solution .....	45
III.5.7. Définition des critères de convergence des résidus .....	46
III.5.8. Initialisation des calculs .....	47
III.5.9. Lancement des calculs itératifs .....	47
<b>Conclusion</b> .....	<b>48</b>

## Chapitre IV: Résultats et discussion

<b>Introduction</b> .....	<b>49</b>
<i>IV.1. Variation du nombre de Reynolds et la fraction massique en sel à l'entrée.</i>	<i>49</i>
IV.1.1. Les champs de vitesse .....	49
IV.1.2. Les contours de la pression statique.....	50
IV.1.3. Les contours de la fraction massique en sel .....	51
IV.1.4. Les profils de cisaillement .....	52
IV.1.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure...	53
A) Comportement de la polarisation de concentration à différentes vitesses d'entrée de la solution aqueuse de NaCl .....	53
IV.1.6. Les pertes hydrauliques .....	54
<i>IV.2. Variation du rapport <math>b/a</math> des ellipses</i> .....	<i>56</i>
IV.2.1. Les champs de vitesse .....	56
IV.2.2. Les contours de la pression statique.....	57
IV.2.3. Les contours de la fraction massique en sel .....	58
IV.2.4. Les profils de cisaillement .....	59
IV.2.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure ..	60
IV.2.6. Les pertes hydrauliques .....	61
<i>IV.3. Variation de la distance de l'inter-filament</i> .....	<i>62</i>
IV.3.1. Les champs de vitesse .....	62
IV.3.2. Les contours de la pression statique.....	64
IV.3.3. Les contours de la fraction massique en sel .....	65
IV.3.4. Les profils de cisaillement .....	66
IV.3.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure ..	66
IV.3.6. Les pertes hydrauliques .....	67
<b>Conclusion</b> .....	<b>68</b>

*Conclusion général* .....69

*Références bibliographiques* .....70



Liste des figures

Figure	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Schéma d'un système à Osmose Inverse utilisé pour la désalinisation, employant un échangeur de pression [10].	6
Figure I.2	Comparaison entre filtration classique (ou frontale) et filtration tangentielle.	10
Figure I.3	Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration	11
Figure I.4	Schéma d'un module tubulaire	16
Figure I.5	Modules à fibres creuses.	17
Figure I.6	Schéma d'un module plan	18
Figure I.7	Structure interne d'une membrane à spirale [19].	19
Figure II.1	Module membranaire SWM et le domaine bidimensionnel à étudier	21
Figure II.2	Le phénomène de la polarisation de concentration obtenu à partir d'un interférogramme [23].	28
Figure III.1	Interface de logiciel Gambit2.4.6	31
Figure III.2	Interface de logiciel Fluent6.3.26.	31
Figure III.3	Module membranaire [24-25].	32
Figure III.4	Dimensions de la géométrie de référence à simuler numériquement	32
Figure III.5	Création des points sous Gambit.	33
Figure III.6	Création des lignes sous Gambit	34
Figure III.7	Création des ellipses sous Gambit	34
Figure III.8	Soustractions les ellipses sous Gambit	35
Figure III.9	Création des faces sous Gambit.	35
Figure III.10	Maillage des lignes sous Gambit.	36
Figure III.11	Maillage des faces sous Gambit	37
Figure III.12	Conditions aux limites et définition du domaine.	37
Figure III.13	Exportation du fichier 'msh'	38
Figure III.14	Choix du 2D, double précision sur Fluent 6.3.2	38
Figure III.15	Importation du fichier 'msh'.	39

Figure III.16	Vérification des données sous Fluent	39
Figure III.17	Définition du solveur	40
Figure III.18	Fenêtre de L'UDS	40
Figure III.19	Définition de la nature de fluide et ses paramètres	41
Figure III.20	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 à l'entrée	42
Figure III.21	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 à la sortie	43
Figure III.22	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 aux deux murs	44
Figure III.23	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 d'eau	44
Figure III.24	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 à l'ellipse	45
Figure III.25	Contrôle des solutions sous fluent 6.3.26	45
Figure III.26	Fenêtre des résidus	47
Figure III.27	Initialisation des calculs.	47
Figure III.28	Lancement des calculs sous fluent 6.3.26.	48
Figure IV.1	Champs des vitesses (en m/s) à différents nombre de Reynolds	50
Figure IV.2	Contours des pressions statiques (en Pa) à différents nombres de Reynolds	51
Figure IV.3	Contours de la fraction massique en sel (en kg/kg) à différents nombres de Reynolds	52
Figure IV.4	Cisaillement pour différents nombres de Reynolds	53
Figure IV.5	Evolution du rapport de la fraction massique en sel pour différents $m_{A0}$ le long de la membrane inférieure (Ellipses $b/a = 1$ mm et $Re = 120$ ).	54
Figure IV.6	Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents nombres de Reynolds (Ellipses, $m_{A0} = 0.002$ kg/kg)	55
Figure IV.7	Les ellipses pour différents rapports b/a	56
Figure IV.8	Champs des vitesses (en m/s) pour différents diamètres	57
Figure IV.9	Contours des pressions statique (en Pa) pour différent diamètres	58
Figure IV.10	Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) à différents rapports de variation b/a.	59
Figure IV.11	Cisaillement pour différent rapport b/a pour les ellipses.	60

Figure IV.12	Profil de concentration le long de la membrane inférieure pour différents rapports b/a	60
Figure IV.13	Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents rapports b/a (Ellipses, $m_{A0} = 0.002$ kg/kg).	61
Figure IV.14	Les ellipses pour différentes distance inter-filament.	62
Figure IV.15	Les contours de vitesses (en m/s) pour différentes distance inter-filament	63
Figure IV.16	Les contours des pressions statiques (en Pa) pour différentes distances inter-filament.	64
Figure IV.17	Contours de la fraction massique du sel (en kg/ kg) pour différentes distance inter-filament.	65
Figure IV.18	Cisaillement pour différentes distance inter-filament de ces ellipses	66
Figure IV.19	Profil de concentration le long de la membrane inferieure pour différentes distance inter-filament	67
Figure IV.20	Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différentes distance inter-filament entre ces ellipses (Ellipses, $m_{A0} = 0.002$ kg/kg)	67

## Nomenclature

Symbole	Description	Unité
Y	Taux de conversion	-
$Q_p$	Débit massique du perméat	kg/s
$Q_0$	Débit massique du retentât	kg/s
TR	Taux de rejet	-
$C_0$	Concentration du sel en retentât	g/L
$C_p$	Concentration du sel en perméat	g/L
$m_A$	Fraction massique	kg/kg
$m_{AW}$	Fraction massique en sel au niveau des membranes	kg/kg
$m_{A0}$	Fraction massique en sel à l'entrée du canal membranaire	kg/kg
$\Pi$	Pression osmotique	Pa
I	Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte	-
C	Concentration molaire	mol. L <sup>-1</sup>
R	Constante des gaz parfaits	joule/kg.K
T	Température	°C
$J_{\text{solvant}}$	Flux de solvant	m.s <sup>-1</sup>
$J_{\text{soluté}}$	Flux de solute	kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
A	Perméabilité de la membrane	m.s <sup>-1</sup> .pa <sup>-1</sup>
S	Surface de la membrane	m <sup>2</sup>
$\Delta P$	Pression transmembranaire	Pa
$J_v$	Vitesse de perméation	m/s

## Nomenclature

B	Perméabilité moyenne de la membrane au soluté	$\text{m.s}^{-1}$
Re	Nombre de Reynolds	-
DAB	Coefficient de diffusion	$\text{m}^2/\text{s}$
P	Pression statique	Pa
P <sub>1</sub>	Pression statique au niveau de la ligne en aval de premier obstacle	Pa
P <sub>2</sub>	Pression statique au niveau de la ligne en amont de dernier obstacle	Pa
L <sub>m</sub>	Longueur de la membrane	mm
l <sub>1</sub>	Distance inter-filament entre deux obstacles elliptiques	mm
l	La distance entre deux point	mm
H	Hauteur du canal	mm
b/a	Rapport de variation	mm
u <sub>0</sub>	Vitesse d'entrée selon l'axe des X	m/s
V	Vitesse caractéristique du fluide	m/s
<b>Lettres grecques</b>		
μ	viscosité dynamique	Pa.s
ρ	Masse volumique du fluide	$\text{kg.m}^{-3}$
ν	Viscosité cinématique du fluide	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
∂	Dérivée partielle	-
∇	Gradient nabla	-

# **Introduction générale**

Parmi les bénédictions que Dieu nous a offertes, nous trouvons la grâce de l'eau qui est une source vitale, essentielle conditionnant la vie et l'existence des êtres vivants, comme dit le dicton « L'eau c'est la vie » sans cet élément la terre ne serait qu'un astre mort, semblable à ce que la lune est demeurée depuis sa création.

L'eau, une ressource essentielle car 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. Cette quantité d'eau est estimée suffisante. En effet l'eau est une ressource élémentaire à la vie, elle est indispensable pour l'homme.

Essentielle pour la vie, l'eau douce se trouve en quantité limitée sur terre et sa qualité est constamment menacée. Aujourd'hui, selon l'OMS, une personne sur trois dans le monde n'a pas assez d'eau pour répondre à ses besoins quotidiens.

Les statistiques prévoient que dans les prochaines décennies, un tiers de la population mondiale n'aura pas accès à l'eau. À l'échelle mondiale, le problème s'aggrave à mesure que les villes grandissent, que la population augmente et que l'agriculture, l'industrie et les ménages ont besoin d'eau en quantités toujours plus grandes. Cela risque de mettre gravement en péril le ravitaillement en eau douce d'une grande partie de l'humanité et par voie de conséquence d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de purification des eaux salines 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'Osмосe Inverse est le procédé le plus répandu dans ce domaine [1].

De nos jours, les chercheurs de nombreux pays se focalisent sur cette optique dans le but de perfectionner ce procédé, comme la conception de nouveaux modules membranaires et l'utilisation de nouveaux matériaux et cela dans le but de produire une plus grande quantité d'eau potable à un coût plus faible [1].

L'objectif de ce projet de fin d'études (PFE) consiste en la modélisation d'écoulement à l'intérieur des modules spiralés d'Osмосe Inverse en imposant des conditions aux limites et des paramètres de fonctionnement proches des écoulements réels.

Le présent manuscrit est scindé en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la partie théorique où nous abordons des techniques de dessalement de l'eau de mer, des notions de base sur les procédés membranaires et quelques travaux de recherche.. Le second chapitre, se focalisera sur la description du modèle physique, les conditions aux limites appliquées aux formulations mathématiques et les paramètres d'intérêt. Dans le troisième chapitre nous présentons les étapes suivies dans la construction de la géométrie d'intérêt sur le logiciel d'esquisse et de maillage Gambit 2.4.6, ainsi que la résolution des équations de transferts sur le logiciel CFD Fluent 6.3.26. Dans le quatrième chapitre, nous exposerons les différents résultats obtenus de la simulation que nous traitons en trois parties constitués par la variation de plusieurs paramètres d'étude tels que le nombre de Reynolds d'entrée, la fraction massique en sel d'entrée et les formes de l'obstacle à l'intérieur du canal. Et enfin nous clôturons le présent travail par une conclusion générale.

**Chapitre I**  
**Généralités sur le dessalement**  
**membranaire**

## Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les différents aspects des procédés membranaires, à savoir leur classifications, leurs principes de mise en œuvre, et les différentes configurations des modules membranaires. Nous terminerons ce chapitre par une revue bibliographique dédiée aux travaux activant dans notre domaine d'intérêt.

## I. Le dessalement

### I.1. Définition

Le dessalement de l'eau (également appelé **dessalage**) est un processus qui permet de retirer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation.

Il faut noter que très généralement, il est plus simple et plus rentable de rechercher des sources d'eau douces à traiter (eaux de surface telles que rivière, eau souterraine), plutôt que de dessaler de l'eau de mer. Cependant dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douces sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle [2].

D'autre part, il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité (notamment la production d'énergie, car la vapeur disponible à la sortie des turbines et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de dessalement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation )

L'eau de mer est salée à peu près à 35g/l en général. Dans des régions comme le Golf Persique, la salinité atteint 42g/l. Pour extraire le sel il faut d'un point de vue purement théorique de l'ordre de 563 Wh par m<sup>3</sup> [3].

### I.1.2. Techniques de dessalement

Les procédés de dessalement peuvent être regroupés en deux grandes familles [4] :

🚦 Procédés de distillation (ou d'évaporation).

✚ Procédés membranaires.

### I.I.2.1. Procèdes de distillation

La distillation est la technique de dessalement de l'eau de mer plus ancienne. Elle s'appuie les propriétés d'évaporation-condensation de l'eau. Elle conduit à la production d'une eau pure d'une solution concentrée.

Ce procédé thermique est un grand consommateur d'énergie. et les techniques les plus utilisés dans ces procédés sont :

1. Distillation multi-flash (MSF).
2. Distillation à multiples effets (MED).
3. Compression mécanique de vapeur (VC)

### I.I.2.2. Procédés membranaires

Les procédés membranaires mettent en jeu des barrières (appelées membranes) qui permettent de retenir les composants présents en phase aqueuse, sans changement de phase de l'eau. La force de transfert est, soit un gradient de pression (cas de l'Osmose Inverse et de nano filtration), soit un gradient de potentiel (cas de l'électrodialyse) [4].

Ils consomment donc de l'énergie hydraulique.

### I.I.3. Différents systèmes de dessalement

Parmi les systèmes les plus utilisés :

- Osmose inverse, technique membranaire. Les membranes utilisées ont des 'trous' si petit que même les sels sont retenus. Cette technique est en plein essor et a montré depuis plusieurs années sa fiabilité. La consommation est de l'ordre de:  $\approx 4-5 \text{ kWh/m}^3$ .
- Distillation multi-effets, système demandant beaucoup d'énergie, eau très pure :  $\approx 15 \text{ kWh/m}^3$ .
- Flash multi-étages, ou système flash utilisé dans les pays du Golfe, taux de sel résiduel non négligeable, coût énergétique important :  $\approx 10 \text{ kWh/m}^3$ .

- Compression de vapeur :  $\approx 5 \text{ kWh/m}^3$ .
- Distillation par dépression : la température d'évaporation dépend de la pression. Système très économique avec une eau très pure :  $\approx 2 \text{ à } 3 \text{ kWh/m}^3$ . Système utilisé pour de petites unités.
- Électrolyse : on applique un courant électrique qui fait migrer les ions vers les électrodes. Système très rentable pour les faibles concentrations, l'énergie à mettre en jeu dépend de la concentration en sel [5].

#### I.1.4. Les techniques de filtrations membranaires

Sur base du pouvoir séparateur des membranes, nous pouvons distinguer quatre principales techniques dans la technologie membranaire :

- **Microfiltration** : séparation de particules de +/- 0,1 jusqu'à 1  $\mu\text{m}$  (grandes protéines, levures, microorganismes, ...). Séparation physique en fonction de la taille des pores de la membrane. Des applications possibles dans le domaine de l'épuration des eaux sont p.ex. : séparation de microorganismes dans les eaux usées, séparation des émulsions d'huile-eau, traitement préliminaire des eaux usées et des eaux de procès pour nanofiltration ultérieure ou osmose inverse [6].
- **Ultrafiltration** : séparation de particules de 0,01 jusqu'à 0,1  $\mu\text{m}$  (substances organiques, émulsions d'huile, molécules protéiques telle que la gélatine, bactéries, etc.). La pression de travail habituelle se situe entre 3 et 5 bar [6].
- **Nano filtration** : séparation de particules de 0,001 jusqu'à 0,01  $\mu\text{m}$  (bactéries, germes, sucres, colorants, soufre, adoucissement de l'eau) [7].
- **Osmose inverse**: séparation de particules de 0,0001 jusqu'à 0,001  $\mu\text{m}$  (solutions salines, ions métalliques, nitrates, etc.). La pression de service habituelle se situe entre 10 et 60 bar [8].

#### I.2. L'osmose Inverse

L'osmose inverse est un système de purification de l'eau contenant des matières en solution par un système de filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau [8].

### I.2.1. Principe

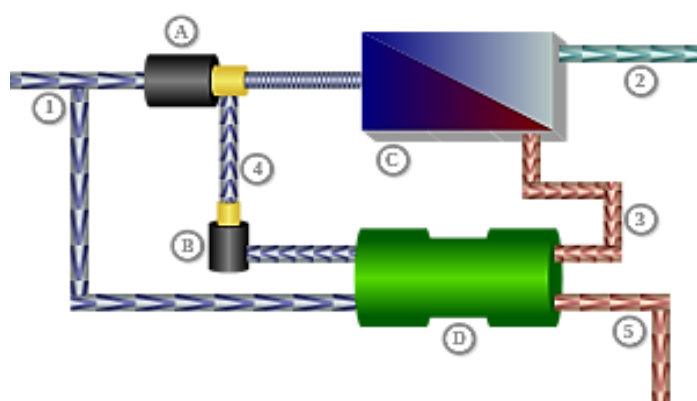
L'eau comporte des solutés, particulièrement des sels. Si deux solutions de concentrations différentes sont placées de chaque côté d'une membrane filtre, l'eau franchira la membrane par osmose jusqu'à ce que les concentrations s'équilibrent ou que la différence de pression dépasse la pression osmotique (le déplacement d'eau fait diminuer la concentration dans le compartiment où l'eau afflue et la fait augmenter dans le compartiment d'où elle vient). Inversement, en exerçant dans un des compartiments une pression hydrostatique qui dépasse la pression osmotique, on force l'eau à quitter le compartiment sous pression en dépit de l'augmentation de concentration en soluté qui s'y produit, et de la dilution qui se fait dans l'autre compartiment [9].

### I.2.2. Utilisation

La technologie d'Osiose Inverse est utilisée dans plusieurs domaines variés d'application, on cite :

#### ✓ Désalinisation

Ci-dessous un schéma représentatif d'un dispositif d'OI pour la désaliénation des eaux de mer et saumâtre.



**Figure I.1:** Schéma d'un système à Osmose Inverse utilisé pour la désalinisation, employant un échangeur de pression [10].

Avec ;

- 1 : entrée de l'eau de mer
- 2 : sortie de l'eau filtrée (40%)
- 3 : flux concentré (60%)
- 4 : flux de l'eau de mer (60%)
- 5 : concentré
- A : flux de la pompe à haute pression (40 %)
- B : pompe de circulation
- C : unité d'osmose avec membrane
- D : échangeur de pression

L'Osмосe Inverse est un procédé industriel efficace de désalinisation. Avec une pression de 50 à 80 bars – la pression osmotique de l'eau de mer étant d'environ 30 bars, environ 50 % de l'eau d'une eau de mer peut être extraite, le sel se retrouve concentré dans les 50 % restants.

#### ✓ **Filtration pour ménages**

L'Osмосe Inverse est également facilement accessible au particulier. Le but en est essentiellement la diminution de la dureté de l'eau, ce qui en rend l'utilisation plus agréable et protège les équipements en aval, mais aussi de supprimer les polluants (nitrates, résidus de pesticides, etc.) et d'en améliorer le goût par l'élimination des composés chlorés.

Les osmoseurs sont alors composés de cartouches. Les modèles les plus répandus utilisent trois cartouches. La première cartouche est un filtre à sédiments d'une porosité de 5 à 10  $\mu\text{m}$ . Cette cartouche est destinée à retenir toutes les impuretés solides présentes dans l'eau. La deuxième cartouche est un filtre à charbon actif qui permet de neutraliser le chlore afin de protéger la membrane. Enfin la troisième cartouche démontable reçoit la membrane d'osmosse inverse. Cette cartouche comporte une sortie d'eau osmosée et une sortie des concentrats. Cette dernière sortie passe au travers d'un restricteur de débit qui participe aux jeux de pression. Il est essentiel au procédé d'Osмосe Inverse et influe sur le rendement. Un système manuel ou automatique de désactivation du restricteur est parfois ajouté pour permettre à la membrane d'être rincée [10].

✓ **Aquariophilie**

L'Osmose Inverse est très souvent utilisée en aquariophilie lors des changements d'eau partiels ou en complément :

- En utilisation mélangée avec l'eau du robinet afin de faire baisser la dureté. (L'eau du robinet est souvent trop dure pour une grande majorité de poissons qui vivent dans des eaux très peu minéralisées et acides) ;
- En utilisation pure avec adjonctions de sels minéraux afin de recréer une eau parfaite pour le biotope souhaité, ou lorsque l'eau du robinet est trop polluée pour être utilisée même mélangée ;
- En utilisation pure pour compenser l'évaporation (osmoleur) des aquariums afin de ne pas modifier les paramètres de l'eau du bac (technique surtout utilisée pour l'aquariophilie marine ou récifale).

✓ **Utilisations industrielles**

L'Osmose Inverse est également utilisée en horticulture pour l'arrosage des plantes calcifuges.

L'osmose inverse est utilisée pour produire de l'eau déminéralisée pour l'appoint d'eau de batteries d'accumulateurs électriques (traction ou marine).

Elle est aussi utilisée dans l'industrie pharmaceutique, ou des semi-conducteurs, où une eau pure est indispensable à la fabrication du produit.

Dans l'industrie agroalimentaire, elle est utilisée pour :

Concentrer le sucre de la sève de canne, du jus de betterave ou de l'eau d'érable ; on limite ainsi la consommation d'énergie pour évaporer l'eau dans la production du sirop ou de cristaux de sucre.

**I.2.3. Inconvénients.**

Parmi les inconvénients de l'Osmose Inverse, on cite [11] :

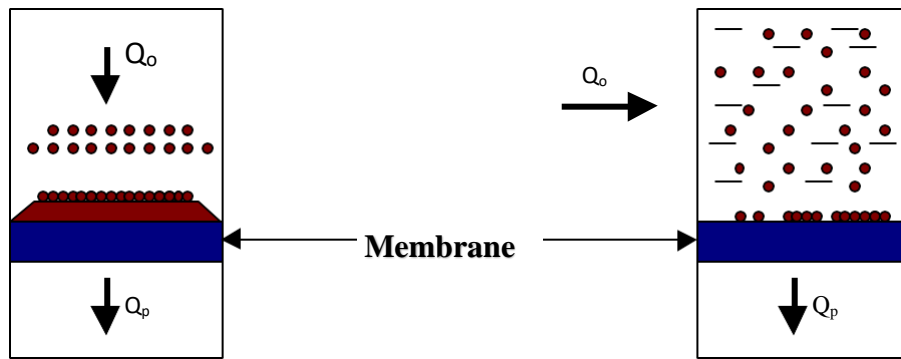
- Le coût des membranes qui se dégradent (notamment à cause des phénomènes de colmatage), lors du dimensionnement d'une installation d'osmose inverse, on tient compte en moyenne d'une durée de vie des membranes de l'ordre de 3 ans.
- Procédé énergivore (pompes de gavage) ;
- Le coût des membranes tend à diminuer ;
- L'énergie consommée par la pompe de gavage ;
- Les pertes en eau. En effet, le concentrat qui contient tous les sels qui n'ont pas traversé la ou les membranes, représente environ 25 % du débit entrant, pour des installations industrielles. Cette eau contient alors trop de sel pour l'agriculture et est donc inutilisable ;
- Pour les ménages, le taux d'eau rejetée oscille entre 3 L d'eau pour 1 L d'eau pure et cela peut monter à 15 L pour 1 L d'eau selon la pression osmotique.

**I.3. Procédés membranaires****I.3.1. Caractérisation des procédés membranaires**

Dans ce qui suit nous allons définir les principales caractéristiques d'un système membranaire.

**I.3.1.1. Taux de conversion**

L'écoulement du fluide à filtrer peut-être continu et tangentiel (cf. figure ci-dessous).



**Figure I.2** : Comparaison entre filtration classique (ou frontale) et filtration tangentielle[12].

La solution à traiter (débit  $Q_o$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes :

Une partie qui passe à travers la membrane ou perméat (débit  $Q_p$ )

Une partie qui ne passe pas à travers la membrane, appelée concentrat (débit  $Q_c$ ), et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

La fraction de débit du liquide qui traverse la membrane est appelée taux de conversion de l'opération de séparation [12] :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_o} \quad \text{I.1}$$

Dans le cas du traitement des eaux, c'est le perméat qui est le flux valorisé.

### I.3.1.2. Sélectivité

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

$$TR = \frac{c_0 - c_p}{c_0} = 1 - \frac{c_p}{c_0} \quad \text{I.2}$$

Avec

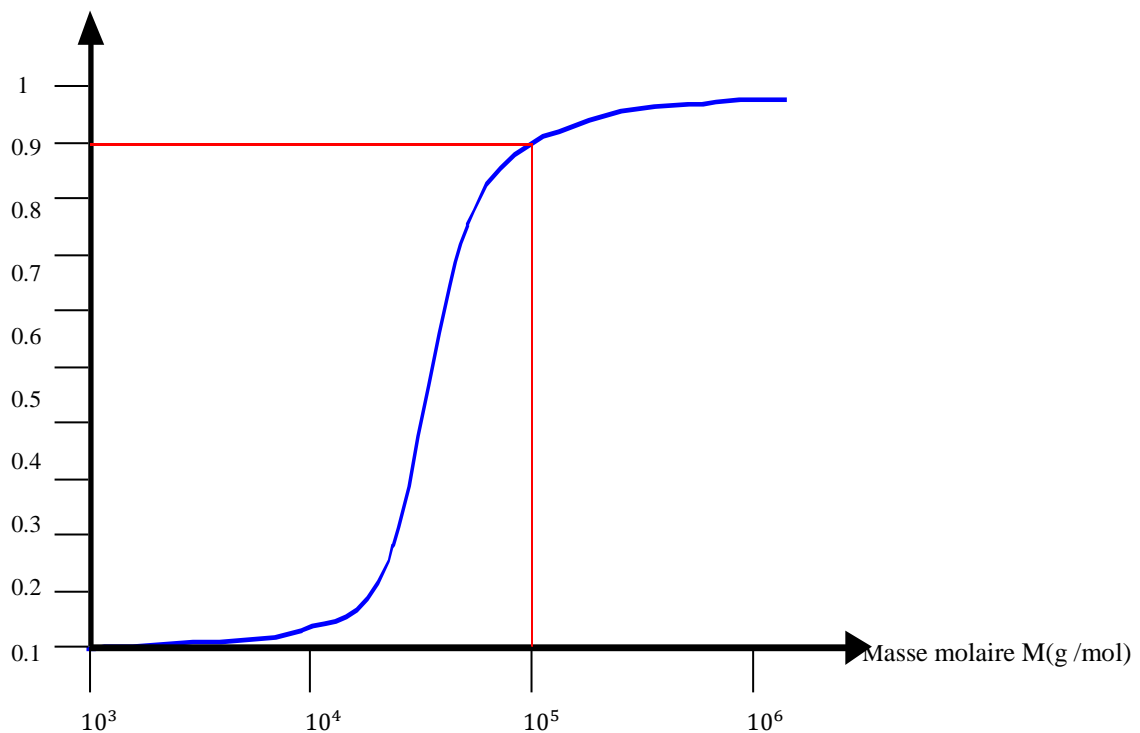
$C_o$  = concentration de l'espèce à retenir dans la solution

$C_p$  = concentration de la même espèce dans le perméat

Dans le cas de l'Osmose Inverse, le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium (NaCl), la déminéralisation des eaux étant l'application la plus importante. Certaines membranes développées pour le dessalement de l'eau de mer ont un taux de rejet au chlorure de sodium de 99 % environ. D'autres, développées pour le dessalement des eaux saumâtres, présentent un taux de rejet au NaCl de 96 %.

Dans le cas de l'ultrafiltration, l'efficacité de la membrane est en général caractérisée par le seuil de coupure (cut-off en anglais). Il s'agit de la masse molaire (g/mol) correspondant à une rétention pratiquement totale (90 % le plus souvent) d'une macromolécule déterminée [13].

Taux de rejet TR



**Figure I.3 :** Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration [13].

Cette notion de seuil de coupure n'a pas de sens dans le cas de l'osmose inverse. En effet, dans ce cas, des entités chimiques de même taille peuvent avoir, dans les mêmes conditions opératoires, des taux de rejets très différents. De même, cette notion n'a pas de sens en microfiltration malgré une certaine analogie sur le plan des mécanismes, les espèces retenues (micro-organismes, boues) ne pouvant être définies ni par une masse molaire ni par une taille en dehors d'un diamètre apparent ou équivalent.

Dans le cas de la microfiltration tangentielle, la sélectivité de la membrane est caractérisée, en général, par son diamètre de pore (0,45  $\mu\text{m}$  par exemple) [14].

### I.3.1.3. La pression osmotique

La pression osmotique se définit comme la pression minimale qu'il faut exercer pour empêcher le passage d'un solvant d'une solution moins concentrée à une solution plus concentrée au travers d'une membrane semi-perméable. La pression osmotique se caractérise quand la part de la fraction molaire du solvant aqueux n'est égale à 1.

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van 't Hof, qui exprime que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercée dans l'état gazeux dans le même volume et à la même température [15].

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en soluté

$$\Pi = I.C.R.T$$

**I.3**

Avec ;

$\Pi$  : pression osmotique [bar]

I : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : Concentration molaire [ $\text{mol. L}^{-1}$ ]

R : Constante des gaz parfait [ $0,082 \text{ L.bar.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

T : Température absolue [K].

### I.3.1.4. Transfert de solvant et de soluté

En osmose inverse, les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation-diffusion. Toutes les espaces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression.

Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont et sont liées au pouvoir de la membrane.

#### I.3.1.4.1. Flux de solvant

Le flux de solvant  $J_{\text{solvant}}$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et le débit volumique de solvant  $Q_p$  ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) traversant la membrane sont donnés par la relations [16].

$$J_{\text{solvant}} = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad \mathbf{I.4}$$

$$Q_p = A \cdot S \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad \mathbf{I.5}$$

Avec ;

A : perméabilité de la membrane [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pa}^{-1}$ ]

S : surface de la membrane [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta P$  : différence de pression de part et d'autre de la membrane [Pa]

$\Delta \Pi$  : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane [Pa].

#### I.3.1.4.2. Flux de soluté

Le flux massique  $J_{\text{soluté}}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) de soluté traversant la membrane est donné par la relation [16] :

$$J_{\text{soluté}} = B \cdot (C_r - C_p) \quad \mathbf{I.6}$$

B : est la perméabilité moyenne de la membrane au soluté [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$C_r$  et  $C_p$  : sont respectivement la concentration en soluté de l'alimentation et du perméat départ et d'autre de la membrane [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

### I.3.2. Structure des membranes

La structure des matériaux permet de distinguer trois types de membranes [17] :

- les membranes isotropes, elles ont des propriétés structurelles constantes sur leur épaisseur.
- les membranes anisotropes, leur structure composite varie de la surface de la membrane vers l'intérieur
- les membranes liquides.

Selon la nature des matériaux constitutifs des membranes on parle également de :

- Membranes organique
- Membranes minérales ou inorganique
- Membranes composites
- Membranes échangeuses d'ions

#### I.3.2.1. Membranes organiques

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.). Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constitués de membranes organiques [17].

#### I.3.2.2. Membranes minérales ou inorganiques

Ces techniques se sont diffusées plus tardivement que les membranes organiques. Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre). Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles voies dans la séparation par membrane.

Les membranes dites dynamiques sont fabriquées par l'utilisateur à partir de tubes poreux dont le diamètre des pores est compris entre 0.5 et 5  $\mu\text{m}$ . Une dispersion colloïdale

de zirconium associée à des copolymères est introduite à l'intérieur des tubes. Certaines de ces membranes peuvent trouver des applications en eaux usées [18].

### **I.3.2.3. Membranes composites**

Apparues au début des années 1990, elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tels le zircon, l'alumine et le titane) [18].

### **I.3.2.4. Membranes échangeuses d'ions**

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

## **I.3.3. Modules membranaires**

Les modules supportent les membranes, 4 grands types de modules sont commercialisés [19] :

Les modules tubulaires.

Les modules fibres creuses.

Les modules plans.

Les modules spiralés.

### I.3.3.1. Les modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent, voire très turbulent. A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations.

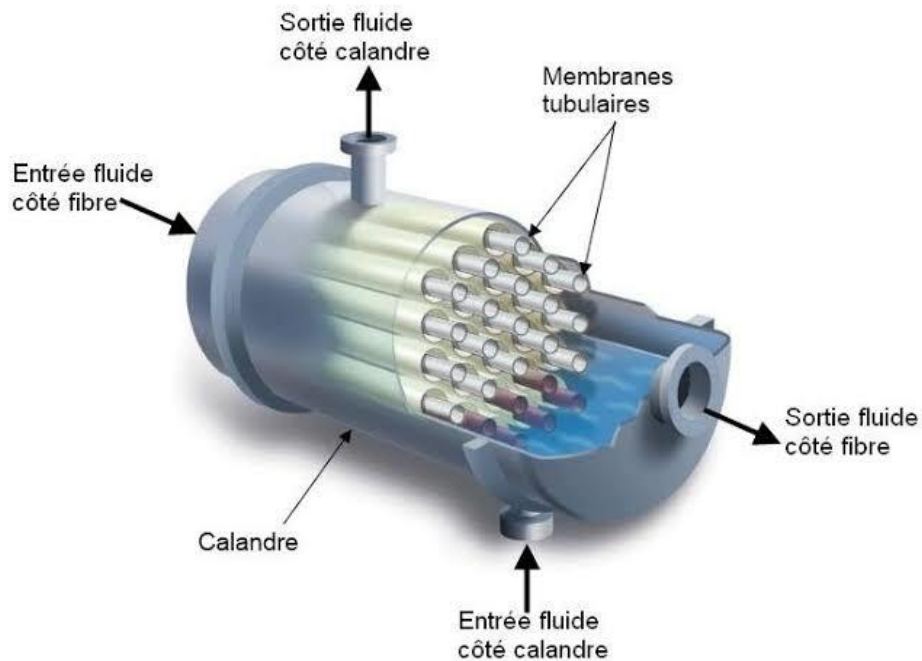


Figure I.4 : Schéma d'un module tubulaire [19].

### I.3.3.2. Les modules fibres creuses

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration Int-Ext (schéma a) : comme c'est le cas pour les modules, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a un écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres
- Configuration Ext-Int (schéma b et c) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

Dans les deux cas, les membranes sont assemblées en faisceaux et leurs extrémités sont noyées dans des bouchons de colle qui isolent le perméat de l'eau à traiter. Un module industriel peut être constitué de dizaines de milliers de fibres. Les fibres creuses supportent des rétrolavages. L'écoulement à l'intérieur des fibres creuses est, selon toutes probabilités, laminaire [19].

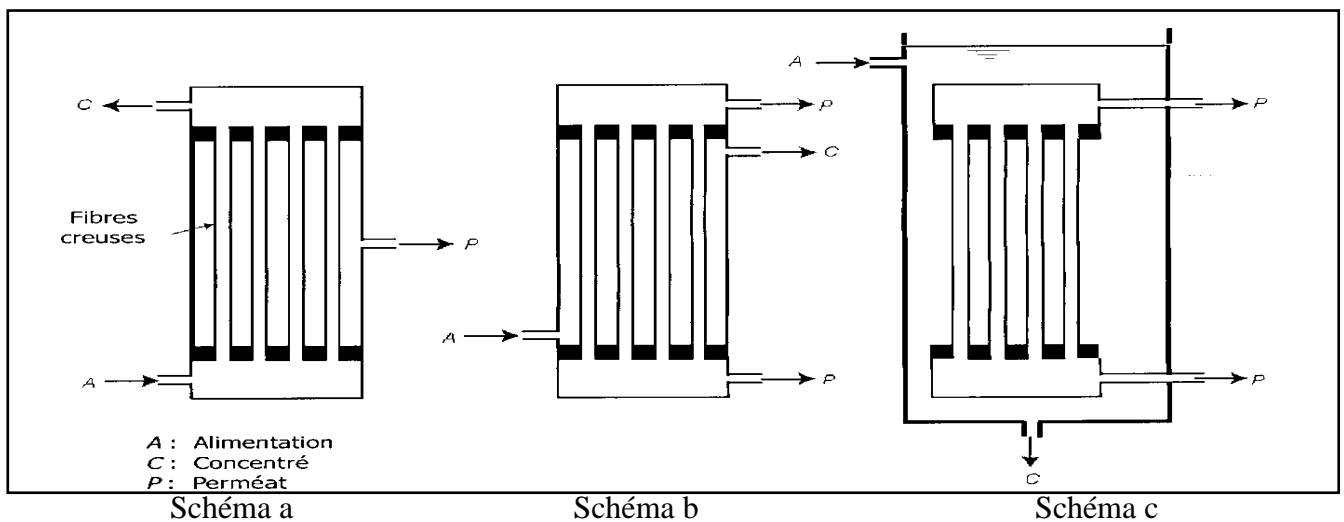
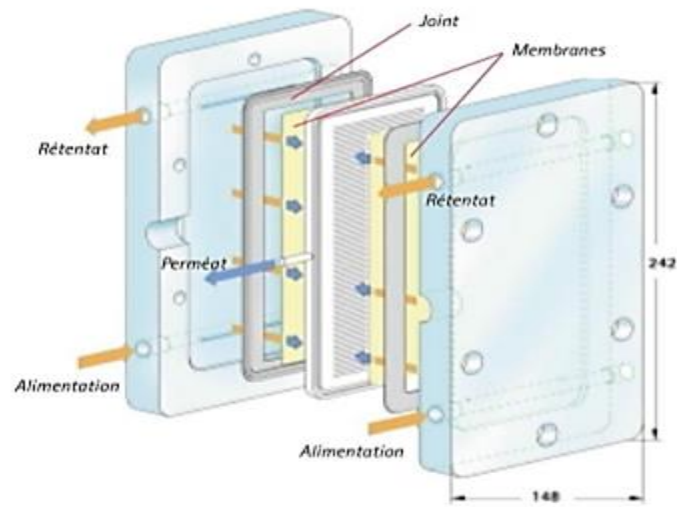


Figure I.5 : Modules à fibres creuses [19].

### I.3.3.3. Les modules plans

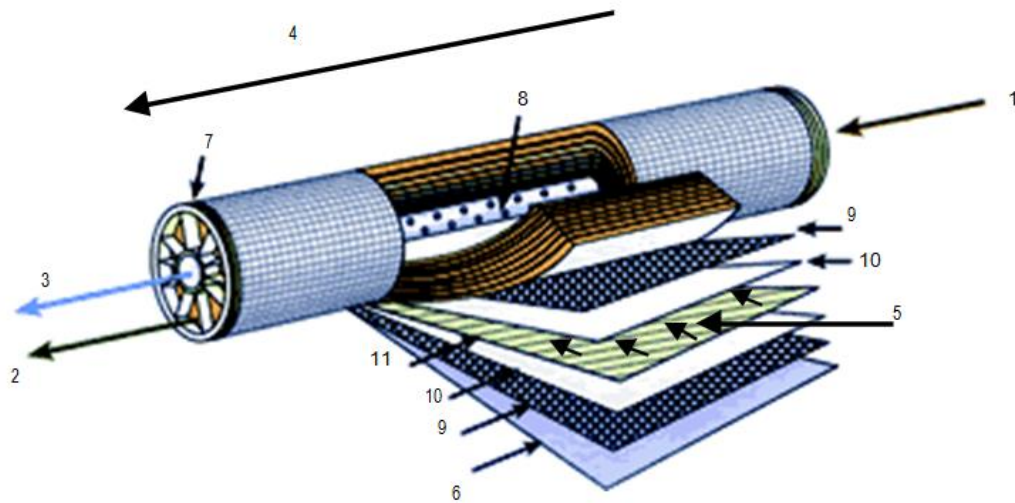
Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides [19].



**Figure I.6 :** Schéma d'un module plan [19].

#### I.3.3.4. Les modules spiralés

Au sein des modules spiralés, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multi-couches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.



**Figure I.7** : Structure interne d'une membrane à spirale [19].

Avec ;

- 1 Entrée d'eau
- 2 Sortie de concentrat
- 3 Sortie de perméat
- 4 Sens d'écoulement de l'eau brute
- 5 Sens d'écoulement du perméat
- 6 Matériau de protection
- 7 Joint d'étanchéité entre module et enveloppe
- 8 Perforations collectant le perméat
- 9 Espaceur
- 10 Membrane
- 11 Collecteur de perméat

#### I.4. Etude bibliographique

La recherche bibliographique dans cette thématique est assez extensive. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques travaux numériques qui ont traité cette problématique.

**Geraldes et al. [20]** ont développé un modèle mathématique pour prédire la polarisation de concentration dans les procédés d'Osmose Inverse et de Nanofiltration. Le modèle a été conçu pour prendre en considération le coefficient de rejection intrinsèque de la membrane et les variations des propriétés physiques des solutions aqueuses de chlorure de sodium (NaCl) en fonction de la concentration.

**A.L. Ahmad et al. [21]** ont introduit le flux de perméation et la concentration du perméat obtenu expérimentalement comme conditions aux limites dans le modèle numérique précédemment développé, dans le but de comparer les profils de concentration au niveau de la surface membranaire et de calculer le coefficient intrinsèque de rejection en fonction de la pression transmembranaire. La modélisation numérique a permis de reproduire les profils observés expérimentalement.

**Amokrane et al. [22]** ont présenté une étude numérique sur le phénomène de polarisation de concentration dans différentes configurations. Les prédictions numériques ont montré que pour les configurations en zigzag et immergées, le processus admet les meilleures performances avec un rapport de format ( $l / H = 4$ ). En général, l'augmentation de la distance entre les obstacles favorise le dépôt de sel sur les surfaces des membranes, ce qui réduit à la fois le flux de perméation et l'efficacité du transfert entre plusieurs espaceurs successifs qui favorise le dépôt de sel sur les surfaces des membranes, ce qui réduit à la fois le flux de perméation et l'efficacité du transfert.

L'étude suggère la réduction de la distance inter- filaments comme moyen de contrôler le développement de la polarisation de la concentration.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la technologie du dessalement (différentes techniques, systèmes) et aussi parlé des différents procédés membranaires et leurs domaines d'application. Enfin, nous avons évoqué quelques travaux de recherche dans notre thématique.

# **Chapitre II**

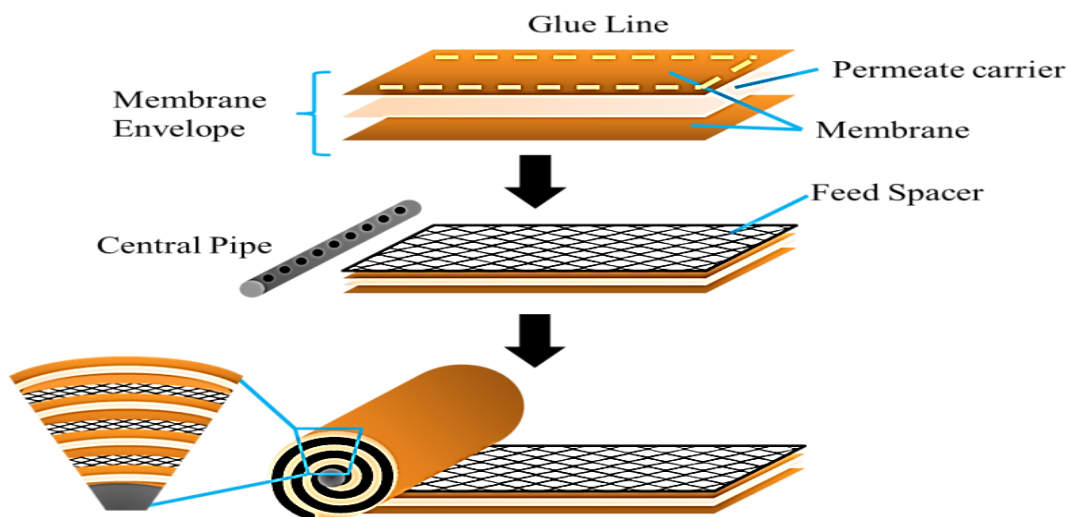
## **Formulation mathématique**

## Introduction

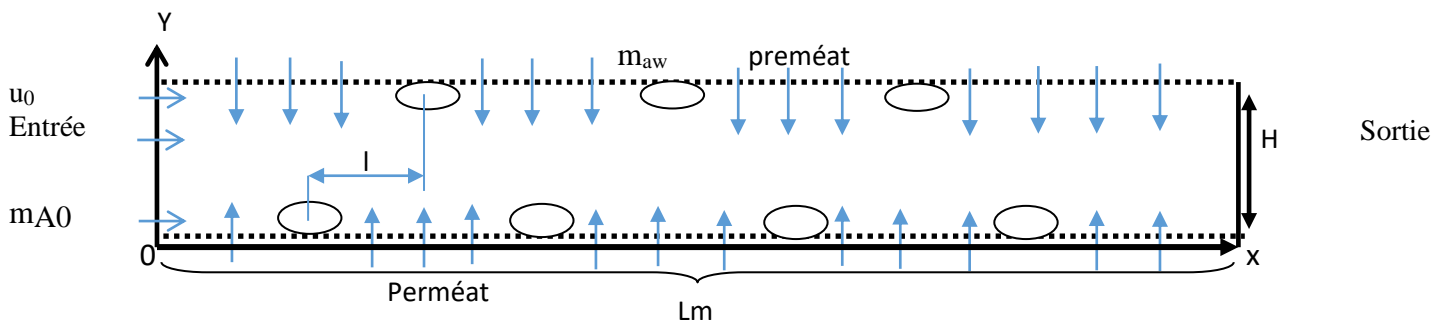
Pour modéliser un écoulement à l'intérieur d'un module membranaire, on doit connaître les principes de la mécanique des fluides numérique et la manière de transformer le problème physique à une formulation mathématique. Dans ce chapitre, nous allons décrire le problème physique que nous allons étudier numériquement ainsi que les différentes équations régissant l'écoulement et le transfert de masse à l'intérieur d'un canal membranaire.

### II.1. Description mathématique du problème physique

Pour notre PFE, nous nous intéressons à étudier l'hydrodynamique et le transfert de masse dans une section bidimensionnelle d'un module membranaire spiralé, figure II.1 (a,b).



a) Module membranaire spiralé [16].



b) Modèle physique à étudier en 2D.

**Figure II.1 :** Module membranaire Spiralé et le domaine bidimensionnel à étudier.

On considère le problème physique schématisé dans la figure II.1, il s'agit d'une coupe d'un module SWM représentant une configuration en zigzag de sept entretoises de formes elliptiques espacées de 8 mm. Ces avec la même section transversale (hauteur) qui sont montée entre deux plaque parallèles de longueur  $L= 85$  mm séparent par une distance de  $H=2$  mm par commodité, ces paramètres sont définis en termes de rapports géométriques, tel que le premier obstacle est placé au début de la membrane inferieure à une distance de  $x= 12$  mm et  $R= 0.5$  mm, ces entretoises sont séparées d'une distance  $l = 8$  mm

Pour modéliser notre problème physique, on doit suggérer des hypothèses simplificatrices pour cerner le modèle mathématique qu'on va mettre en œuvre pour la résolution des équations de transfert, comme suit :

- La nature de l'écoulement : dans notre cas c'est un écoulement d'un fluide visqueux, et iso thermique.
- Régime d'écoulement : nous nous intéressons à un écoulement en régime laminaire, stationnaire.
- La gravité est négligeable donc nulle.
- Les membranes sont supposées imperméables du point de vue numérique.

## II.2. Equations de transport

Les équations régissant l'écoulement d'un fluide incompressible newtonien, les cas échéants, sont :

### II.2.1. Equation de continuité

L'équation de continuité traduit le principe de conservation de la masse et s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec ;

$\rho$  : masse volumique du fluide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$\vec{V}$  : vitesse caractéristique du fluide [m/s].

Dans le cas où l'écoulement bidimensionnel est stationnaire et que le fluide est incompressible, l'équation précédente devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{II.2}$$

Et dans le cas où l'écoulement est dépendant du temps, elle devient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \tag{II.3}$$

Avec ;

u : la vitesse suivant l'axe x [m/s];

v : la vitesse suivant l'axe y [m/s].

### II.2.2. Equations de Navier-Stokes

La loi de conservation de quantité de mouvement traduite par les équations de Navier-Stokes exprime tout simplement la loi fondamentale de la dynamique d'un fluide newtonien.

Les équations de quantité de mouvement écrites suivants  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sont [23]:

$$\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_{\text{Stationnaire}} + \underbrace{U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j}}_{\text{Convectif}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\nu \left[ \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) \right]}_{\text{Terme visqueux}} + \underbrace{\vec{F}}_{\text{forces extérieures}} \tag{II.4}$$

Dans notre cas :

Forces de pesanteur sont négligées ;

Propriétés physiques du fluide sont constantes ;

Le régime est stationnaire.

Les équations de NS selon les axes x et y s'écrivent comme suit :

Selon l'axe x :

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

Selon l'axe y :

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

Et dans le cas d'un régime transitoire, ces équations s'écrivent :

Selon l'axe x :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

Selon l'axe y :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Dans les précédentes équations :

P : pression statique en [Pa] ;

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide en [m<sup>2</sup>/s] ;

$\mu$  : viscosité dynamique en [kg/ (m.s)].

### II.2.3. Equation de transfert de masse (transport d'espèces)

La forme adimensionnelle de l'équation de transfert de masse s'écrit, comme suit :

$$\frac{\partial m_A}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (V m_A) = \vec{\nabla} \cdot (D_{AB} m_A) \quad (\text{II.9})$$

$m_A$  : Fraction massique du sel à l'entrée [kg/kg] ;

$D_{AB}$  : coefficient de diffusion de soluté dans le solvant [m<sup>2</sup>/s].

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel stationnaire, l'équation de transfert de masse devient :

$$u \frac{\partial m_A}{\partial x} + v \frac{\partial m_A}{\partial y} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 m_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_A}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel instationnaire, elle devient sous la forme suivante :

$$\frac{\partial m_A}{\partial t} + u \frac{\partial m_A}{\partial x} + v \frac{\partial m_A}{\partial y} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 m_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_A}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.11})$$

### II.3. Propriétés du fluide et conditions aux limites

#### II.3.1. Propriétés du fluide

Le fluide est supposé newtonien et incompressible. Ce fluide est modélisé comme un mélange de solvant (eau pure) et de soluté (NaCl) qui circule à l'intérieur du canal représenté dans la figure II.1b. pour modéliser cette solution, nous avons eu recours au modèle empirique proposé par Geraldès et *al.* [08] valable pour une fraction massique en sel ne dépassant pas 0.09kg /kg et une température de 25 °C.

$$\pi = 805.1 * 10^5 m_{A0} \quad (\text{II.12})$$

$$\mu = 0.89 * 10^{-3} (1 + 1.63 m_{A0}) \quad (\text{II.13})$$

$$D_{AB} = \max(1.61 * 10^{-9} (1 - 14 m_{A0}), 1.45 * 10^{-9}) \quad (\text{II.14})$$

$$\rho = 997.1 * (1.0 + 0.696 m_{A0}) \quad (\text{II.15})$$

Ou ( $m_{A0}$ ) représente la fraction massique en sel (kg soluté/kg solution),  $\pi$  la pression osmotique de la solution aqueuse (Pa).

#### II.3.2. Condition aux limites

Pour suivre l'évolution de la distribution de concentration du sel au niveau des membranes lors de la filtration par Osmose Inverse, nous avons modélisé ce phénomène physique, en appliquant les conditions aux limites suivantes :

À l'entrée du canal : ( $x=0$ ,  $0 \leq y \leq H$ ), la vitesse est uniforme et dirigée suivant l'axe des  $x$  ( $u=u_0$ ), la concentration en soluté est constante ( $m_A=m_{A0}$ ).

À la sortie du canal : ( $x=Lm$ ,  $0 \leq y \leq H$ ), les gradients de vitesse et de pression (pressure outlet) sont nuls.

Au niveau des membranes : ( $y=0$ ,  $y=H$ ,  $0 \leq x \leq Lm$ ), la fraction massique et sel est constante au niveau des parois inférieure et supérieure  $m_A=m_{AW}$

## II.4. Paramètres d'intérêt

### II.4.1. Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds noté  $Re$ , 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. Le nombre de Reynolds généralisé est défini par l'équation :

$$Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (\text{II.16})$$

$u_0$  : vitesse caractéristique du fluide [m/s];

$D$  : diamètre du canal membranaire [m].

### II.4.2. Le cisaillement

La contrainte de cisaillement représente la force appliquée à un milieu par unité de surface.

Généralement notée  $\tau$  et se présente sous forme :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{II.17})$$

### II.4.3. La perte hydraulique par unité de longueur

La différence de pression  $\Delta p / l$  en ( Pa/m) est calculée à l'intérieur du canal entre deux sections situées en aval de la première section et en amont de la dernière section qui située au niveau de la membrane inférieure, cette différence de pression est ensuite divisée par la distance entre ces deux ' $l$ ', autrement dit :

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (\text{II.18})$$

$p_1$  : pression statique moyenne au niveau de la ligne située à  $x = 16$  mm en aval de premier obstacle en [Pa].

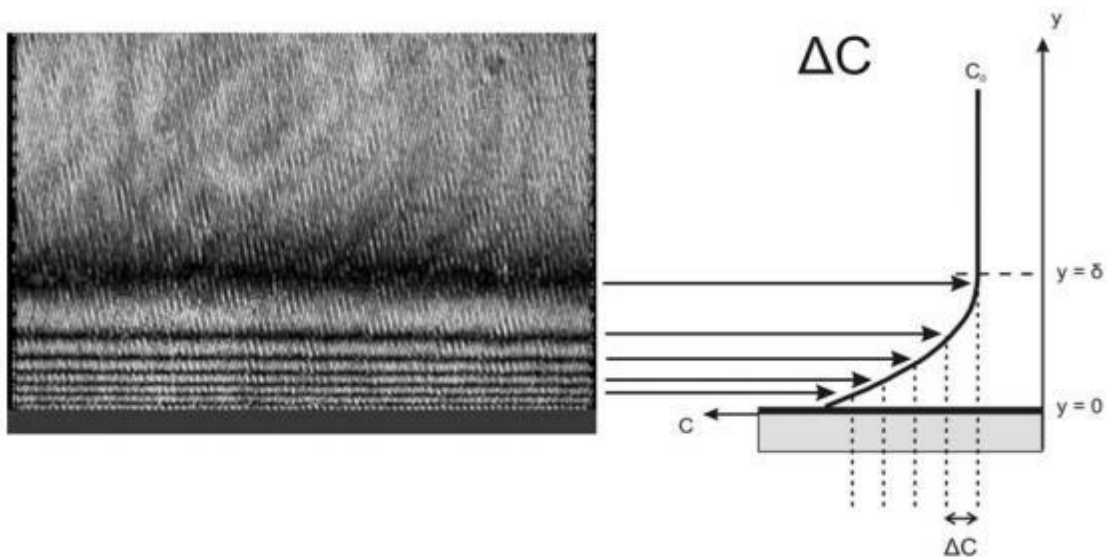
$p_2$  : pression statique moyenne au niveau de la ligne située à  $x = 56$  mm en amont de dernier obstacle en [Pa].

$l$  : distance entre les deux points [m].

#### II.4.4. La polarisation de concentration

Le rejet des ions du sel à la surface de la membrane dans les processus d'Osmose Inverse entraîne une augmentation de la concentration du soluté près de la membrane. Ce phénomène s'appelle la polarisation de concentration et constitue l'un des facteurs les plus importants influençant des performances de processus de séparation membranaire. Le développement de la couche de polarisation de concentration dans l'OI est un processus complexe qui est influencé par plusieurs facteurs tels que les propriétés du soluté, les propriétés de la membrane et l'hydrodynamique (vitesse d'écoulement, pression, géométrie du canal, etc.)

pour prédire l'évolution de cette couche, nous allons dessiner une ligne à proximité de la membrane inférieure à  $y = 0.001$  mm comme le montre la (figure II.2), puis nous allons extraire le profil local de la fraction massique en sel dans chaque points de cette ligne, ' $m_{AL}'$ .



**Figure II.2** : le phénomène de la polarisation de concentration obtenu à partir d'un interférogramme [24].

L'épaisseur  $\delta$  (en m) de la couche limite de PC est calculée suit :

$$\delta = \frac{D_{AB}}{J_v} \ln\left(\frac{m_{AW} - m_{AP}}{m_A - m_{AP}}\right) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$D_{AB}$  : coefficient de diffusion binaire du soluté dans l'eau [ $m^2/s$ ] ;

$J_v$  : vitesse de perméation [ $m/s$ ] ;

$m_{AP}$  : fraction massique en sel du soluté du coté du perméat [ $kg/kg$ ] ;

$m_{AW}$  : fraction massique en sel à la surface de la membrane [ $kg/kg$ ] ;

$m_A$  : fraction massique en sel [ $kg/kg$ ].

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis de cerner les équations régissant l'écoulement d'une solution de NaCl à l'intérieur d'un module membranaire, comme les équations de continuité et de quantité de mouvement. Après l'application des conditions aux limites nous aboutissons à un modèle mathématique plus simplifié, malgré tout la solution analytique s'avère difficile et très compliquée à résoudre analytiquement. Cela nous amène à l'utilisation du logiciel CFD Fluent basé sur la méthode des volumes finis pour la résolution de ces équations.

## **Chapitre III**

### **Processus de la simulation**

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes étapes suivies pour la simulation numérique d'un écoulement bidimensionnel d'un mélange d'eau pure et de sel à l'intérieur d'un module membranaire. Pour cela, nous allons commencer par esquisser et mailler la géométrie d'intérêt sur le logiciel de génération de maillage Gambit 2.4.6, puis nous allons discrétiser les équations régissant le problème physique en utilisant le solveur Fluent 6.3.26.

### **III.1. Présentation du logiciel Gambit 2.4.6**

Gambit est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Il permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage.

Largement répandu dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

La figure III.1 montre l'interface graphique de gambit, qui comprend une même fenêtre principale, une fenêtre graphique (1), un menu d'instructions (2), une fenêtre d'information (3) et un test d'aide (4) sur l'action en cours.

Gambit regroupe trois fonctions :

- ✓ Définition de la géométrie du problème (construction de la géométrie).
- ✓ Le maillage et sa vérification.
- ✓ Définition des frontières (types des conditions aux limites) et des domaines de calculs.



Figure III.1 : Interface de logiciel Gambit 2.4.6.

### III.2. Présentation du logiciel Fluent 6.3.26

Fluent 6.3.26 est un logiciel de modélisation tridimensionnelle et bidimensionnelle des écoulements fluides avec ou sans transfert thermique, avec ou sans réactions chimiques et pour une ou plusieurs phases. On l'utilise dans de nombreux domaines d'ingénierie. La figure III.2 montre l'interface de fluent, qui comprend un menu d'instruction (1) et une fenêtre de calcul (2).

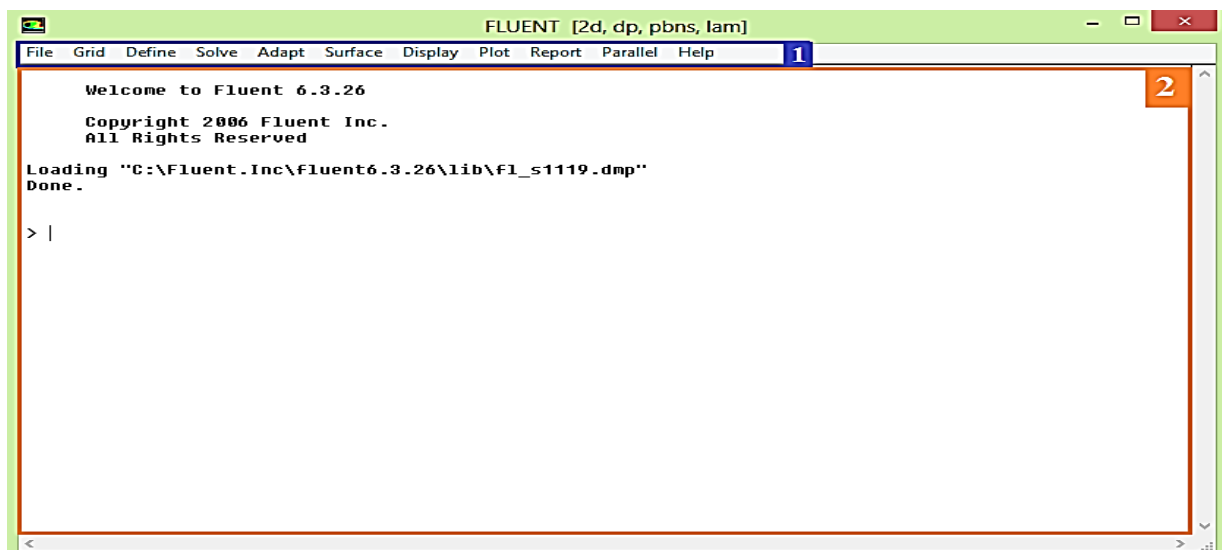


Figure III.2 : Interface du logiciel Fluent 6.3.26.

### III.3. Etapes de la simulation sous Gambit et Fluent

La géométrie de référence est une parcelle bidimensionnelle d'un module membranaire déroulé comme le montre la figure III.3. Pour des raisons de limitations en puissance informatique, nous allons nous limiter à un canal membranaire ayant les caractéristiques suivantes : longueur  $L_m = 85 \text{ mm}$ , hauteur  $H = 2 \text{ mm}$  avec des obstacles de formes elliptiques d'un rayon  $R = 1 \text{ mm}$ , voir la figure III.4.

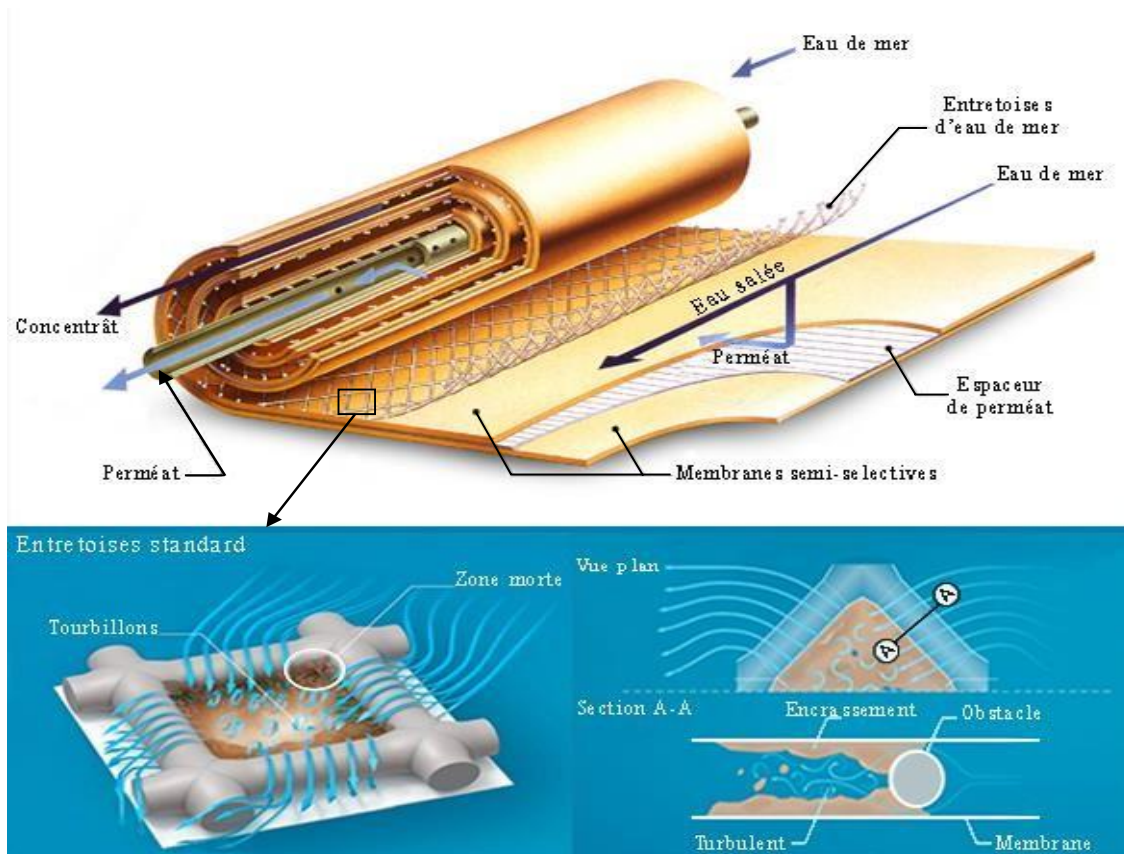


Figure III.3: Module membranaire [24-25].

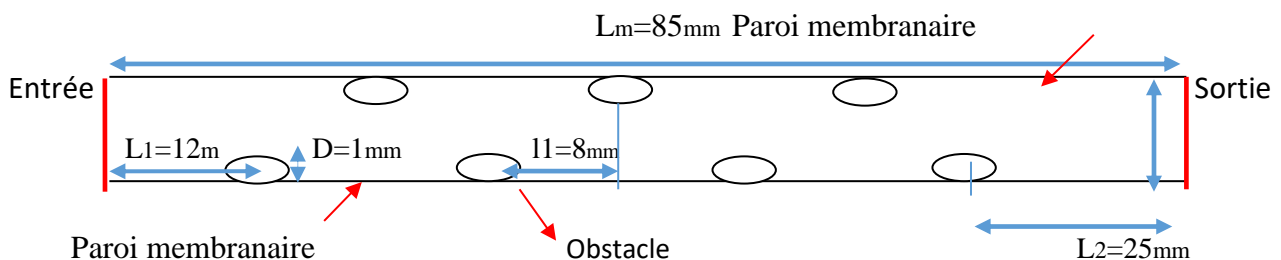


Figure III.4: Dimensions de la géométrie de référence à simuler numériquement.

Pour modéliser la cellule unitaire nous allons suivre les étapes suivantes :

### III.4. Esquisse de la géométrie sur Gambit 2.4.6

On commence par créer des points, puis on les relie entre eux, et en enfin on crée des surfaces, voir les figures III.5, III.6 et III.7.

#### a) Création des points

On a comme le montre la figure III.5.

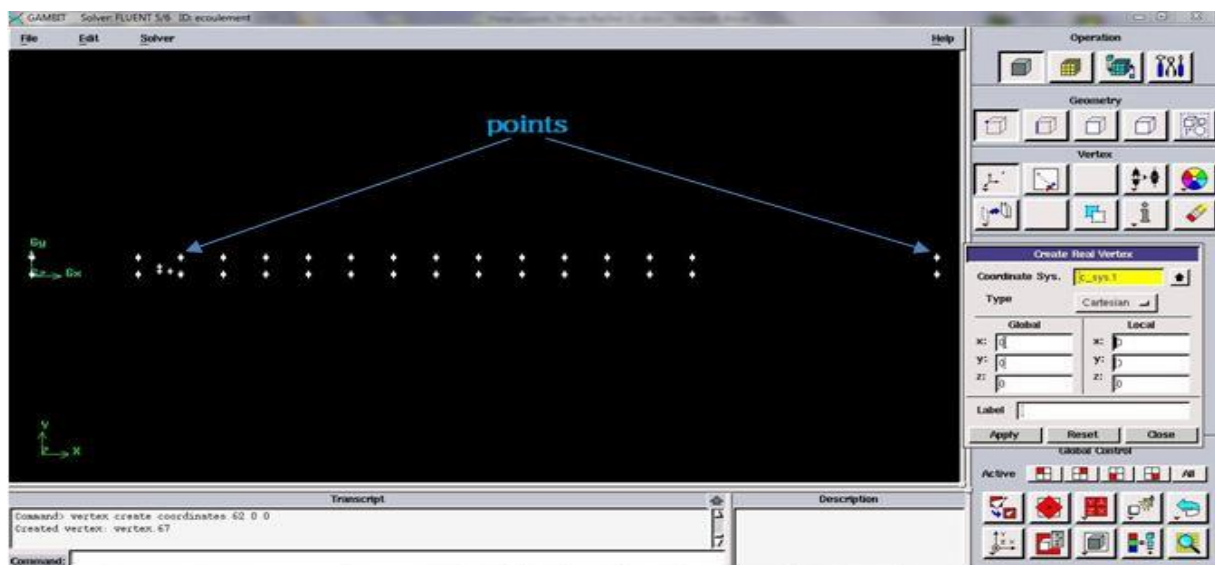


Figure III.5 : Création des points sous Gambit.

**b) Création des lignes**

Après avoir créé les points principaux qui constituent la géométrie, on les reliés entre eux  
Comme montré sur la figure III.6.

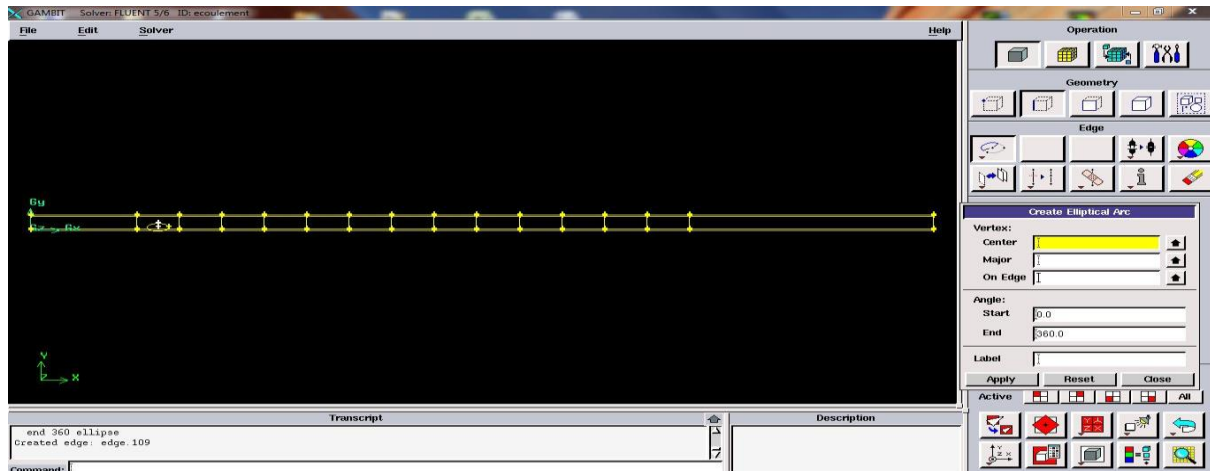


Figure III.6: Création des lignes sous Gambit.

**c) Création des ellipses**

Après avoir relié les points entre eux, on crée les ellipses. Comme la montre la figure III.7.

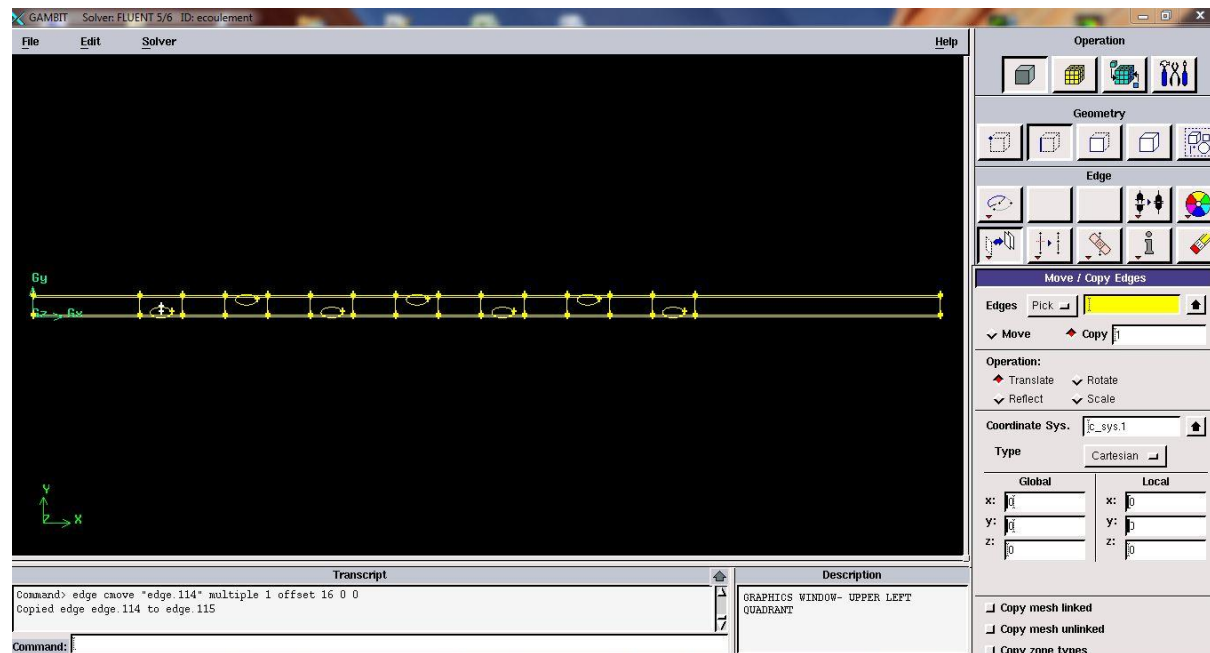
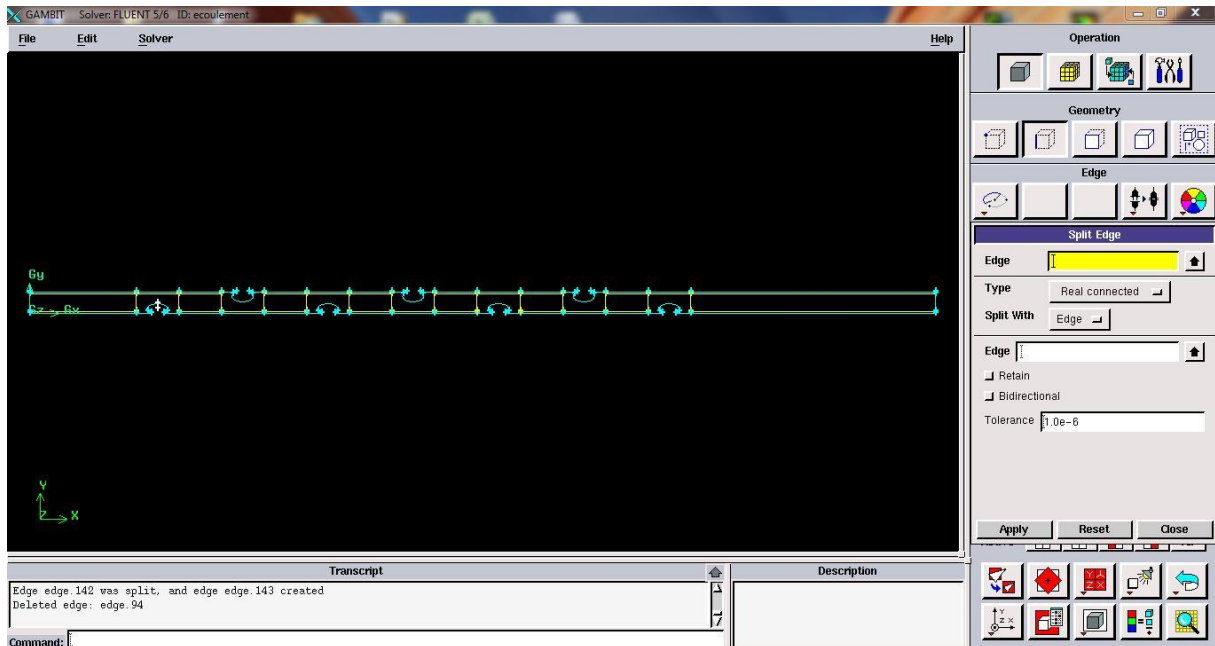


Figure III.7 : Création des ellipses sous Gambit.

**d) Soustraction des faces**

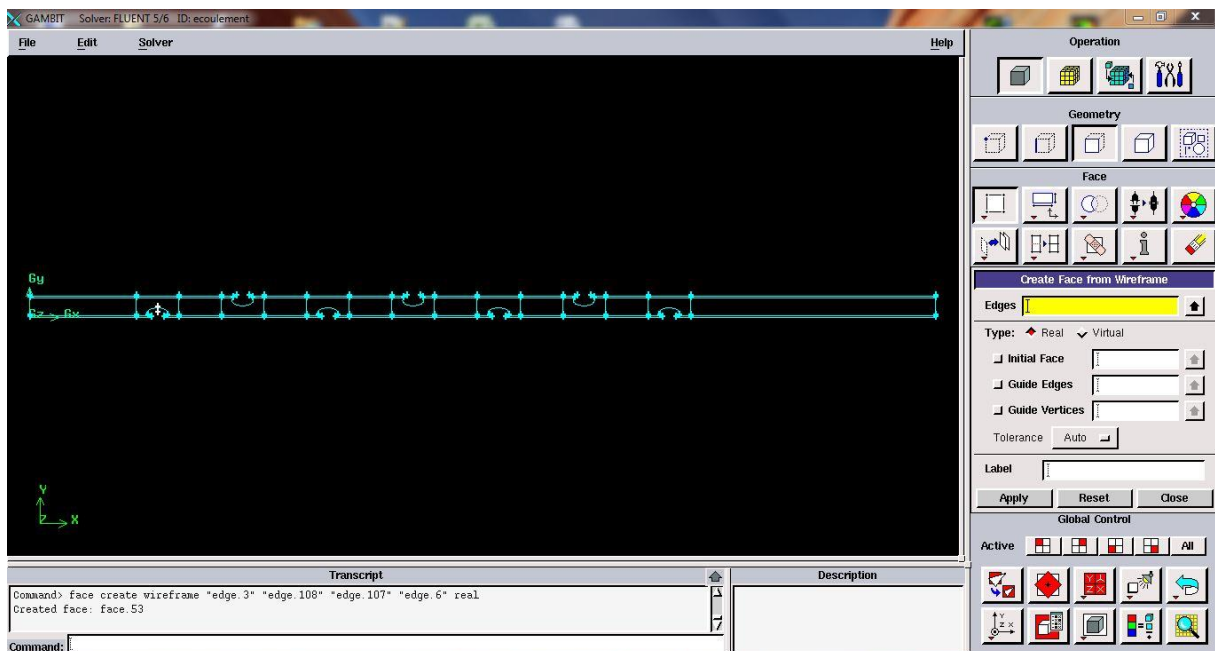
Après avoir créé ces ellipses, on va les sous traire, comme la montre la figure III.8.



**Figure III.8 : Soustraction des ellipses sous Gambit**

**e) Création des faces**

Après avoir effectué la soustraction des ellipses, on va créer des faces, comme la montre la figure III.9.



**Figure III.9 : Création des faces sous Gambit.**

### III.4.1. Maillage de la géométrie

Le maillage joue un rôle important pour la convergence et la précision des résultats, ce qui nous oblige à le faire de manière précise. Dans notre cas, on commence par mailler chaque segment du domaine manuellement en donnant à chaque segment, un nombre de divisions bien précis, puis on génère la surface maillée, comme suit :

#### III.4.1.1. Maillage des lignes

Nous commençons d'abord par diviser les lignes en plusieurs segments puis on génère un maillage pour chaque segment selon l'axe x et l'axe y (figure III .10), dans notre cas :

- Nombre des nœuds selon l'axe x : 210 nœuds
- Nombre des nœuds selon l'axe y : 74 nœuds
- Ellipses : 100 nœuds

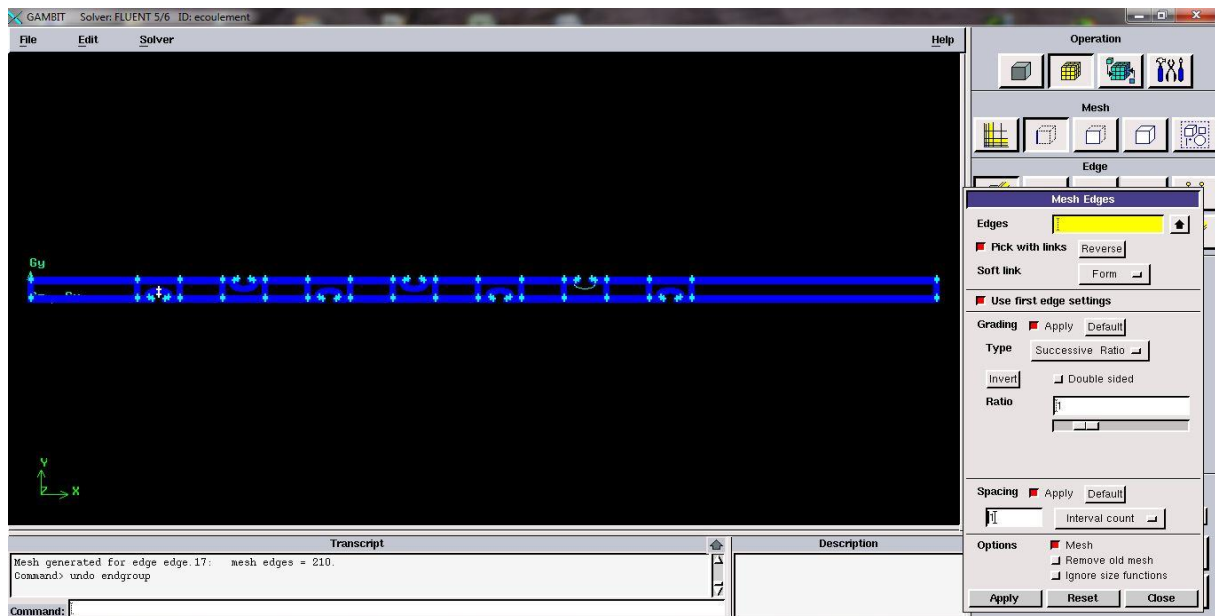


Figure III.10 : Maillage des lignes sous Gambit.

#### III.4.1.2. Maillage des faces

Pour avoir des résultats précis, on raffine le maillage à proximité des parois inférieur et supérieur et aux alentours des ellipses. A titre d'exemple la distance entre un mur et le premier nœud est de 0.0001mm, comme le montre la figure III.11.

- ✓ Le nombre des nœuds total du domaine : 851676 nœuds

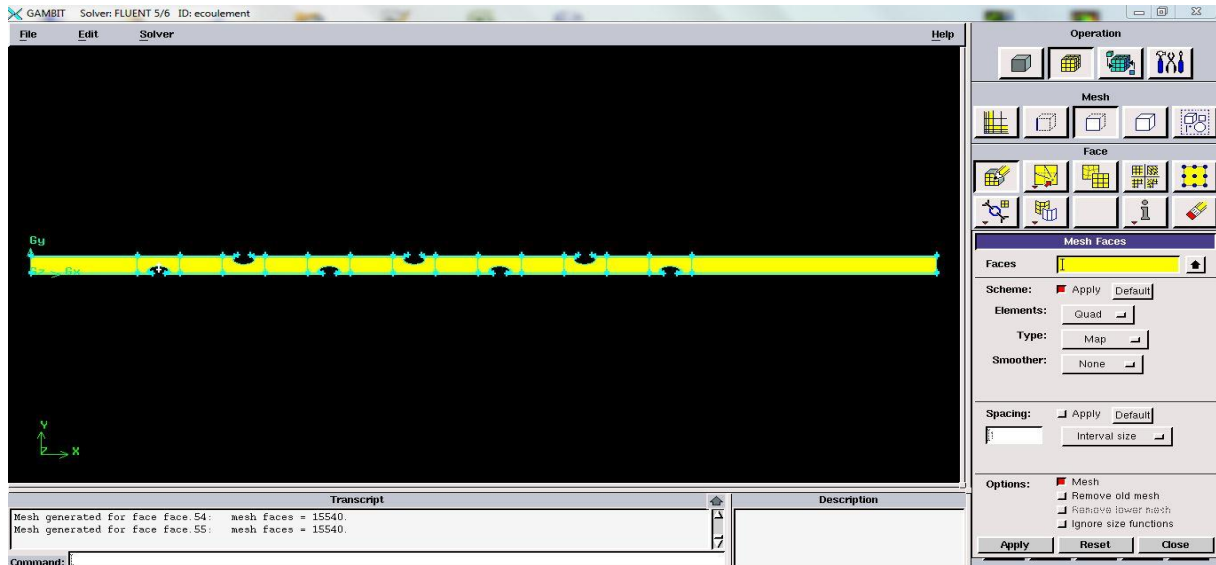
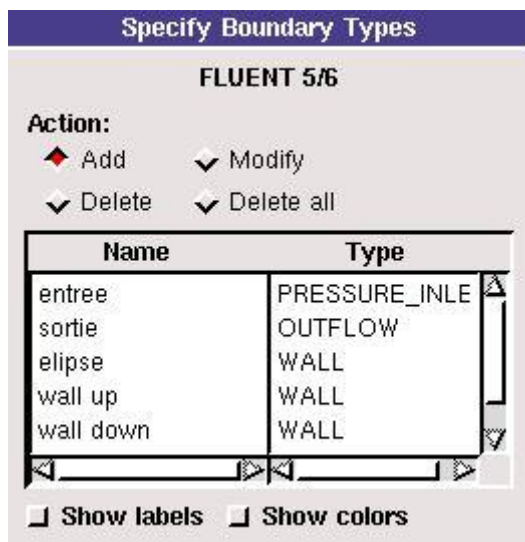


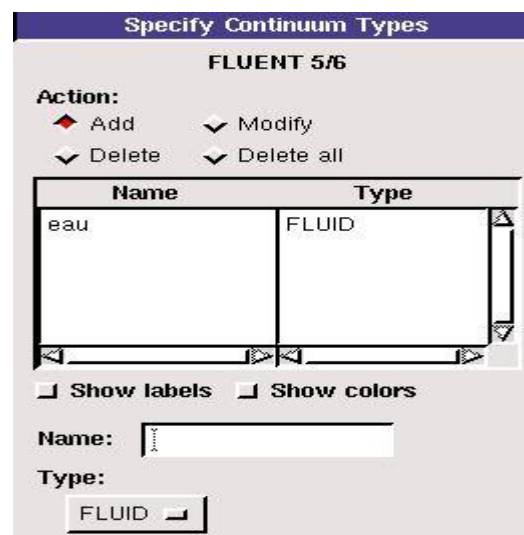
Figure III.11 : Maillage des faces sous Gambit.

### III.4.2. Conditions aux limites et définition du domaine

Après avoir terminé le maillage des faces, on doit choisir les conditions aux limites à appliquer aux frontières de notre géométrie d'étude et spécifier le type du fluide. Il est à noter que les conditions aux limites de notre problème physique consistent à définir la section d'entrée (ou bien une vitesse d'entrée), l'obstacle, les parois et une condition de sortie. Ces conditions sont représentées sur la figure III.12 (a et b)



a) Conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine étudié



b) Définition du domaine

Figure III.12: Conditions aux limites et définition du domaine.

Après avoir terminé la réalisation de la géométrie sur Gambit nous allons exporter le travail sous un fichier de format ‘msh’ (mesh = maillage en anglais) pour pouvoir l’exploiter dans le logiciel de simulation Fluent. Figure III.13 :



Figure III.13 : Exportation du fichier ‘msh’

### III.5. Simulation sous Fluent 6.3.26

On ouvre le solveur Fluent 6.3.26 en cochant la version 2D et en choisissant une double précision. Cela semble le plus à notre simulation (voire figure III.14).



Figure III.14 : Choix du 2D, double précision sur Fluent 6.3.2

Pour commencer la simulation sous Fluent 6.3.23, on importe le fichier (msh) généré sous Gambit 2.4.6. Cela permet de générer le domaine maillé dans le logiciel Fluent.

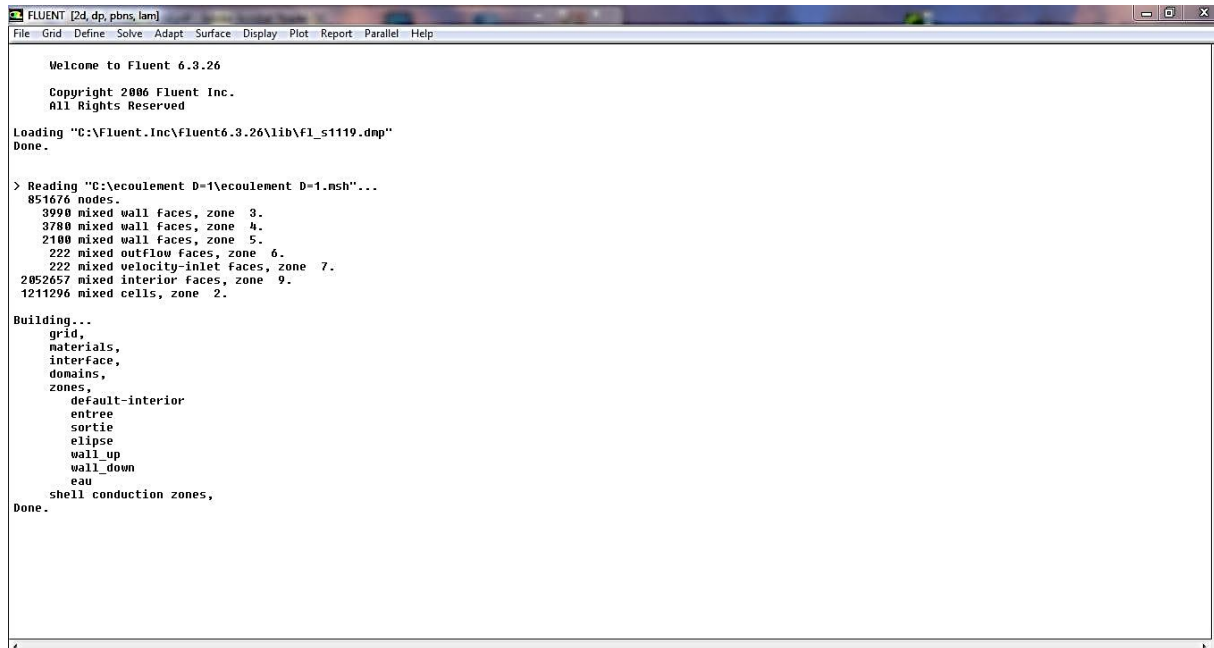


Figure III.15 : Importation du fichier 'msh'.

### III.5.1. Vérification de la géométrie importée

On vérifie le maillage en utilisant l'icône 'check'. Ceci permet de vérifier si le fichier importé ne contient pas d'erreurs, voir la figure III.16.

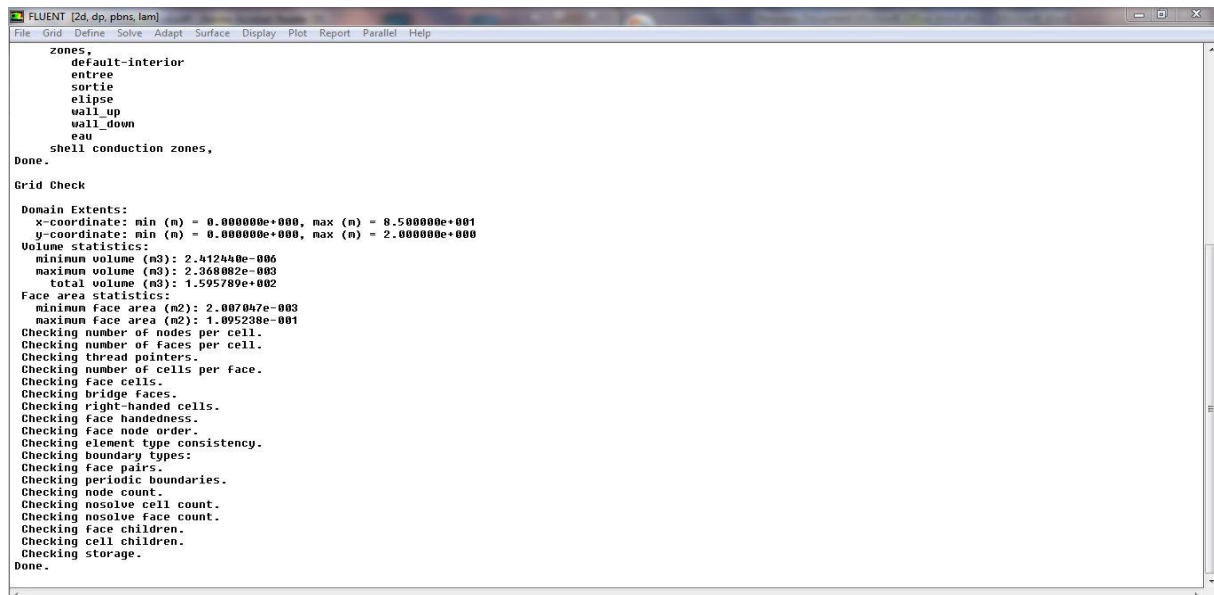


Figure III.16 : Vérification des données sous Fluent.

### III.5.2. Définition du régime d'écoulement

Après avoir vérifié les données par Fluent sous la rubrique 'check', on va définir le solveur pour le régime d'écoulement laminaire stationnaire comme présenté dans la figure III.17.

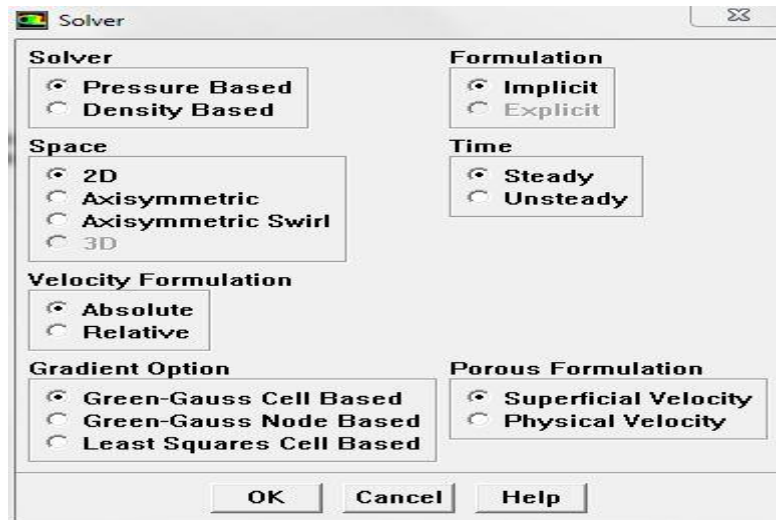


Figure III.17 : Définition du solveur.

### III.5.3. Définition de l'équation de transport du sel

Cette étape nous permet de définir l'équation qui suivra l'évolution de la concentration massique du sel à l'intérieur du canal membranaire, figure III.18.

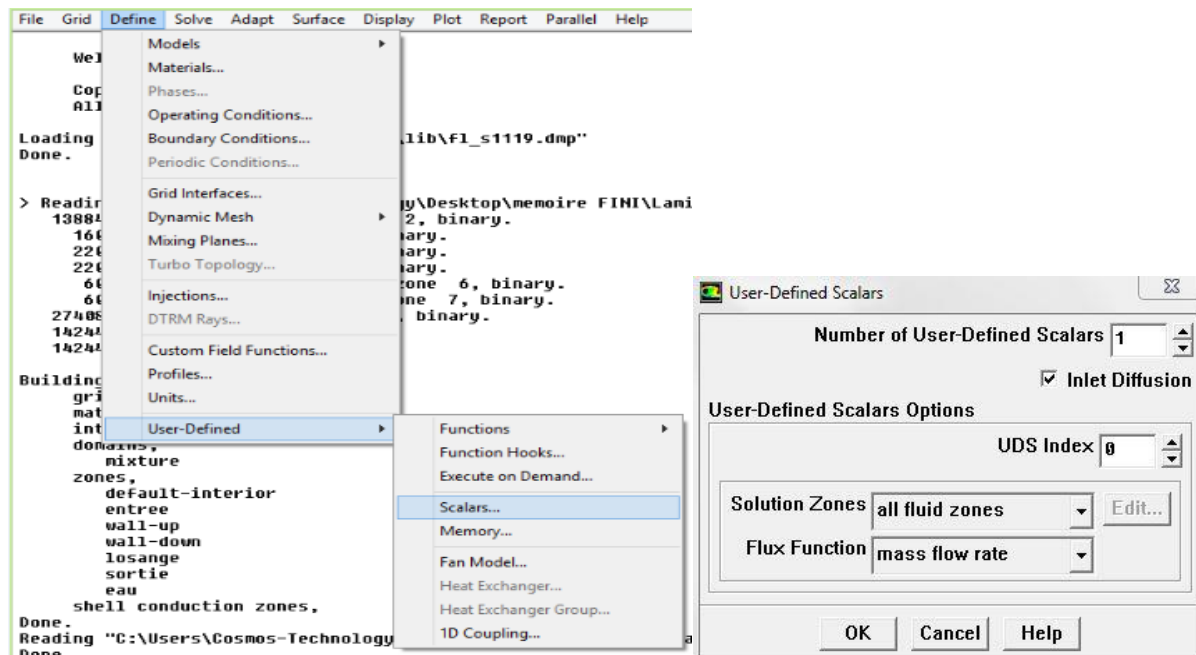


Figure III.18 : Fenêtre de L'UDS

### III.5.4. Propriétés du fluide utilisé

On définit la nature du fluide qui circule dans le domaine étudié, dans notre cas de l'eau de mer qui a comme propriétés ( $\rho = 998.4879 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.000892901 \text{ m}^2/\text{s}$ ) qui la circulation du fluide, voir figure III.19

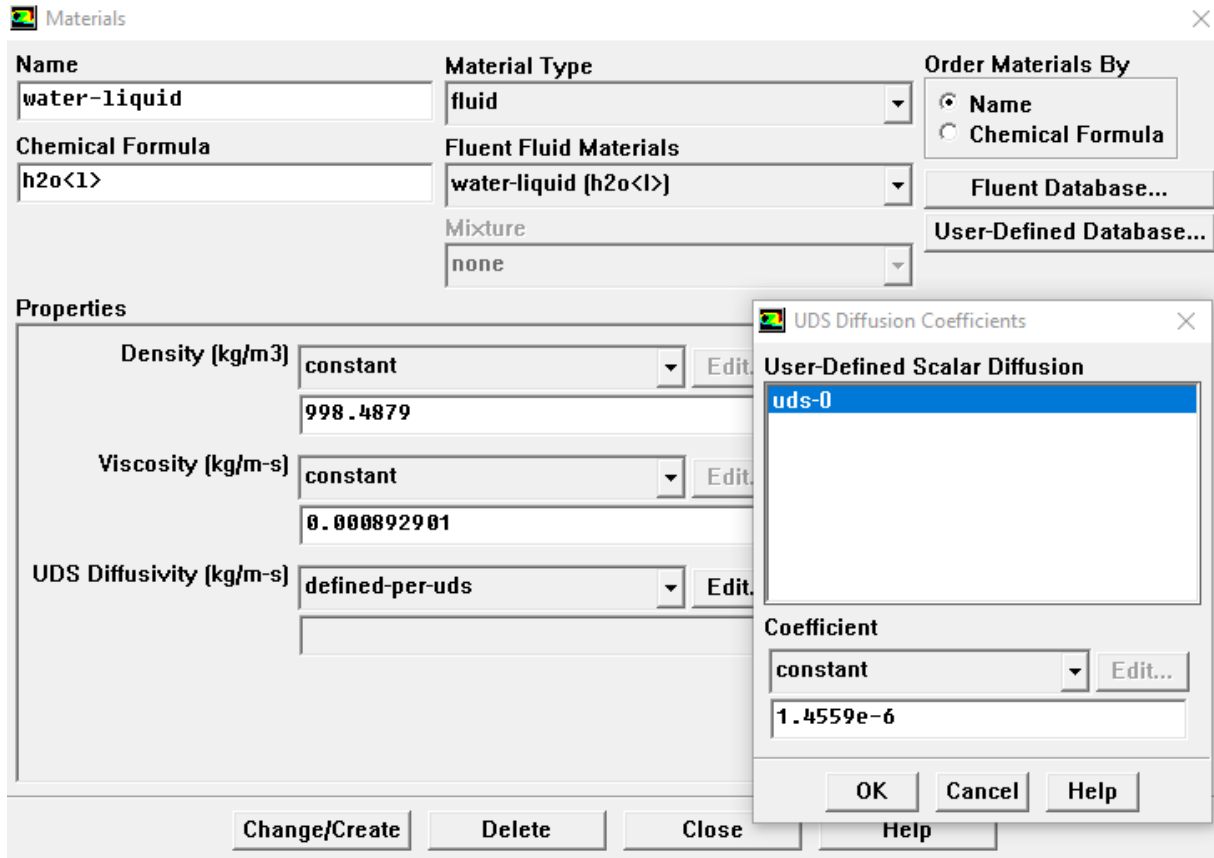


Figure III.19 : Définition de la nature de fluide et ses paramètres.

### III.5.5. Les conditions aux limites

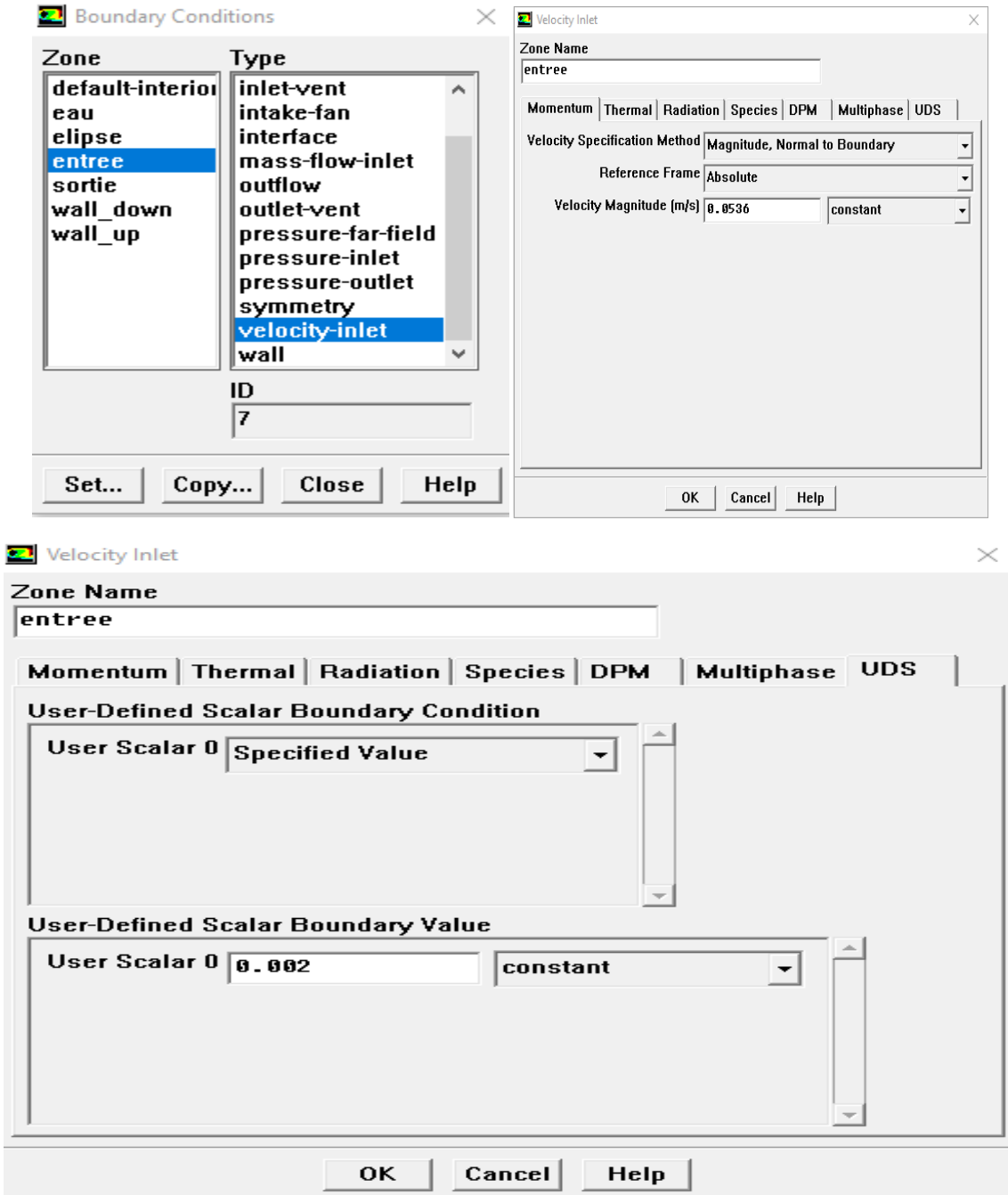


Figure III.19 : Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 à l'entrée.

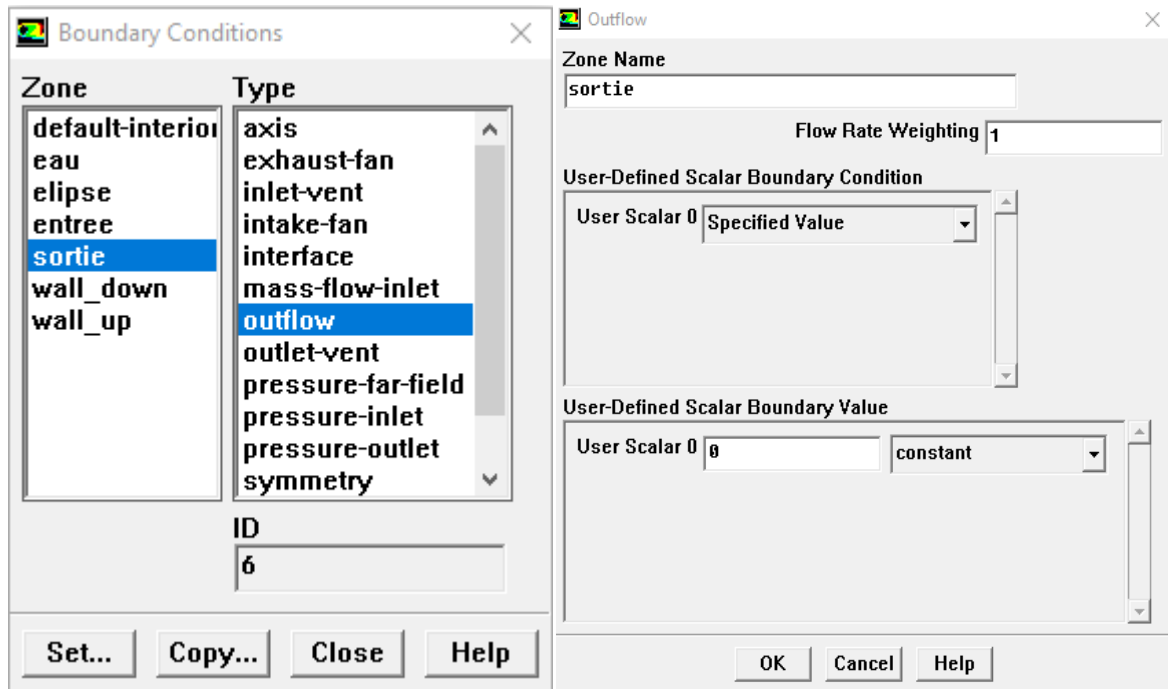
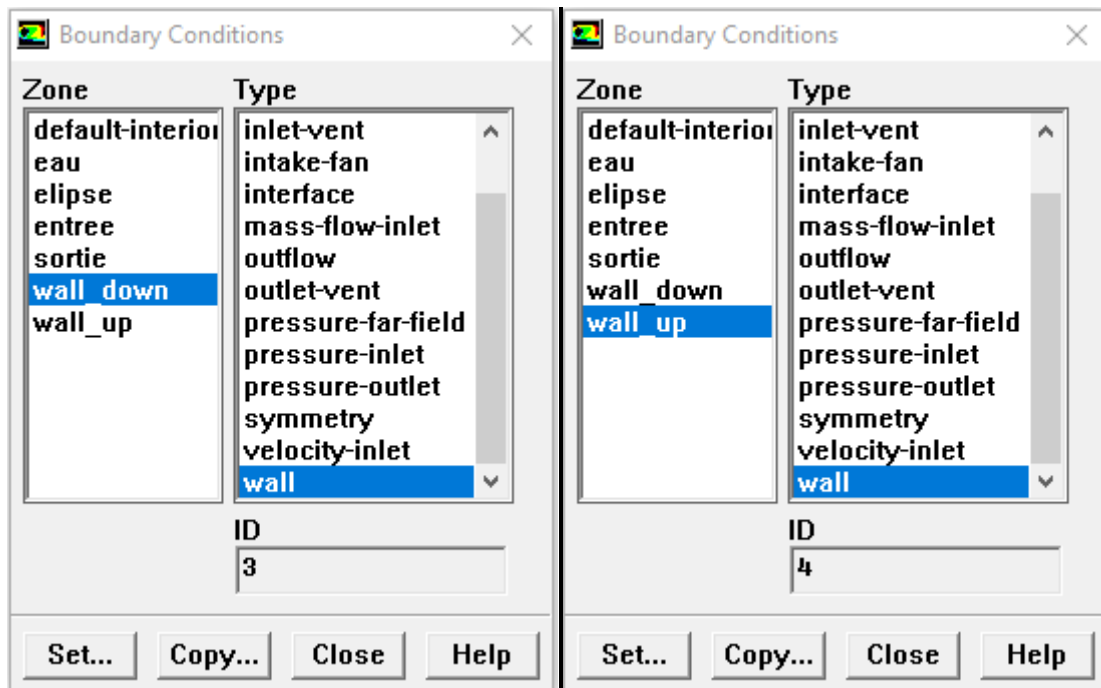


Figure III.20 : définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 à la sortie.



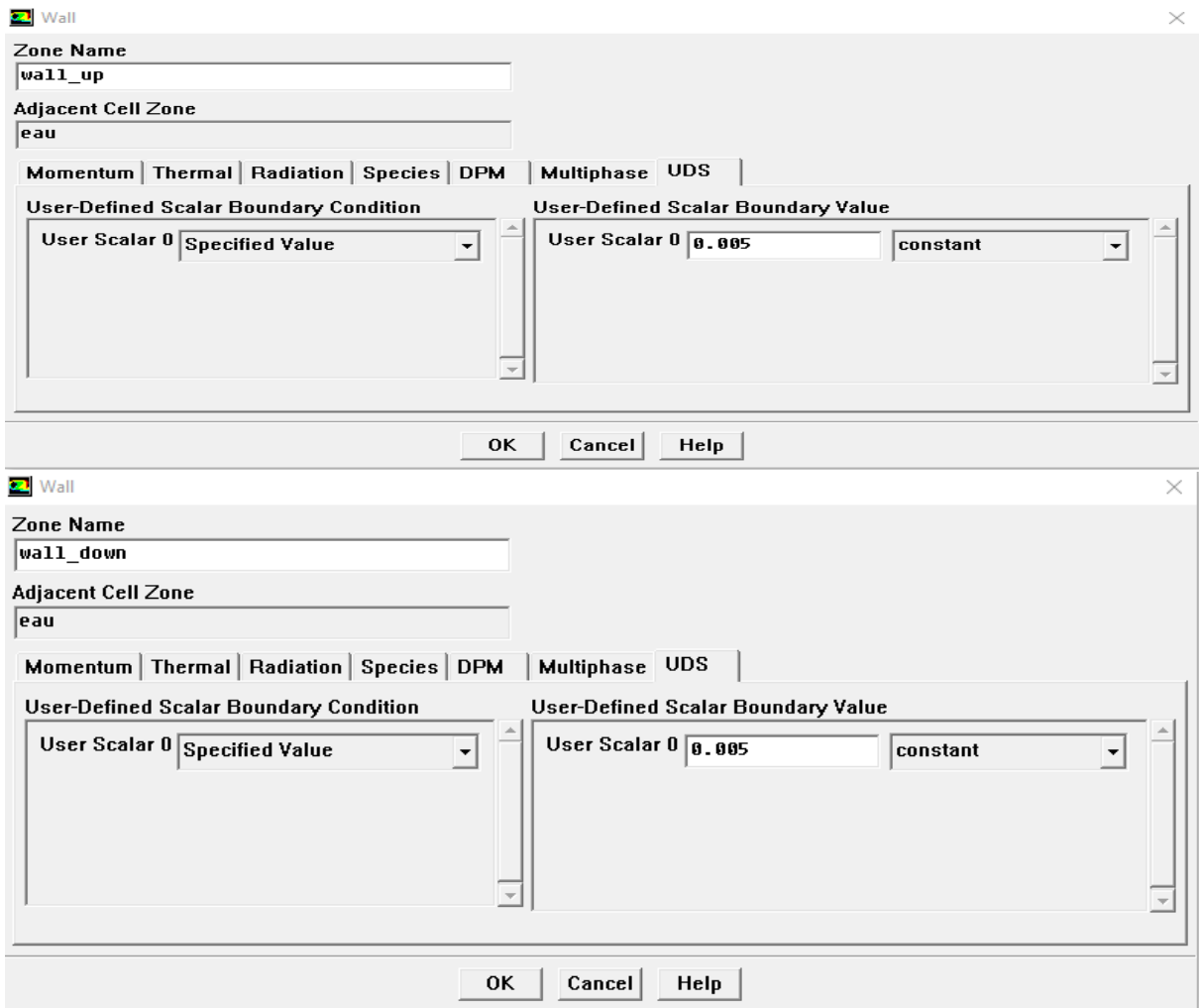


Figure III.21 : Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 (murs).

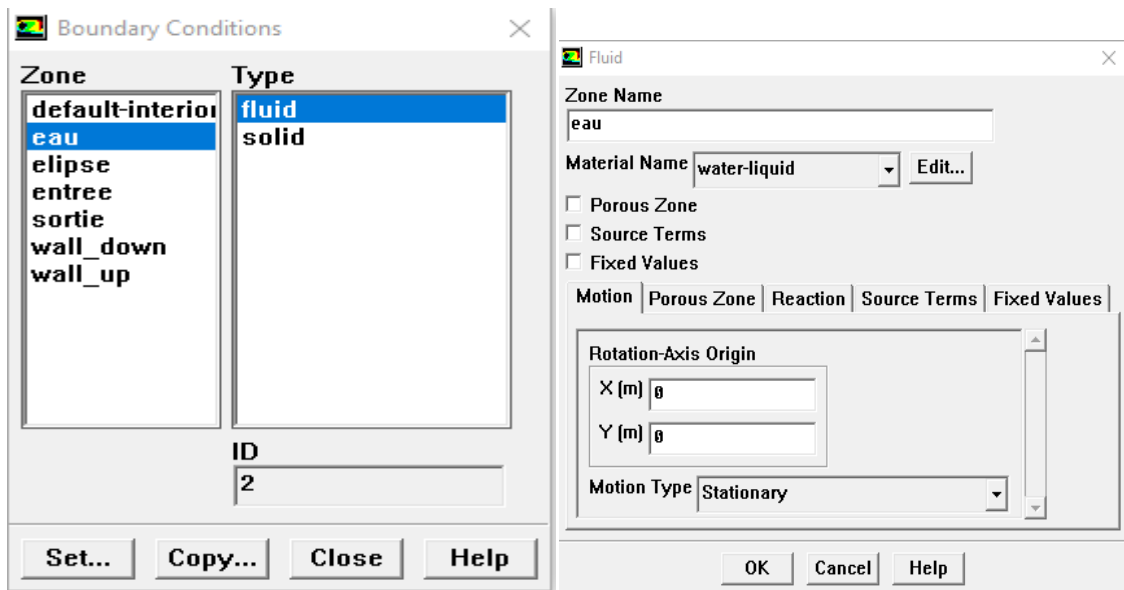


Figure III.22 : Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 (fluide).

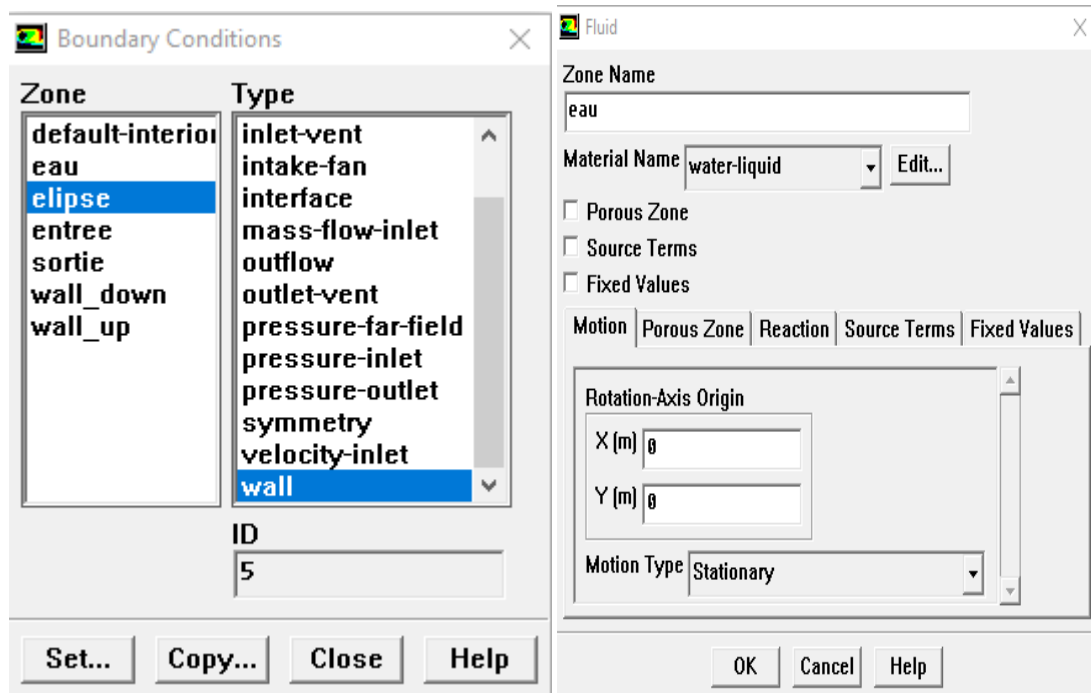


Figure III.23 : Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26 (ellipse).

### III.5.6. Contrôle de solution

L'étape du contrôle de la solution est d'une importance décisive pour la précision des résultats, vu que c'est la partie où on choisit la méthode de discrétisation des équations de Navier-Stokes et le couplage pression-vitesse. Dans notre cas, on adapte une méthode de Seconde Ordre Upwind pour la résolution des équations et simple ou PISO pour le couplage, voir la figure III.24.

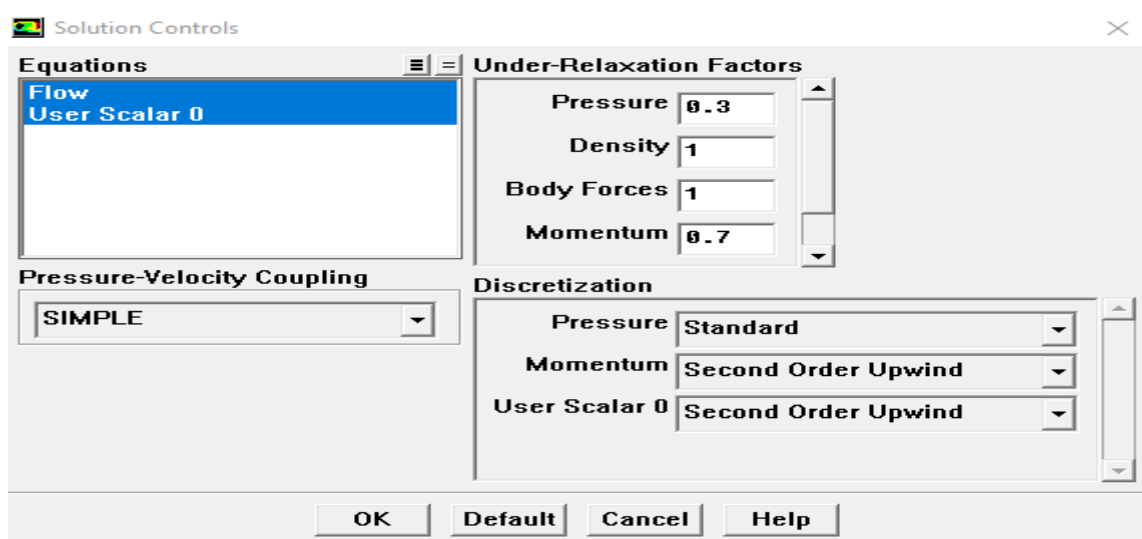


Figure III.24 : Contrôle de la solution sous fluent 6.3.26.

Le logiciel fluent propose trois méthodes pour le couplage pression-vitesse (seulement avec la formation « isolé »)

- Les deux premiers, très similaires, sont la méthode \*SIMPLE\* (Semi-Implicit Method for a Pressure Linked Equations) et la méthode \*SIMPLEC\* (SIMPLE Consistent). Cette dernière méthode se différencie de la première par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (correction) de pression proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution.
- Methode \*PISO\* (Pressure-implicit with Splitting of Operators) : Cette méthode fait partie des algorithmes de la famille \*SIMPLE\*. Elle est recommandée pour les écoulements instationnaires ou pour les maillages contenant des cellules très obliques \*highly skewed\*.

Dans notre cas on s'intéresse sur la méthode \*SIMPLE\*

### III.5.7. Définition des critères de convergence des résidus

La mise en place physique est presque complète, maintenant on se tourne vers la fenêtre affichant les résidus de sorte qu'on puisse facilement observer le progrès de la solution.

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température et continuité du problème, entre la présente itération et la précédente.

Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (Residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent  $10^{-3}$ . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à  $10^{-4}$  voire  $10^{-6}$  ou même plus. Donc il n'y a pas de règle universelle.

Dans cette étude, on choisit un critère de convergence assez élevé  $10^{-6}$  pour toutes les simulations, ce qui permet d'avoir une précision des résultats, voir figure III.25

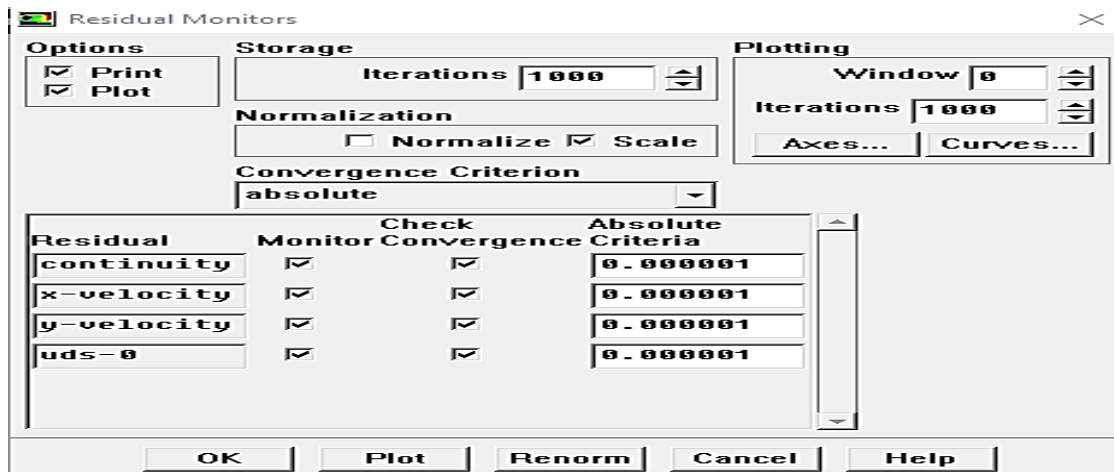


Figure III.25 : Fenêtre des résidus.

### III.5.8. Initialisation des calculs

On initialise le calcul comme la figure III.26.

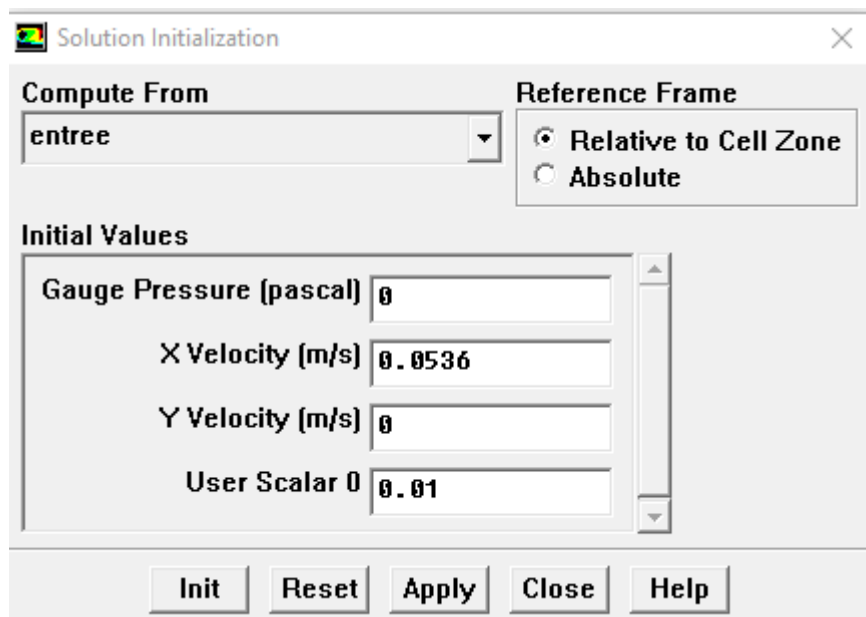


Figure III.26 : Initialisation des calculs.

### III.5.9. Lancement des calculs itératifs

Et enfin, on lance le calcul comme suit :

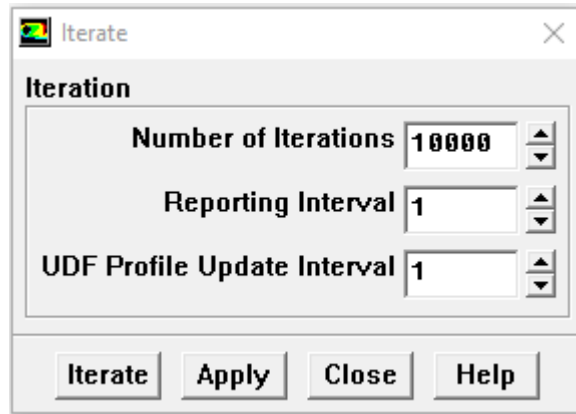
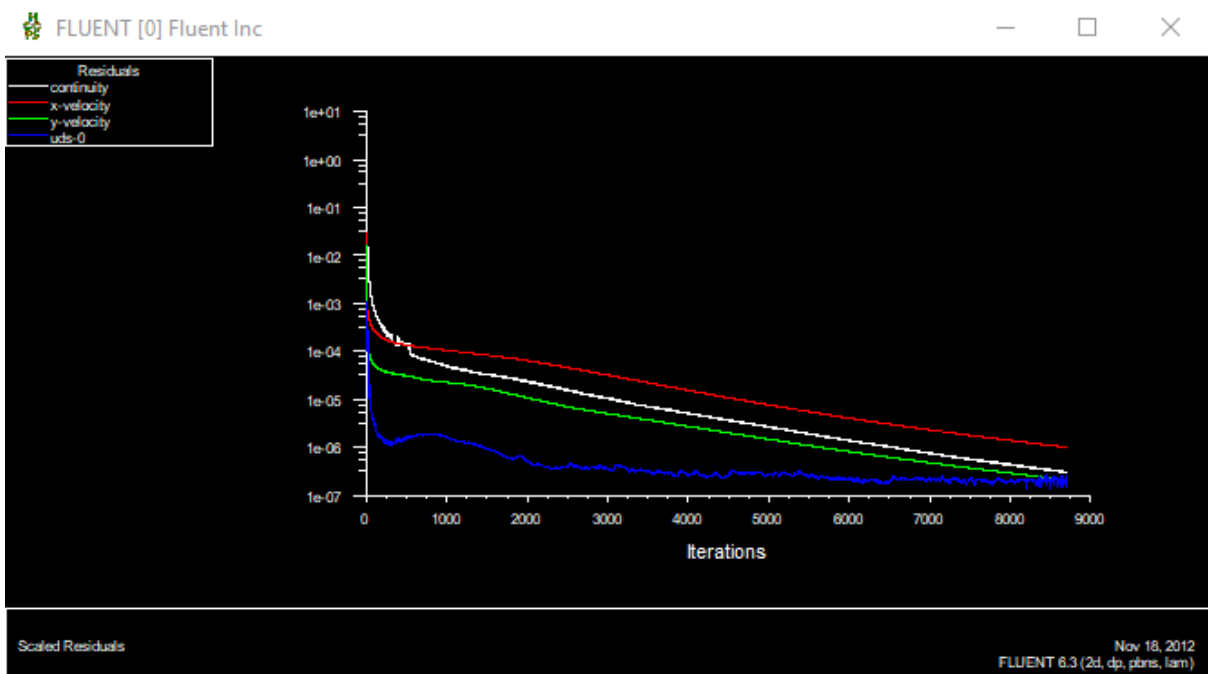


Figure III.26 : Lancement des calculs sous fluent 6.3.26.



## Conclusion

L'utilisation des méthodes numériques est nécessaire pour la solution des équations de bilan. Pour notre problème, on a employé le logiciel FLUENT basé sur la méthode des volumes finis.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

## Introduction

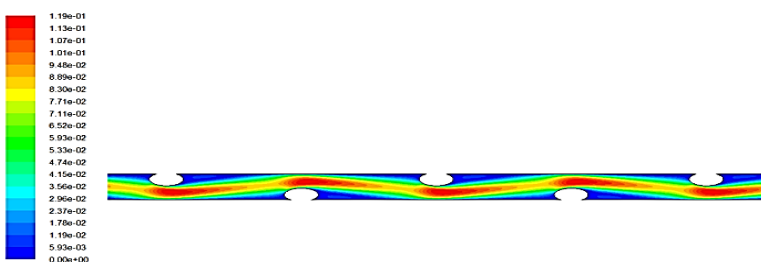
Dans ce chapitre, nous présenterons les différents résultats obtenus lors de la modélisation du problème physique étudié. Ces résultats sont exposés sous formes de contours de vitesse, de pression, de fraction massique en sel, les graphes de profils de cisaillement et de concentration dans la région centrale du canal entre les sections  $x = 12 \text{ mm}$  et  $x = 60 \text{ mm}$ .

### IV.1. Variation du nombre de Reynolds et de la fraction massique en sel à l'entrée

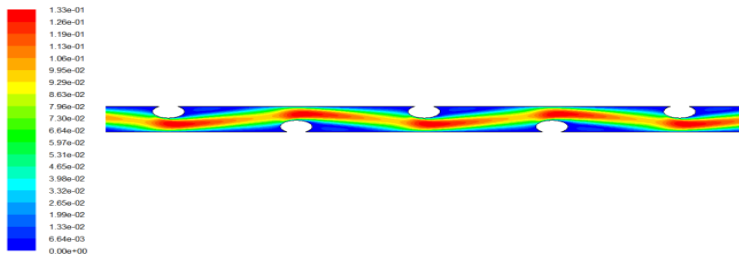
Nous nous intéressons dans un premier temps à étudier le comportement du fluide et du transfert de masse à l'intérieur d'une unité cellulaire d'un canal membranaire, en variant de la vitesse de circulation du fluide ( $u_0$ ) et la salinité de la solution aqueuse de Na Cl ( $m_{A0}$ ) à l'entrée du canal. Pour cela, on fixe la fraction massique du sel à l'entrée du canal a  $m_{A0}=0.002\text{kg/kg}$ , tout en variant le nombre de Reynolds( $Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu}$ ) entre 100 et 380 ( $0.047\text{m/s} \leq u_0 \leq 0.169\text{m/s}$ ).

#### IV.1.1. Champs de vitesse

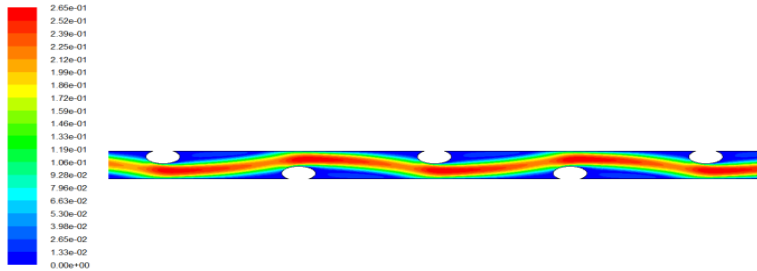
La figure IV.1 montre les contours de la vitesse autour des obstacles à différents nombres de Reynolds et pour une fraction massique en sel de  $m_{A0}=0.002\text{kg/kg}$ . On remarque que les obstacles elliptiques insérés entre les deux membranes accélèrent le fluide dans le canal et cette accélération s'accroît en augmentant la vitesse d'entrée, sans pour autant déstabiliser l'écoulement.



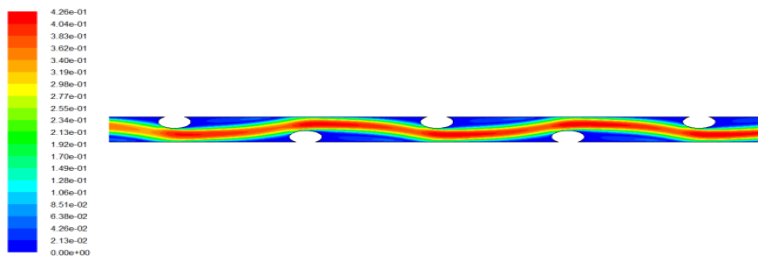
$$Re = 100, u_0 = 0.0477 \text{ m/s}$$



$Re = 120, u_0 = 0.0536 \text{ m/s}$



$Re = 240, u_0 = 0.1073 \text{ m/s}$

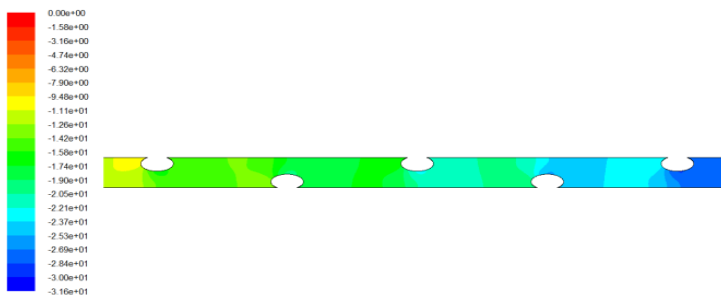


$Re = 380, u_0 = 0.1699 \text{ m/s}$

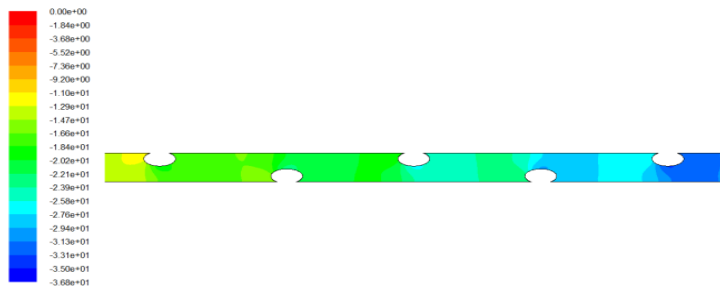
**Figure IV.1 :** Champs des vitesses (en m/s) à différents nombre de Reynolds.

### IV.1.2. Contours de la pression statique

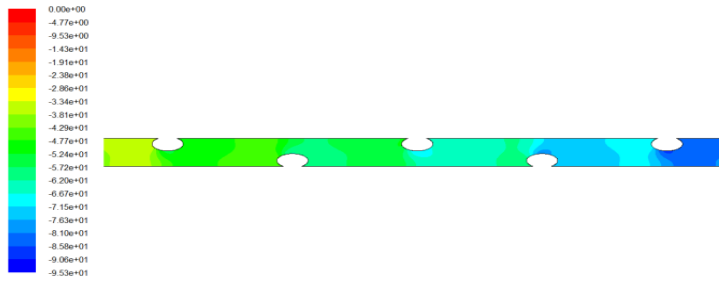
La figure IV.2 montre que la distribution de la pression statique dans le canal évolue de manière assez semblable pour les différents cas. La pression admet une surpression en amont des obstacles puis une dépression.



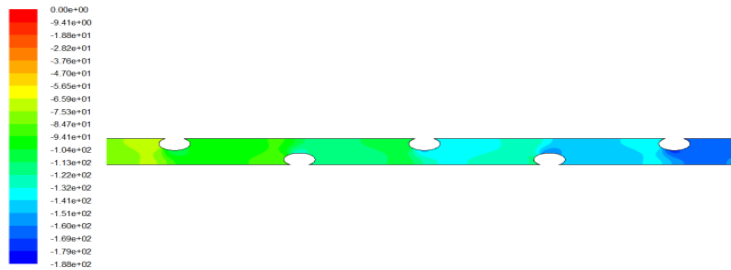
$Re = 100, u_0 = 0.00477 \text{ m/s}$



$$\text{Re} = 120, u_0 = 0.0536 \text{ m/s}$$



$$\text{Re} = 240, u_0 = 0.1073 \text{ m/s}$$

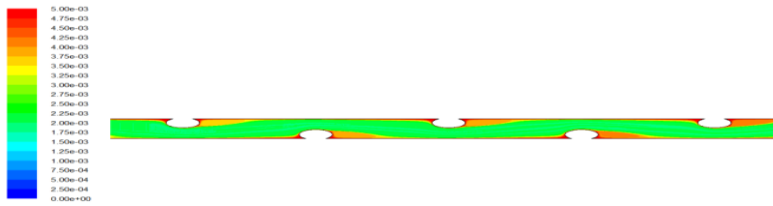


$$\text{Re} = 380, u_0 = 0.1699 \text{ m/s}$$

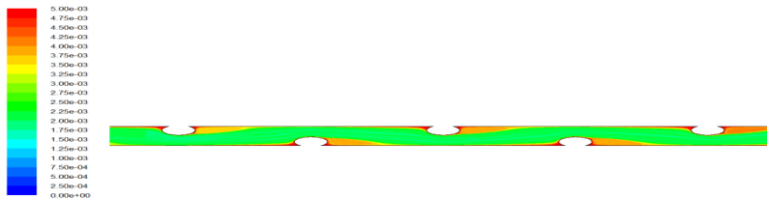
**Figure IV.2 :** Contours des pressions statiques (en Pa) à différents nombres de Reynolds.

### IV.1.3. Contours de la fraction massique en sel

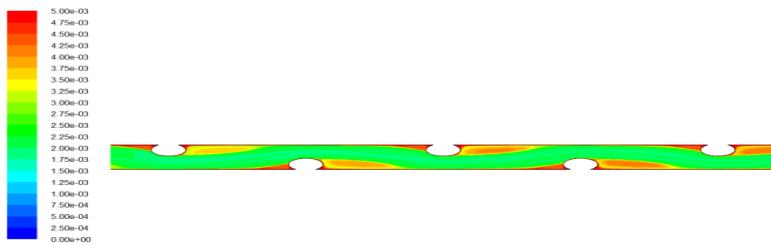
La figure IV.3 représente les contours de la fraction massique en sel pour différents nombres de Reynolds à  $m_{A0}=0.002\text{kg/kg}$ . On remarque qu'une forte concentration du sel en amont et en aval des obstacles. Ces zones où la concentration est importante s'étendent à force qu'on augmente la vitesse d'entrée. Il est à noter que les champs de concentration obtenus dans cette étude sont similaires à ceux des travaux précédents [25], ce qui valide notre simulation numérique et la méthode suivie.



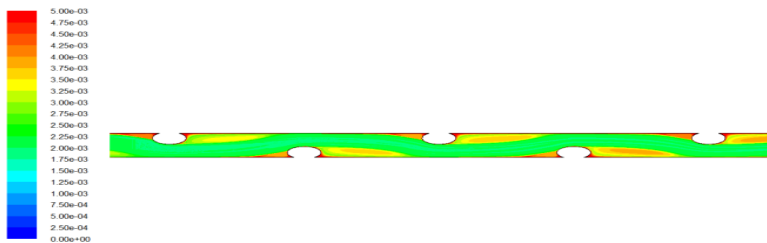
$$Re = 100, u_0 = 0.0477 \text{ m/s}$$



$$Re = 120, u_0 = 0.0536 \text{ m/s}$$



$$Re = 240, u_0 = 0.1073 \text{ m/s}$$



$$Re = 380, u_0 = 0.1699 \text{ m/s}$$

**Figure IV.3 :** Contours de la fraction massique en sel (en kg/kg) à différents nombres de Reynolds.

#### IV.1.4. Les profils de cisaillement

On trace le profil de cisaillement obtenu grâce à l'équation  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$  présentée dans le chapitre II. Au long de la membrane inférieure pour différents nombre de Reynolds.

La figure IV.4 présente les évolutions locales du cisaillement pour différentes nombres de Reynolds à  $m_{A0} = 0.002 \text{ kg/kg}$ . Le cisaillement enregistré au niveau des obstacles

est très important [26]. De plus, en augmentant la vitesse d'entrée, les valeurs deviennent plus importantes, ou le maximum est enregistré pour  $Re = 380$ .

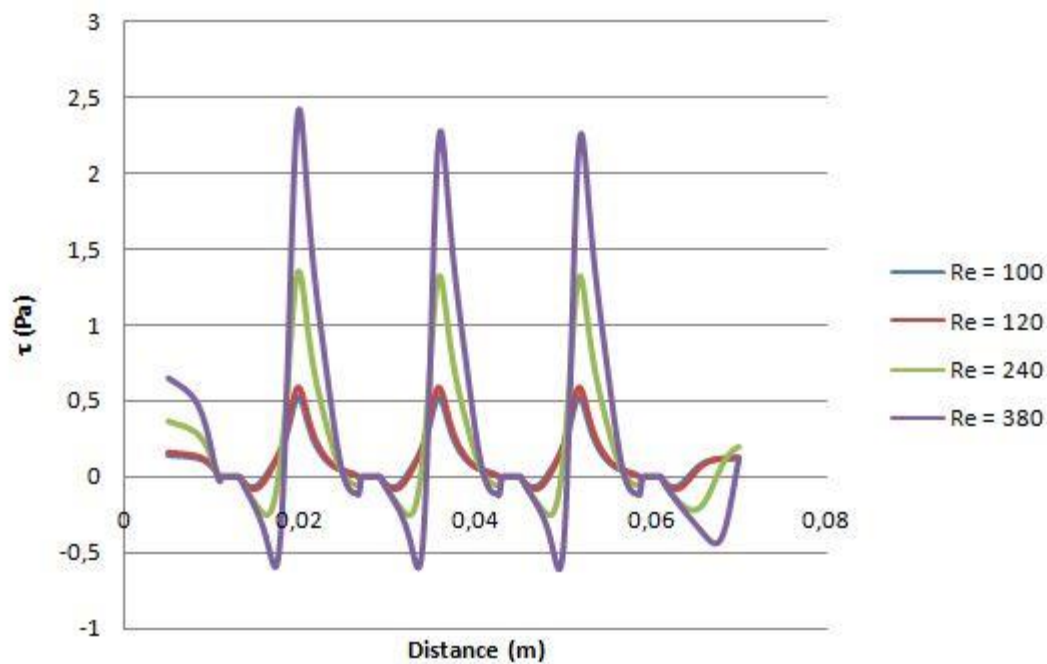


Figure IV.4 : Cisaillement pour différents nombres de Reynolds

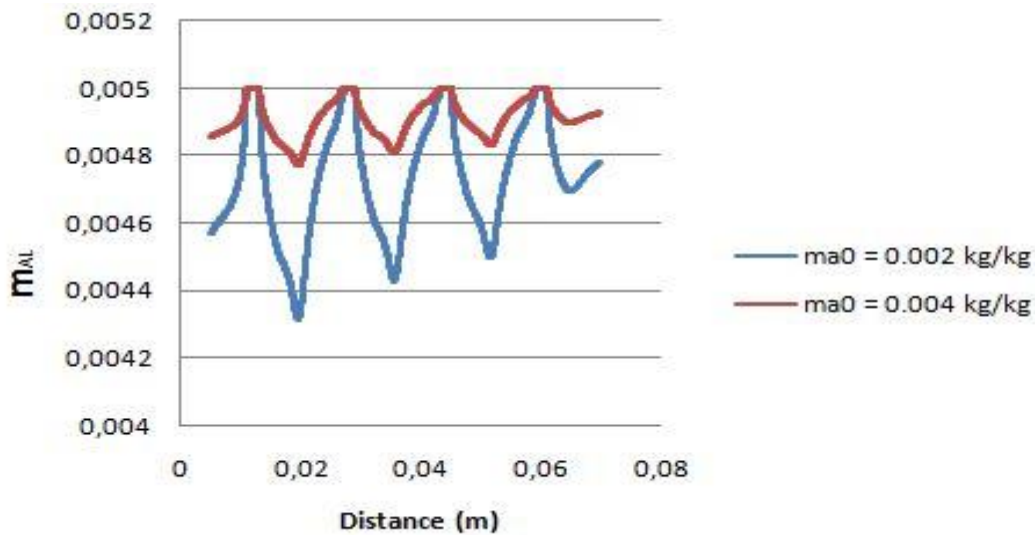
#### IV.1.5. Profils de la polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure

##### A\_ Comportement de la polarisation de concentration à différentes vitesses d'entrée de la solution aqueuse de NaCl.

Afin d'étudier le comportement de la polarisation de concentration à différentes valeurs de la fraction massique en sel d'entrée, on trace le profil de la fraction massique en sel  $m_{AL}$  le long d'une ligne droite située à  $y = 0.001$  mm de la membrane inférieure.

La figure IV.5 représente l'évolution des profils de la polarisation de concentration du sel le long de la canal membranaire pour  $Re = 120$  et divers fractions massiques en sel à l'entrée  $m_{A0}$ .

Les profils de la polarisation de concentration en sel représentés sur la figure IV.5 ont une allure semblable avec des pics de concentration observés au niveau des obstacles et cela concorde avec les résultats de plusieurs travaux de recherches. On remarque que l'augmentation de la salinité de la solution aqueuse de NaCl génère plus de dépôt de sel au niveau des membranes.

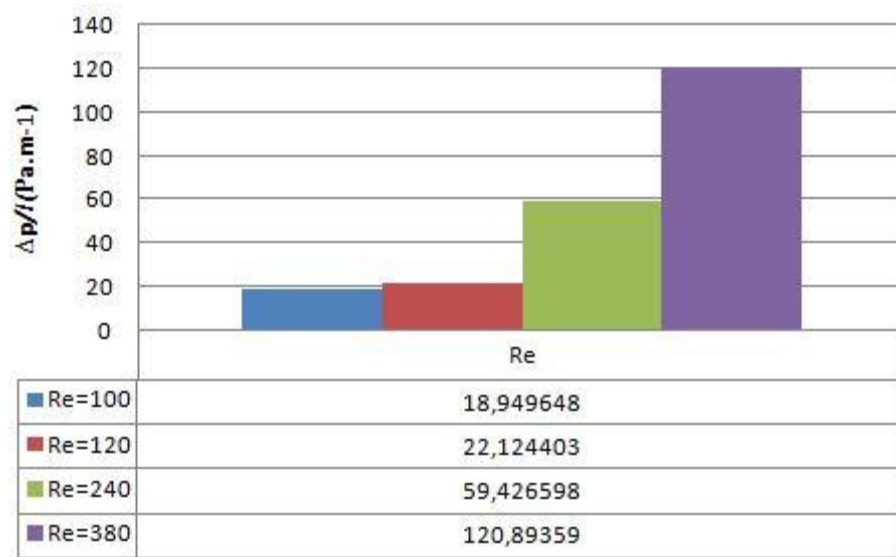


**Figure IV.5 :** Evolution de la fraction massique en sel pour différents  $m_{A0}$  le long de la membrane inférieure (  $Re = 120$ ).

#### IV.1.6. Les pertes hydrauliques

Pour estimer les pertes hydrauliques dans les canaux membranaires, on calcule la déperdition par unité de longueur comme expliqué précédemment dans le chapitre II.

La figure IV.6 représente un histogramme qui compare la perte de pression par unité de longueur en fonction du nombre de Reynolds pour  $m_{A0} = 0.002 \text{ kg/kg}$ . Ici, la dépression est faible pour  $Re = 100$  et elle croit en augmentant la vitesse d'entrée, ainsi elle atteint sa valeur maximale pour  $Re = 380$ .



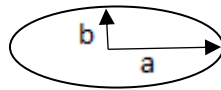
**Figure IV.6 :** Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents nombres de Reynolds (Ellipses,  $m_{A0} = 0.002$  kg/kg)

## IV.2 : Variation du rapport $b/a$ des ellipses

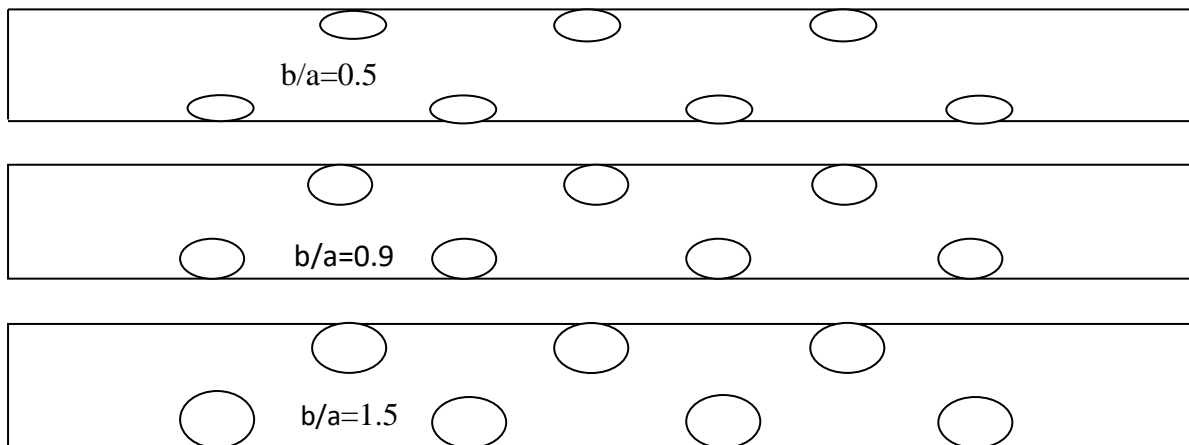
Dans le but d'étudier la variation du rapport  $b/a$  sur le comportement de l'écoulement et le transfert de masse dans le canal, on varie le rapport ' $b/a$ ' de 0.5 à 1.5 comme montré sur la figure IV.7.

Pour nos simulations, nous avons fixé la fraction massique du sel à l'entrée 0.002 kg/kg et la vitesse d'entrée à 0.1m/s.

### a) Rapport $b/a$



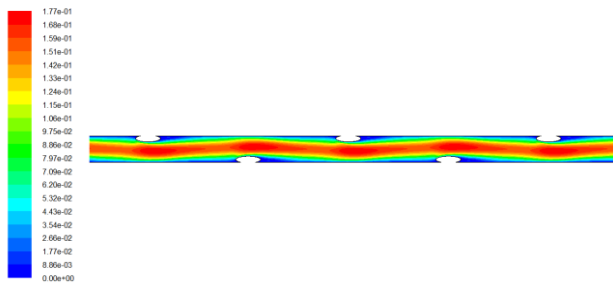
### b)



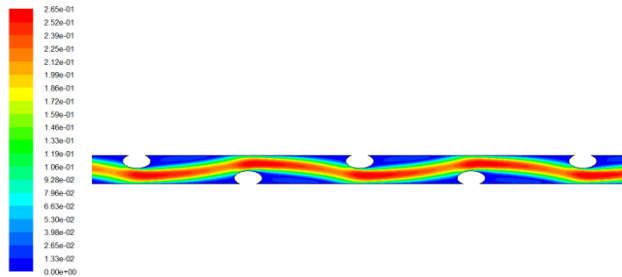
**Figure IV.7 :** Les ellipses pour différents rapports  $b/a$ .

### IV.2.1. Les champs de vitesse

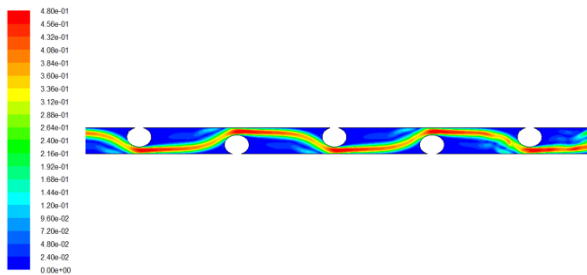
La figure IV.8 représente les contours de la vitesse obtenus en variant le rapport ' $b/a$ ' des obstacles, où le champ hydrodynamique varie en fonction du rapport géométrique de l'obstacle. On remarque que le comportement du fluide est relativement similaire pour les différents cas étudiés. En effet l'écoulement est brusquement stable pour  $b/a = 0.5$ , et instable pour  $b/a = 0.9$ ,  $b/a = 1.5$  avec une vitesse  $u_0 = 0.1\text{m/s}$ .



$b/a = 0.5, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$



$b/a = 0.9, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$

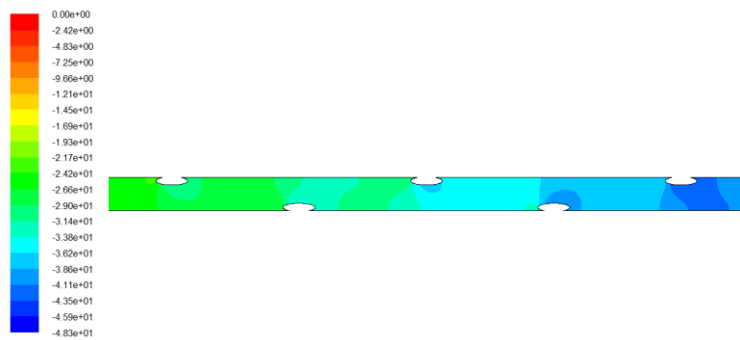


$b/a = 1.5, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$

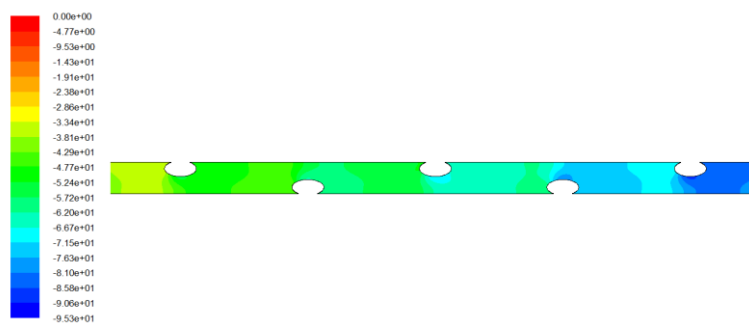
**Figure IV.8** : Champs des vitesses (en m/s) pour différents diamètres.

## IV.2.2. Contours de la pression statique

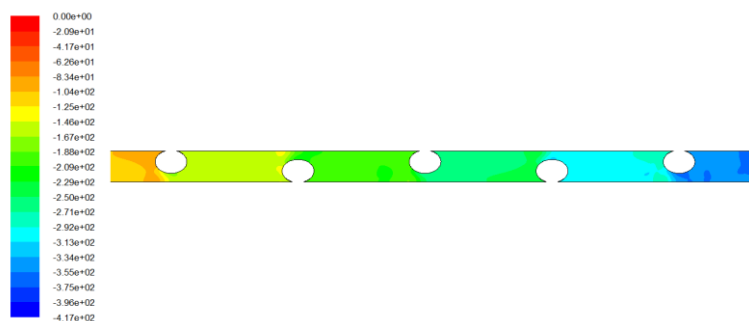
La figure IV.9 présente la propagation de la pression statique à l'intérieur de canal membranaire pour une concentration de sel  $m_{A0} = 0.002 \text{ kg/kg}$  et nombre de Reynolds fixe  $\text{Re} = 240$ . On remarque que la pression statique est plus élevée en amont des obstacles pour chaque cas et elles subissent une forte suppression à  $b/a = 1.5$ , puis une dépression.



$$b/a = 0.5, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$$



$$b/a = 0.9, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$$

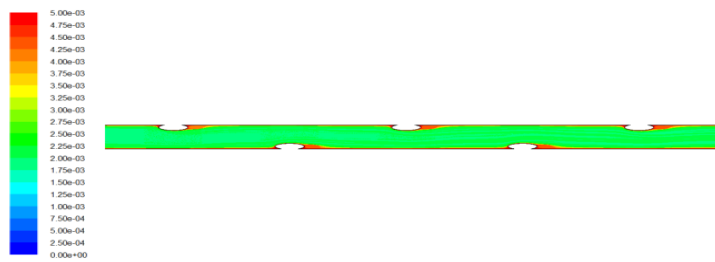


$$b/a = 1.5, u_0 = 0.1 \text{ m/s}, \text{Re} = 240$$

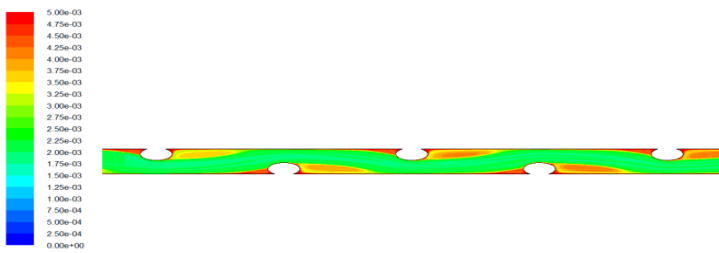
**Figure IV.9 :** Contours des pressions statiques (en Pa) pour différent diamètres.

### IV.2.3. Contours de la fraction massique en sel

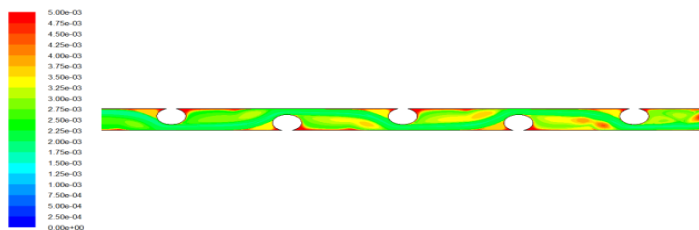
La figure IV.10 montre que le rapport géométrique de l'obstacle affecte significativement le champ de concentration. On constate que, les obstacles elliptiques avec le rapport ' $b/a$ ' = 1.5 perturbent largement la couche limite de concentration le long des membranaire.



$$b/a = 0.5, u_0 = 0.1\text{m/s}, \text{Re} = 240$$



$$b/a = 0.9, u_0 = 0.1\text{m/s}, \text{Re} = 240$$



$$b/a = 1.5, u_0 = 0.1\text{m/s}, \text{Re} = 240$$

**Figure IV.10:** Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) à différents rapports de variation  $b/a$ .

#### IV.2.4 Profils de cisaillement

La figure IV.11, présente les courbes du cisaillement le long de la membrane inférieure obtenus avec différents rapports de variation ' $b/a$ ' et pour une fraction massique d'entrée constante  $m_{A0} = 0.002\text{kg/kg}$ .

D'après les résultats obtenus, on remarque que les obstacles les plus importants  $b/a = 1.5$ , génère le cisaillement le plus important. En effet, les ellipses ayant le rapport  $b/a$  le plus élevé provoque étranglement et qui accélère le fluide en haut et en bas des obstacles elliptiques, par conséquent le cisaillement enregistré est plus important.

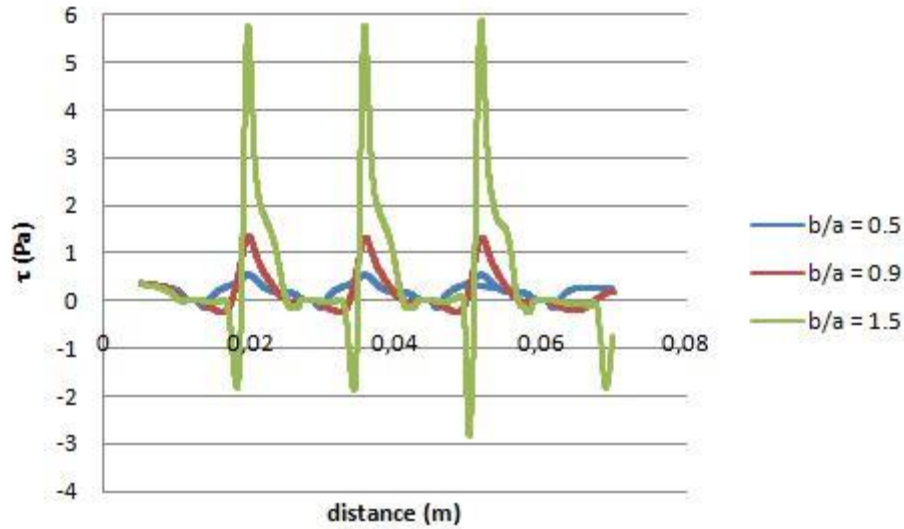


Figure IV.11 : Cisaillement pour différent rapport b/a pour les ellipses.

#### IV.2.5. Profils de la polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure

La figure IV.12 représente les profils de la polarisation de concentration le long de la membrane inférieure pour différents rapports b/a au nombre de Reynolds 240. On remarque que le rapport de forme impacte le profil de polarisation de concentration.

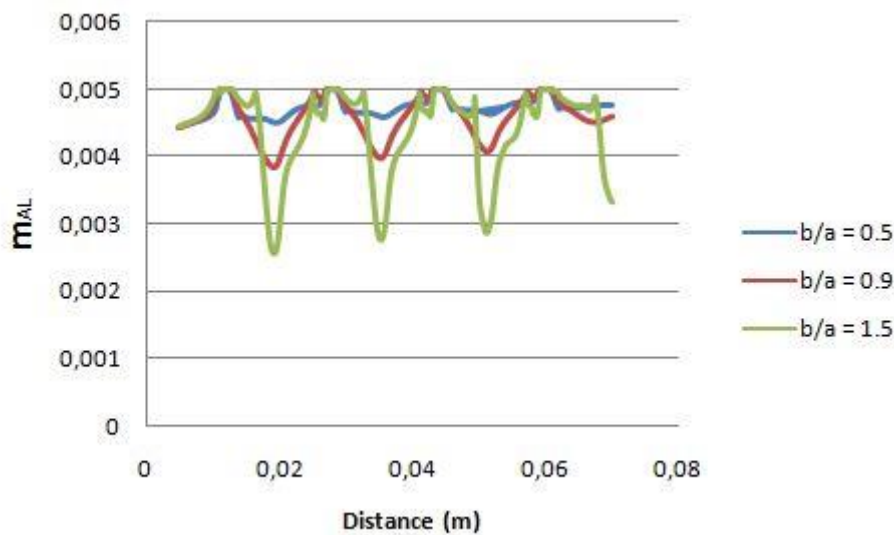
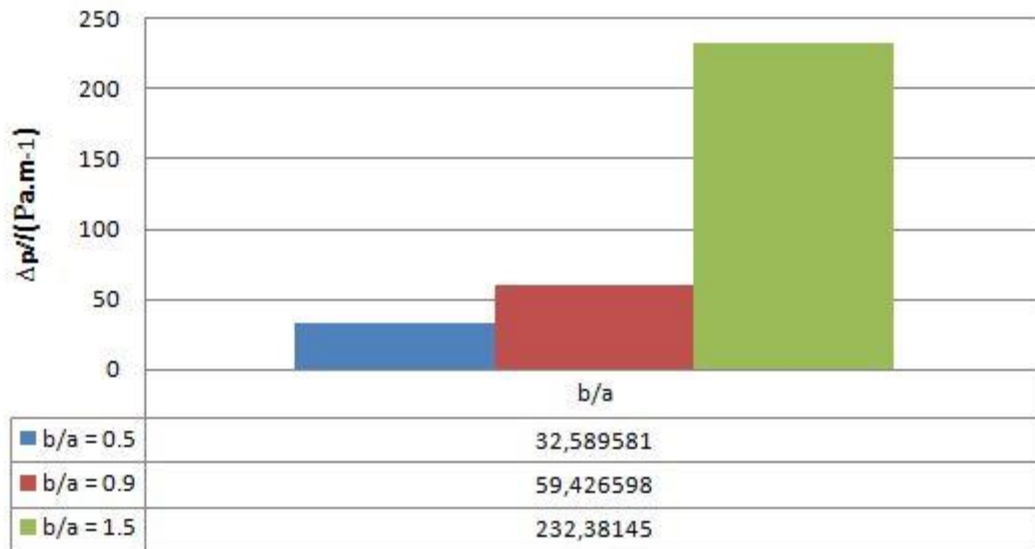


Figure IV.12 : Profil de concentration le long de la membrane inférieure pour différents rapports b/a.

### IV.2.6. Les pertes hydrauliques

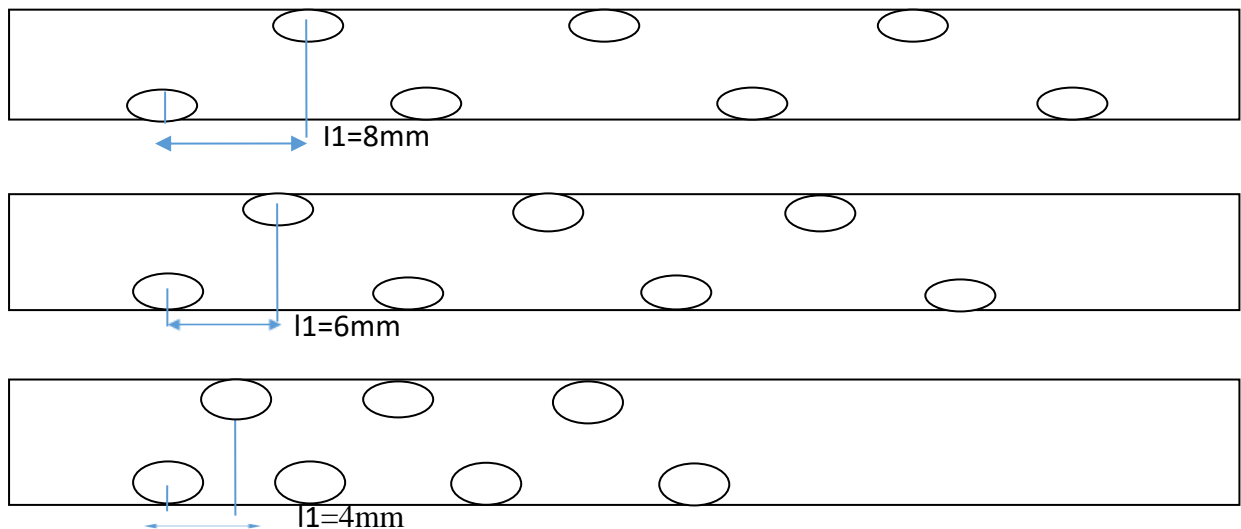
D'après l'histogramme de la figure IV.13, on constate que, la perte de pression par unité de longueur obtenue en présence du rapport  $b/a = 1.5$  est plus élevée par rapport aux autres cas étudiés. Par conséquent, les pertes de pression sont liées à l'agrandissement du rapport  $b/a$ .



**Figure IV.13** : Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents rapports  $b/a$  (Ellipses,  $m_{A0} = 0.002$  kg/kg).

### IV. 3 : Variation de la distance inter-filament

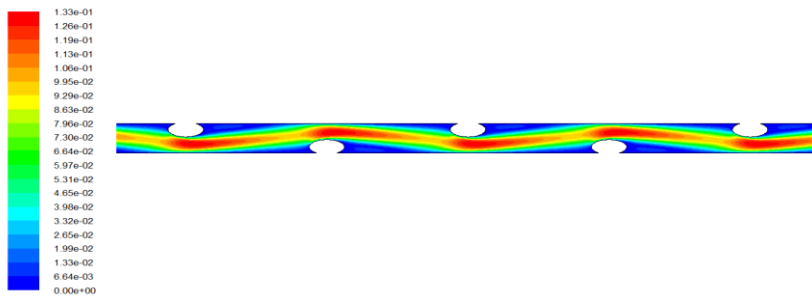
Dans ce cas on va étudier l'influence de la distance inter-filament sur le comportement de l'écoulement et la fraction massique en sel à l'intérieur du canal membranaire, nous avons opté pour diminuer la distance entre ces ellipses de 8mm à 6mm et 4mm comme la montre dans la figure IV.14. Nous avons fixé la fraction massique du sel à l'entrée à 0.002kg/kg et la vitesse d'entrée à 0.053m/s.



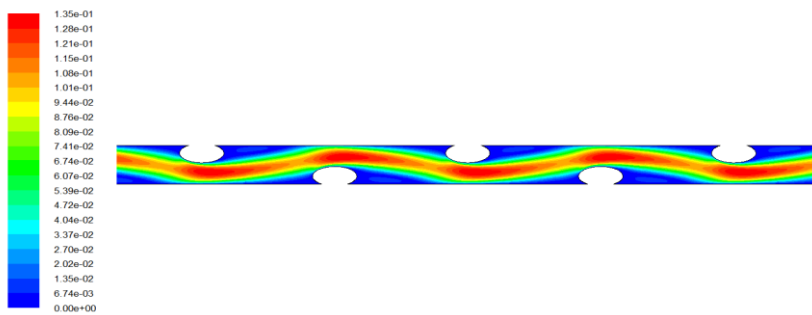
**Figure IV.14 :** Les ellipses pour différentes distances inter-filament.

#### IV.3.1. Les champs de vitesse

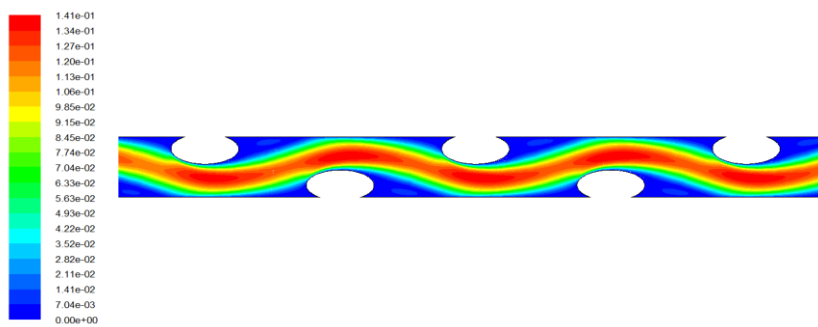
La figure IV.15 représente les contours de la vitesse obtenus avec différentes distances entre les obstacles elliptiques. On remarque que le comportement du fluide est relativement similaire pour les différents cas étudiés. En effet, les obstacles elliptiques insérés entre les deux membranes accélèrent le fluide au-dessus et au-dessous de ce dernier, ce qui favorise la déstabilisation du fluide.



$l_1 = 8\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{ m/s}$



$l_1 = 6\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{ m/s}$

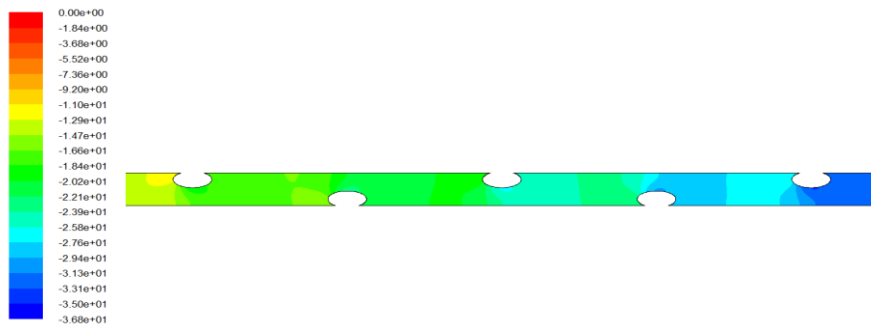


$l_1 = 4\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{ m/s}$

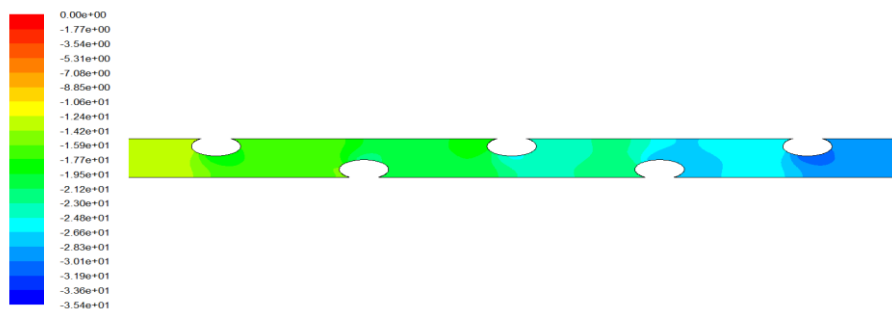
**Figure IV.15** : Les contours de vitesses (en m/s) pour différentes distances inter-filament.

### IV.3.2. Les contours de la pression statique

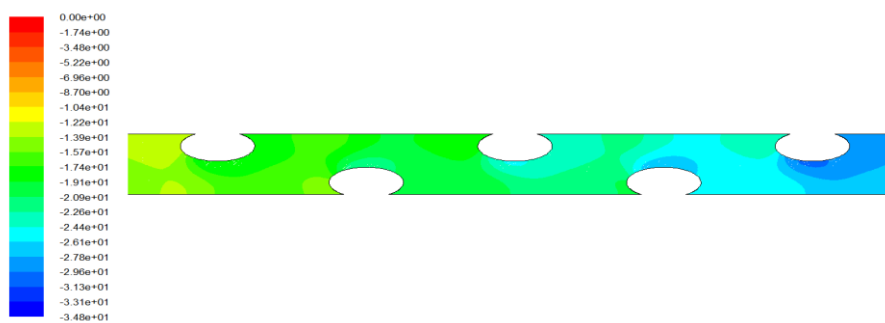
La figure IV.16 montre les champs de la pression statique lorsque la distance inter filament varie de 4 à 8 mm. On remarque une évolution similaire pour les différents cas traités.



$l_1 = 8\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{m/s}$



$l_1 = 6\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{m/s}$

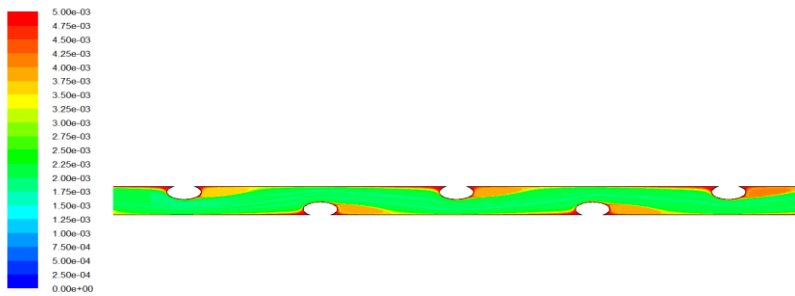


$l_1 = 4\text{mm}$  ,  $Re = 120$  ,  $u_0 = 0.053\text{m/s}$

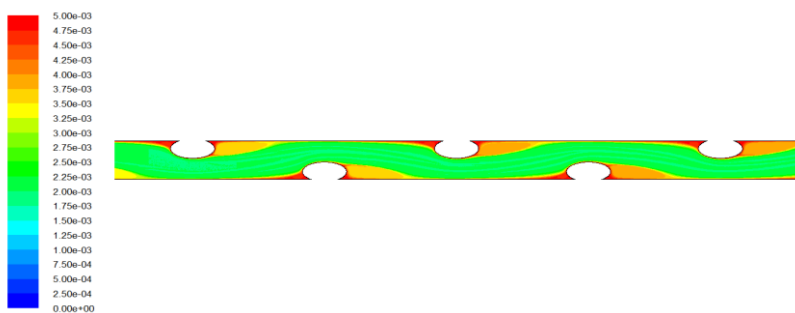
**Figure IV.16** : Les contours des pressions statiques (en Pa) pour différentes distances inter-filament.

### IV.3.3. Les contours de la fraction massique

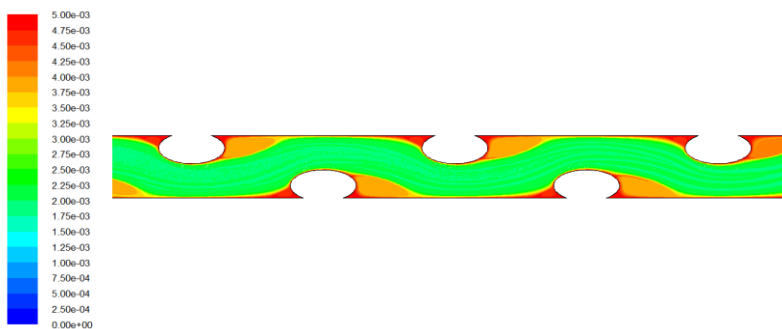
La figure IV.17 représente les contours de la fraction massique en sel à  $m_{A0}=0.002\text{kg/kg}$ . La couche du sel qui se développe au niveau des membranes est stable, elle est mince en amont, et épaisse en aval de ces obstacles. L'augmentation de la distance inter-filament entre ces obstacles elliptiques perturbe cette couche essentiellement près des membranes. A force de diminuer la longueur, la couche du sel devient de plus en plus uniforme.



$$l_1 = 8\text{mm} , \text{Re} = 120 , u_0 = 0.053\text{m/s}$$



$$l_1 = 6\text{mm} , \text{Re} = 120 , u_0 = 0.053\text{m/s}$$



$$l_1 = 4\text{mm} , \text{Re} = 120 , u_0 = 0.053\text{m/s}$$

**Figure IV.17 :** Contours de la fraction massique du sel (en kg/ kg) pour différentes distances inter-filament.

### IV.3.4 Les profils de cisaillement

La figure IV.18 montre que les profils suivent la même tendance ou les valeurs maximales et minimales sont très proches quelques soit la distance inter-finalement.

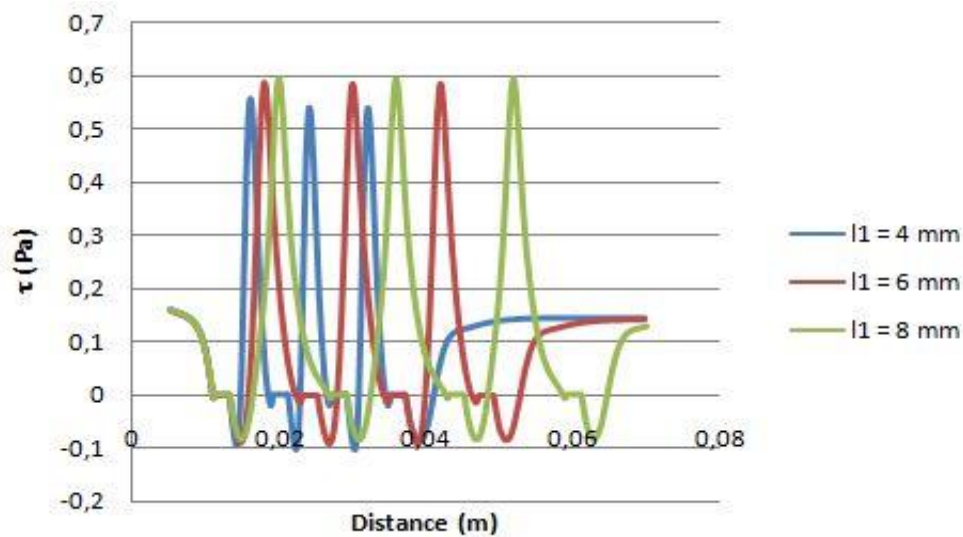


Figure IV.18 : Cisaillement pour différentes distances inter-filament de ces ellipses.

### IV.3.5. Profils de la polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure

La figure IV.19 représente les profils de la polarisation de concentration le long de la membrane inférieure pour différentes distance inter-filament et  $Re = 120$ . On constate que les profils de  $m_{AL}$  varient en fonction de la distance inter-finalement.

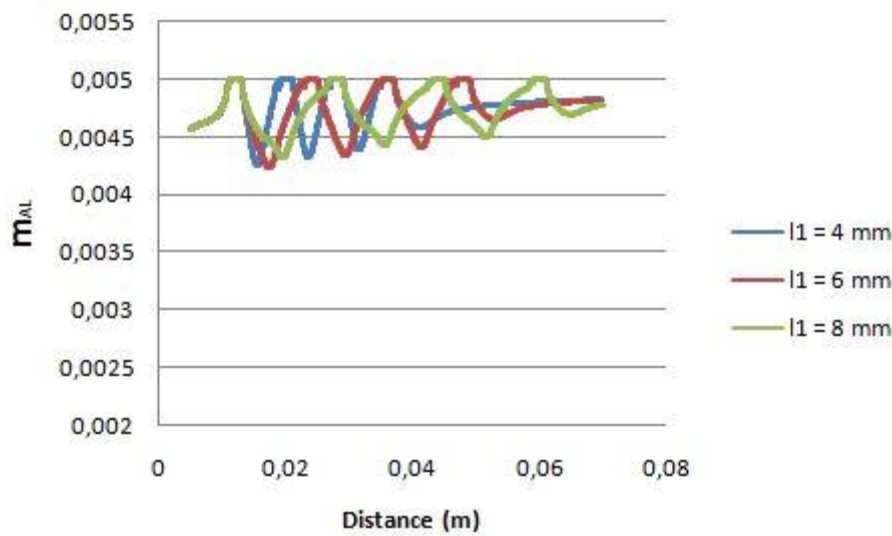


Figure IV.19 : Profil de la concentration le long de la membrane inférieure pour différentes distances inter-filament.

### IV.3.6 Les pertes hydrauliques

D’après l’histogramme de la figure IV.20, on constate que la perte de pression par unité de longueur obtenue en présence de la distance inter-filament  $l_1 = 8$  mm est plus élevée par rapport aux autres cas. Par conséquent, les pertes de pression sont liées à l’agrandissement de la distance entre ces entretoises.

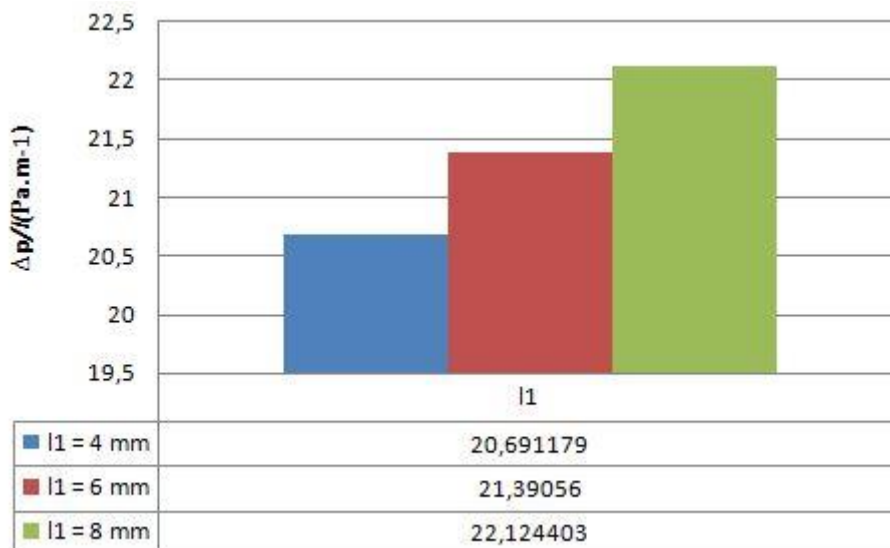


Figure IV.20 : Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différentes distances inter-filament entre ces ellipses (Ellipses,  $m_{A0} = 0.002\text{kg/kg}$ ).

**Conclusion**

Ce chapitre consacré aux résultats et discussions de notre simulation, nous a fait savoir que les paramètres tel que nombre de Reynolds, et variation du rapport  $b/a$  et la distance inter-filament (11) influent sur le comportement du transfert de masse dans le canal membranaire.

# **Conclusion générale**

L'objectif du présent travail consiste en l'étude de l'influence des différents paramètres sur le comportement hydrodynamique du fluide, et le dépôt de sel au niveau des membranes à l'intérieur d'un canal membranaire. Après avoir élaboré notre étude théorique, nous avons abordé les équations régissant l'écoulement en régime laminaire (stationnaire) avec le transfert de masse dans un modèle numérique bidimensionnel. Le processus a été modélisé en exploitant le logiciel de simulation numérique CFD Fluent basé sur la méthode des volumes finis qui couple le transfert de masse avec les équations de quantité de mouvement.

Dans notre problème, nous avons étudié trois cas :

Dans le premier cas, nous avons étudié l'influence de la variation du nombre de Reynolds et la fraction massique du sel sur le transfert de masse à l'intérieur du canal membranaire en présence d'obstacle elliptique en configuration zigzag. On a trouvé que l'augmentation du Reynolds de 100 à 380, perturbe l'écoulement, ce qui réduit le phénomène de polarisation de concentration aux niveaux des membranes.

En second lieux, l'étude s'est portée sur la variation du rapport  $b/a$  des ellipses, qui a été varié de 0.5 à 1.5. Il a été remarqué que la variation de ce rapport affecte de manière significative le transfert de la masse.

En dernier lieux, l'effet de la variation de la distance inter filament sur le transfert de masse a été étudié. Ici il a été constaté que la distance inter filament joue un rôle important dans le processus de purification membranaire.

En perspective dans présent travail, il serait intéressant d'imaginer de nouvelles formes d'obstacles capables d'améliorer le transfert de masse dans les canaux membranaires.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Orelis environment “Fournisseur d'équipements industriels à Salindres, France” [enligne]. (Consulté en septembre 2019).
- [2] A. Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Lavoisier Tec&Doc. 2001.
- [3] Le dessalement de l'eau de mer [en ligne]. Disponible sur : « [https://dessalement de l'eau de mer blog.wordpress.com/2017/02/04/introduction/](https://dessalement-de-l'eau-de-mer.blog.wordpress.com/2017/02/04/introduction/) ». (Consulté en décembre 2019).
- [4] Saunier Environnement & Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2000 : Etude relative au constat d'efficacité des appareils de désinfection de l'eau distribuée – cas particulier des U.V. et des membranes – Janvier 2000.
- [5] P. Danis. Dessalement de l'eau de mer techniques de l'ingénieur, J 2700. Juin 2003.
- [6] V.Geraldes, V. Semião, M.N. Pinho, hydrodynamics and concentration polarisation and flow structure with in nanofiltration spiral-wound modules with ladder-type spacers, *Desalination* 157 (2003) 395–402.
- [7] Al Akoum, O., Ding, L.H., Jaffrin, M.Y., “Microfiltration and ultrafiltration of UHT skim milk with a vibrating membrane module”, *Separation and Purification Technology*, vol. 28, 2002.
- [8] V. Geraldes, V. Semião, M.M. Pinho, The effect on mass transfer of momentum and concentration boundary layers at the entrance region of a slit with a nanofiltration membrane wall, *Chem. Eng. Sci.* 57 (2002), 735-748.
- [9] A. Panagopoulos, K-J. Haralambous et M.Loizidou, « desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review », *science of the total environment*, vol. 693, 25 novembre
- [10] M. Amokrane, D. Sadaoui, M. Dudeck, Improvement of reverse Osmosis desalination process by an oval zigzag spacer configuration, soumis, *Desal. Water Treat.* (2016).
- [11] B. Saint Girons, *La qualité de l'eau*, Paris, médicis, 13 octobre 2020, 218 p. (ISBN 978-2-85327-695-5), p. 155-167.

- [12] Travaux pratiques de génies chimie étude du procédé d'osmose inverse [en ligne]. « [https://eduscol.education.fr/rnchimie/gen\\_chim/triboulet/rtf/osmose\\_inverse.pdf](https://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf) ». (consulté en octobre 2019)
- [13] ZAHAF. B (2003): « L'osmose inverse pour les faibles concentrations en sels ». Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme DEUA en hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.
- [14] Gaeta SN., “Application of membrane processes to textile industry: development of specific membrane and process”, 4th Brite-EuRam Conference Processing, Séville, 1992.
- [15] A. Etori, “Vieillissement chimique de membranes d'osmose inverse,” thèse doctorat à l'université de toulouse 3. Juillet 2011.
- [16] Buisson. H., Lebeau T., Lelievre C., Herremans L. (1998) Les membranes : point sur les évolutions d'un outil incontournable en production d'eau potable, L'eau, l'industrie, les nuisances, pp 42-47.
- [17] C. Campos, I. Baudin, 2002 : L'élimination des pesticides par le procédé Cristal, T.S.M. n°3, mars 2002.
- [18] Chellam S., Serra C. A., Wiesner M. R. (1998) estimating costs for integrated membrane systems, journal of american water works association, 90:11:96-104.
- [19] A. Etori, “vieillissement chimique de membranes d'osmose inverse,” thèse doctorat à l'université de toulouse 3. Juillet 2011.
- [20] M.N. de Pinho, V. Semia ~o, V. Geraldés, Integrated modeling of transport processes in fluid/ nano filtration membrane systems , J. Membr. Sci. 206 (2002) 189–200.
- [21] A.L. Ahmad, K.K. Lau, M.Z.A. Bakar, S.R.A. Shukor, Integrated CFD simulation of concentration polarization in narrow membrane channel, Comput. Chem. Eng. 29 (2005) 2087–2095.
- [22] M. Amokrane, D. Sadaoui, M. Dudeck, temperature effect on the development of concentration polarization on osmotic membrane walls for desalination, JITH (2015) Marseille, France.

- [23] Alpa<sup>TM</sup>, Osmose inverse, spiral wound element design [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.alpa.com.pk/industrial-solutions/ro-filter/> ». (Consulté en septembre 2019).
- [24] Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, “Les procédés membranaires pour le traitement de l’eau,” 2002.
- [25] M. Amokrane, D. Sadaoui, M. D0udeck , C.P. Koutsou, New spacer designs for the performance improvement of the zig-zag spacer configuration in spiral-wound membrane modules (2015), desalination and water treatment, DOI: 10.1080/19443994.2015.1022003.
- [26] Combescure. M, Fages An, Niezborala C, Vaur M Février (2002) : « l’eau ultra pure obtention et applications, office international de l'eau » service national d'information et de documentation sur l'eau.