

**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 Professionnel en Génie Mécanique*

*Spécialité : Energétique*

*Option : Froid, Chauffage & Climatisation*

# Thème

**Modélisation numérique d'un écoulement à l'intérieur  
d'un module membranaire**

**Proposé et dirigé par :**

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

**Réalisé par :**

**M<sup>r</sup>. MARAR Lounes**

**M<sup>r</sup>. MOUAS Rachid**

*Présenté, devant le jury composé de :*

M<sup>r</sup>. OUIBRAHIM Ahmed

« Président »

UMMTO

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

« Encadreur »

UMMTO

M<sup>r</sup>. TEBBICHE Hocine

« Examineur »

UMMTO

Promotion: 2018/2019

## ***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, **M<sup>r</sup> 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 : **M<sup>r</sup> Ouibrahim Ahmed** et **M<sup>r</sup> Tebbiche Hocine**.*

*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 mes parents et mes grands-parents Que dieu leur procure*

*bonne santé et longue vie, et bien sûr à mes frères,*

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

*A mon binôme Rachid.*

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

*de ce projet, je vous dis merci.*

*Et à toute la promotion de Génie Mécanique 2018/2019.*

*MARAR Lounes*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents*

*A mes Frères et sœurs*

*A toute ma famille, et mes amis*

*A mon binôme Lounes*

*A tous mes 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.*

*MOUAS Rachid*

## Résumé

Ce travail, a pour objectif d'étudier le comportement hydrodynamique d'un écoulement bidimensionnel en régime laminaire (stationnaire et instationnaire), 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 d'équations régissant l'écoulement (équations de transport). L'analyse est faite pour plusieurs géométries (cylindre de différents diamètres 1, 1.2 et 1.5 mm, carré, triangle et losange), trois nombres de Reynolds (55, 100 et 170) et différentes fractions massique en sel à l'entrée  $m_{A0}$  (0.005, 0.01 et 0.04 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 cylindre et les formes de l'obstacle.

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

## Abstract

This work aims to study the hydrodynamic behavior of a two-dimensional flow in laminar regime (stationary and unsteady), for an incompressible fluid (seawater) with mass transfer inside a membrane channel of the module reverse osmosis spiral. We have sketched and meshed the geometry of interest with the Gambit 2.4.6 mesh generation software. For the simulations, we used CFD Fluent 6.3.26 software based on the finite volume method, in order to solve the system of equations governing the flow (transport equations). The analysis is made for several geometries (cylinder with different diameters: 1, 1.2 and 1.5 mm, square, triangle and rhombus), three Reynolds numbers (55, 100 and 170) and different mass fractions in salt at the input  $m_{A0}$  (0.005, 0.01 and 0.04 kg / kg). The results obtained show that the development of the concentration polarization layer is a complicated phenomenon which is influenced by all the main variables of the process studied: hydrodynamics (speed), mass fraction of salt at the inlet, the size of the cylinder and the shapes of the obstacle.

**Keywords:** Desalination, Reverse Osmosis, Membrane module, Numerical simulation.

# 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 et des tableaux.....</b>	<b>x</b>
<b>Nomenclature.....</b>	<b>xiii</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. Dessalement.....</i></b>	<b><i>3</i></b>
I.1.1. Les techniques de filtration membranaire .....	3
I.1.1.1. La microfiltration.....	4
I.1.1.2. L'ultrafiltration .....	4
I.1.1.3. La nanofiltration.....	4
I.1.1.4. L'osmose inverse.....	4
<b><i>I.2. Les modules membranaires .....</i></b>	<b><i>6</i></b>
I.2.1. Définition.....	6
I.2.2. Types de membranes.....	6
I.2.2.1. Modules plans.....	6

I.2.2.2. Modules spiralés.....	7
I.2.2.3. Modules tubulaires.....	8
I.2.2.4. Modules à fibres creuses.....	8
I.2.3. Caractérisations des membranes.....	9
I.2.3.1. Le taux de conversion.....	9
I.2.3.2. La sélectivité.....	9
I.2.3.3. La pression osmotique.....	9
I.2.3.4. Le transfert de solvant et de soluté.....	10
I.2.3.4.1. Flux de solvant.....	10
I.2.3.4.2. Flux de soluté.....	11
I.2.4. Matériaux .....	11
I.2.4.1. Les dérivés de cellulose.....	11
I.2.4.2. Le polypropylène.....	12
I.2.4.3. Les poly sulfones.....	12
I.2.5. Les Différents systèmes membranaires.....	12
I.2.5.1. Systèmes de filtrations membranaires sous pression.....	13
I.2.5.2. Systèmes à membranes immergées.....	15
<i>I.3. Etude bibliographique.....</i>	<i>16</i>
<b><i>Conclusion.....</i></b>	<b><i>19</i></b>

## Chapitre II : Formulation mathématique

<b><i>Introduction.....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<i>II.1. Description mathématique du problème physique.....</i>	<i>20</i>
<i>II.2. Equations de transport.....</i>	<i>21</i>
II.2.1.1. Equation de continuité.....	21
II.2.1.2. Equations de Navier-Stokes .....	22

II.2.1.3. Equation de transfert de masse (transport d'espèces).....	23
<b>II.3. Propriétés du fluide et conditions aux limites.....</b>	<b>24</b>
II.3.1. Propriétés du fluide.....	24
II.3.2. Conditions aux limites.....	25
<b>II.4. Paramètres d'intérêt.....</b>	<b>25</b>
II.4.1. Le nombre de Reynolds.....	25
II.4.2. Le cisaillement.....	26
II.4.3. La perte hydraulique par unité de longueur.....	26
II.4.4. La polarisation de concentration.....	26
<b>Conclusion.....</b>	<b>27</b>

## **Chapitre III: Matériels et méthodes**

<b>Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>III.1. Présentation du logiciel Gambit 2.4.6.....</b>	<b>28</b>
<b>III.2. Présentation du logiciel Fluent 6.3.26.....</b>	<b>29</b>
<b>III.3. Etapes de la simulation sous Gambit et Fluent.....</b>	<b>30</b>
<b>III.4. Construction de la géométrie sur Gambit 2.4.6.....</b>	<b>31</b>
a) Création des points.....	31
b) Création des lignes.....	32
c) Création des faces.....	32
III.4.1. Maillage de la géométrie.....	33
III.4.1.1. Maillage des segments .....	33
III.4.1.2. Maillage des faces .....	34

III.4.2. Conditions aux limites et définition du domaine.....	34
<b>III.5. Simulation sous Fluent 6.3.26.....</b>	<b>36</b>
III.5.1. Vérification de la géométrie importée.....	37
III.5.2. Définition du régime d'écoulement.....	37
III.5.3. Définition de l'équation de transport du sel.....	38
III.5.4. Propriétés du fluide utilisé.....	39
III.5.5. Les conditions aux limites.....	39
III.5.6. Contrôle de solution.....	40
III.5.7. Définition des critères de convergence des résidus.....	41
III.5.8. Initialisation des calculs.....	42
III.5.9. Lancement des calculs itératifs.....	42
<b>Conclusion.....</b>	<b>43</b>

## Chapitre IV: Résultats et discussion

<b>Introduction.....</b>	<b>44</b>
<i>IV.1. 1<sup>er</sup> cas / Simulation de l'écoulement d'une eau salée à l'intérieur d'une unité d'un module membranaire (Variation du nombre de Reynolds et la fraction massique en sel à l'entrée) .....</i>	<i>44</i>
IV.1.1. Les champs de vitesse.....	45
IV.1.2. Les contours de la pression statique.....	47
IV.1.3. Les contours de la fraction massique en sel.....	48
IV.1.4. Les profils de cisaillement.....	49
IV.1.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure...49	
A) Comportement de la polarisation de concentration à différentes vitesses d'entrée de la solution aqueuse de NaCl.....	49

B) Comportement de la polarisation de concentration à différentes salinités de la solution aqueuse de NaCl.....	52
IV.1.6. Les pertes hydrauliques.....	53
<b>IV.2. 2<sup>eme</sup> cas / Variation du diamètre de cylindre .....</b>	<b>54</b>
IV.2.1. Les champs de vitesse.....	55
IV.2.2. Les contours de la pression statique.....	56
IV.2.3. Les contours de la fraction massique en sel.....	57
IV.2.4. Les profils de cisaillement.....	57
IV.2.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure...	59
IV.2.6. Les pertes hydrauliques.....	60
<b>IV.3. 3<sup>eme</sup> cas / Variation de la géométrie de l'obstacle immergé.....</b>	<b>61</b>
IV.3.1. Les champs de vitesse.....	62
IV.3.2. Les contours de la pression statique.....	63
IV.3.3. Les contours de la fraction massique en sel.....	64
IV.3.4. Les profils de cisaillement.....	66
IV.3.5. Les profils de polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure...	67
IV.3.6. Les pertes hydrauliques.....	68
<b>Conclusion.....</b>	<b>68</b>
 <b>Conclusion générale.....</b>	 <b>69</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures et des tableaux

Figure	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Les techniques de filtration membranaire	5
Figure I.2	Schéma d'un module plan Ray-Flow	6
Figure I.3	Schéma d'un module spiralé d'osmose inverse	7
Figure I.4	Schéma d'un module tubulaire de marque Synderfiltration	8
Figure I.5	Schéma d'un module à fibres creuses de marque Synderfiltration	8
Figure I.6	Systèmes de filtration membranaires sous pression : Schéma (a) : configuration multi-étagé Schéma (b) : configuration avec recirculation	14
Figure I.7	Système à membranes immergées	15
Figure I.8	Écoulement pour les différentes configurations : cavité (a), immergée (b) et zigzag (c)	17
Figure I.9	Contours de concentration pour différentes configurations : a) Immergée et b) zigzag.	18
Figure II.1	Module membranaire spiralé et le domaine bidimensionnel à étudier : a) Module membranaire spiralé b) Modèle physique à étudier en 2D	20
Figure II.2	Le phénomène de la polarisation de concentration obtenu à partir d'un interférogramme	27
Figure III.1	Interface du logiciel Gambit2.4.6	29
Figure III.2	Interface du logiciel Fluent 6.3.26	29
Figure III.3	Module membranaire	30
Figure III.4	Dimensions de la Géométrie de référence étudiée	30
Figure III.5	Création des points sous Gambit	31
Figure III.6	Création des lignes sous Gambit	32
Figure III.7	Création des faces sous Gambit	32
Figure III.8	Maillage des lignes sous Gambit	33
Figure III.9	Maillage des faces sous Gambit	34
Figure III.10	Conditions aux limites et définition du domaine : a) Conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine étudié b) Définition du domaine	35

Figure III.11	Exportation du fichier 'msh'	35
Figure III.12	Choix du 2D, double précision sur Fluent 6.3.26	36
Figure III.13	Importation du fichier '.msh'	36
Figure III.14	Vérification des données sous fluent	37
Figure III.15	Définition du solveur : a) Stationnaire b) Instationnaire	38
Figure III.16	Fenêtre de L'UDS	38
Figure III.17	Définition de la nature de fluide et ses paramètres	39
Figure III.18	Définition des conditions aux limites sous fluent 6.3.26	39
Figure III.19	Contrôle des solutions sous fluent 6.3.26 a) Laminaire stationnaire b) Laminaire instationnaire	40
Figure III-20	Fenêtre des résidus	41
Figure III-21	Initialisation des calculs	42
Figure III.22	Lancement des calculs sous fluent 6.3.26 : a) Laminaire stationnaire b) Laminaire instationnaire	42
Figure III.23	Allures de l'évolution des résidus de calcul	43
Figure IV.1	Champs des vitesses (en m/s) à différents nombres de Reynolds	45
Figure IV.2	Champs des vitesses de la réf	46
Figure IV.3	Contours des pressions statiques (en Pa) à différents nombres de Reynolds	47
Figure IV.4	Contours de la fraction massique en sel (en kg/kg) à différents nombres de Reynolds	48
Figure IV.5	Cisaillement pour différents Reynolds le long de la membrane	49
Figure IV.6	Graphes du rapport de la fraction massique en sel pour différents nombres de Re le long de la membrane inférieure a) Cylindre $D = 1$ mm et $m_{A0} = 0.005$ kg/kg b) Cylindre $D = 1$ mm et $m_{A0} = 0.01$ kg/kg c) Cylindre $D = 1$ mm et $m_{A0} = 0.04$ kg/kg	51
Figure IV.7	Graphe du rapport de la fraction massique en sel pour différents $m_{A0}$ le long de la membrane (Cylindre $D = 1$ mm et $Re = 100$ )	52

Figure IV.8	Histogramme de $\Delta p/l$ pour différents nombres de Reynolds	53
Figure IV.9	Le cylindre pour différents diamètres	54
Figure IV.10	Champs des vitesses (en m/s) pour différents diamètres.	55
Figure IV.11	Contours des pressions statiques (en Pa) pour différents diamètres	56
Figure IV.12	Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) à différents diamètres pour les nombres de Re = 55 et 100	57
Figure IV.13	Cisaillement pour différents diamètres le long de la membrane inférieure : a) Re= 55, b) Re= 100	58
Figure IV.14	Profil de concentration le long de la membrane inférieure pour différents diamètres : a) Re=55, b) Re= 100	59
Figure IV.15	Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents Diamètres (Cylindre, $m_{A0} = 0.01$ kg/kg)	60
Figure IV.16	Les différentes géométries de l'obstacle immergé	61
Figure IV.17	Les contours des vitesses (en m/s) pour différentes géométries	62
Figure IV.18	Les contours des pressions statiques (en Pa) pour différentes géométries	64
Figure IV.19	Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) pour différentes géométries à Re=55 et Re=100	65
Figure IV.20	Cisaillement le long de la membrane inférieure pour différentes géométries : a) Re=55, b) Re= 100	66
Figure IV.21	Rapport de la fraction massique en sel pour différentes géométries le long de la membrane inférieure a) Re=55, b) Re= 100	67
Figure IV.22	Histogramme de $\Delta p/l$ pour différentes géométries ( $m_{A0} = 0.01$ kg/kg)	68
<b>Tableau</b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>Pages</b>
Tableau IV.1	Variation de la vitesse maximale en fonction du Reynolds d'entrée	46
Tableau IV.2	Variation de la vitesse maximale en fonction du Reynolds d'entrée pour différents diamètres	56
Tableau IV.3	Variation de la vitesse maximale en fonction du Reynolds d'entrée pour différentes géométries	63

## Nomenclature

Symbole	Description	Unité
Y	Taux de conversion	-
$Q_p$	Débit massique du perméat	$m^3s^{-1}$
$Q_r$	Débit massique du retentât	$m^3s^{-1}$
$R_{Rejet}$	Taux de rejet	-
Cr	Concentration du sel en retentât	g/L
Cp	Concentration du sel en perméat	g/L
$m_A$	Fraction massique en sel à l'intérieure du canal membranaire	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
$m_{AL}$	Fraction massique en sel au niveau de la ligne	kg/kg
$m_{AP}$	La fraction massique en sel du soluté du côté du perméat	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	L.bar.mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
T	Température	°C
$J_{solvant}$	Flux de solvant	m.s <sup>-1</sup>
$J_{soluté}$	Flux de soluté	kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
$J_v$	Vitesse de perméation	m/s
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

<b>B</b>	Perméabilité moyenne de la membrane au soluté	$\text{m.s}^{-1}$
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds calculé en fonction de D ou L des géométries	-
<b>Re<sub>h</sub></b>	Nombre de Reynolds Hydraulique	-
<b>D<sub>AB</sub></b>	Coefficient de diffusion binaire	$\text{m}^2/\text{s}$
<b>P</b>	Pression statique	Pa
<b>P<sub>1</sub></b>	Pression statique au niveau de la ligne en aval de l'obstacle	Pa
<b>P<sub>2</sub></b>	Pression statique au niveau de la ligne en aval de l'obstacle	Pa
<b>L<sub>m</sub></b>	Longueur de la membrane	mm
<b>L<sub>1</sub></b>	Distance entre le centre de l'obstacle et l'entrée du canal	mm
<b>L<sub>2</sub></b>	Distance entre le centre de l'obstacle et la sortie du canal	mm
<b>l</b>	La distance entre les deux points de pression	mm
<b>H</b>	Hauteur du canal d'alimentation	mm
<b>D<sub>1, 2, 3</sub></b>	Diamètre du cylindre	mm
<b>u<sub>0</sub></b>	Vitesse d'entrée selon l'axe des X	m/s
<b>V</b>	Vitesse caractéristique du fluide	m/s
<b>g</b>	Accélération de la pesanteur	$\text{m.s}^{-2}$
<b>Lettres grecques</b>		
<b><math>\mu</math></b>	viscosité dynamique	Pa.s
<b><math>\rho</math></b>	Masse volumique du fluide	$\text{Kg.m}^{-3}$
<b><math>\nu</math></b>	Viscosité cinématique du fluide	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
<b><math>\tau</math></b>	Contrainte de cisaillement	Pa
<b><math>\partial</math></b>	Dérivée partielle	-
<b><math>\nabla</math></b>	Gradient nabla	-

# **Introduction générale**

## **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.

La terre est souvent appelé la planète bleue parce que l'eau recouvre la majorité de sa surface environ 71%, le volume d'eau sur terre est estimé à environ 1,4 milliard de km<sup>3</sup>, mais seulement 3% de cette source est douce [1]. En plus cette dernière n'est pas uniformément répartie à travers le monde, puisque moins de 10 pays partagent 60 % des ressources en eau naturelle, avec un pourcentage très faible 3% située dans des régions quasi-inatteignables par l'homme. Les 2/3 de cette eau douce est sous forme de glace alors que le reste est sous forme de liquide [2]. Le problème d'eau dans le monde est de plus en plus aigu particulièrement avec le réchauffement climatique de la planète.

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

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de purification des eaux saumâtres sont mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des solutions prometteuses est le dessalement de l'eau de mer qui est opérationnelle depuis de nombreuses années. Parmi les techniques utilisées pour le dessalement de l'eau de mer, l'Osiose Inverse est le procédé le plus répandu dans ce domaine.

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.

Ce manuscrit présente un travail de modélisation numérique d'un écoulement bidimensionnel d'une eau salée à l'intérieure d'une cellule unitaire d'un canal membranaire contenant des obstacles de forme circulaire ou autres. Il est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la partie théorique où nous abordons des notions de base sur les procédés membranaires et quelques travaux de recherche dédiés à cette thématique. 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 leurs classifications, leurs principes de mise en œuvre, et les différentes configurations des modules membranaires. Nous terminons le chapitre par une revue bibliographique dédiée aux travaux activant dans notre domaine d'intérêt.

### I.1. Le dessalement

Le dessalement est une technique de suppression du chlorure de Sodium (NaCl) de l'eau de mer ou saumâtre. On distingue deux grandes familles de procédés, qui sont :

- Les procédés membranaires utilisant des membranes sélectives comme l'Osmose Inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase comme la distillation et la congélation.

Le choix d'utilisation de chacun d'eux est relié à la disponibilité de la source d'énergie qui fait fonctionner l'appareillage de dessalement [3].

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement de l'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause des problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent. De ce fait, nous allons nous focaliser sur le procédé membranaire d'Osmose Inverse en définissant ces caractéristiques.

#### I.1.1. Les techniques de filtration membranaire

On distingue quatre techniques de filtration selon le gradient de pression et la taille des pores, qui sont :

### **I.1.1.1. La microfiltration (MF)**

La Microfiltration pour laquelle la taille des pores est de l'ordre du micromètre se situant généralement entre 0,1 à 10  $\mu\text{m}$ . C'est un procédé basse pression de 0,1 à 2 bars qui permet de séparer des composés à grand poids moléculaire (éléments en suspension ou éléments colloïdaux) des solides dissous. Ce procédé inclut la récupération de cellules issues de bouillons de fermentation, le fractionnement de protéines de lait, la clarification du sirop de maïs et la récupération de produits chimiques utilisés dans les phases de Nettoyage en Place (NEP) [4].

### **I.1.1.2. L'Ultrafiltration (UF)**

L'Ultrafiltration se situe entre la microfiltration et la nanofiltration, avec une taille de pores variant de 1 à 100 nm (0.001 à 0.1  $\mu\text{m}$ ) est un procédé basse pression (1 à 5 bars) de séparation sélective utilisé pour purifier les composés de poids moléculaire moyen ou fort tels que les protéines de lait ou végétales, les glucides et les enzymes. Les domaines d'application sont notamment la concentration des protéines sériques, la concentration et la déminéralisation des gélatines et la clarification des jus de fruit [4].

### **I.1.1.3. La Nanofiltration (NF)**

La Nanofiltration ou la taille des pores est de l'ordre de nanomètre (0,001  $\mu\text{m}$ ) est un procédé de filtration unique dont le domaine d'application se situe entre l'Ultrafiltration et l'Osmose Inverse sous une pression qui variée de 5 à 20 bars. Elle est conçue pour obtenir une séparation très spécifique des composés à faible poids moléculaire, tels que les sucres, des minéraux dissous et des sels. Ce procédé inclut la déminéralisation des produits laitiers, la récupération des protéines hydrolysées, la concentration des sucres ainsi que la purification des colorants solubles et des pigments [4].

### **I.1.1.4. L'Osmose Inverse (OI)**

L'Osmose Inverse est un procédé haute pression entre 20 et 80 bars, énergétiquement performant. Les membranes d'Osmose Inverse ont des pores plus fins entre 0,001 et 0,0001  $\mu\text{m}$ , utilisé pour le traitement des eaux usées. Ce procédé est couramment utilisé aussi pour la pré-concentration des produits laitiers ou alimentaires avant l'évaporation, le

traitement des condensats des évaporateurs, la purification des eaux saumâtres et le dessalement de l'eau de mer [4].

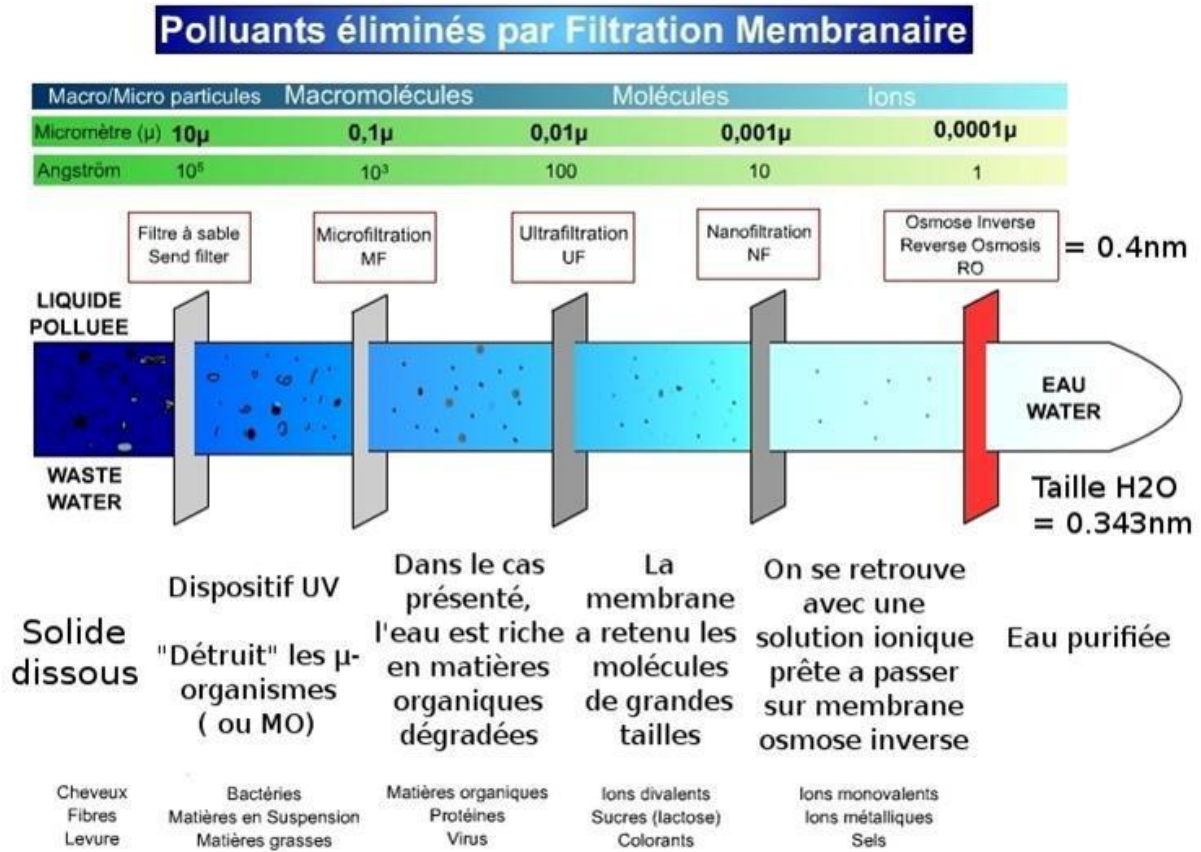


Figure I.1: Les techniques de filtration membranaire [4].

## I.2. Les modules membranaires

### I.2.1. Définition

La membrane est définie comme une barrière séparant deux compartiments et permettant le passage préférentiel d'au moins une espèce parmi les autres sous l'action d'une force de transfert chimique (concentration) ou physique (pression). En général, les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers sous l'effet d'une pression appliquée, tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues.

### I.2.2. Types de membranes

#### I.2.2.1. Modules plans

Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme des feuilles. Les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres et sont séparées par des grilles ou supports. Le module plan est un assemblage de type filtre-presse. Dans le cas du module Ray-Flow, la membrane est disposée à plat sur un support permettant l'écoulement et la collecte du perméat. L'écoulement de l'alimentation est tangentiel à la membrane et l'épaisseur de la veine liquide est assurée par l'épaisseur du joint qui rend étanche le montage (Figure I.2). Ce type de module est peu compact, mais facilement démontable pour le changement d'une ou plusieurs membranes [5].

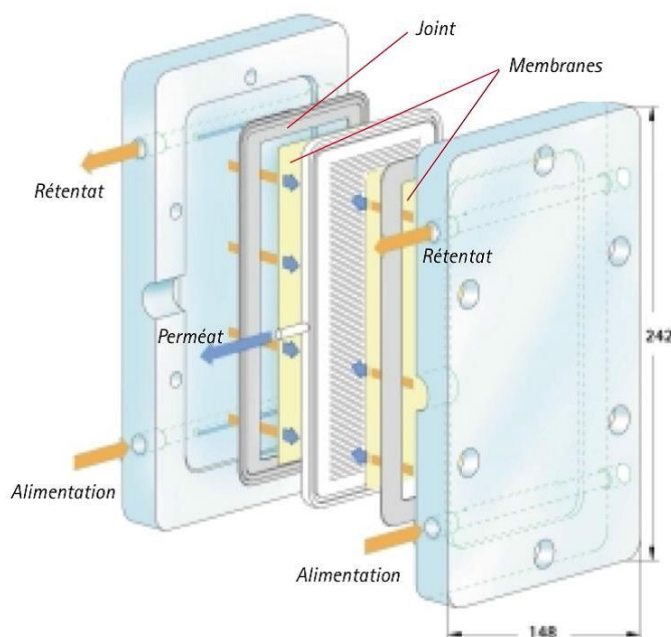
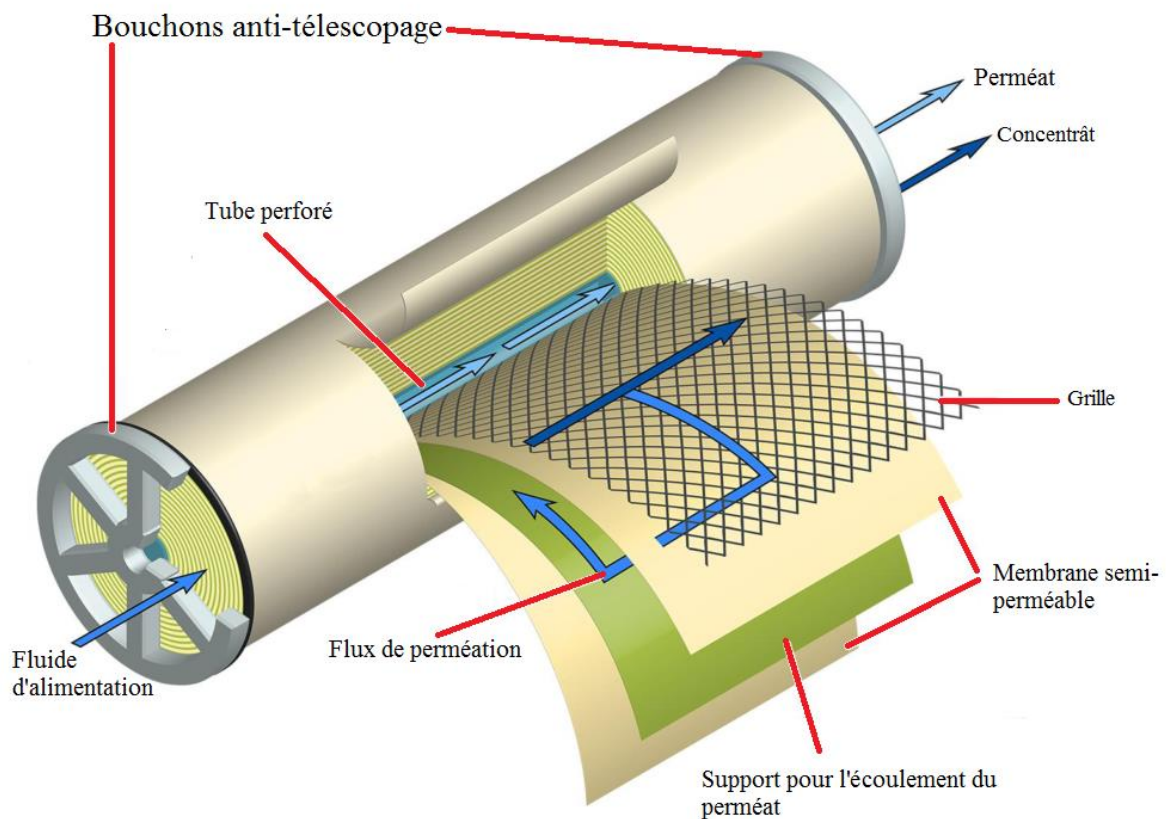


Figure I.2: Schéma d'un module plan Ray-Flow [5].

### I.2.2.2. Modules spiralés

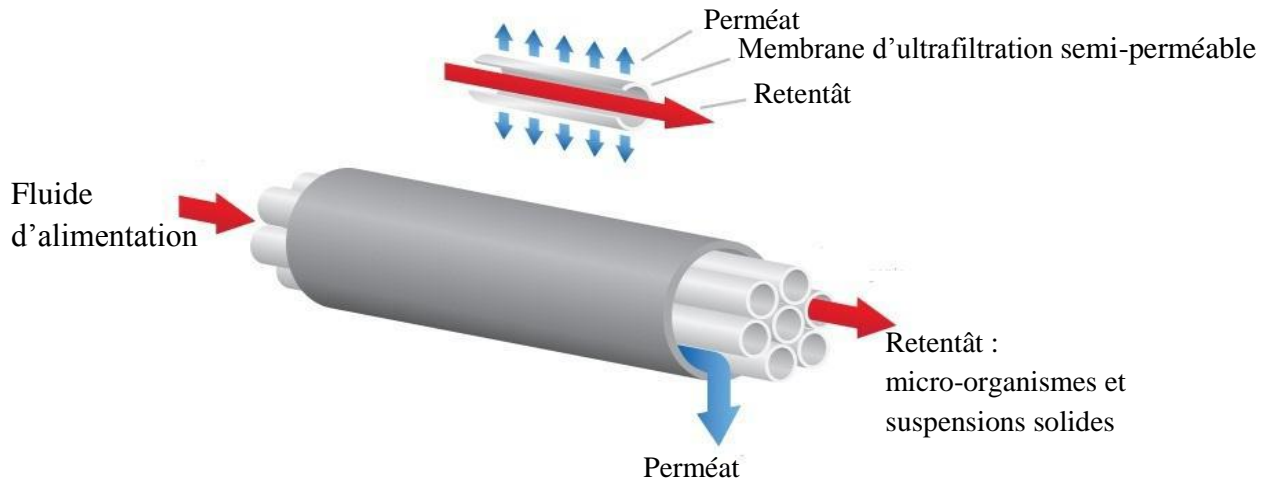
C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux collecteur de perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du retentât. Le module spiralé est composé d'un ensemble de membranes planes collées dos à dos, renfermant un espaceur de perméat et assurant l'écoulement du perméat dans le tube collecteur qui constitue l'axe central de la membrane. Du côté retentât, les membranes sont séparées par des espaceurs qui jouent le rôle de promoteur de turbulence et sont enroulés autour du tube collecteur (Figure I.3). Un grillage extérieur maintient l'ensemble enroulé. Le nombre des membranes collées dos à dos variées suivant les tailles des modules et des fabricants. Un module spiralé est beaucoup plus compact qu'un module plan [6].



**Figure I.3:** Schéma d'un module spiralé d'Osiose Inverse [6].

**I.2.2.3. Modules tubulaires**

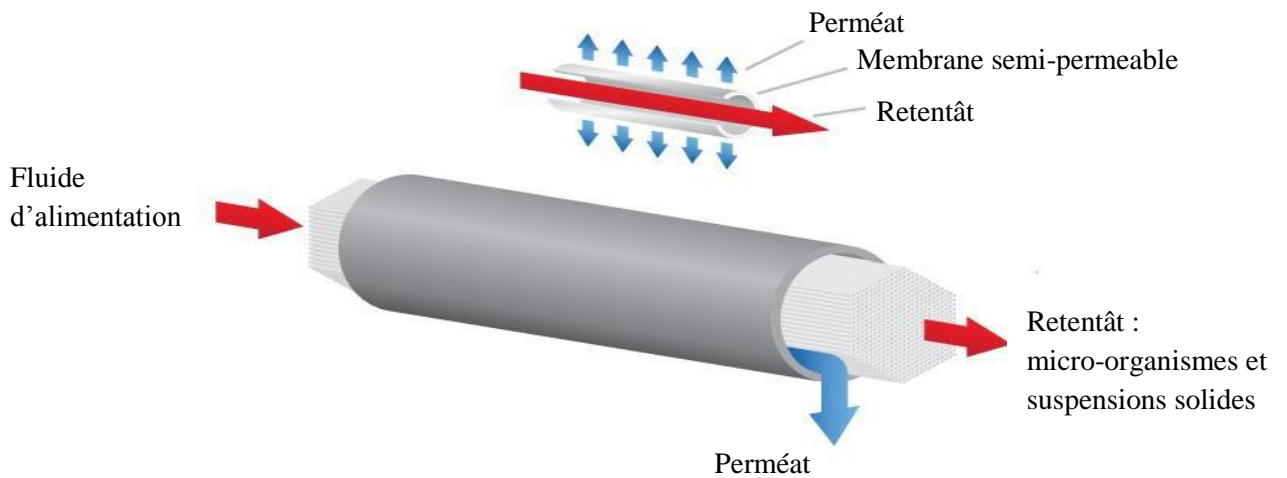
Les modules tubulaires sont constitués d'une ou plusieurs membranes inorganiques ou organiques de forme tubulaire, ayant des diamètres internes entre 4 et 25 mm. Plusieurs tubes individuels peuvent être placés dans un module. Le module multicanaux est fait d'assemblage de tubes parallèles dans une même matrice qui représente la forme optimisée actuelle [7].



**Figure I.4:** Schéma d'un module tubulaire de marque Synderfiltration [7].

**I.2.2.4. Modules à fibres creuses**

Les modules à fibres creuses sont constitués de fibres membranaires disposées parallèlement dans un tube central perforé. La solution saline à l'intérieur du tube central se diffuse radialement autour des fibres [7].



**Figure I.5:** Schéma d'un module à fibres creuses de marque Synderfiltration [7].

### I.2.3. Caractérisations des membranes

Le taux de conversion et la sélectivité des membranes sont deux grandes notions qui permettent de caractériser les membranes :

#### I.2.3.1. Le taux de conversion

C'est La fraction de débit qui traverse la membrane, qu'on note  $Y$  :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_r} \quad (I.1)$$

$Q_p$  : Le débit de la partie qui passe à travers la membrane ou perméat (en  $m^3s^{-1}$ ).

$Q_r$  : Le débit de la partie appelée concentrât ou retentât qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane (en  $m^3s^{-1}$ ) [8].

#### I.2.3.2. La sélectivité

Qui est définie par le taux de rejet  $R$  (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir [9]:

$$R = \frac{C_r - C_p}{C_r} = 1 - \frac{C_p}{C_r} \quad (I.2)$$

$C_r$  : est la concentration de l'espèce à retenir dans la solution [g/L].

$C_p$  : est la concentration de la même espèce dans le perméat. L'osmose inverse utilise des membranes denses sans porosité qui laissent passer le solvant et arrêtent les ions [g/L].

#### I.2.3.3. La pression osmotique

On applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler, cette pression est nommée la pression osmotique  $\Pi$  (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse [9].

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 exercé dans l'état

gazeux dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en  $i$  ions, la pression osmotique sera  $i$  fois supérieure [10].

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en soluté [11] :

$$\Pi = i \cdot C \cdot R \cdot T \quad (I.3)$$

$\Pi$  : Pression osmotique [bar]

$i$  : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

$C$  : Concentration molaire [mol. L<sup>-1</sup>]

$R$  : Constante des gaz parfaits [0,082 L.bar.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]

$T$  : Température absolue [K]

#### I.2.3.4. Transfert de solvant et de soluté

En Osmose Inverse, les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation - diffusion : le soluté et le solvant se dissolvent à travers la membrane et ce diffusent. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leurs solubilités dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane [11].

##### I.2.3.4.1. Flux de solvant

Le flux de solvant  $J_{\text{solvant}}$  (m.s<sup>-1</sup>) et le débit volumique de solvant  $Q_p$  (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) traversant la membrane sont donnés par les relations [11]:

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

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

$A$  : est la perméabilité de la membrane [m.s<sup>-1</sup>.pa<sup>-1</sup>]

$S$  : la surface de la membrane [m<sup>2</sup>]

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

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

### I.2.3.4.2. 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 [11]:

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

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 de part et d'autre de la membrane [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

## I.2.4. Les matériaux

Une grande variété de polymères est utilisée pour la fabrication des membranes destinées à la production de l'eau potable [12].

Pour des raisons bien compréhensibles de protection de leurs secrets de fabrication, les fabricants hésitent à dévoiler avec précision la nature chimique des constituants de leurs membranes et préfèrent en indiquer les principales propriétés en termes :

- de résistance mécanique (déterminant la durée de vie et l'intégrité des membranes) ;
- d'hydrophilicité (déterminant la résistance au colmatage. Le colmatage des membranes est un phénomène irréversible qui résulte de l'accumulation des macromolécules à la surface de la membrane);
- de stabilité chimique (résistance aux agents l'avant).

### I.2.4.1. Les dérivés de cellulose

Les dérivés de cellulose sont utilisés pour la fabrication des membranes asymétriques d'ultrafiltration, de nanofiltration et d'osmose inverse. Sous l'effet de fortes pressions, ils ont tendance à se compacter entraînant une diminution irréversible de la perméabilité. Ce phénomène ne se produit pas en ultrafiltration où les pressions sont faibles.

Ces matériaux présentent une forte hydrophilicité garantissant une faible tendance au colmatage. Leur stabilité chimique est réduite. Les pH opératoires doivent rester dans une gamme allant de 4 à 6,5 et la température doit rester inférieure à 40°C pour éviter l'hydrolyse

du matériau. Les dérivés de cellulose supportent une exposition continue à de faibles concentrations de chlore. Il ne faut donc pas hésiter à pratiquer une chloration avant membrane qui évitera leur dégradation complète par les micro-organismes [12].

#### **I.2.4.2. Le polypropylène**

Le polypropylène est utilisé pour la fabrication de membranes de microfiltration. Il s'agit d'un matériau élastique qui résiste bien, sur le plan mécanique, aux rétro lavages. Le caractère hydrophobe de ce matériau le rend assez sensible au colmatage. Il présente une bonne stabilité chimique dans une large gamme de pH mais peut être détruit par le chlore dont l'usage est donc proscrit [12].

#### **I.2.4.3. Les poly-sulfones**

Les poly-sulfones sont utilisés pour la fabrication des membranes d'ultrafiltration. Ils peuvent être utilisés tel quel ou servir de support à une couche fine de séparation au sein des membranes composites de nanofiltration ou d'osmose inverse. Les propriétés mécaniques de ce matériau ainsi que sa résistance chimique sont excellentes (résistance à une large gamme de pH et à une exposition continue au chlore).

En revanche, le caractère hydrophobe des poly-sulfones les rendent sensibles au colmatage par adsorption des molécules organiques [12].

#### **I.2.5. Les différents systèmes membranaires**

Un système membranaire comprend :

- Un système de prétraitement ;
- Des pompes ;
- Un système d'agitation (pour les systèmes à membranes immergées) ;
- Un ensemble de module ;
- Un poste unitaire chimique de nettoyage ;
- Un post-traitement chimique au besoin.

Le prétraitement vise à prévenir le colmatage prématuré des membranes et/ou des canaux d'écoulement tangentiel. Les pompes servent à bâtir la pression transmembranaire. Les pompes ou un système d'agitation permettent la circulation de l'eau à traiter dans les

modules ou entre les modules. La séparation est assurée dans les modules membranaires [13].

Le post traitement chimique permet d'ajuster, ou de réajuster, la composition chimique de l'eau traitée.

Suivant la manière dont est appliquée la pression membranaire, deux types de systèmes peuvent être distingués :

- Les systèmes de filtration membranaires sous pression;
- Les systèmes à membranes immergées.

#### **I.2.5.1. Systèmes de filtration membranaires sous pression**

Dans le cas d'un système de filtration sous pression, les modules sont installés dans des caissons pressurisés (Figure I.6 – schéma (a)). Une pompe additionnelle peut servir à la recirculation du concentrât à l'entrée des modules (Figure I.6 – schéma (b)).

L'ajustement du débit d'alimentation et l'ajustement d'une vanne, située en aval des modules, permettent de contrôler la pression transmembranaire et le taux de récupération global. Le perméat est généralement à une pression proche de la pression atmosphérique.

Les différents types de modules peuvent être mis en œuvre de cette façon. Plusieurs modules peuvent être placés en série dans un même caisson comme dans le cas des modules spiralés où un caisson peut contenir de un à six modules spiralés. Plusieurs caissons peuvent être utilisés en série et/ou en parallèle [14].

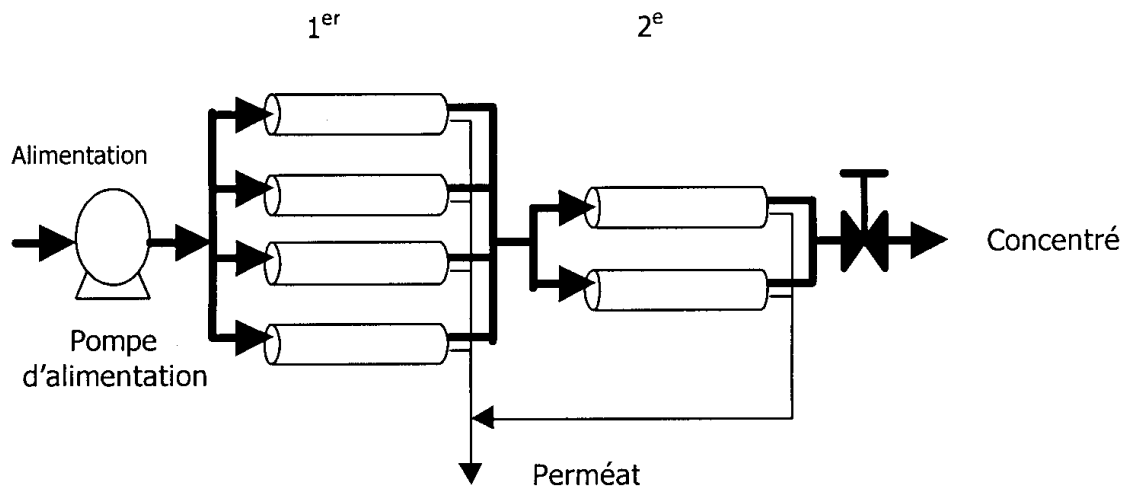


Schéma (a) : Configuration multi-étagé.

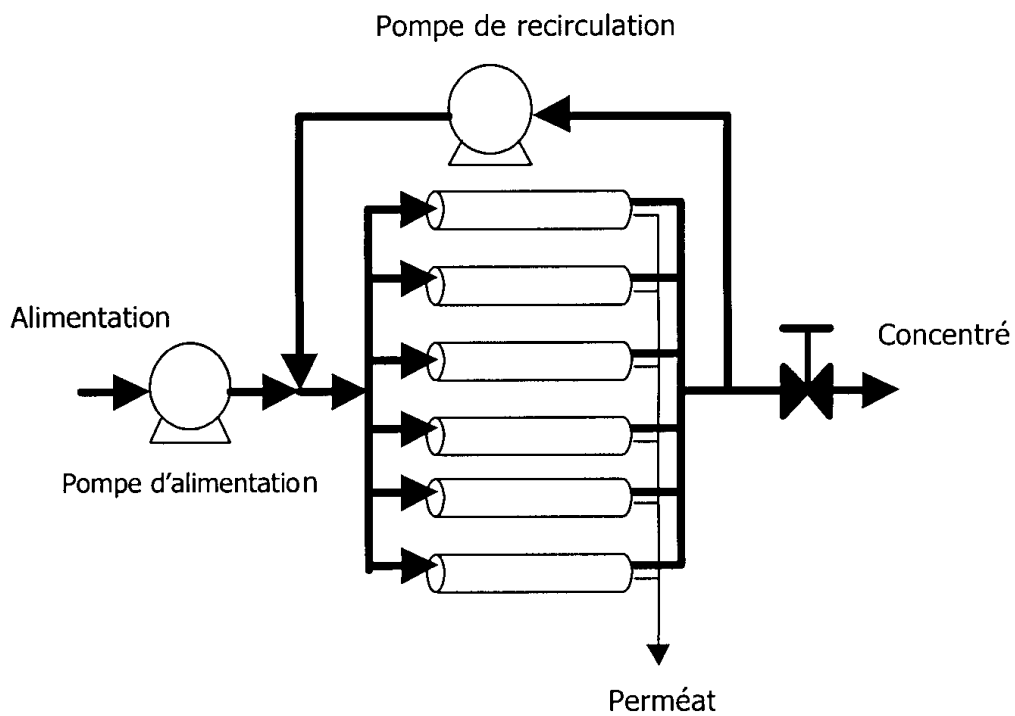
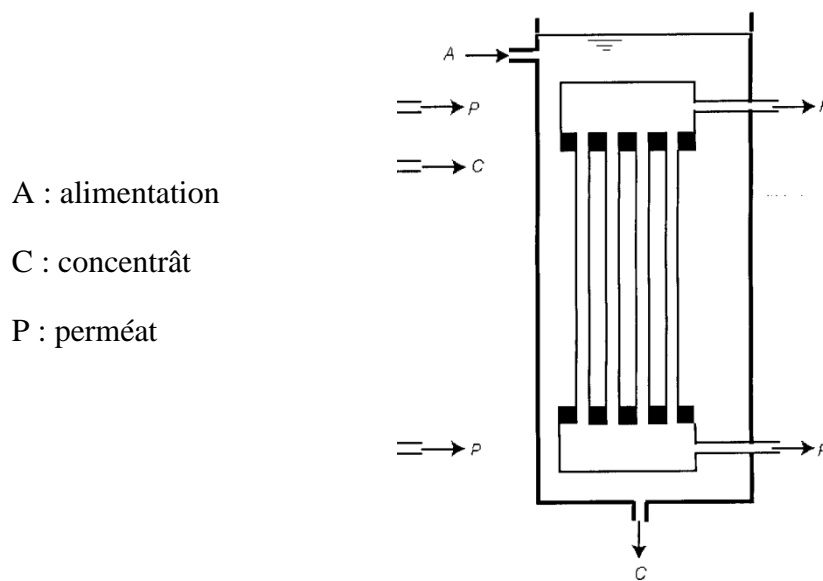


Schéma (b) : Configuration avec recirculation.

**Figure I.6:** Systèmes de filtrations membranaires sous pression [14].

### I.2.5.2. Systèmes à membranes immergées

Dans un système à membranes immergées, les membranes sont plongées dans un bassin alimenté avec l'eau à traiter (Figure I.7). Le côté alimentation est soumis à une pression hydrostatique et un vide partiel est appliqué du côté perméat. L'agitation de l'eau autour des membranes (écoulement tangentiel libre) réduit l'accumulation de particules à la surface des fibres. La vitesse de soutirage du concentrât à même le bassin contrôle le taux de récupération. Dans le domaine de l'eau potable, cette configuration n'existe actuellement qu'avec des membranes à fibre creuses de types UMF [15].



**Figure I.7:** Systèmes à membranes immergées [15].

### I.3. Etude bibliographique

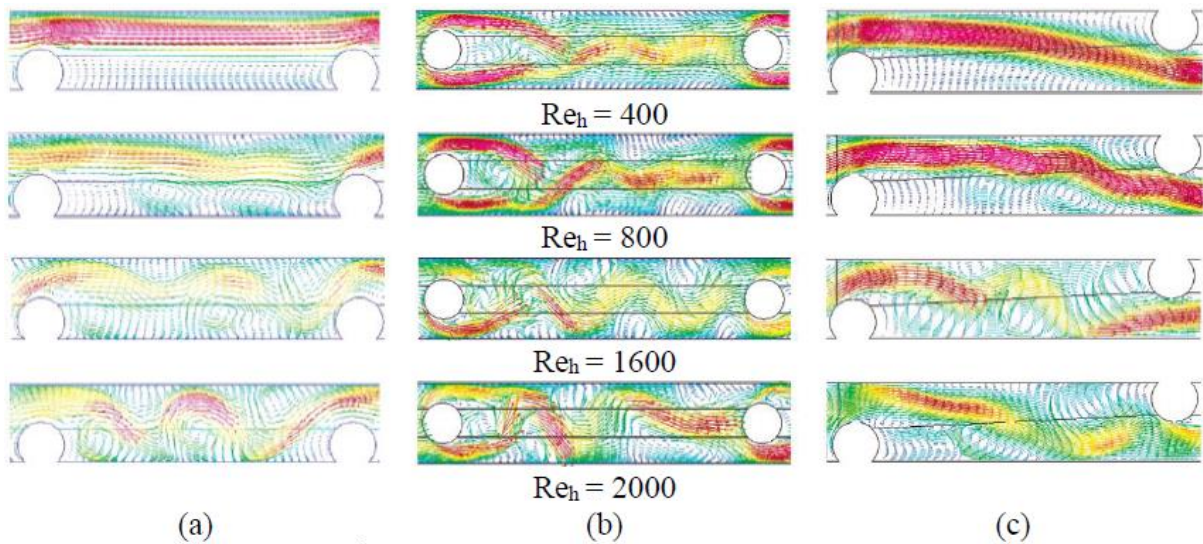
Le survol de la bibliographie nous a permis d'énumérer plusieurs travaux qui ont eu comme objectif la simulation numérique des écoulements à l'intérieur des modules membranaires ou/et dans des canaux membranaires, parmi eux nous citons :

**Geraldes et al.** [16-17] 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.

**Pinho et al.** [18] ont introduit le flux de perméation et la concentration du perméat obtenu expérimentalement comme conditions aux limites dans le modèle numérique précédemment développé, [16-17] 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.

**Schwinge et al.** [19-21] ont mené plusieurs travaux pour optimiser le rendement des modules spiralés d'Osmose Inverse. Leur première étude [19], a permis de visualiser la structure de l'écoulement pour divers configurations (immergée, zigzag et cavité). Les simulations ont été conduites pour divers rapports de forme (distance inter-filaments et diamètre des obstacles) et un nombre de Reynolds à l'entrée allant jusqu'à 103. Il a été démontré que le mouvement de recirculation dépend de la configuration choisie, de la distance inter filaments, du diamètre du filament et du Reynolds à l'entrée.

En présence d'un seul obstacle immergé, l'écoulement devient supercritique à partir Reynolds hydraulique ( $Re_h$ ) de 300 ; par contre, lorsqu'il est adjacent à une paroi, la déstabilisation apparaît à ( $Re_h = 800$ ). Pour les configurations à obstacles multiples, la transition intervient aux alentours de  $Re_h = 80$  en fonction du rapport de forme. Dans une autre étude, ou le Reynolds hydraulique avoisine 2000 [20], ils ont estimé le domaine de transition entre 200 et 800 en fonction de la configuration choisie. En écoulement transitoire, des tourbillons apparaissent derrière les obstacles et près des membranes et se déplacent le long des canaux. En outre, la dépression enregistrée en écoulement instationnaire est largement supérieure à celle de l'écoulement laminaire.



**Figure I.8:** Écoulement pour les différentes configurations [19] :

cavité (a), immergée (b) et zigzag (c).

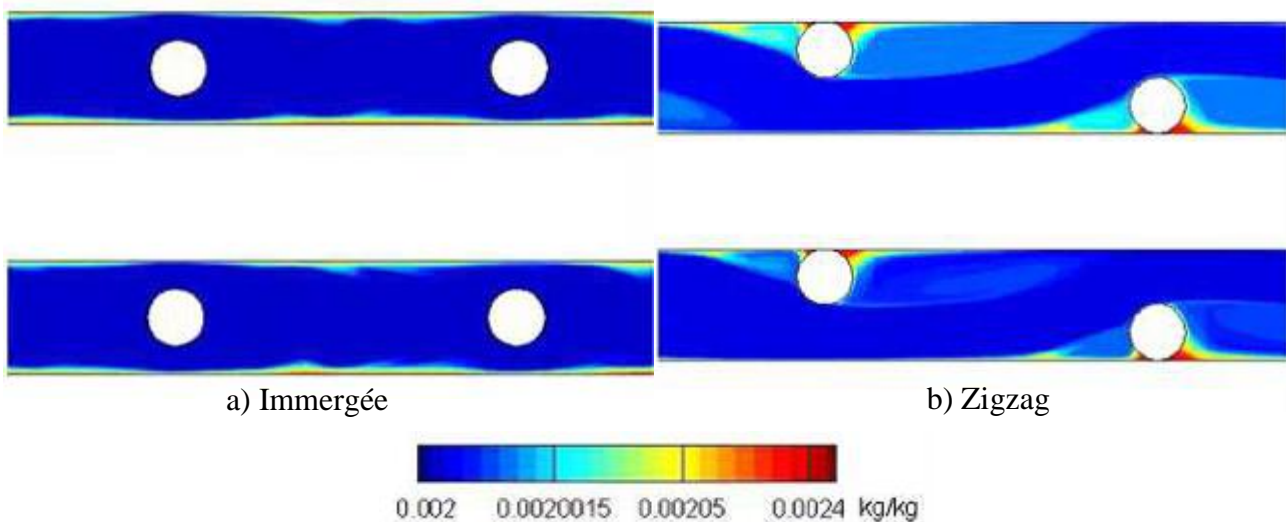
**Wiley et al.** [22–23] ont développé un modèle numérique sur le code commercial CFX pour étudier la variation locale de la polarisation de concentration des deux côtés d’une membrane sélective. Le modèle tient en compte des variations locales des propriétés physico-chimiques de la solution saline en fonction de la concentration. Les résultats obtenus ont clairement démontré que l’effet de la pesanteur n’est significatif que pour des vitesses d’écoulement très faibles.

**Ahmad et al.** [24] ont intégré un sous-programme (UDF - user defined function) sur le code CFD Fluent pour modéliser la polarisation de concentration dans un canal muni d’une membrane semi-perméable. Les résultats obtenus numériquement ont montré que le dépôt de sel, ainsi que la couche limite de concentration de polarisation qui se développent sur la membrane diminuent en augmentant le nombre de Reynolds (ou vitesse d’entrée). De plus, ils ont remarqué que le coefficient de transfert de masse s’améliore avec l’augmentation du nombre de Reynolds.

**Gimmelshtein et al.** [25-26] ont mené une recherche basée sur un modèle-démo (expérimental et numérique) pour étudier l’écoulement à travers un canal membranaire contenant des obstacles circulaires immergés. En variant le diamètre et l’espace inter obstacles, il a constaté qu’un accroissement du diamètre conduit à la formation d’importants tourbillons localisés au-dessus et au-dessous des filaments. Par la suite, les expériences menées en utilisant la vélocimétrie par images de particules (VIP) ont montré que les valeurs des vitesses obtenues à partir des simulations numériques étaient en accord avec celles obtenues expérimentalement.

Amokrane et al. [27] avaient présenté une étude détaillée de la polarisation de l'écoulement et de la concentration d'un fluide pour diverses configurations d'espaceur. L'étude a été menée dans de longs canaux remplis par divers espaceurs, qui ont consommé beaucoup de ressources de calcul. En outre, les paramètres géométriques étaient fixés et ils ont utilisé un modèle bidimensionnel complet englobant tous les phénomènes essentiels se produisant au sein d'un module de membrane enroulée en spirale afin de prédire localement et en moyenne la polarisation de concentration, la perméabilité à l'eau et d'autres paramètres clés pour divers rapports géométriques (longueur entre filaments, hauteur du canal) dans les configurations en zigzag, cavité et immergée. Les prédictions numériques ont montré que pour les configurations en zigzag et immergées, le processus admet les meilleures performances avec un rapport de format ( $l / H = 2$ ). En général, l'augmentation de la distance entre deux espaceurs successifs 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 ( $Sh$ ).

L'étude suggère la réduction de la longueur entre filaments comme moyen de contrôler le développement de la polarisation de la concentration et ainsi réduire la probabilité d'encrassement.



**Figure.I.9:** Contours de concentration pour différentes configurations [27] :  
a) Immergée et b) zigzag.

**Koutsou et al. [28]** en utilisant la simulation numérique directe (DNS), ils ont étudié le cas d'un canal étroit et plan avec un réseau périodique d'obstacles cylindriques avec leurs axes placés sur le plan médian de la symétrie. Leur approche de modélisation permet de réduire la charge de calcul en imposant des conditions aux limites périodiques entre filaments cylindriques successifs, réduisant ainsi le domaine de calcul à une cellule unitaire. Le but était d'étudier les caractéristiques de flux détaillées et l'effet des filaments espaceurs sur le champ de flux. Cependant, dans ce système, le transfert de masse n'a pas été pris en compte et la distribution de la concentration en sel près de la surface de la membrane n'a pas été déterminée. L'amélioration des performances des modules SWM en faisant varier la géométrie des filaments entretoises a fait l'objet de plusieurs études [29-30], bien que certaines de ces géométries alternatives ne semblent pas aussi efficaces que la forme espaceur conventionnelle [31].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents procédés membranaires, leurs techniques de filtration et leurs domaines d'utilisation, à savoir le dessalement de l'eau de mer, les eaux saumâtres et usées. Nous avons aussi évoqué quelques travaux effectués dans notre thématique d'intérêt.

# **Chapitre II**

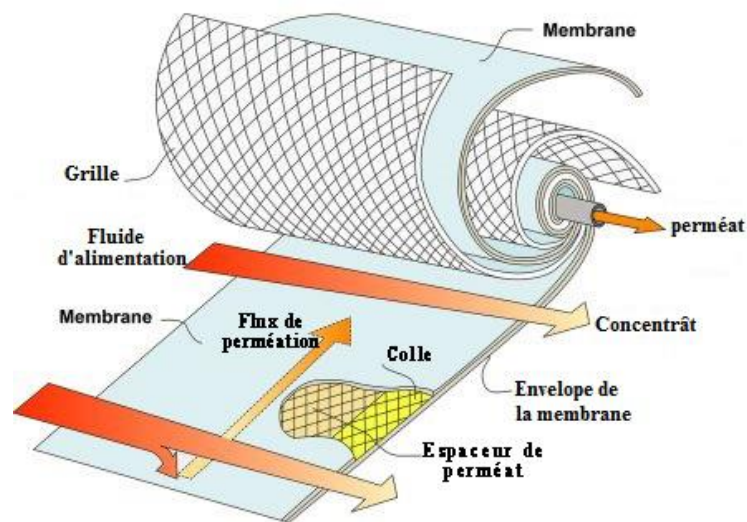
## **Formulation mathématique**

## Introduction

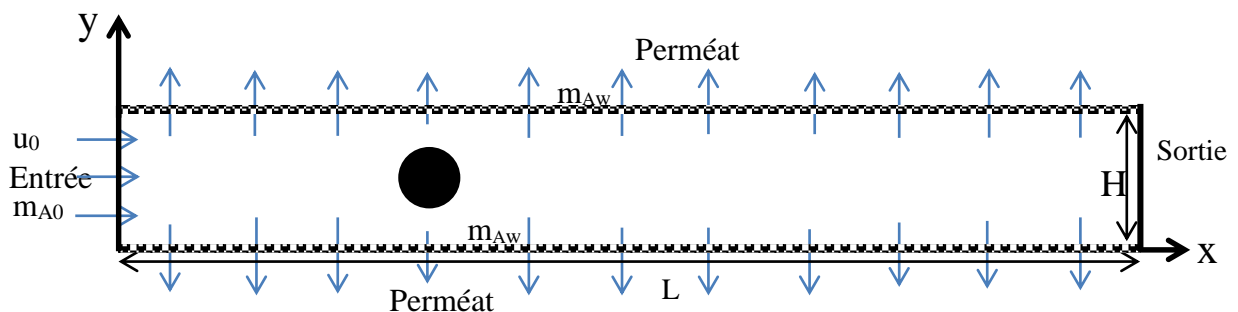
Pour modéliser un écoulement à l'intérieur d'un module membranaire, on doit connaître les principes de la mécanique des fluides numérique et la manière de transformer le problème physique à une formulation mathématique. Dans ce chapitre, nous allons décrire le problème physique que nous allons étudier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

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

Dans notre étude 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 [32].



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 transversale bidimensionnelle d'un module membranaire spiralé, qui est représenté par un canal constitué essentiellement de deux membranes semi-perméables. Le canal membranaire de référence représente deux membranes parallèles distantes de  $H = 2$  mm, la longueur du canal entre l'entrée et la sortie est  $L_m = 24$  mm, un obstacle circulaire de diamètre  $D = 1$  mm est immergé au milieu du canal à  $y = 1$  mm et a une distance  $x = 8$  mm de l'entrée du canal.

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, incompressible et isothermique.
- Régime d'écoulement : nous nous intéressons à un écoulement en régime laminaire, stationnaire et instationnaire.
- La gravité est négligeable donc nulle.
- Les membranes sont supposés 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 :

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

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

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

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 :

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

Avec :  $\rho$  : la masse volumique du fluide [kg/m<sup>3</sup>];

$u$  : 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 [33] :

$$\underbrace{\left[ \underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_{\text{Instationnaire}} + \underbrace{U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{\text{Convectif}} \right]}_{\text{Forces d'inertie}} = \underbrace{- \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\nu \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \right]}_{\text{Terme visqueux}} \tag{II.4}$$

Dans le cas d'un écoulement stationnaire, les équations de NS selon les axes x et y s'écrivent comme suit :

Selon l'axe x :

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

Selon l'axe y :

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

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

Selon l'axe x :

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

Selon l'axe y :

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

Dans les précédentes équations :

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

v représente la vitesse suivant l'axe y [m/s] ;

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

p représente la pression statique [Pa] ;

$\rho$  représente la masse volumique du fluide [kg/m<sup>3</sup>].

### 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 :

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

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

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

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

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

Dans les précédentes équations :

$m_A$  est la fraction massique du sel à l'entrée [kg/kg] ;

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

$v$  est la vitesse suivant l'axe  $y$  [m/s] ;

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

### 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.1.b. Pour modéliser cette solution, nous avons eu recours au modèle empirique proposé par Geraldès et *al.* [16], valable pour une fraction massique en sel ne dépassant pas 0,09 kg/kg et une température de 25 °C.

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

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

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

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

Où ( $m_{A0}$ ) représente la fraction massique en sel (kg soluté/kg solution),  $\pi$  la pression osmotique de la solution aqueuse (Pa),  $\mu$  la viscosité dynamique (Pa.s),  $D_{AB}$  le coefficient de diffusion binaire du soluté dans l'eau (m<sup>2</sup>/s) et  $\rho$  la masse volumique du fluide (kg /m<sup>3</sup>).

### II.3.2. Conditions 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 : ( $x = L_m, 0 \leq y \leq H$ ), les gradients de vitesse et de pression (pressure outlet) sont nuls.

Au niveau des membranes : ( $y = 0, y = H, 0 \leq x \leq L_m$ ), la fraction massique en 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 :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (II.16)$$

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

$D$  : diamètre du cylindre [m] ;

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

D'où la formulation classique :

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (II.17)$$

### II.4.2. Le cisaillement

La contrainte de cisaillement représente la force appliquée à un milieu par unité de surface. Généralement notée  $\tau$ , elle s'exprime en (Pa) et se présente sous forme :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (II.18)$$

$\tau$  : La contrainte du cisaillement [Pa] ;

$\mu$  : La viscosité dynamique [Pa·s] ;

$u$  : La vitesse du fluide selon l'axe des x, à une hauteur y [m/s] ;

$y$  : La coordonnée d'espace repérant la position du fluide.

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

La différence de pression  $\Delta p/l$  en (Pa.m<sup>-1</sup>) est calculée à l'intérieur du canal entre deux lignes situées en amont et en aval de l'obstacle, cette différence de pression est ensuite divisée par la distance entre ces deux lignes ' $l$ ', autrement dit :

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (II.19)$$

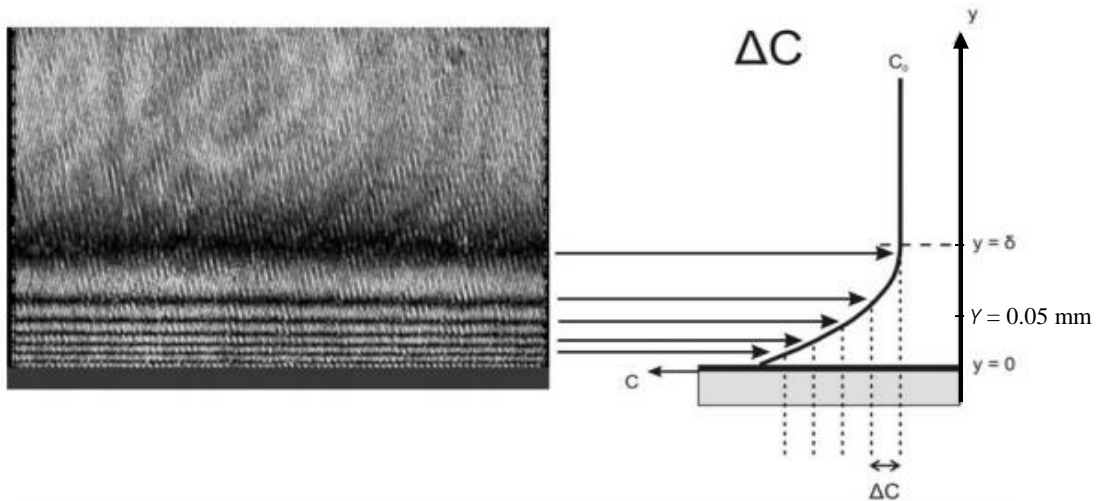
- $P_1$  : la pression statique moyenne au niveau de la ligne située à  $x = 4$  mm en amont de l'obstacle en [Pa].
- $P_2$  : la pression statique moyenne au niveau de la ligne située à  $x = 16$  mm en aval de l'obstacle en [Pa].
- $l$  est la distance entre les deux points en [m].

### II.4.4. La polarisation de concentration

Le rejet des ions du sel à la surface de la membrane dans les processus d'Osiose 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 les performances des 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  $y = 0.05$  mm comme le montre la figure II.2, puis nous allons extraire le profil local de la fraction massique en sel dans chaque point de cette ligne, ' $m_{AL}$ '.



**Figure II.2:** Le phénomène de la polarisation de concentration obtenu à partir d'un interférogramme [29].

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

$$\delta = \frac{D_{AB}}{J_v} \ln \left( \frac{m_{AW} - m_{AP}}{m_A - m_{AP}} \right) \quad (II.20)$$

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

$J_v$  est la vitesse de perméation [ $m/s$ ];

$m_{AP}$  est la fraction massique en sel du soluté du côté du perméat [ $kg/kg$ ];

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

$m_A$  est la 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**

## **Matériels et méthodes**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes étapes suivies pour la modélisation numérique d'un écoulement bidimensionnel d'un mélange d'eau pure et de sel à l'intérieur d'une unité cellulaire 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 répandus 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.

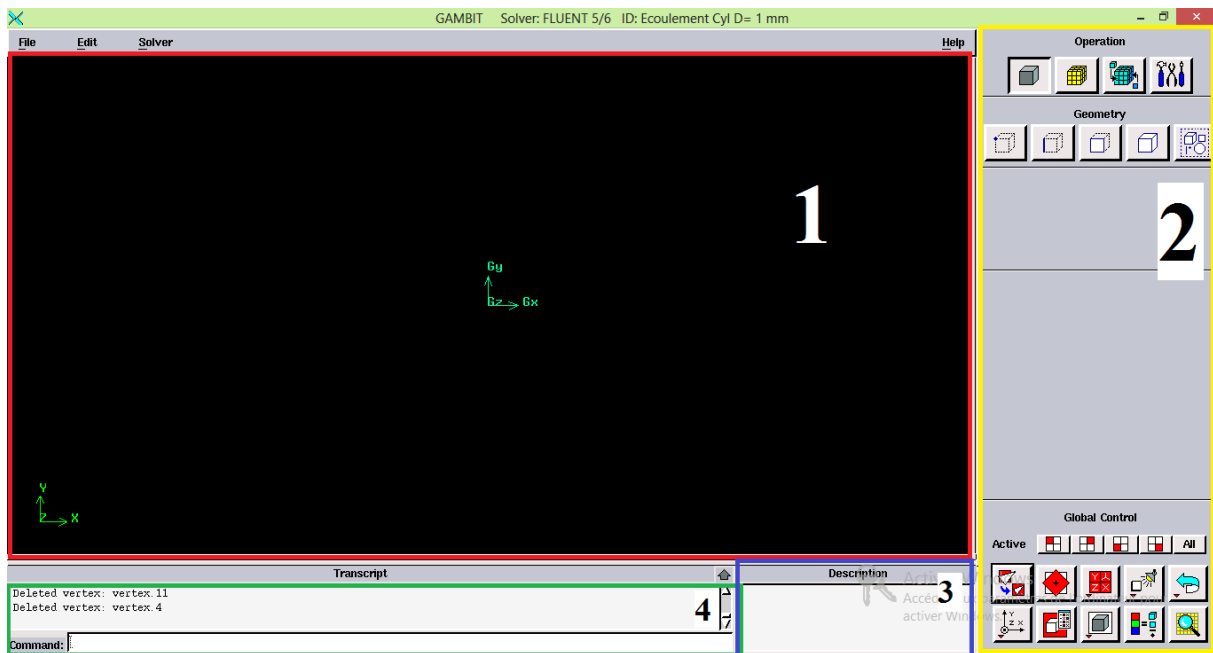


Figure III.1: Interface de logiciel Gambit 2.4.6.

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

Fluent 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).

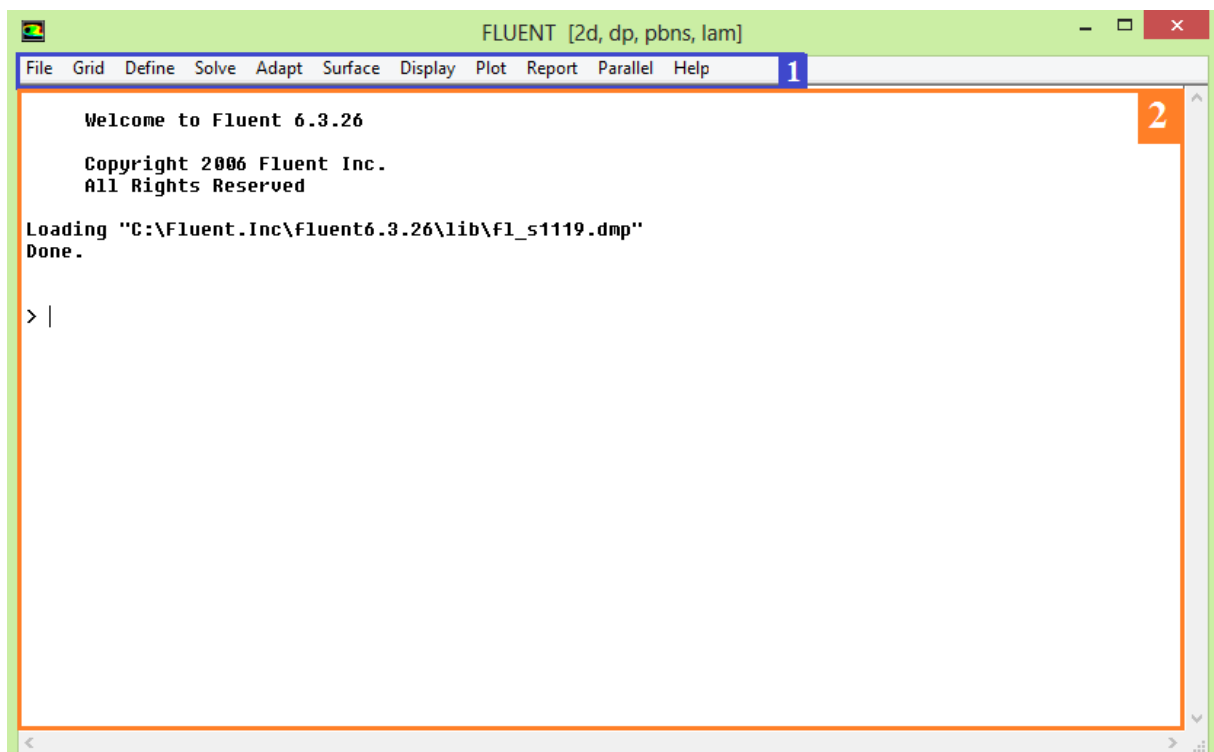


Figure III.2: Interface du logiciel Fluent 6.3.26.

### 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 réduire la puissance informatique de calcul, nous allons nous limiter à une cellule unitaire d'un canal membranaire ayant les caractéristiques suivantes, longueur  $L_m = 24$  mm, hauteur  $H = 2$  mm avec un obstacle circulaire de diamètre  $D = 1$  mm, voir la figure III.4.

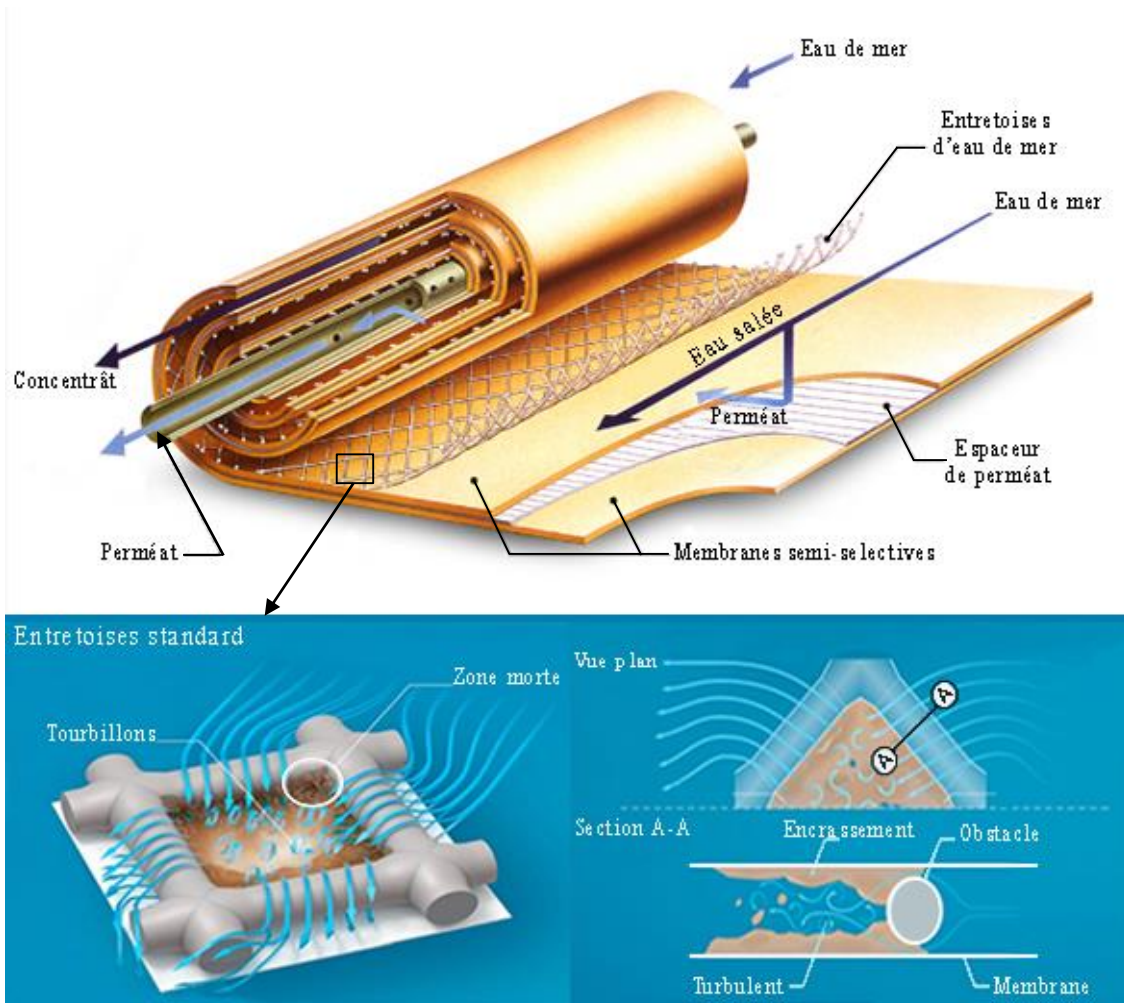


Figure III.3: Module membranaire [34-35].

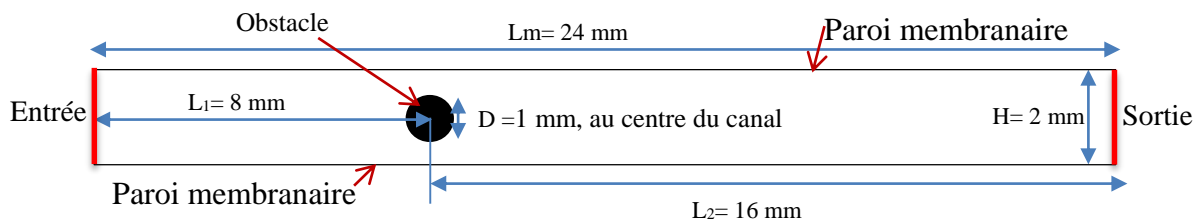


Figure III.4: Dimensions de la géométrie de référence étudiée.

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

### III.4. Construction 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 figures III.5, III.6 et III.7.

#### a) Création des points

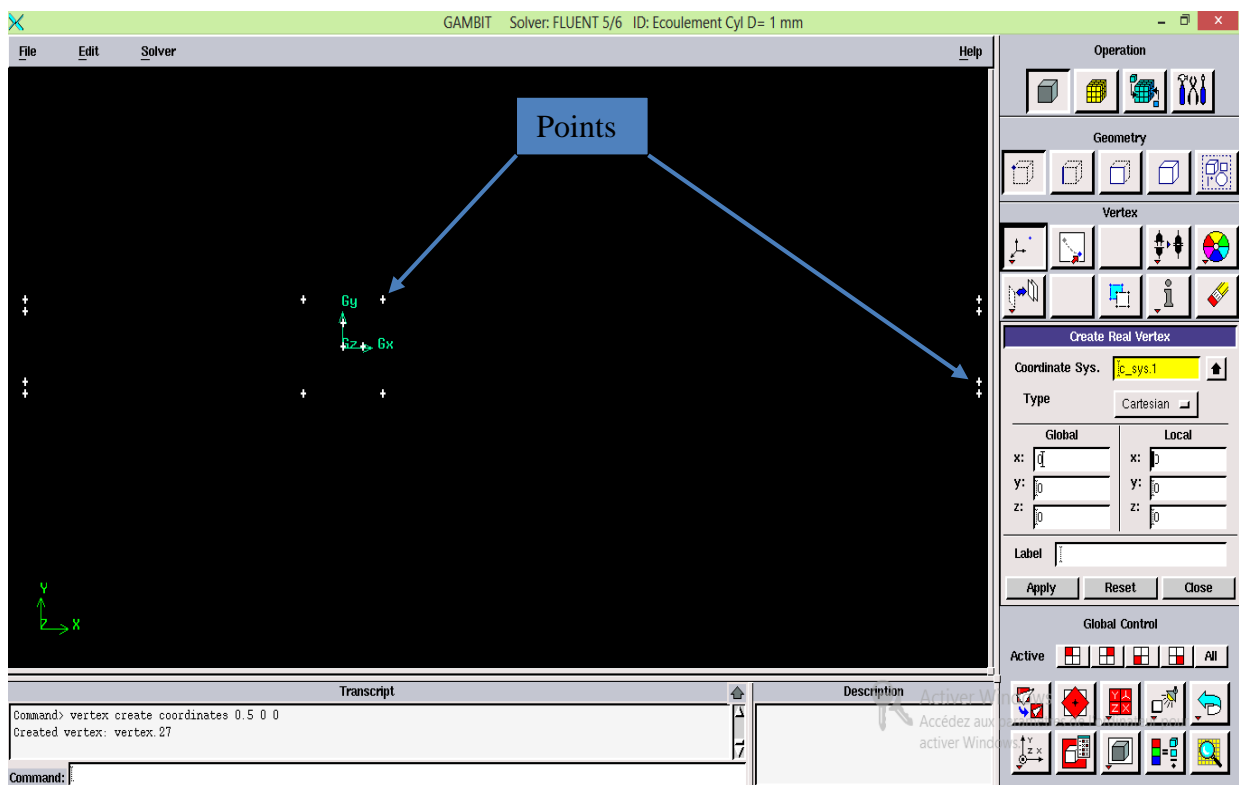
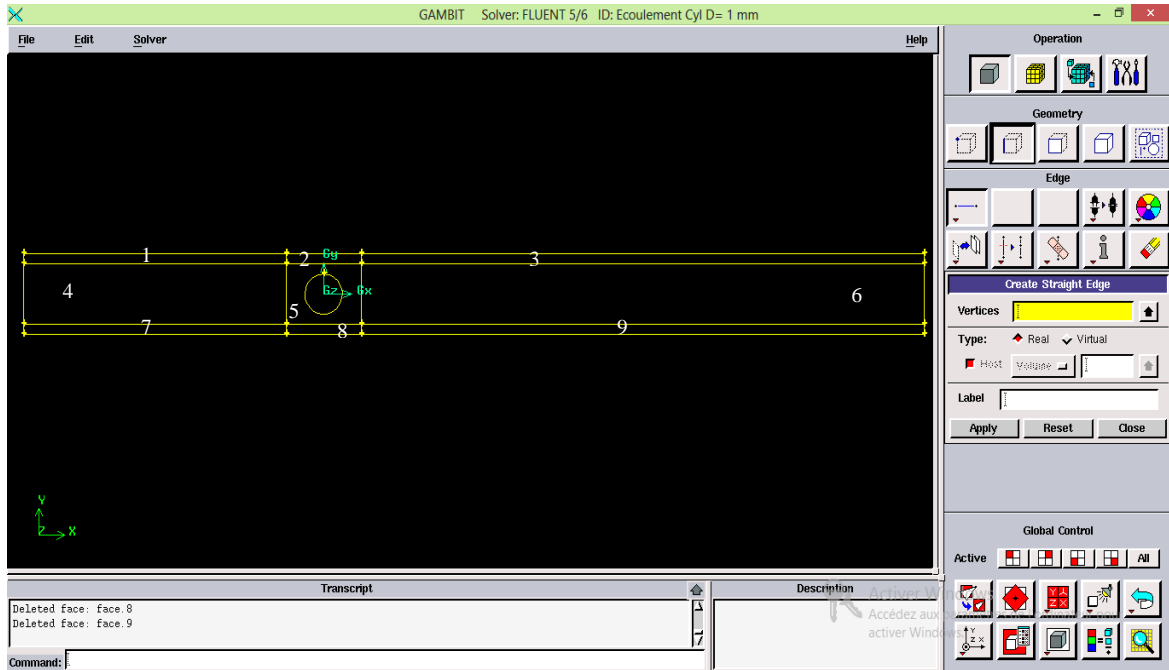


Figure III.5: Création des points sous Gambit.

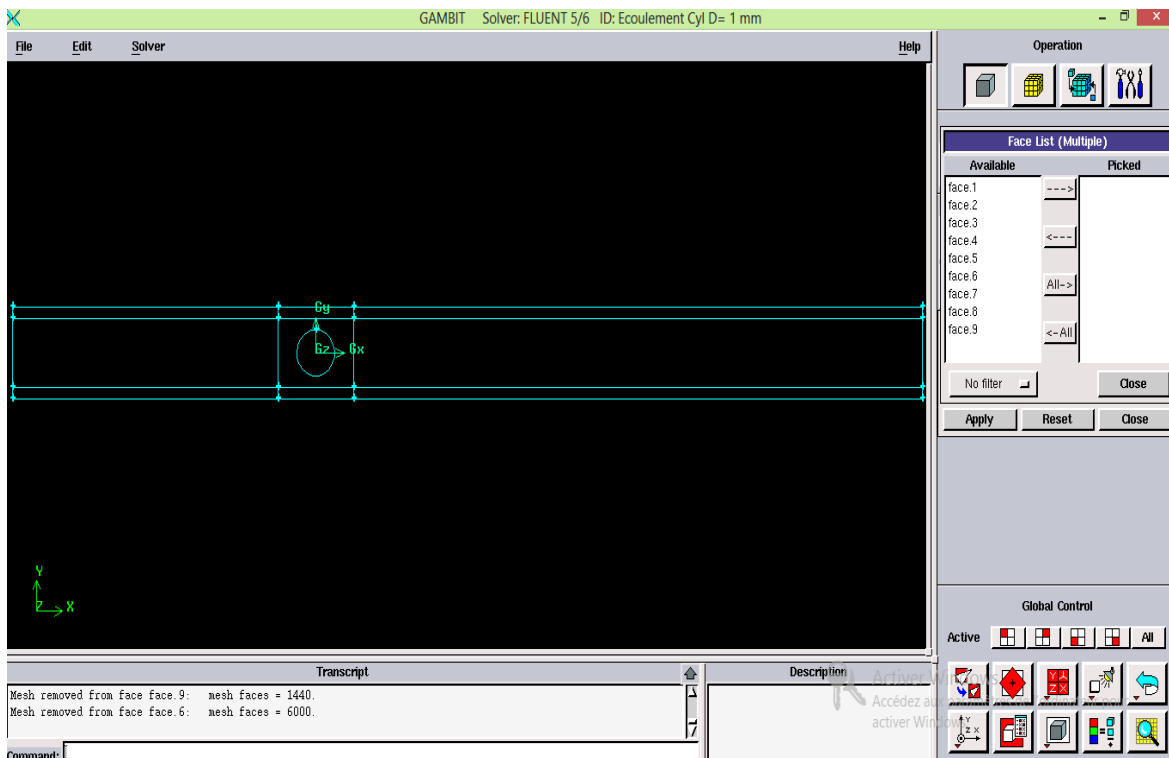
**b) Création des lignes**

Après avoir créé les points principaux qui constituent la géométrie, on les reliés entre eux, puis nous divisons la géométrie en sous domaines de 1 à 9 pour faciliter le maillage, comme le montre la figure III.6.



**Figure III.6:** Création des lignes sous Gambit.

**c) Création des faces**



**Figure III.7:** 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 de notre 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.8), dans notre cas :

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

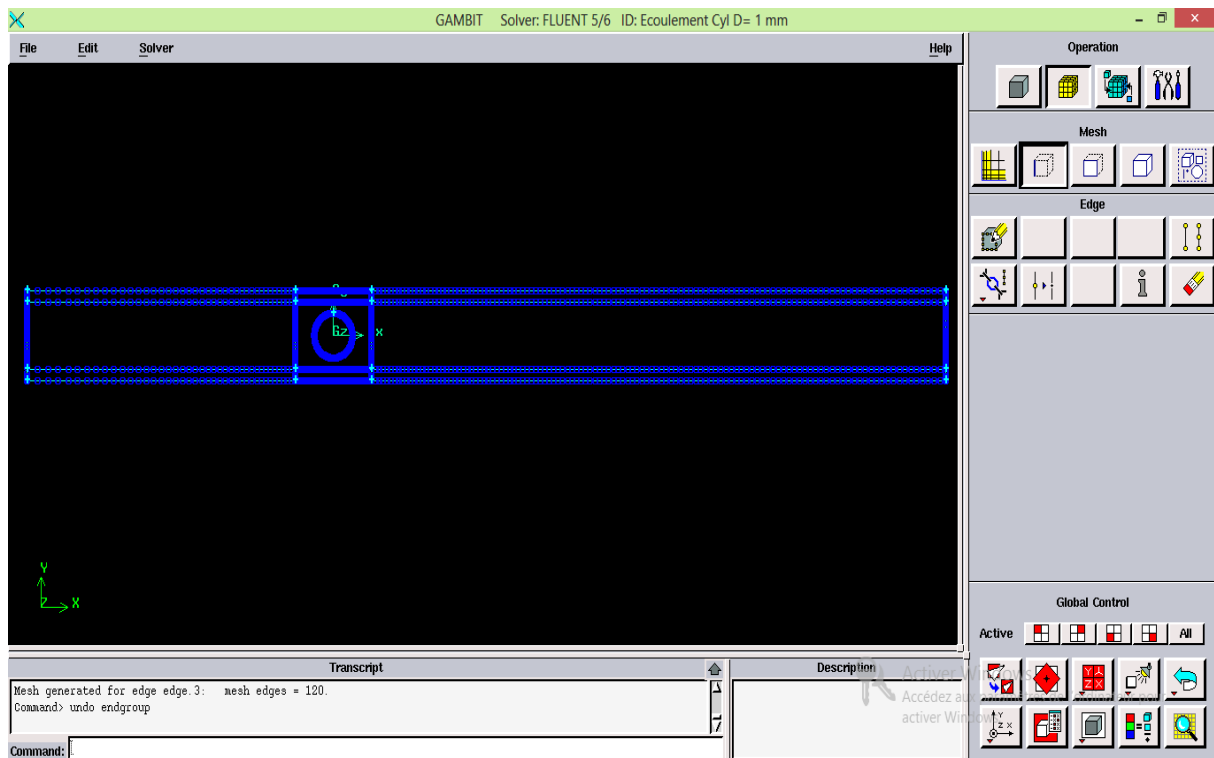
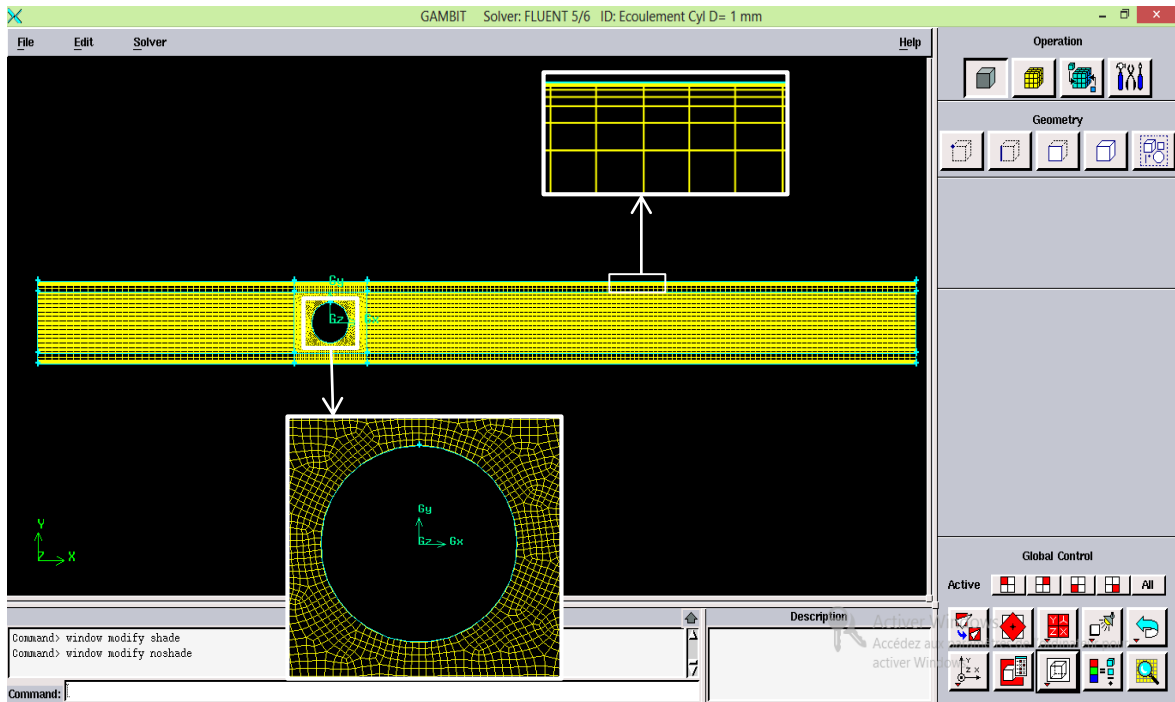


Figure III.8: Maillage des lignes sous Gambit.

### III.4.1.2. Maillage des faces

Pour avoir des résultats plus précis on raffine le maillage des segments à la proximité des parois (inferieur et supérieur) et aux alentours du cylindre. Le traitement près des parois, pour une distance  $dy = 0.25$  mm, commence par un pas de 0,1 mm puis augmente proportionnellement le long de cette distance. Comme le montre la figure III.9.

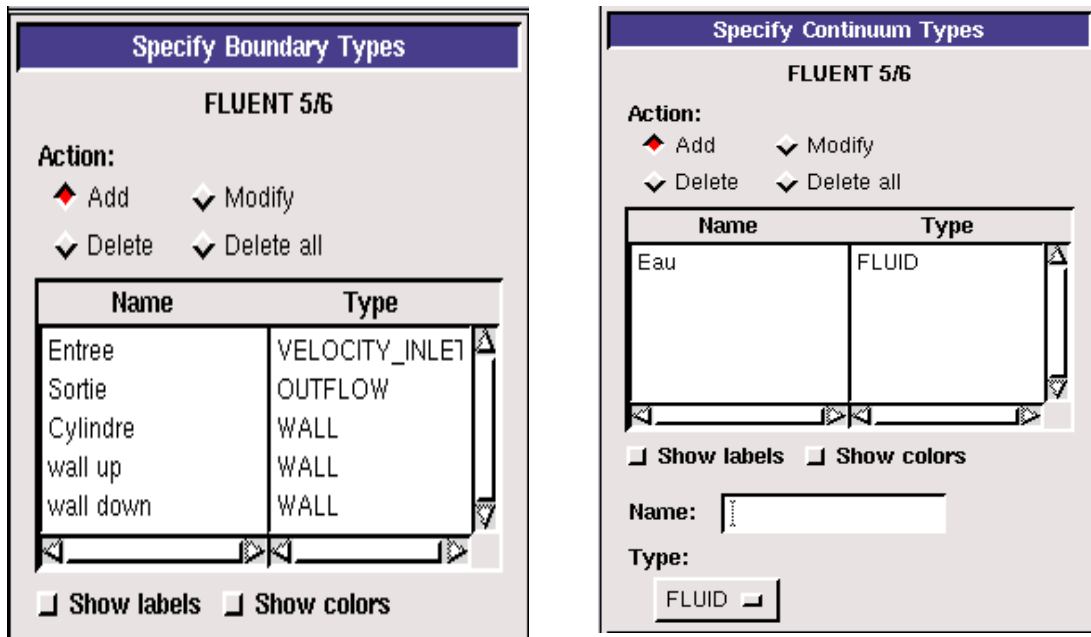
- Le nombre des nœuds total du domaine : 15332 nœuds



**Figure III.9:** 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 consiste 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.10 (a et b).

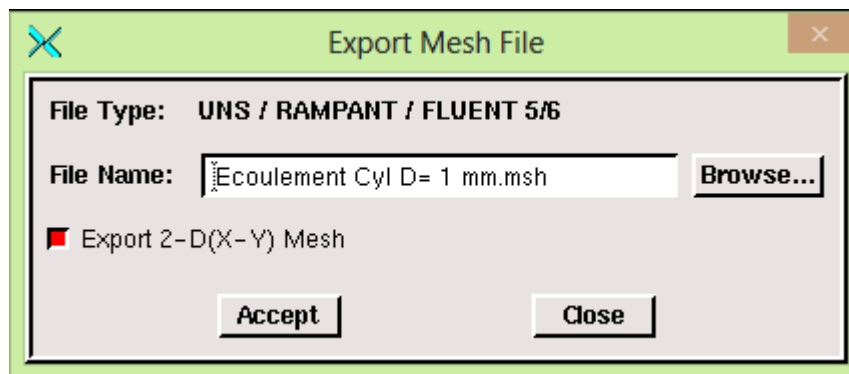


a) Conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine étudié.

b) Définition du domaine.

**Figure III.10:** 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.11.



**Figure III.11:** 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 approprié à notre simulation. Voir figure III.12.

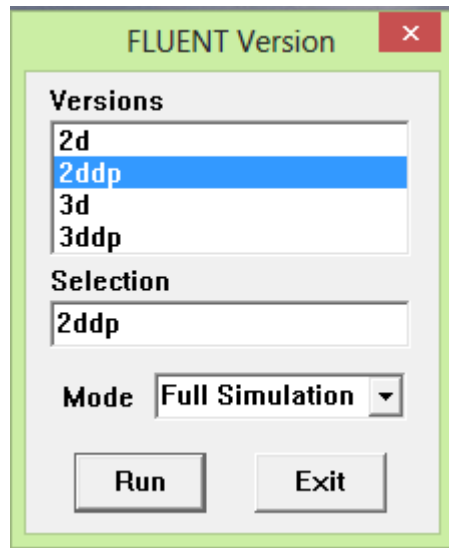


Figure III.12: Choix du 2D, double précision sur Fluent 6.3.26.

Pour commencer la simulation sous Fluent 6.3.26, on importe le fichier (.msh) généré sous Gambit 2.4.6. Cela permet de générer le domaine maillé dans le logiciel Fluent.

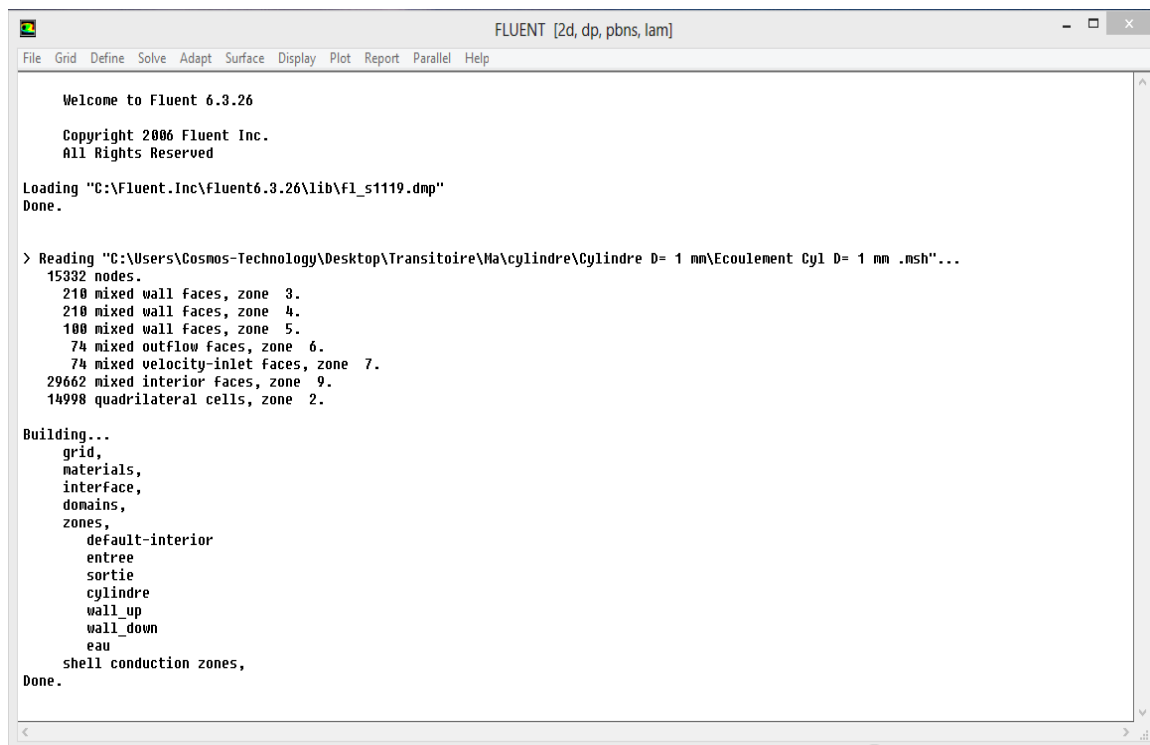
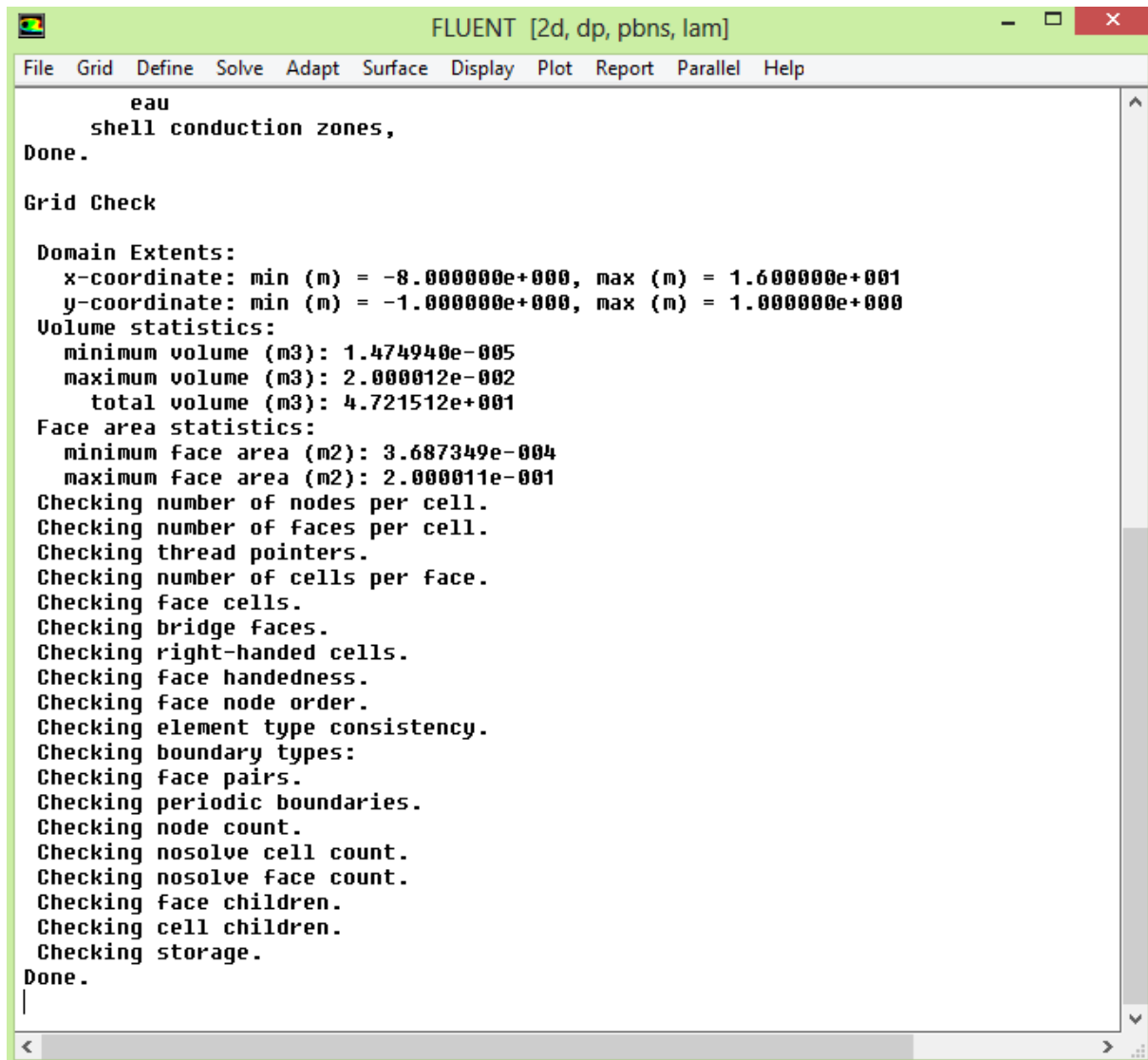


Figure III.13: Importation du fichier '.msh'.

### 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 figure III.14.



```
FLUENT [2d, dp, pbns, lam]
File  Grid  Define  Solve  Adapt  Surface  Display  Plot  Report  Parallel  Help

eau
shell conduction zones,
Done.

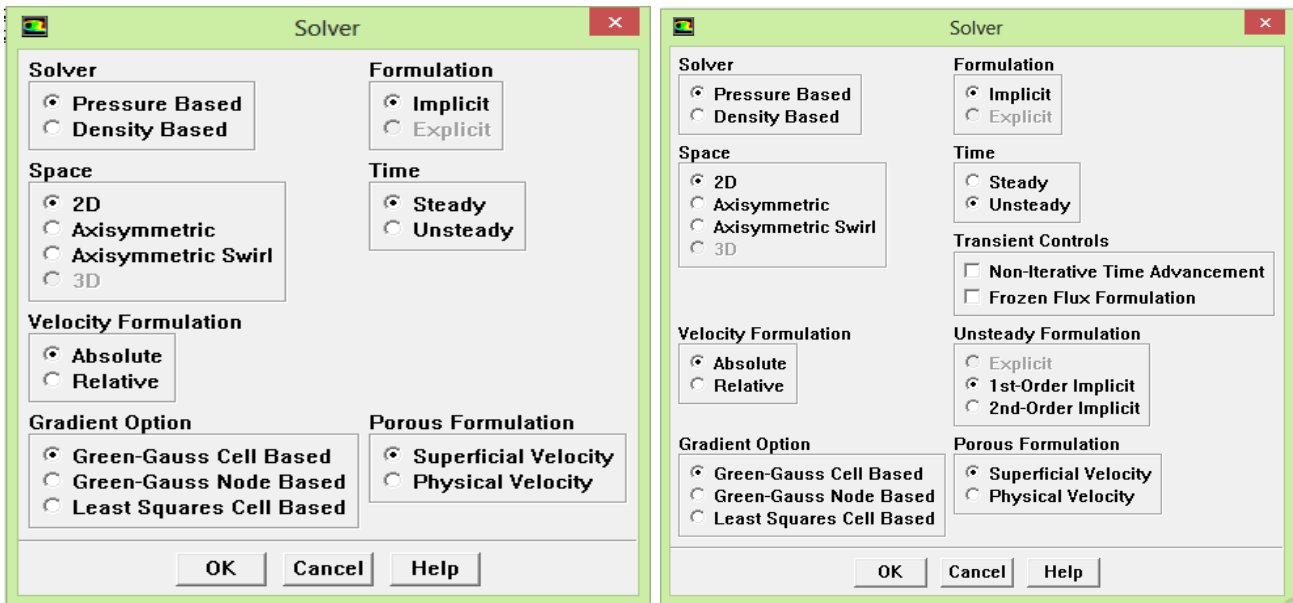
Grid Check

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -8.000000e+000, max (m) = 1.600000e+001
y-coordinate: min (m) = -1.000000e+000, max (m) = 1.000000e+000
Volume statistics:
minimum volume (m3): 1.474940e-005
maximum volume (m3): 2.000012e-002
total volume (m3): 4.721512e+001
Face area statistics:
minimum face area (m2): 3.687349e-004
maximum face area (m2): 2.000011e-001
Checking number of nodes per cell.
Checking number of faces per cell.
Checking thread pointers.
Checking number of cells per face.
Checking face cells.
Checking bridge faces.
Checking right-handed cells.
Checking face handedness.
Checking face node order.
Checking element type consistency.
Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking periodic boundaries.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Checking storage.
Done.
```

Figure III.14: 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 les deux régimes d'écoulement laminaire stationnaire et laminaire instationnaire comme présent dans la Figure III.15.a et la figure III.15.b respectivement.



a) Stationnaire.

b) Instationnaire.

Figure III.15: Définition du solveur.

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

Cette étape nous permis de définir l'équation qui suivra l'évolution de la concentration massique du sel à l'intérieur du canal membranaire, figure III.16.

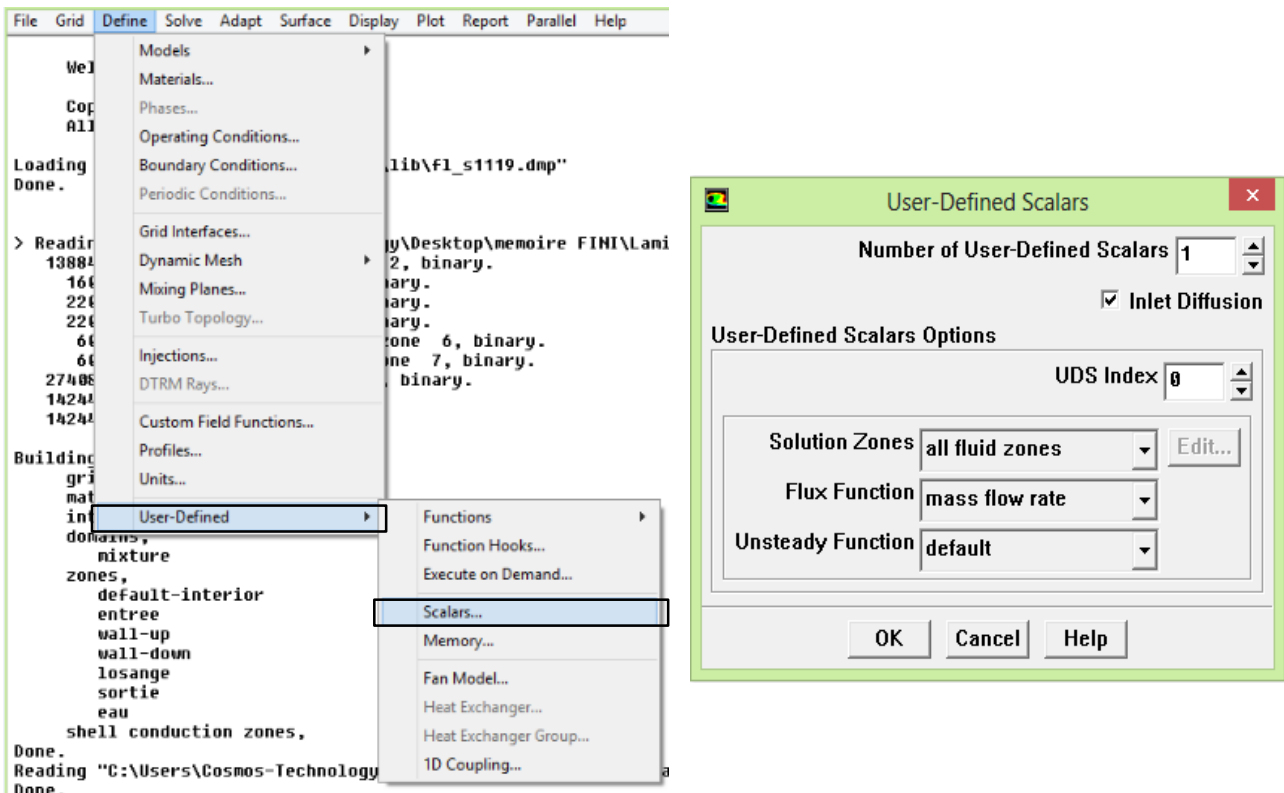


Figure III.16: Fenêtre de L'UDS.

### III.5.4. Propriétés du fluide utilisé

On définit la nature du fluide qui circule dans le domaine étudié, dans notre cas c'est de l'eau de mer qui fait office de fluide de circulation, voir figure III.17.

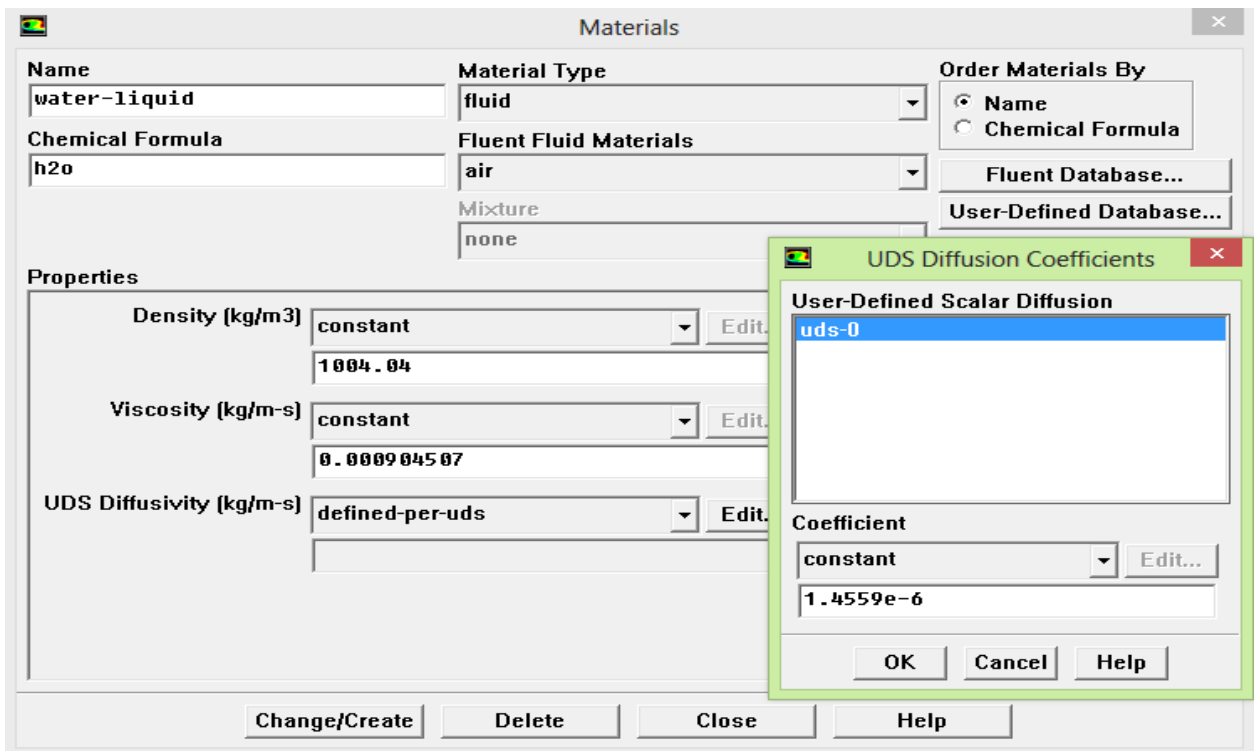


Figure III.17: Définition de la nature de fluide et ses paramètres.

### III.5.5. Les conditions aux limites

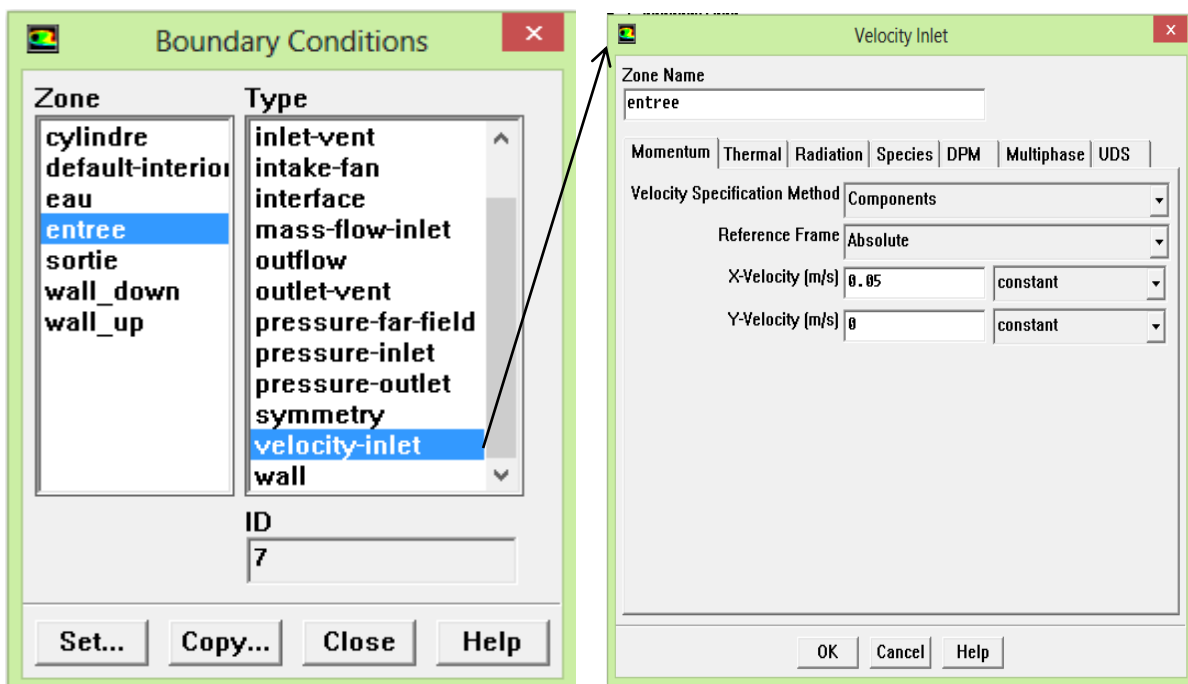
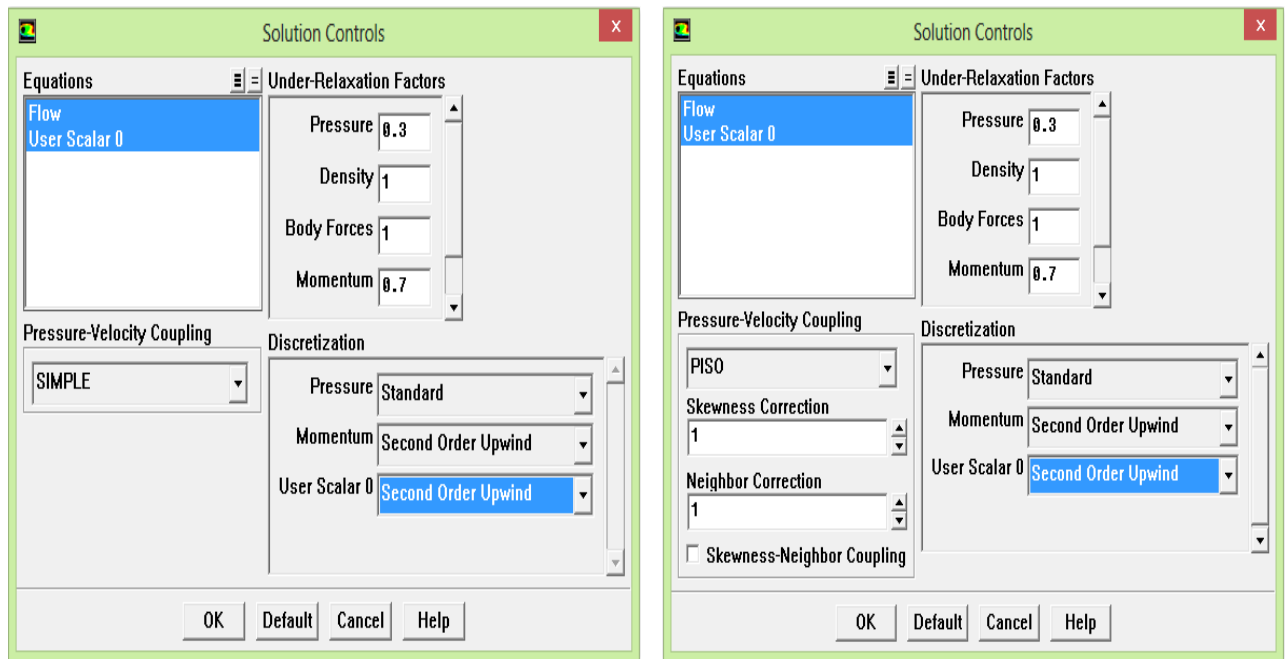


Figure III.18: Définition des conditions aux limites sous Fluent 6.3.26.

### 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 adopte une méthode de Second Ordre Upwind pour la résolution des équations et simple ou PISO pour le couplage, voir la figure III.19. (a et b).



a) Laminaire stationnaire.

b) Laminaire instationnaire.

**Figure III.19:** Contrôle des solutions sous fluent 6.3.26.

Le logiciel Fluent propose trois méthodes pour le couplage pression-vitesse (seulement avec la formulation "isolé"):

- Les deux premières, 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.
- Méthode "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".

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

La mise en place du problème 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 l'itération 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 toute les simulations, ce qui permet d'avoir une précision des résultats, voir figure III.20.

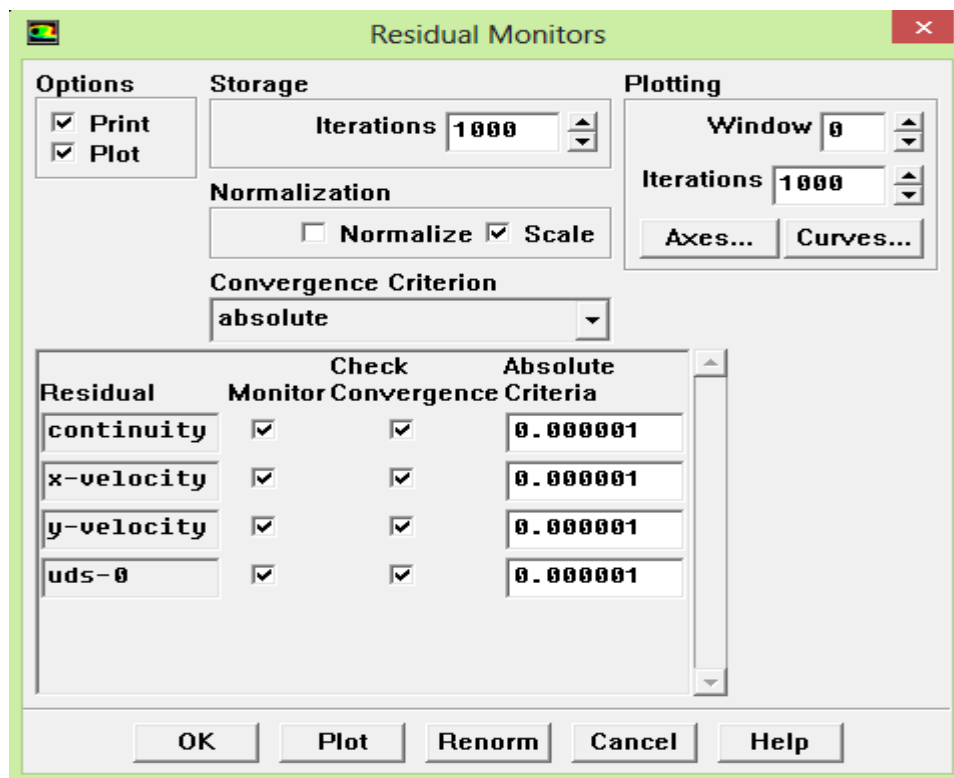
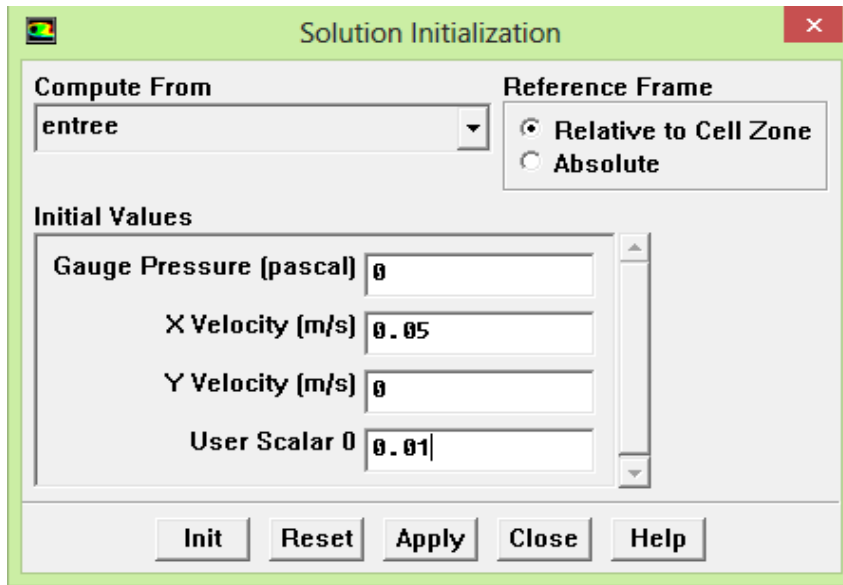


Figure III.20: Fenêtre des résidus.

**III.5.8. Initialisation des calculs**

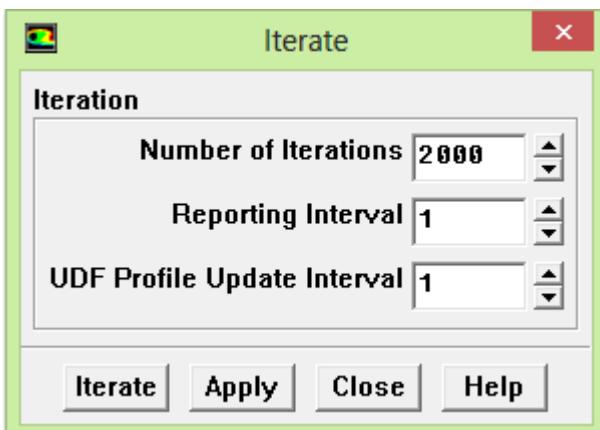
On initialise le calcul comme le montre la figure III.21.



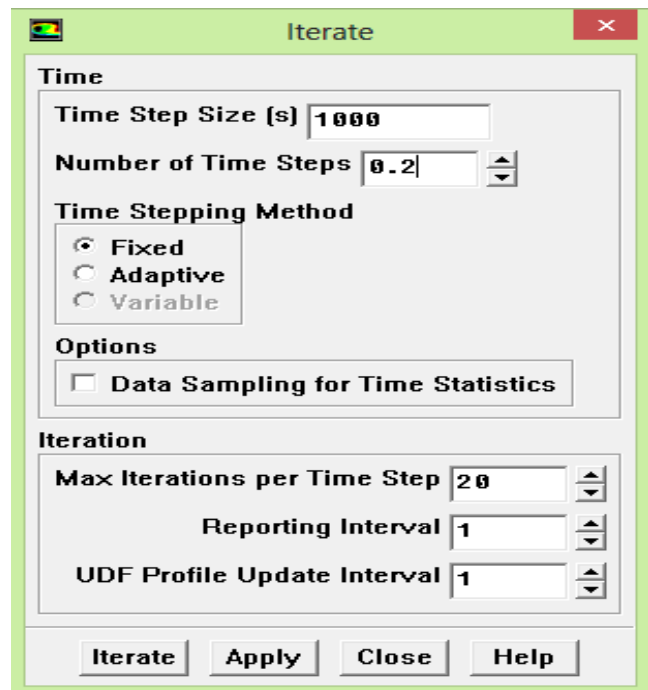
**Figure III.21:** Initialisation des calculs.

**III.5.9. Lancement des calculs itératifs**

Et enfin, on lance le calcul comme suit :

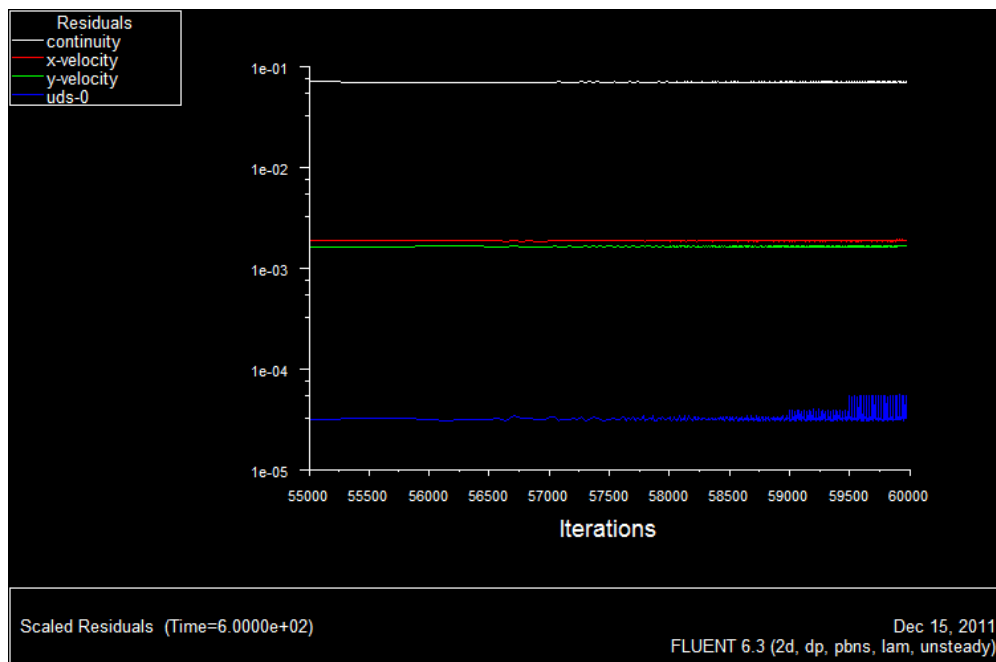


a) Laminaire stationnaire.



b) Laminaire instationnaire.

**Figure III.22:** Lancement des calculs sous fluent 6.3.26.



**Figure III.23:** Allures de l'évolution des résidus de calcul.

## Conclusion

L'utilisation des méthodes numériques est pratiquement nécessaire pour la résolution 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.

### IV.1. 1<sup>er</sup> Cas: Simulation de l'écoulement d'une eau salée à l'intérieur d'une unité d'un module membranaire (Variation du nombre de Reynolds et la fraction massique en sel à l'entrée)

Sachant que les modules membranaires commerciaux sont équipés d'espaceurs circulaires, nous nous intéressons en premier temps à étudier le comportement du fluide et du transfert de masse à l'intérieur d'une unité cellulaire d'un canal membranaire, par la variation de la vitesse de circulation du fluide ( $u_0$ ) et la salinité de la solution aqueuse de NaCl ( $m_{A0}$ ) à l'entrée du canal. Pour ce faire, on fixe la fraction massique du sel à l'entrée du canal à  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg, et nous varions le nombre de Reynolds entre 55 et 170 ( $0.05 \text{ m/s} \leq u_0 \leq 0.153 \text{ m/s}$ ).

Pour les simulations instationnaires, les contours (vitesses, pressions et fraction massique) sont exposés à un temps de simulation  $t = 600$  s.

IV.1.1. Les champs de vitesse

La figure IV.1 montre les contours des vitesses autour d'un cylindre à différents nombre de Reynolds pour une fraction massique en sel  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.

La figure IV.1 montre que l'obstacle circulaire inséré entre les deux membranes accélère le fluide au-dessus et au-dessous de ce dernier, ce qui favorise la déstabilisation du fluide même à des bas nombres de Reynolds. On constate que le régime d'écoulement est stationnaire pour un nombre de  $Re = 55$  et que la déstabilisation apparaît à partir du nombre de  $Re = 70$  (écoulement instationnaire). Ces résultats sont en accord avec ceux des références [27-36], figure IV.2, ce qui consolide la présente modélisation.

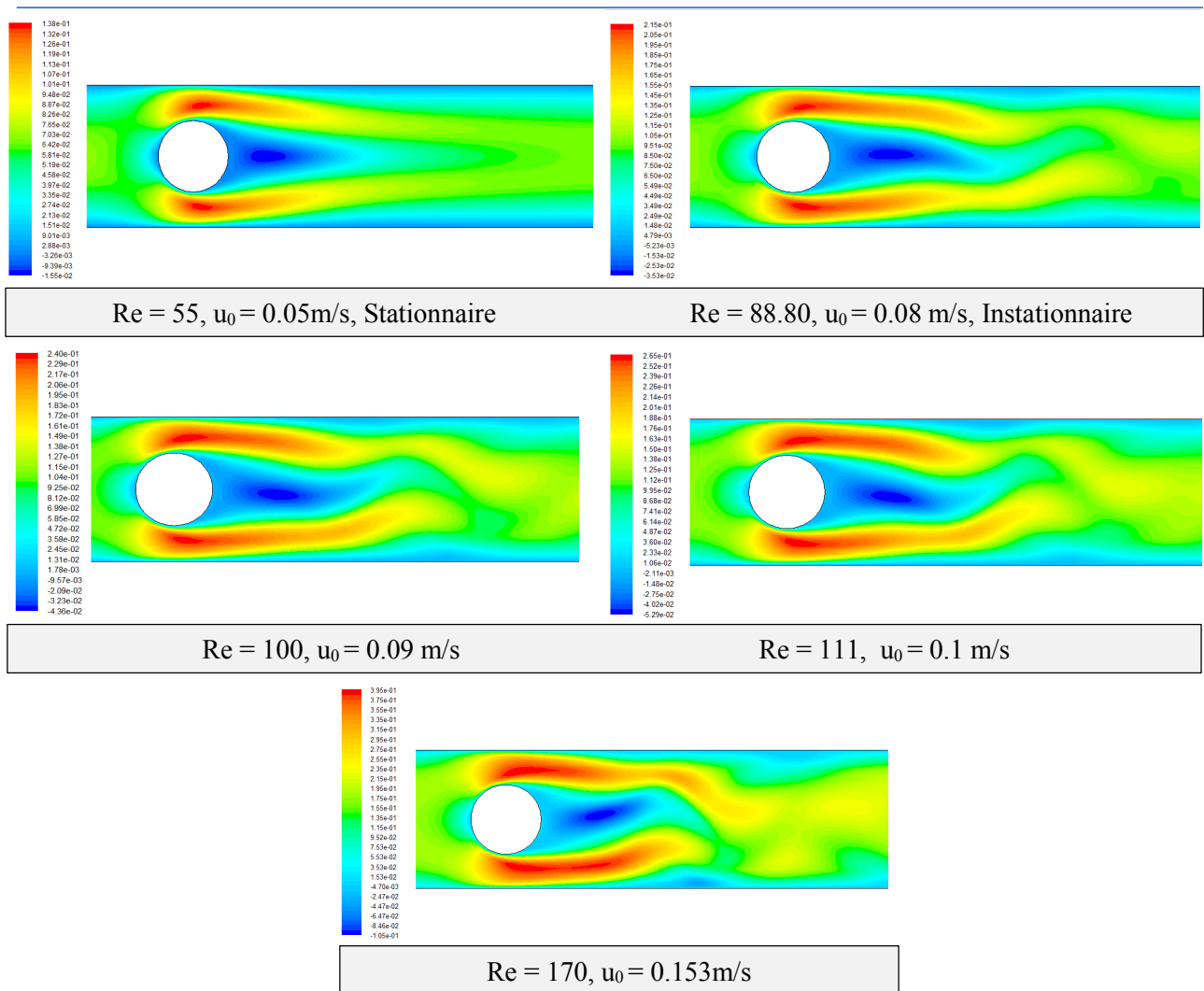


Figure IV.1 : Champs des vitesses (en m/s) à différents nombre de Reynolds.

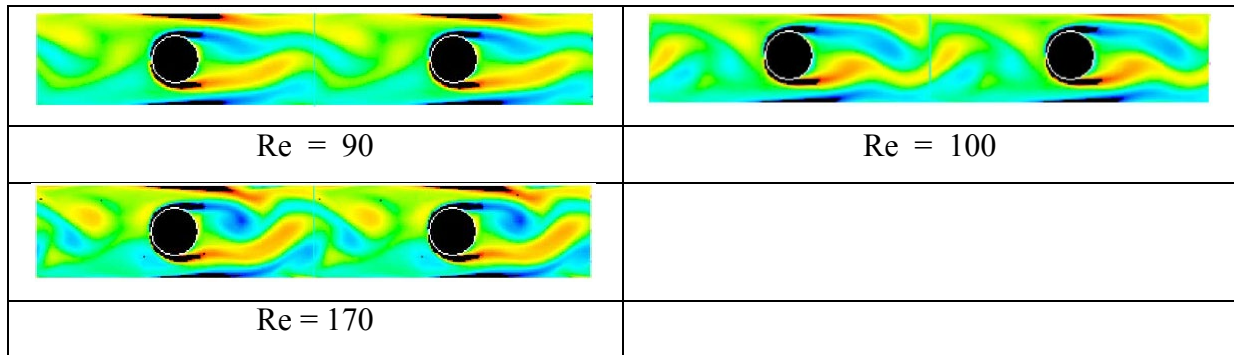


Figure IV.2 : Champs des vitesses de la réf. [36]

Du tableau IV.1. On déduit que la vitesse maximale est liée au nombre de Reynolds qui caractérise la vitesse à l’entrée, quand ce dernier augmente la vitesse augmente. De ce fait, la vitesse maximale est enregistrée au nombre de  $Re = 170$  au niveau de l’obstacle (le bas et le haut).

Re \ Vitesses (m/s)	55	88.80	100	111	170
$u_0$	0.05	0.08	0.09	0.1	0.153
$V_{max}$	0.138	0.215	0.240	0.265	0.395

Tableau IV.1 : Variation de la vitesse maximale en fonction du nombre de Reynolds d’entrée.

IV.1.2. Les contours de la pression statique

La figure IV.3 montre que les valeurs de la pression statique sont plus importantes en amont du cylindre qu'à son aval, cela veut dire que l'amont du cylindre subit une forte surpression (zone rouge) et sa valeur maximale augmente avec l'augmentation de la vitesse d'entrée. La dépression apparaît en haut, en bas et à l'aval de l'obstacle (zone bleue).

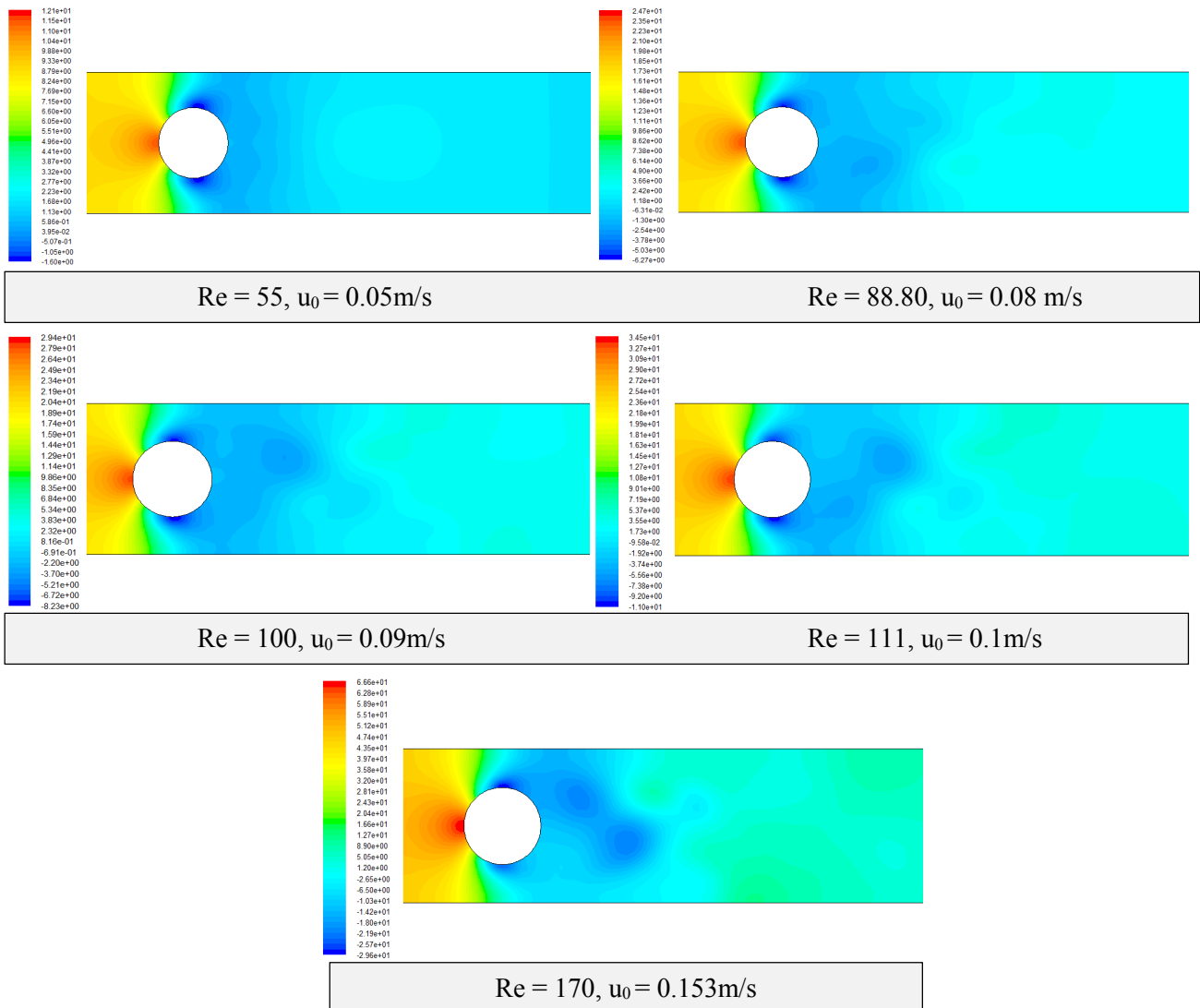


Figure IV.3: Contours des pressions statiques (en Pa) à différents nombres de Reynolds.

IV.1.3. Les contours de la fraction massique en sel

La figure IV.4 représente les contours de la fraction massique en sel pour différents Reynolds à  $m_{A0} = 0.01 \text{ kg/kg}$ . Pour de faibles nombres de Re, la couche du sel qui se développe au niveau des membranes est stable, elle est mince au niveau de l'obstacle (le bas et le haut) et épaisse en amont et en aval de l'obstacle. L'augmentation de la vitesse d'entrée perturbe cette couche essentiellement près des membranes, cela est dû à la formation des tourbillons à proximité de ces membranes. A force d'augmenter la vitesse, la couche du sel devient de plus en plus non uniforme.

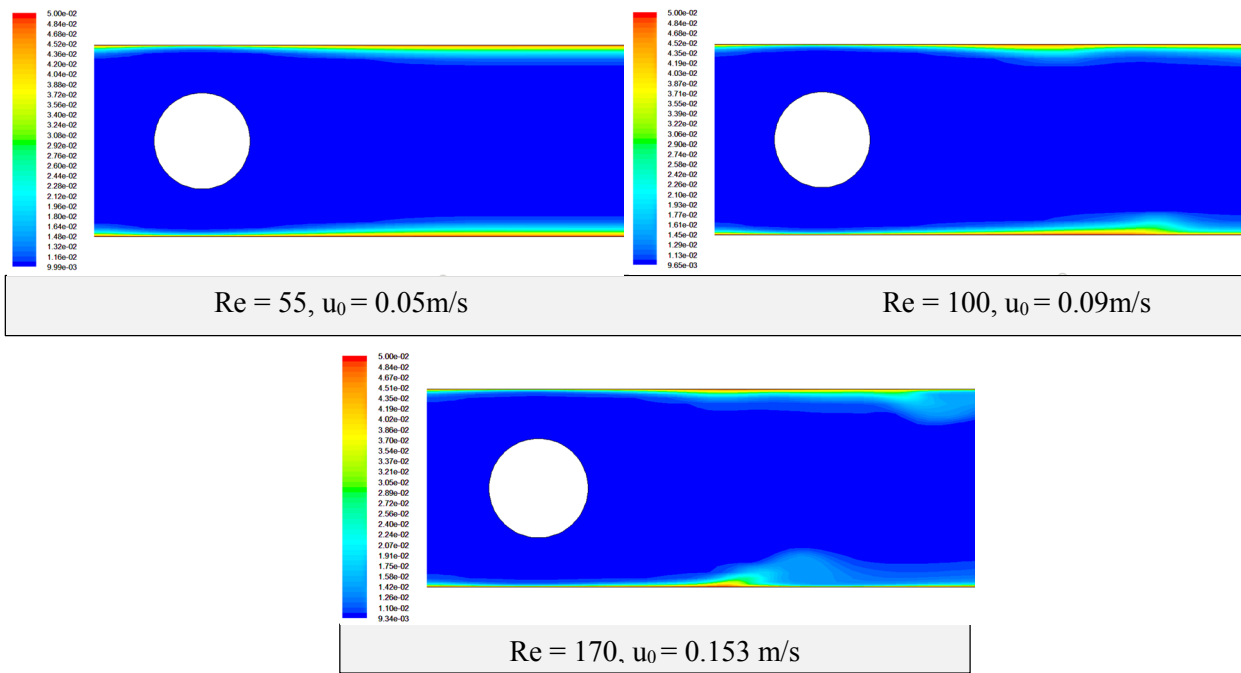


Figure IV.4: Contours de la fraction massique en sel (en kg/kg) à différents nombre de Reynolds.

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

On trace le profil de cisaillement obtenu grâce à l'équation (II.18) le long de la membrane inférieure pour différents nombre de Reynolds.

La figure IV.5 présente les évolutions locales du cisaillement pour différents nombre de Reynolds à  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg le long de la membrane inférieure. On remarque que le cisaillement au niveau du cylindre est très élevé et cela quel que soit le nombre de Reynolds d'entrée, où il atteint son maximum au nombre de  $Re = 170$ . Par contre en amont et en aval du cylindre le cisaillement est faible. C'est courbes sont similaires à celles de la Réf. [36].

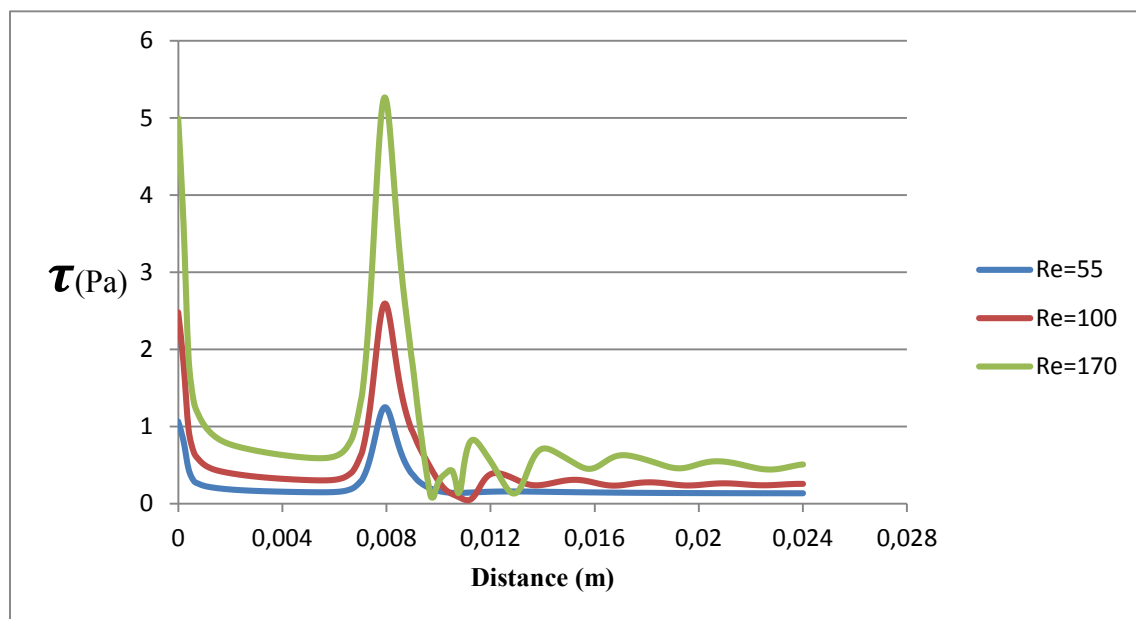


Figure IV.5: Cisaillement pour différents nombre de Reynolds le long de la membrane.

#### IV.1.5. Les 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

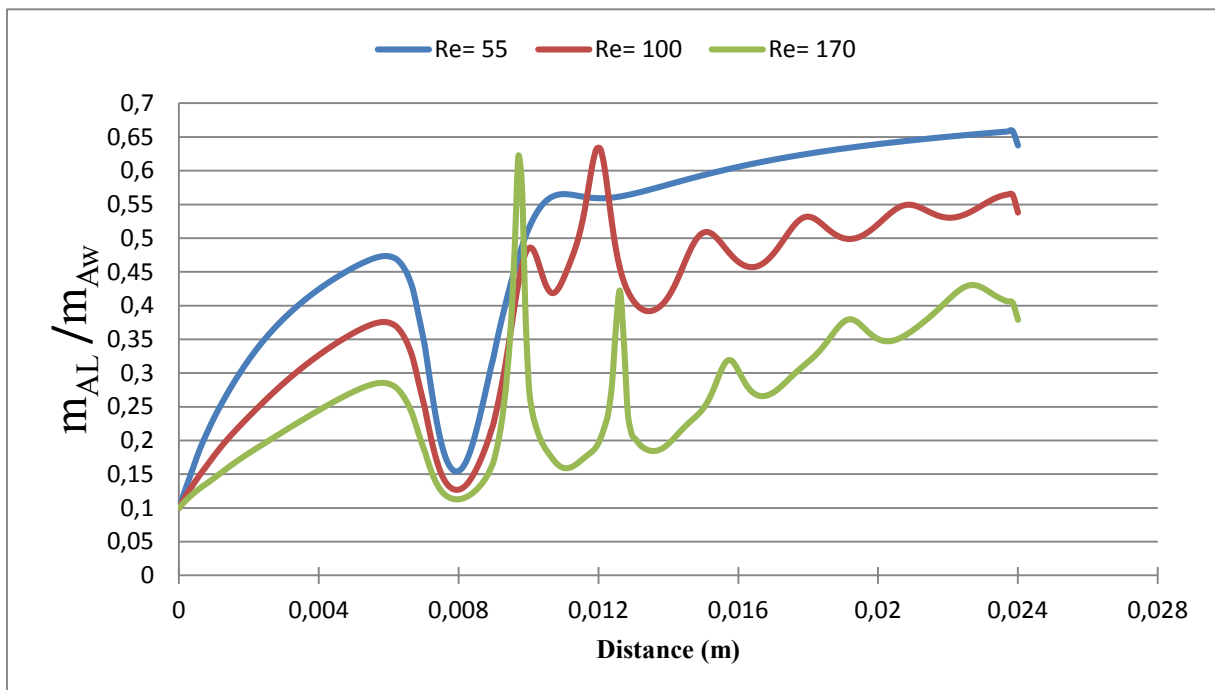
Comme expliqué précédemment, nous traçons une ligne à  $y = 0.05$  mm de la membrane inférieure afin d'extraire les valeurs locales de la polarisation de concentration ' $m_{AL}$ '. Ces valeurs sont ensuite divisées sur celles de la membrane  $m_{AW}$ . Cela nous permet de tracer le profil adimensionnel  $m_{AL}/m_{AW}$  afin d'étudier le comportement de PC à différentes valeurs de la fraction massique en sel d'entrée et différents nombres de Reynolds.

La figure IV.6 représente l'évolution des profils de la polarisation de concentration du sel le long de la membrane inférieure pour différents nombres de Reynolds et divers fraction massique en sel à l'entrée  $m_{A0}$ .

Les profils adimensionnels de la polarisation de concentration en sel ont une allure ascendante, ce qui concorde avec les résultats de plusieurs recherches antérieurs Réf. [24-27]. Ces profils admettent des valeurs minimales au niveau de l'obstacle et cela quel que soit la salinité de la solution aqueuse et la vitesse d'entrée. On constate que, l'augmentation de la fraction massique en sel à l'entrée de  $m_{A0} = 0.005 \text{ kg/kg}$  à  $m_{A0} = 0.04 \text{ kg/kg}$ , implique l'augmentation des valeurs de la couche de polarisation de concentration tout le long de la membrane inférieure en amont et en aval de l'obstacle. Ainsi, pour  $m_{A0} = 0.04 \text{ kg/kg}$  les valeurs sont plus importantes par rapport à celles de  $m_{A0} = 0.005 \text{ kg/kg}$  et  $m_{A0} = 0.01 \text{ kg/kg}$ .

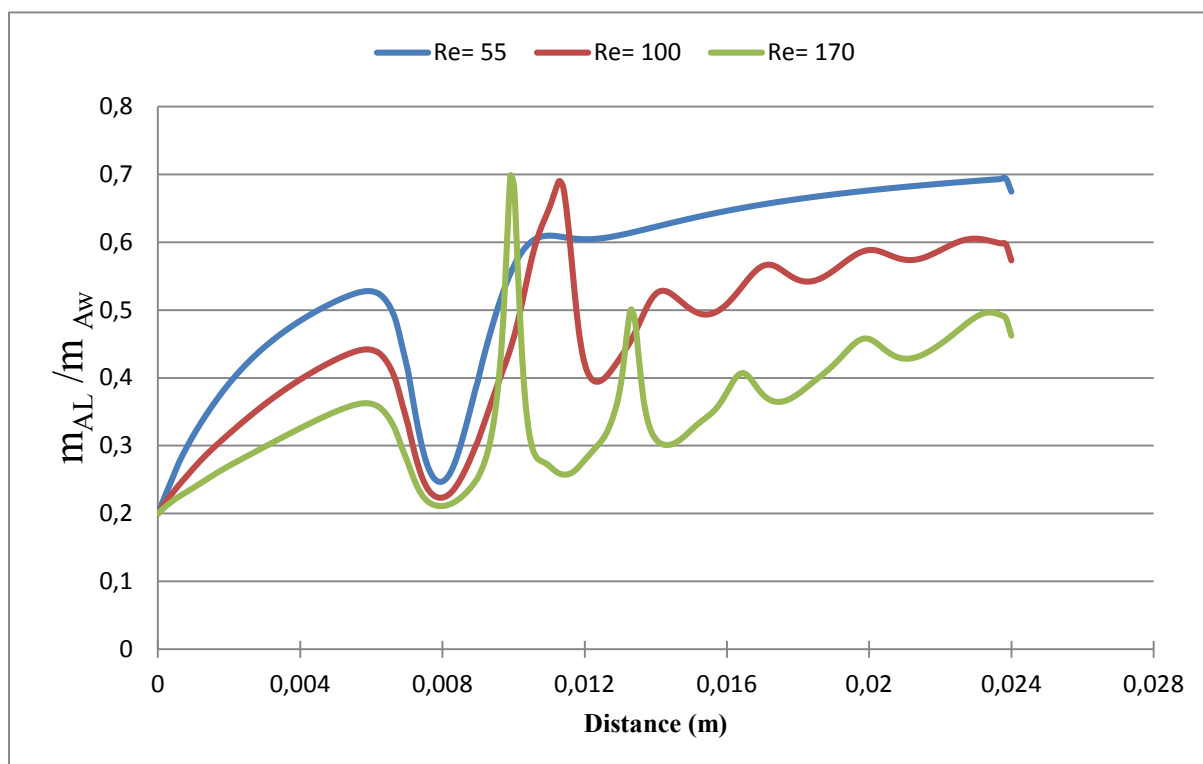
On remarque aussi que la fraction massique en sel au niveau du cylindre est très faible pour tous les nombres de Reynolds quel que soit  $m_{A0}$ .

**a)  $m_{A0} = 0.005 \text{ kg/kg}$**



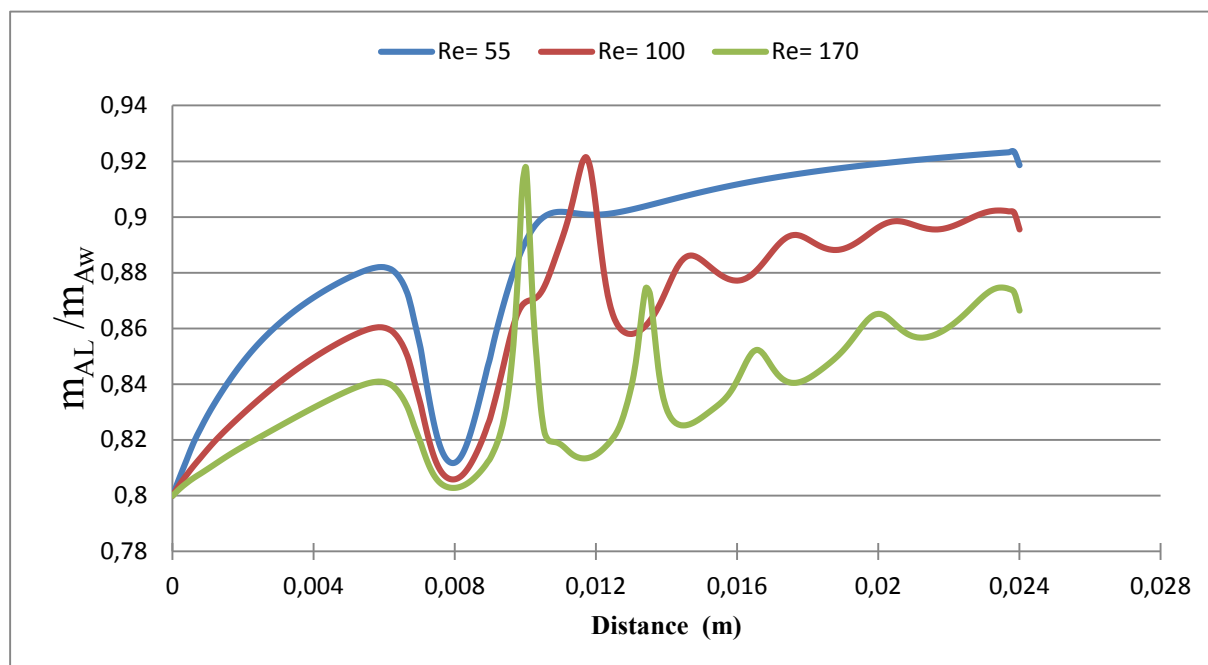
**a) Cylindre D =1 mm et  $m_{A0} = 0.005 \text{ kg/kg}$ .**

b)  $m_{A0} = 0.01 \text{ kg/kg}$



b) Cylindre  $D = 1 \text{ mm}$  et  $m_{A0} = 0.01 \text{ kg/kg}$ .

c)  $m_{A0} = 0.04 \text{ kg/kg}$



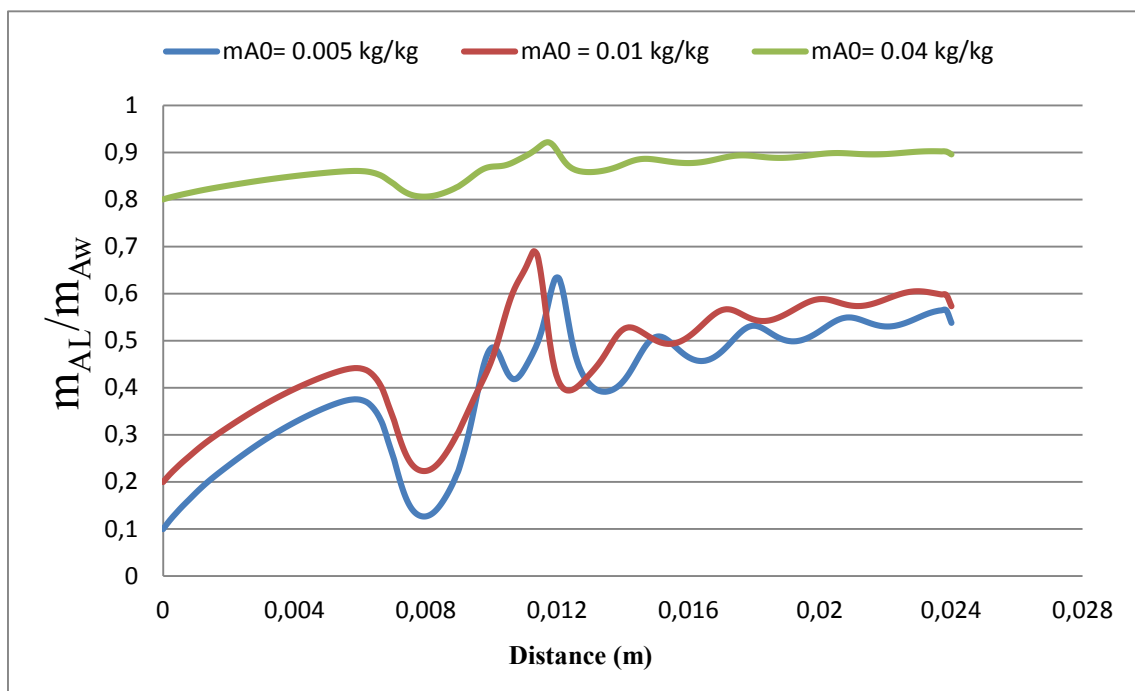
c) Cylindre  $D = 1 \text{ mm}$  et  $m_{A0} = 0.04 \text{ kg/kg}$ .

**Figure IV.6:** Graphes de la fraction massique en sel des différents nombres de  $Re$  le long de la membrane inférieure (a, b et c).

### B) Comportement de la polarisation de concentration à différentes salinités de la solution aqueuse de NaCl

Dans ce cas, nous avons fixé le nombre de Reynolds à l'entrée du canal à la valeur de 100 et on a varié la fraction massique du sel à l'entrée  $m_{A0}$  de 0.005 kg/kg jusqu'à 0.04 kg/kg.

De la figure IV.7, on remarque que les valeurs du profil obtenu avec  $m_{A0} = 0.04$  kg/kg sont plus importantes que celles des autres  $m_{A0}$ . Cela implique que l'augmentation de la salinité de la solution aqueuse de NaCl, génère plus de dépôt de sel au niveau des membranes.



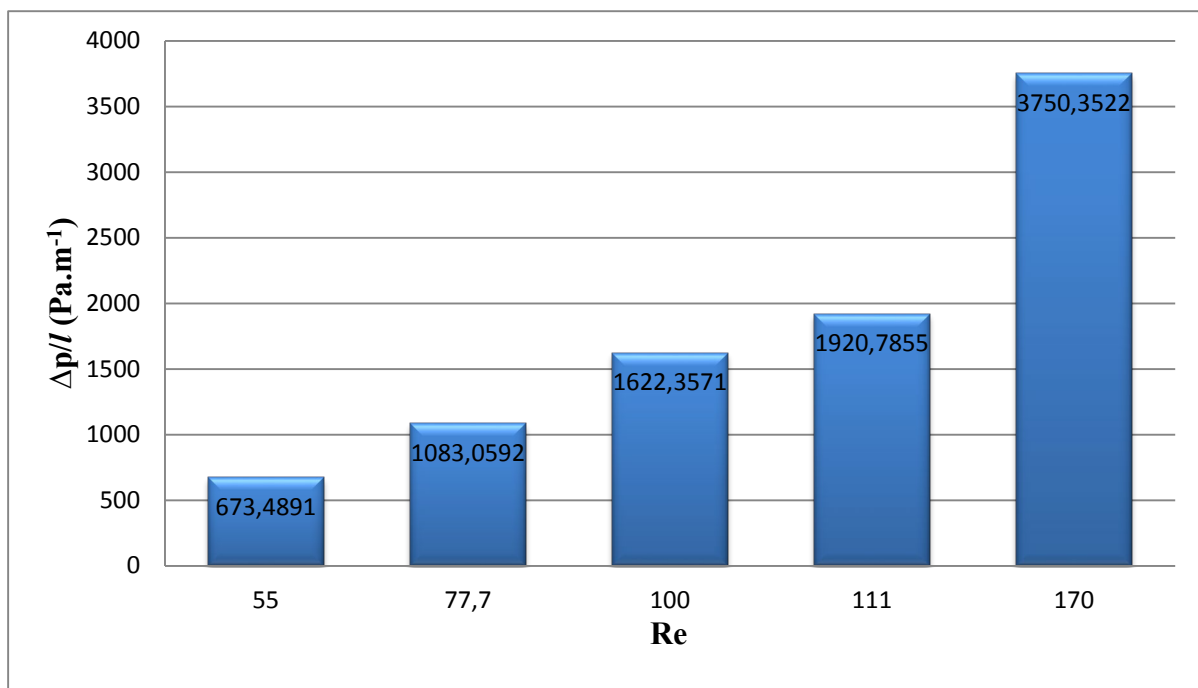
**Figure IV.7 :** Graphe du rapport de la fraction massique en sel pour différents  $m_{A0}$  le long de la membrane (Cylindre  $D = 1$  mm et  $Re = 100$ ).

#### 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, équation II.19.

La figure IV.8 représente un histogramme qui compare la perte de pression par unité de longueur en fonction du nombre de Reynolds pour  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.

On constate que la perte de pression est faible pour  $Re = 55$ , elle croît proportionnellement avec la croissance du nombre de Reynolds, ainsi elle atteint sa valeur maximale au nombre de  $Re = 170$ .

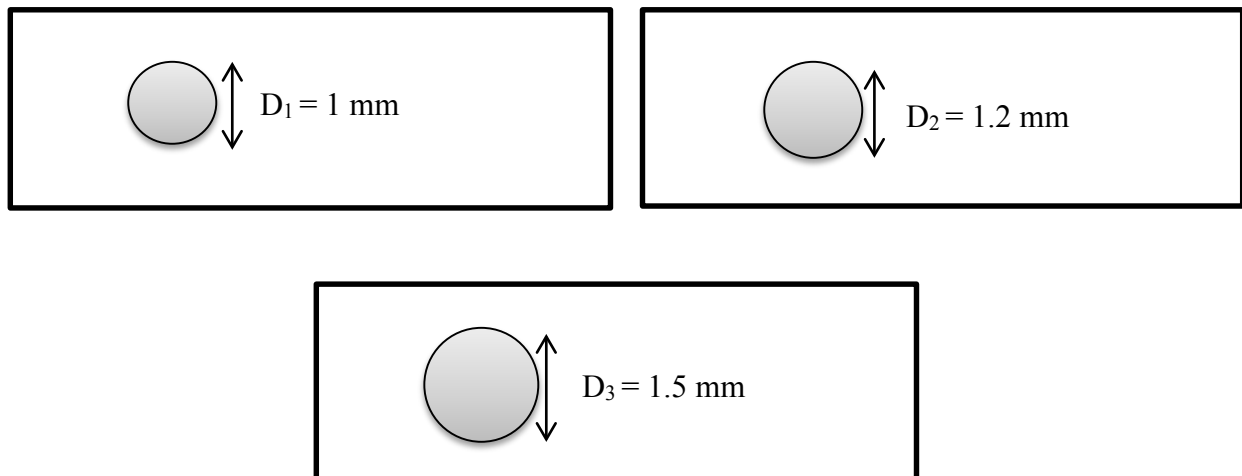


**Figure IV.8:** Histogramme de  $\Delta p/l$  pour différents nombres de Reynolds.

## IV.2. 2<sup>ème</sup> Cas : Variation du diamètre du cylindre

Dans le but d'étudier l'influence du diamètre sur le comportement de l'écoulement et la fraction massique en sel à l'intérieur du canal membranaire, nous avons opté pour l'augmentation du diamètre de cylindre de 1 mm à 1.5 mm comme le montre la figure IV.9. Les résultats obtenus de la simulation seront présentés sous forme d'une analyse comparative.

Pour que la comparaison soit plus précise nous avons fixé la fraction massique du sel à l'entrée à la valeur de 0.01 kg/kg et nous avons varié le nombre de Reynolds entre 55 et 100 ( $0.033\text{m/s} \leq u_0 \leq 0.09\text{ m/s}$ ). Pour les simulations en régime instationnaire, les résultats des simulations sont enregistrés à  $t = 600\text{ s}$ .



**Figure IV.9 :** Le cylindre pour différents diamètres.

IV.2.1. Les champs de vitesse

La figure IV.10 représente les contours de la vitesse obtenus avec différents diamètres de l'obstacle circulaire. On remarque que le comportement du fluide est relativement similaire pour les différents cas étudiés. En effet, à un faible nombre de Reynolds, l'écoulement est stable dans tous les canaux, contrairement au nombre de  $Re = 100$ , où l'écoulement est instable.

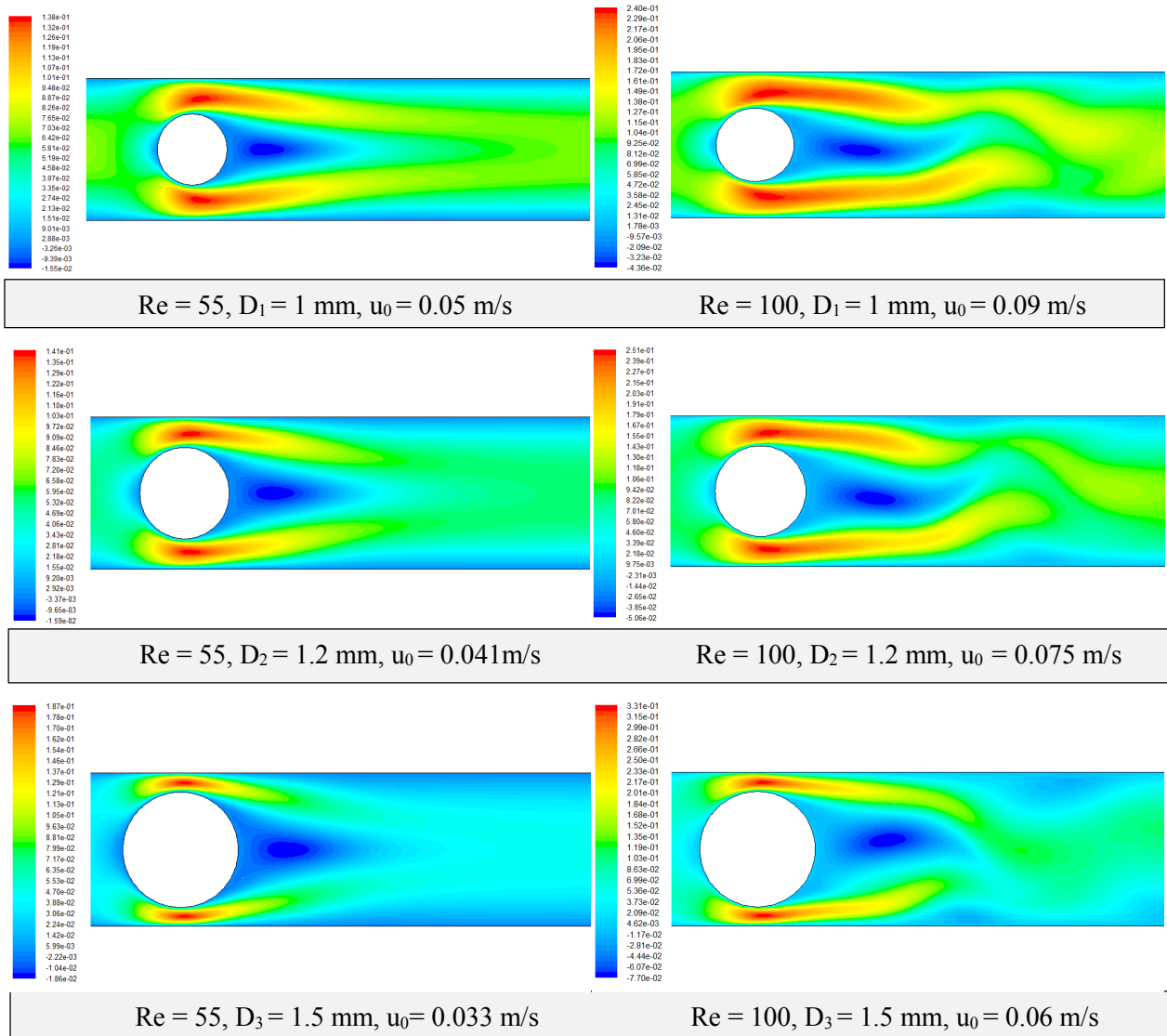


Figure IV.10 : Champs des vitesses (en m/s) pour différents diamètres.

À partir du tableau IV.2, on déduit que la vitesse maximale augmente à chaque fois qu'on agrandit le diamètre du cylindre et cela est dû à la diminution de la section de passage du fluide en haut et en bas de l'obstacle.

		D <sub>1</sub> = 1 mm		D <sub>2</sub> = 1.2 mm		D <sub>3</sub> = 1.5 mm	
Vitesse (m/s)	Re	55	100	55	100	55	100
	u <sub>0</sub>		0.05	0.09	0.041	0.075	0.033
V <sub>max</sub>		0.138	0.20	0.141	0.251	0.187	0.331

Tableau IV.2 : Variation de la vitesse maximale en fonction du nombre Reynolds d'entrée pour différents diamètres.

IV.2.2. Les Contours de la pression statique

La figure IV.11 présente la propagation de la pression statique à l'intérieur des canaux membranaire pour une concentration de sel  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg et différents nombres de Reynolds. On remarque que les valeurs de la pression statique locale sont plus élevées en amont de l'obstacle et cela quel que soit le diamètre du cylindre. En parallèle, on constate un comportement presque identique pour tous les cas traités.

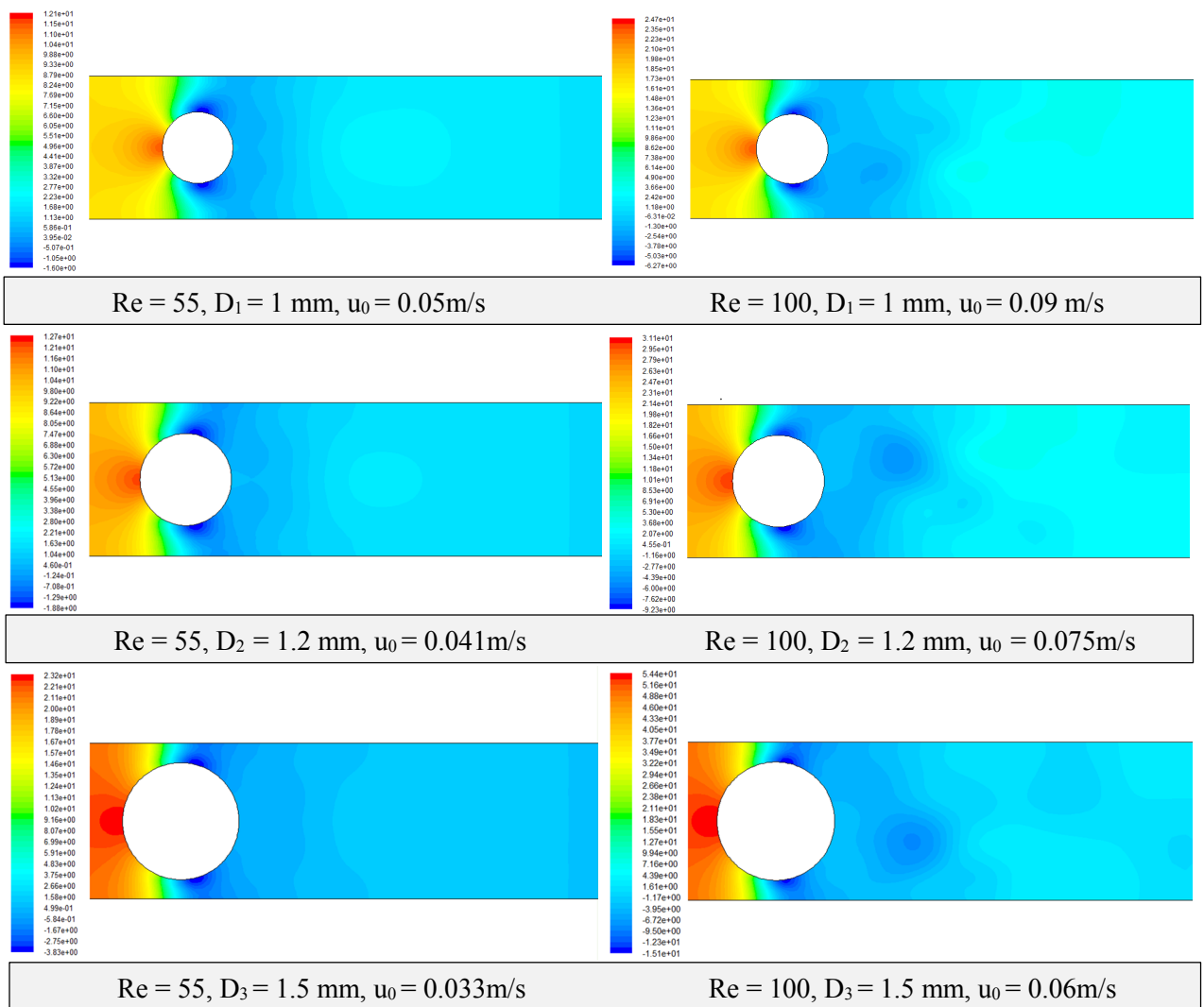


Figure IV.11: Contours des pressions statiques (en Pa) pour différents diamètres.

IV.2.3. Les contours de la fraction massique en sel

La figure IV.12 représente les Contours de fraction massique en sel pour différents diamètres obtenus aux nombres de Reynolds 55 et 100. On constate que, le cylindre avec le grand diamètre ‘D<sub>3</sub>’ perturbe largement la couche limite de concentration en aval de l’obstacle à la fois sur les parois supérieure et inférieure par rapport aux autres diamètres, cela est dû probablement à l’accélération du fluide en présence d’une grande surface de contact.

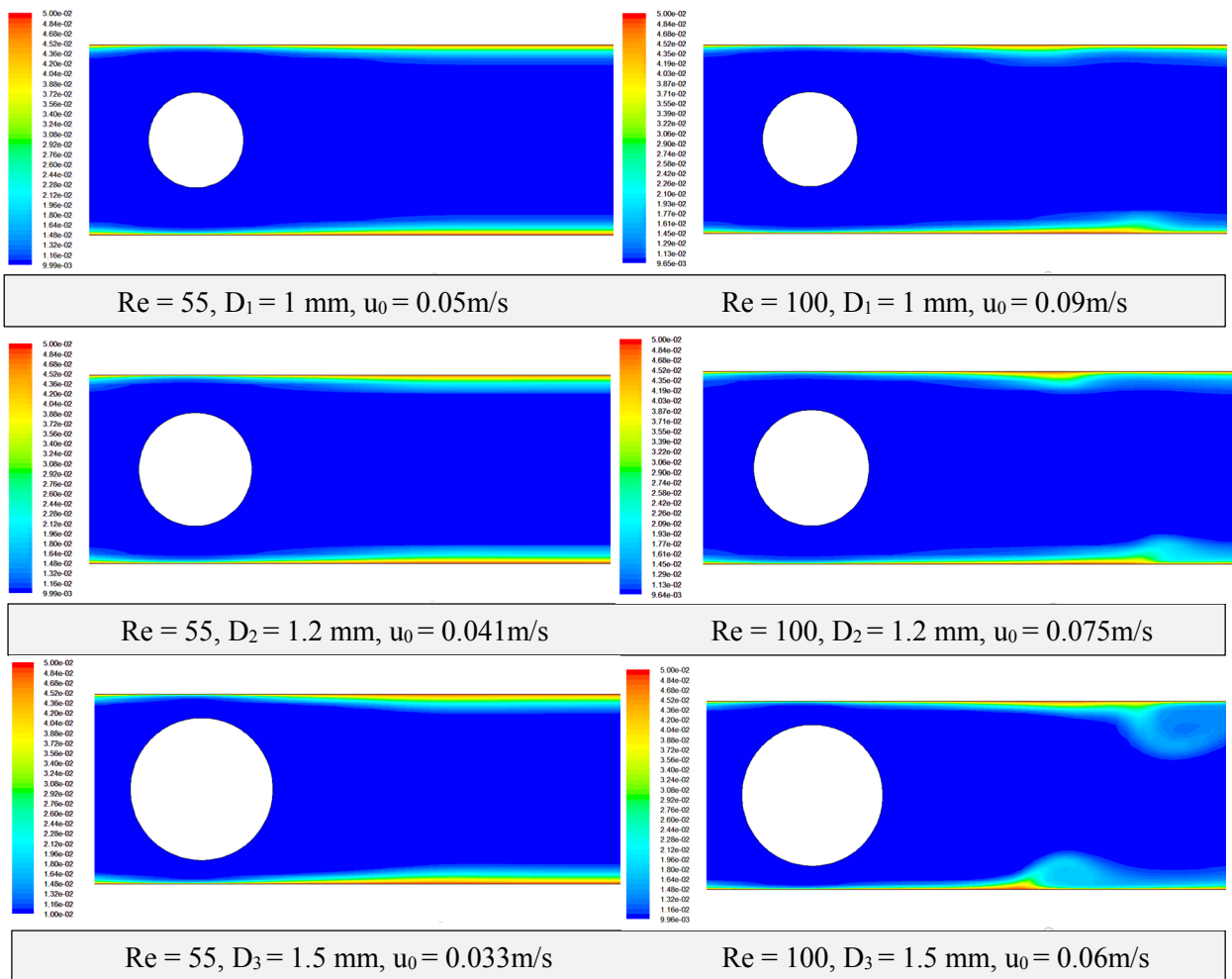
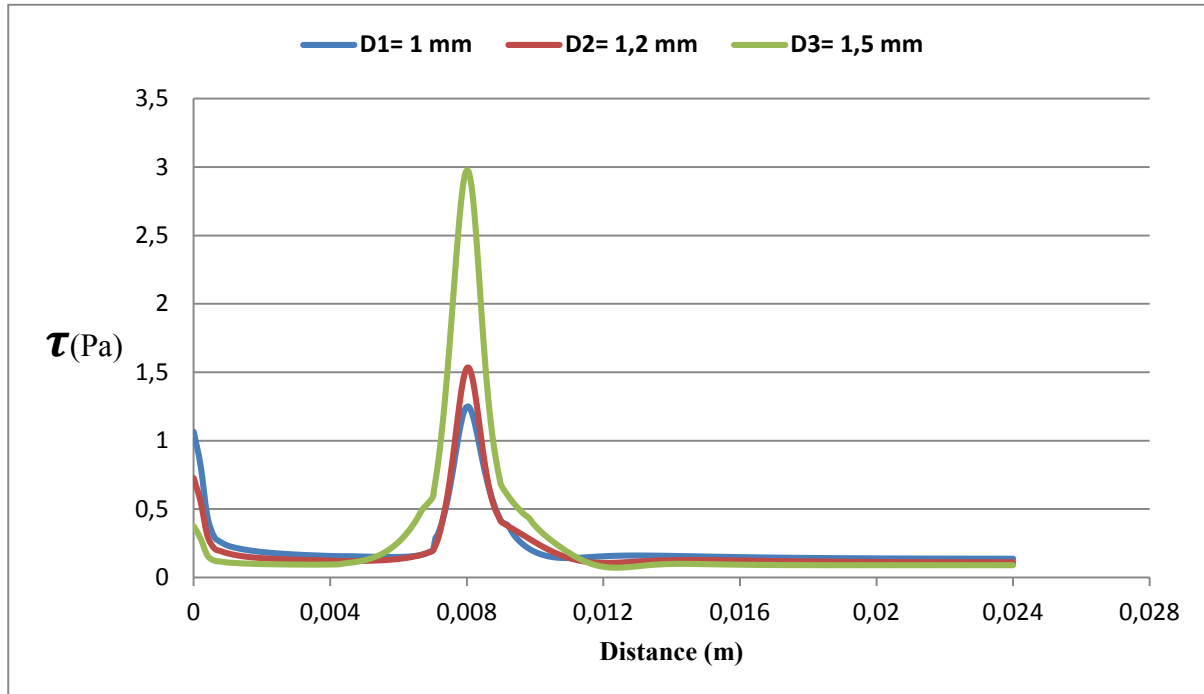


Figure IV.12 : Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) à différents diamètres pour les nombres de Re = 55 et 100.

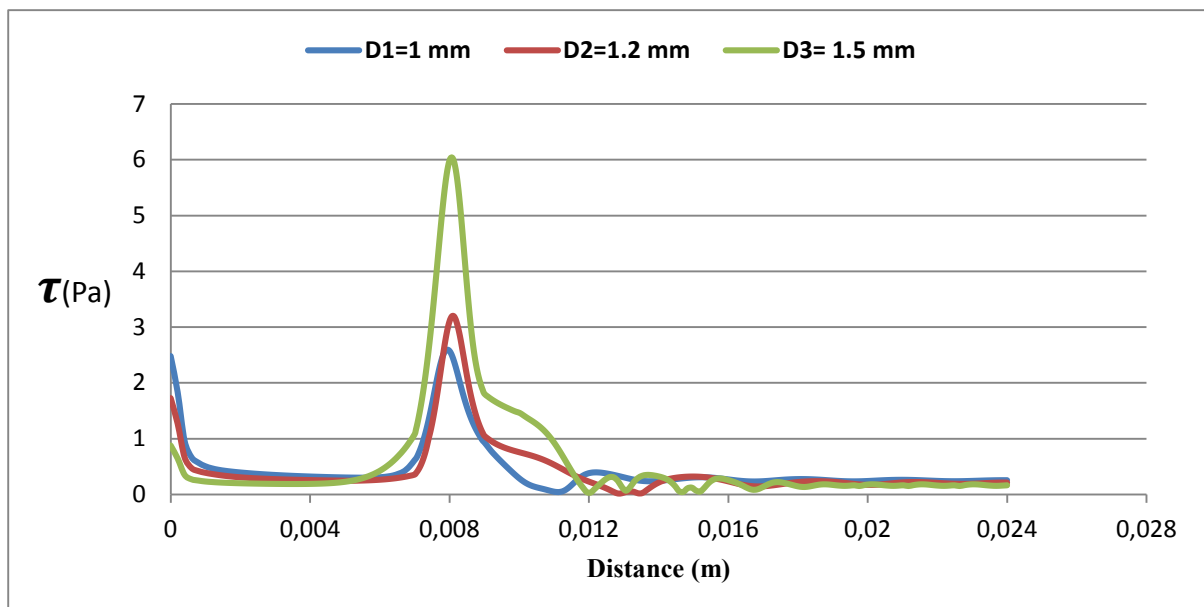
IV.2. Les profils de cisaillement

La figure IV.13, présente les courbes du cisaillement le long de la membrane inférieure obtenus avec différents diamètres et pour une fraction massique d’entrée constante m<sub>A0</sub>=0.01 kg/kg.

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'obstacle le plus imposant ' $D_3 = 1.5 \text{ mm}$ ' génère le cisaillement le plus important et cela quel que soit le nombre de Reynolds. En effet, l'obstacle ayant le diamètre le plus important provoque un étranglement qui accélère le fluide en haut et en bas du cylindre, par conséquent le cisaillement enregistré est plus important.



a) Re = 55.

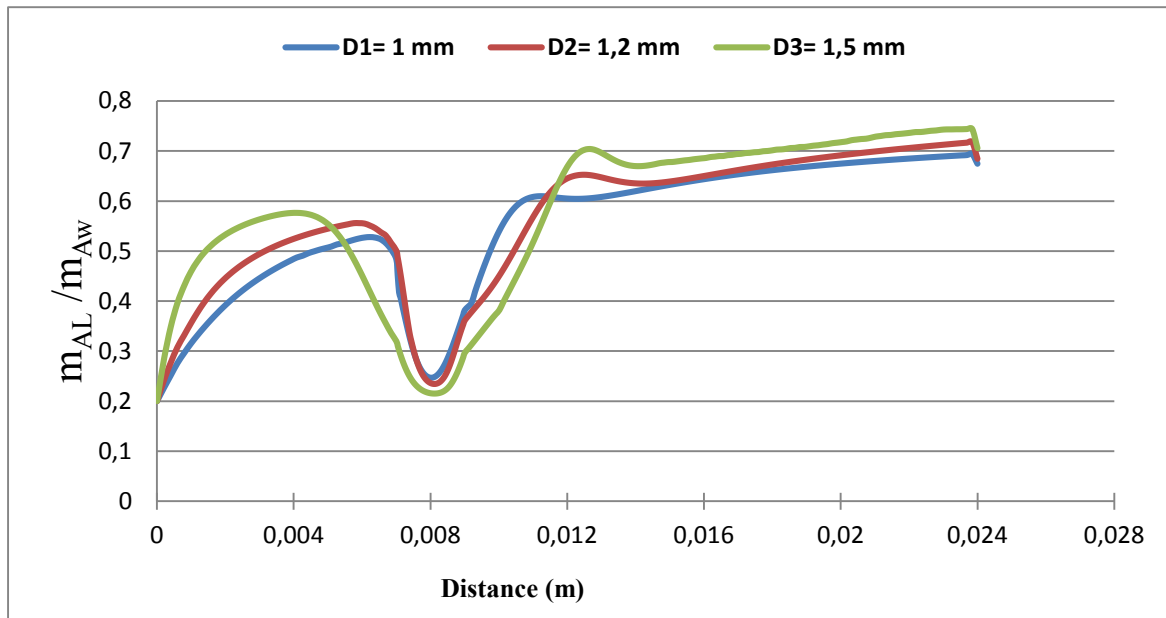


b) Re = 100.

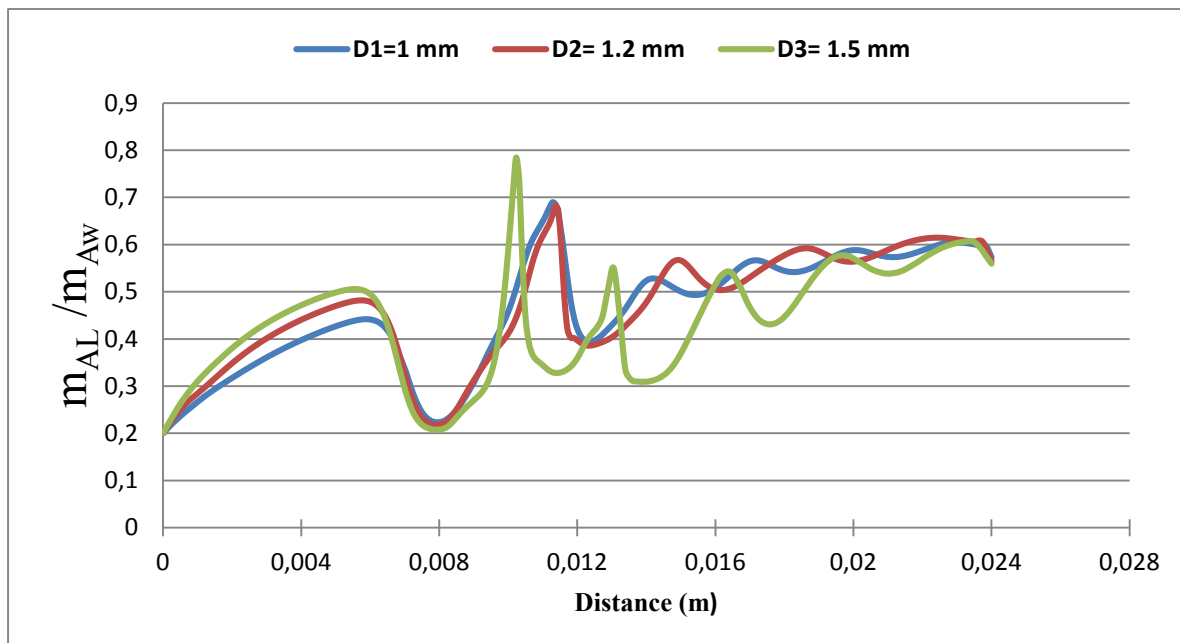
**Figure IV. 13:** Cisaillement pour différent diamètres le long de la membrane inférieure :  
a) Re = 55, b) Re = 100.

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

La figure IV.14 représente les profils de la polarisation de concentration le long de la membrane inférieure pour différents diamètres aux nombres de Re 55 et 100, respectivement. On remarque que les profils  $m_{AL}/m_{AW}$  sont largement impactés par le diamètre de l'obstacle immergé. Cet impact diffère lorsque l'écoulement est stable (Re = 55), ou instable (Re = 100).



a)  $Re = 55$  et  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.

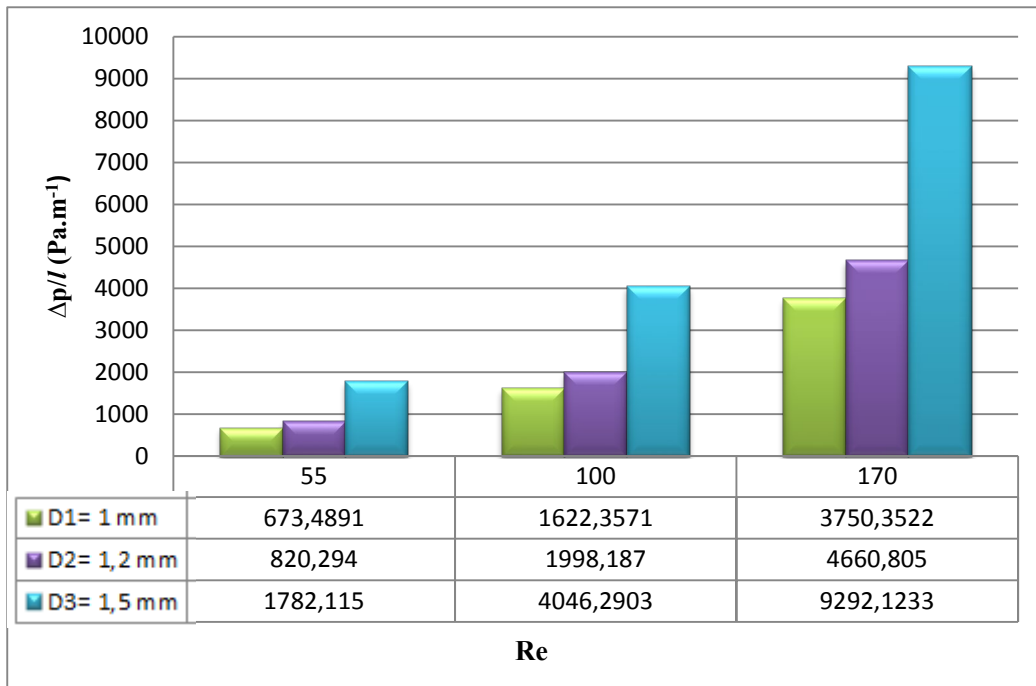


b)  $Re = 100$  et  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.

**Figure IV.14 :** Profil de concentration le long de la membrane inférieure pour différents diamètres (a et b).

### IV.2.6. Les pertes hydrauliques

D'après l'histogramme de la figure IV.15, on constate que, la perte de pression par unité de longueur obtenue en présence du diamètre 'D<sub>3</sub>' est plus élevée par rapport aux autres cas et cela quel que soit le nombre de Reynolds à l'entrée. Par conséquent les pertes de pression sont liées à l'agrandissement du diamètre.

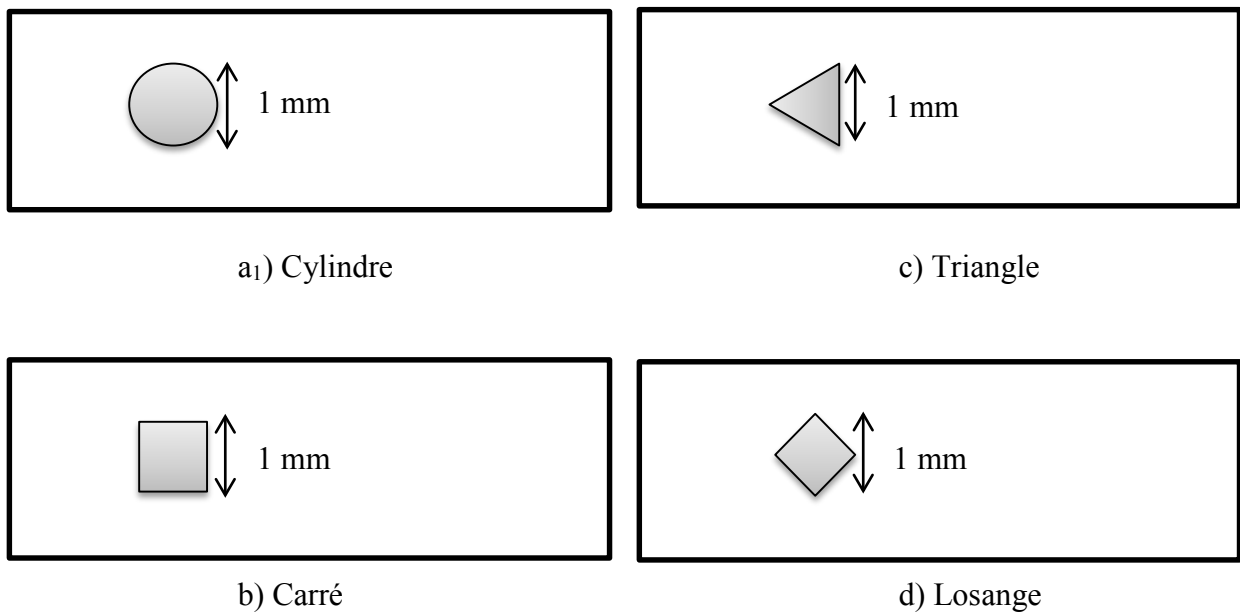


**Figure IV.15 :** Histogramme de dépression par unité de longueur ( $\Delta p/l$ ) pour différents Diamètres (Cylindre,  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg).

### IV.3. 3<sup>ème</sup> Cas : Variation de la géométrie de l'obstacle immergé

Dans cette section, nous allons tester l'effet du changement de la forme de l'obstacle. Pour cela, nous allons insérer entre les deux membranes, les obstacles montrés sur la figure IV.16 et comparer les différents résultats obtenus (vitesse, pression, polarisation de concentration et cisaillement) par rapport au cylindre « géométrie de référence ».

Pour que la comparaison soit plus précise, nous avons fixé la fraction massique en sel à l'entrée à la valeur de 0.01 kg/kg et nous varions le nombre de Reynolds entre 55 et 100. Pour les simulations en régime instationnaire, les résultats des contours sont exposés à  $t = 600$  s.



**Figure IV.16:** Les différentes géométries de l'obstacle immergé.

IV.3.1. Les champs de vitesse

D’après la figure IV.17 on remarque que, la perturbation apparait en présence des formes carrée et triangle même à bas nombre de Reynolds 55, tandis que l’écoulement reste stable pour les obstacles de formes cylindrique et losange. Les vitesses locales maximales enregistrées sont mentionnées dans le tableau IV.3, de là on constate que, les valeurs les plus élevées sont enregistrées en présence de la forme carrée.

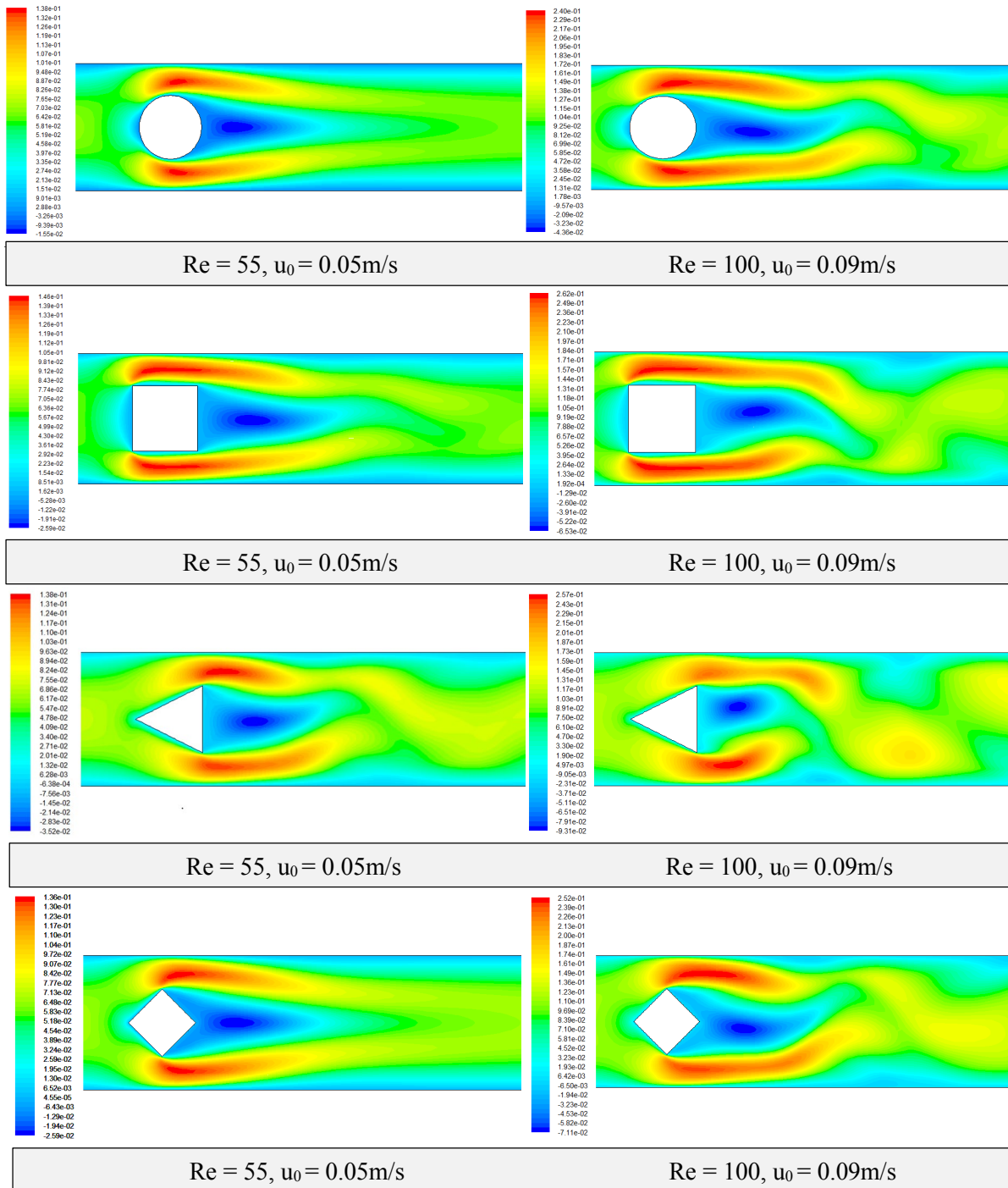


Figure IV.17 : Les contours des vitesses (en m/s) pour différentes géométries.

	Cylindre		Carré		Triangle		Losange	
<b>Re</b> Vitesse (m/s)	55	100	55	100	55	100	55	100
<b>u<sub>0</sub></b>	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09
<b>V<sub>max</sub></b>	0.138	0.240	0.146	0.262	0.136	0.252	0.138	0.257

**Tableau IV.3 :** Variation de la vitesse maximale en fonction du nombre de Reynolds d'entrée pour différentes géométries.

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

La Figure IV.18 montre que les valeurs locales de la pression statique obtenues en présence d'un obstacle de forme carrée sont nettement supérieures en amont de ce dernier par rapport aux autres formes et cela pour les deux nombres de Re.

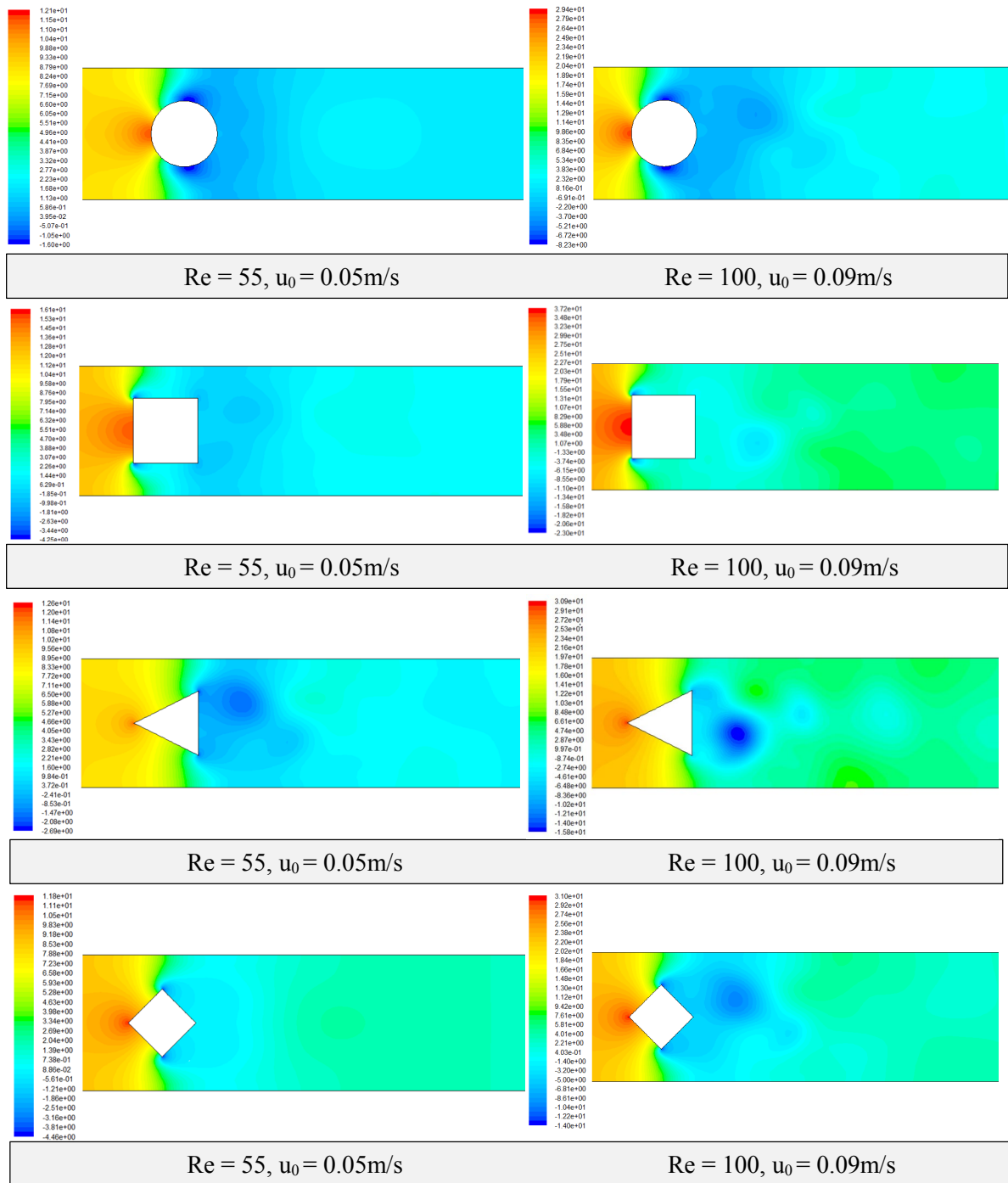


Figure IV.18 : Les contours des pressions statiques (en Pa) pour différentes géométries.

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

La figure IV.19 représente les contours de la fraction massique en sel pour différentes formes d'obstacle.

Pour  $Re = 55$ , on remarque une légère instabilité des couches de sel au niveau des membranes pour les formes carrée et triangle. Pour le nombre de  $Re = 100$ , on remarque que la variation longitudinale de la concentration à proximité de la surface membranaire n'est pas constante, cela veut dire que, la couche limite de concentration est perturbée à la fois sur les parois supérieure et inférieure pour toutes les géométries et beaucoup plus en présence d'un obstacle triangulaire ou carré.

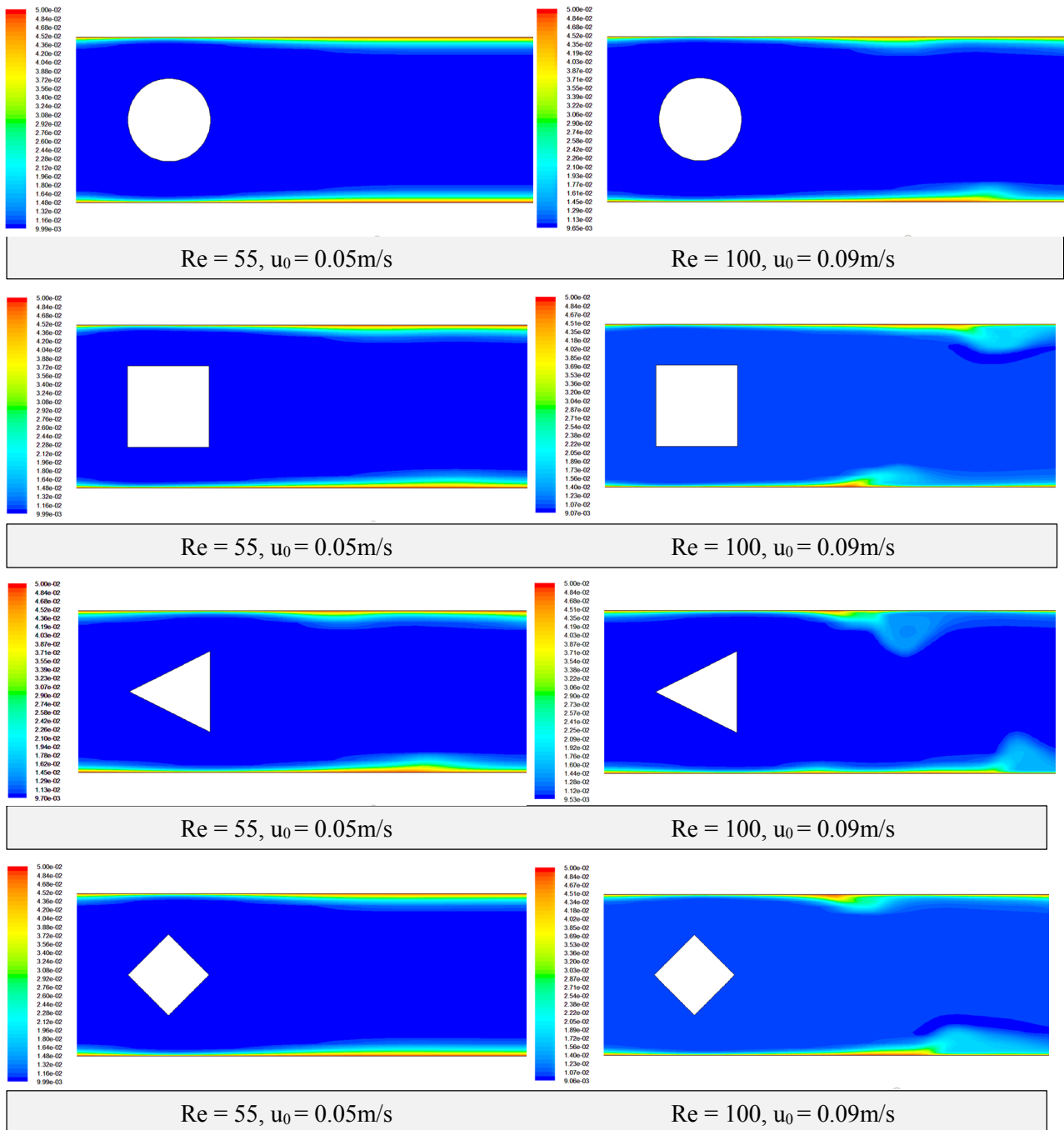
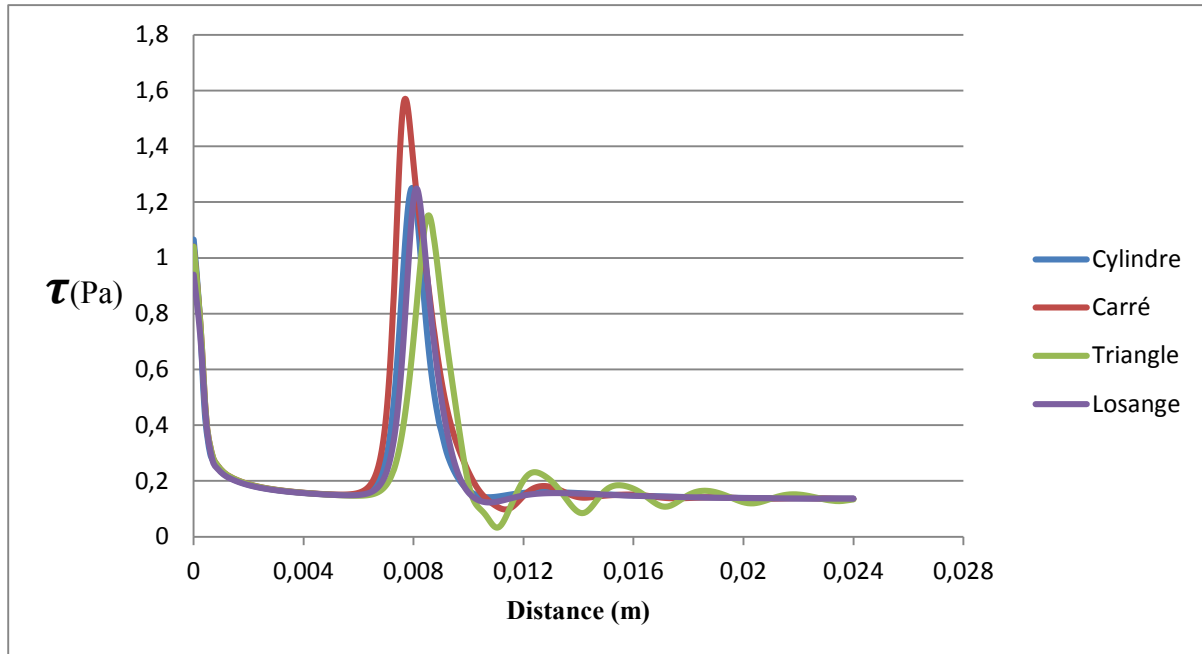


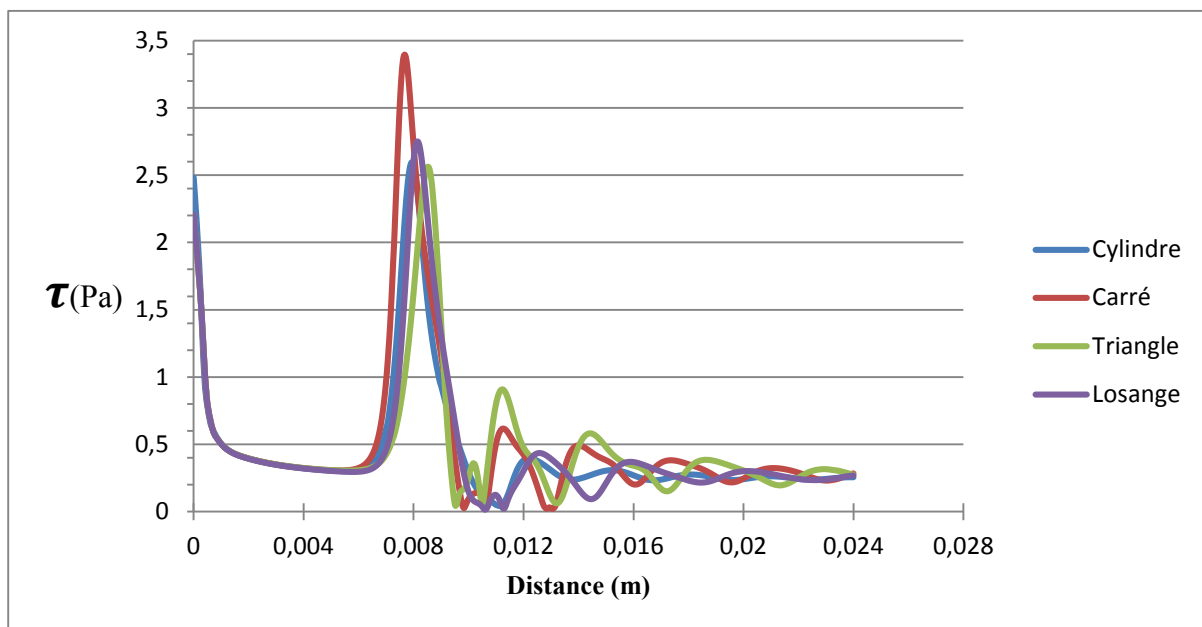
Figure IV.19 : Contours de la fraction massique du sel (en kg/kg) pour différentes géométries à  $Re = 55$  et  $Re = 100$ .

IV.3.4. Les profils de cisaillement

A partir de la figure IV.20, nous remarquons que, la forme carrée génère le cisaillement le plus important (pic maximal) quel que soit le nombre de Re par rapport aux autres formes.



a)  $Re = 55$  et  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.



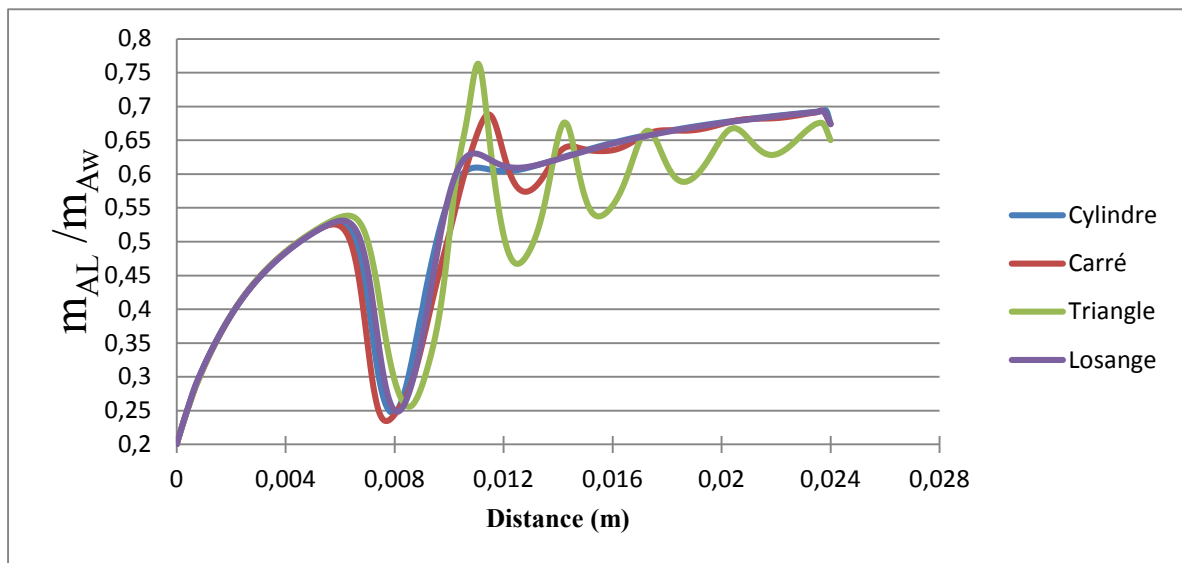
b)  $Re = 100$  et  $m_{A0} = 0.01$  kg/kg.

Figure IV.20 : Cisaillement le long de la membrane inférieure pour différentes géométries (a et b).

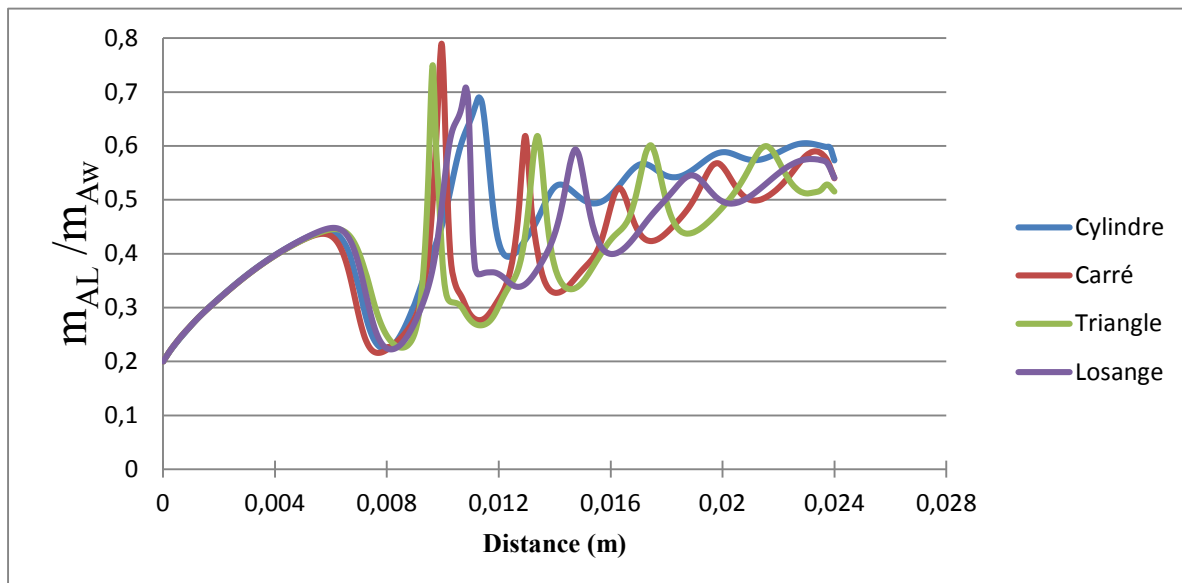
IV.3.5. Les profils de la polarisation de concentration au niveau de la membrane inférieure

La figure IV.21, représente l'évolution des profils de la polarisation de concentration en sel le long de la membrane inférieure en présence de différentes géométries.

A  $Re = 55$ , on constate que les profils sont affectés différemment par la forme de l'obstacle, l'impact est observé beaucoup plus en présence du triangle. Tandis qu'au nombre de  $Re = 100$  tous les profils  $m_{AL}/m_{AW}$  sont considérablement agités en présence des différentes géométries d'obstacle immergé. En revanche, ce qui affecte les profils encore plus c'est la présence de la forme carrée ou triangulaire, où on remarque deux pics plus importants de valeurs en aval de ces dernières.



a)  $Re = 55$  et  $m_{A0} = 0.01\text{kg/kg}$ .

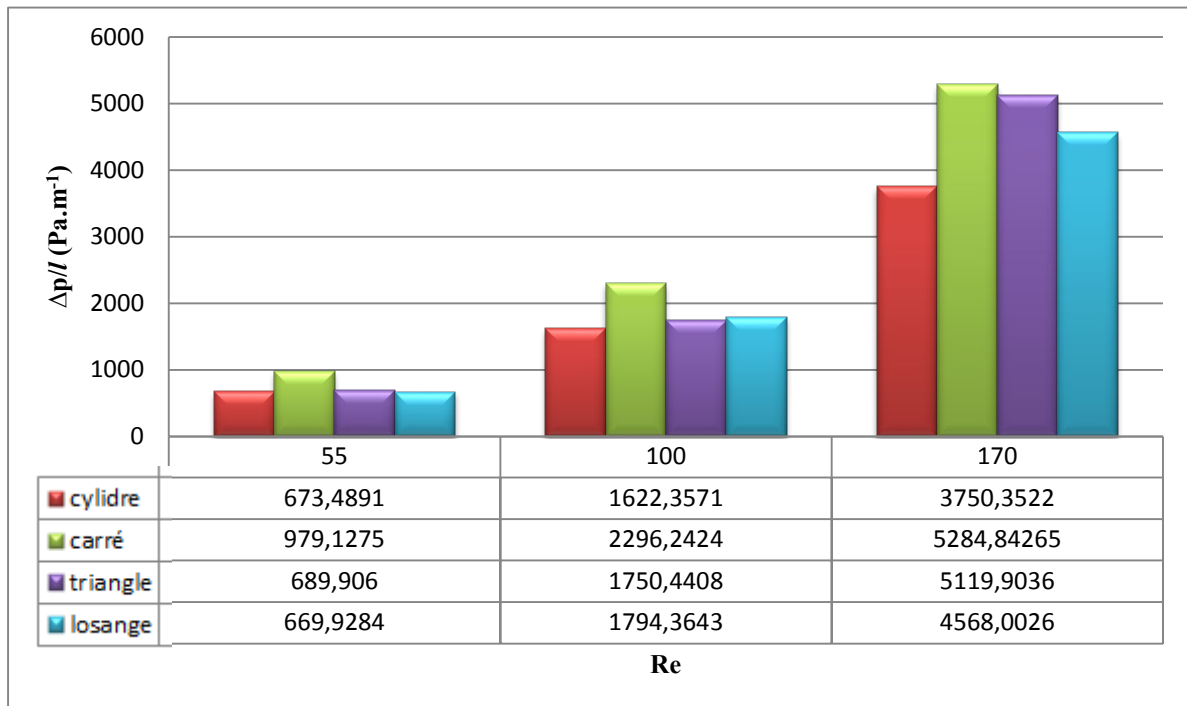


b)  $Re = 100$  et  $m_{A0} = 0.01\text{kg/kg}$ .

Figure IV.21: Rapport de la fraction massique en sel pour différentes géométries le long de la membrane inférieure (a et b).

### IV.3.6. Les pertes hydrauliques

De l'histogramme de la figure IV.22, on remarque que la perte de pression par unité de longueur obtenue en présence de l'obstacle carré est plus élevée par rapport aux autres géométries et cela pour tous les nombres de Reynolds étudiés.



**Figure IV.22:** Histogramme de  $\Delta p/l$  pour différentes géométries ( $m_{A0} = 0.01 \text{ kg/kg}$ ).

## Conclusion

D'après les résultats obtenus dans cette étude effectuée sur les différents cas mentionnés auparavant, on conclut que le nombre de Reynolds le plus fiable est le faible  $Re = 55$ . Le diamètre  $D_3$  est le diamètre le plus efficace, et parmi les géométries qui ont contribué à avoir des résultats pertinents est la forme losange.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif du présent travail consiste en l'étude de l'influence des différents paramètres considérés 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, où nous avons abordé les équations régissent l'écoulement en régime laminaire (stationnaire, instationnaire) et le transfert de soluté telle que la conservation de quantité de mouvement (Navier-Stokes), la continuité et 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 de soluté avec les équations de transport de quantité de mouvement. Afin de réduire le calcul, nous avons appliqué plusieurs conditions aux limites dans la résolution des différentes équations.

Dans le but de cerner le problème physique, nous avons étudié trois cas :

En premier temps, 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'un obstacle cylindrique. On a trouvé que l'augmentation de Reynolds d'entrée de 55 à 170, perturbe l'écoulement à l'intérieur du canal ce qui induit à la diminution du dépôt de sel au niveau des membranes. Nos résultats sont en accord avec certains travaux antérieurs.

En second lieux, l'étude s'est portée sur l'effet de la variation du diamètre du cylindre, qui a été varié de 1 jusqu'à 1.5 mm. Nous avons déduit que ce dernier influe énormément sur les vitesses locales de l'écoulement du fluide. Par conséquent, la polarisation de concentration est nettement perturbée par l'augmentation des dimensions de l'obstacle.

Et enfin, nous avons traité l'effet de la variation de la forme de l'obstacle immergé à l'intérieur du canal membranaire. En effet, Les formes suivantes ont été testées : cylindre carrée, triangle et losange. L'étude a montré que chaque forme impact différemment la couche limite de polarisation de concentration au niveau des membranes.

En perspective du présent travail, une étude sur les diverses configurations de l'obstacle à différentes formes pourrait contribuer à l'optimisation du module membranaire enroulé en spiralé.

## **Références bibliographiques**

# Références bibliographiques

- [1] Le dessalement de l'eau de mer [en ligne]. Disponible sur :  
«<https://dessalementdeleaudemerblog.wordpress.com/2017/02/04/introduction/>».  
(Consulté en décembre 2019).
- [2] Publié par Mousteau, article : le dessalement de l'eau de mer [en ligne]. Disponible sur :  
« <https://dessalement.wordpress.com> ». (Consulté en décembre 2019).
- [3] Degremont - Water Treatment solutions [en ligne]. Disponible sur :  
« <http://www.degremont.com/en/homepage/>. » (Consulté en septembre 2019).
- [4] Dr Mehdi METAICHE « TECHNOLOGIE MEMBRANAIRE » 'Conférence'. Université de Bouira Juin 2014. « <https://puredistinction.ca/eau-de-consommation/ultra-filtration/> ».
- [5] Orelis environnement "Fournisseur d'équipements industriels à Salindres, France" [en ligne]. (Consulté en septembre 2019).
- [6] 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).
- [7] M.Amokrane « thèse Doctorat », Université de Béjaïa, 2015.
- [8] Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, "Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau," 2002.
- [9] Travaux pratiques de génies chimique 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)
- [10] F. Z. BENAÏSSA, "Etude sur le procédé d'osmose inverse pour le dessalement des eaux faiblement saumâtres". Mémoire de fin d'étude, 2013.
- [11] A. Etti, "Vieillesse chimique de membranes d'osmose inverse," thèse doctorat à l'université de Toulouse 3. Juillet 2011.

- [12] 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
- [13] Source : Guide de conception des installations de production d'eau potable [en ligne]. Disponible sur le site Internet d'environnement Québec « <http://www.menv.gouv.qc.ca>, » (consulté en octobre 2019).
- [14] Source : Guide de conception des installations de production d'eau potable présente, Système de filtration membranaire [en ligne]. Disponible sur le site Internet d'environnement Québec « <http://www.menv.gouv.qc.ca>, » (consulté en octobre 2019).
- [15] Source : Guide de conception des installations de production d'eau potable 'Système à membrane émergé' [en ligne]. Disponible sur le site Internet d'environnement Québec « <http://www.menv.gouv.qc.ca>, » (consulté en octobre 2019).
- [16] V. Geraldes, V. Semião, M.M. Pinho, Flow and mass transfer modelling of nanofiltration, *J. Membr. Sci.* 191 (2001) 109–128.
- [17] M. Gimmelshtein, R. Semiat, Investigation of flow next to membrane walls, *J. Membr. Sci.* 264 (2005) 137–150.
- [18] M.M. Pinho, M. Gimmelshtein, R. Semiat, Experimental study of the flow between two membranes, *Desalination* 199 (2006) 108–110.
- [19] J. Schwinge, D.E. Wiley, D.F. Fletcher, A CFD study of unsteady flow in narrow spacer-filled channels for spiral-wound membrane modules, *Desalination* 146 (2002) 195-20.
- [20] J. Schwinge, D. E. Wiley, D. F. Fletcher, Simulation of Unsteady Flow and Vortex Shedding for Narrow Spacer-Filled Channels, *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (2003) 4962-4977
- [21] J. Schwinge, D. E. Wiley, D. F. Fletcher, Simulation of the Flow around Spacer Filaments between Channel Walls. 2. Mass-Transfer Enhancement, *Ind. Eng. Chem. Res.* 41 (2002) 4879-4888.
- [22] D. E. Wiley, D. F. Fletcher, Techniques for computational fluid dynamics modeling of flow in membrane channels, *J. Membr. Sci.* 211 (2003) 127–137.

- [23] D.F. Fletcher, D.E. Wiley, A computational fluids dynamics study of buoyancy effects in reverse osmosis, *J. Membr. Sci.* 245 (2004) 175–181.
- [24] A. L. Ahmad, K.K. Lau, M.Z. Abu Bakar, S.R. Abd. Shukor, Integrated CFD simulation of concentration polarization in narrow membrane channel, *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 2087-2095.
- [25] 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.
- [26] M. N. Pinho, V. Semiao, V. Geraldes, Integrated modeling of transport processes in fluid/nanofiltration membrane systems, *J. Membr. Sci.* 206 (2002) 189–200.
- [27] M. Amokrane, D. Sadaoui, C. P. Koutsou, A. J. Karabelas, and M. Dudeck, “A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination,” *J. Memb. Sci.*, vol. 477, pp. 139–150, 2015.
- [28] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, “Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: effect of spacer geometrical characteristics,” *J. Memb. Sci.*, vol. 291, no. 1–2, pp. 53–69, 2007.
- [29] R. Salcedo-Diaz, P. Garcia-Algado, M. Garcia-Rodriguez, J. Fernández-Sempere, and F. Ruiz-Beviá, “Visualization and modeling of the polarization layer in crossflow reverse osmosis in a slit-type channel,” *J. Memb. Sci.*, vol. 456, pp. 21–30, 2014.
- [30] Z. Cao, D. E. Wiley, and A. G. Fane, “CFD simulations of net-type turbulence promoters in a narrow channel,” *J. Memb. Sci.*, vol. 185, no. 2, pp. 157–176, 2001.
- [31] A. L. Ahmad and K. K. Lau, “Impact of different spacer filaments geometries on 2D unsteady hydrodynamics and concentration polarization in spiral wound membrane channel,” *J. Memb. Sci.*, vol. 286, no. 1–2, pp. 77–92, 2006.
- [32] Membrane : définition de MEMBRANE, subst. fém. article image d’illustration des membranes [en ligne]. (Consulté en décembre 2019), Disponible sur :  
 « <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition-membrane/> »

- [33] S. Bensdira, A. Abdellah el-hadj et D. Semmar, « Etude dynamique de l'écoulement autour d'un cylindre placé proche d'une paroi », conférence. 30-31 octobre 2016.
- [34] Ace Water Treatment Co., LTD THE PRINCIPLE OF DESALINATION [en ligne].  
« <http://www.acewater.co.jp/en/> ». (Consulté en décembre 2019)
- [35] Ionics freshwater LTD 'entreprise' [en ligne]. Disponible sur le lien de l'entreprise  
« <http://www.ionicsfreshwater.com/> ». (Consulté en décembre 2019)
- [36] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, A. J. Karabelas, Numerical simulation of the flow in a plane-channel containing a periodic array of cylindrical turbulence promoters, *J. Membr. Sci.* 231 (2004) 81–90.