

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ENERGÉTIQUE

PAR :

SEDDAR SARA

BAZIZI SABRINA

Thème

Etude hydrodynamique et transfert de chaleur et de masse dans un module membranaire

Soutenu le 21 Juin 2017 devant le jury composé de:

Mr. ALIAGHA

Président

Mr. BENSLIMANE

Rapporteur

Mr. SAHI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

Remerciements

*Tout travail réussi dans la vie nécessite en premier lieu la bénédiction de Dieu, et ensuite l'aide et le support de plusieurs personnes. Nous tenons donc à remercier vivement notre encadreur, **Mr. BENSLIMANE Abd El Hakim**, pour avoir proposé et dirigé ce travail. Ses encouragements et sa disponibilité nous ont été d'une grande utilité.*

*Nous sommes très sensibles à l'honneur que me fait Monsieur **ALI AGHA** d'avoir accepté de présider ce jury. Que Monsieur **SAHI** trouvent ici l'expression de mes remerciements pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

Enfin, nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont contribué, soit par un soutien scientifique, technique ou moral au parachèvement de cette étude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de
l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure
bonne santé et longue vie, et bien sûr A mes frères*

A toute ma famille, et mes amis,

A mon binôme Sabrina.

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
projet soit possible, je vous dis merci.*

SEDDAR Sara

Dédicaces

A mes chères parents

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines
m'ont permis de vivre ce jour.*

A mes Frères et sœurs

A toute ma famille, et mes amis,

A mon binôme Sara.

A tous ceux qui me sont chers.

BAZIZI Sabrina

Sommaire

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	i
NOMENCLATURE.....	ii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Généralités et revue bibliographique.	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Membranes et procédés de filtration membranaire	2
I.2.1 Définition de la membrane.....	2
I.2.2 Classification des membranes : Matériaux membranaires.....	2
I.2.3 Tailles de pores	4
I.2.4 Configuration des modules et mise en forme des membranes.....	4
I.2.5 Modes de filtration	7
I.2.5.1 Filtration frontale	7
I.2.5.2 Filtration tangentielle	7
I.2.6 Différents procédés de filtration membranaire	8
I.2.7 Caractéristiques des membranes	11
I.3 Synthèse bibliographique.....	12
I.4 Conclusion	19
CHAPITRE II : Positionnement du problème.	
II.1 Introduction	20
II.2 Le Modèle physique	20
II.2.1 Equations de Navier-Stokes en coordonnées cylindriques	20

II.3 Géométrie du problème étudié.....	23
II.4 Conclusion	23
CHAPITRE III : Résultats et discussion.	
III.1 Introduction	24
III.2 Conditions initiales.....	24
III.3 Conditions aux limites.....	24
III.4 La convergence.....	24
III.5 La géométrie étudiée	25
III.6 Choix du maillage	26
III.7 Validation du travail.....	28
III.8 L'hydrodynamique	29
III.8.1 La vitesse.....	29
III.8.2 La pression	33
III.9 Transfert de chaleur.....	34
III.9.1 La température.....	35
III.9.2 Le flux de chaleur.....	36
III.10 La concentration de CaCO ₃ (transfert de masse).....	39
III.11 Conclusion.....	40
CONCLUSION GENERALE	41
BIBLIOGRAPHIE	42

Liste des figures et tableaux

Figure I-1 : Schéma d'une membrane organique plane et asymétrique	3
Figure I-2 : Schéma du module plan Ray-Flow X 100 (Orelis	5
Figure I-3 : Schéma du module spiral	6
Figure I-4 : Schéma du module tubulaire	6
Figure I-5 : Schéma du module fibres creuses	7
Figure I-6 : Comparaison entre la filtration classique (ou frontale) et la filtration tangentielle	8
Figure I-7 : Schéma des procédés de filtration membranaire (l'osmose inverse et la nanofiltration	9
Figure I-8 : Schéma des procédés de filtration membranaire (l'ultrafiltration et la microfiltration.....	10
Figure I-9 : Champ de vitesse selon la composante x	13
Figure I-10 : Distribution des vecteurs vitesse pour la configuration cavité à $Re = 188$	13
Figure I-11 : La géométrie de la membrane	14
Figure I-12 : Contours de grandeur de vitesse superposés par les vecteurs de vitesse (longueur fixe) au plan vertical ($y = 0$ mm)	15
Figure I-13 : Viscosité turbulente dans pour un débit d'entré $m = 0,125$ kg / s.....	16
Figure I-14 : Domaine de calcul et conditions de bord utilisées pour calculer le champ d'écoulement.....	17
Figure I-15 : L'évolution de la vitesse selon l'axe z à mi-hauteur de la hauteur du canal. Le flux est de haut en bas.....	17
Figure I-16 : Les caractéristiques géométriques des espaceurs.....	18

Figure I-17 : Contours de vitesse d'un seul espaceur pour un nombre de Reynolds égal à 200 : (a) cavité (b) immergé.....	18
Figure II-1 : Représentation de la géométrie.....	23
Figure III-1 : Evolution des résidus au cours des itérations.....	25
Figure III-2 : La géométrie étudiée.....	26
Figure III-3 : Les dimensions de l'ellipse.....	26
Figure III-4 : Influence de la densité du maillage sur les profils de vitesse.....	28
Figure III-5 : Maillage de la géométrie étudiée.....	28
Figure III-6 : Contour de vitesse de la simulation numérique.....	29
Figure III-7 : Contour de vitesse (Kevin J. Farrell).....	29
Figure III-8 : Contours de vitesse (A) et streamlines (B): (a) $Re = 200$; (b) $Re = 300$; (c) $Re = 400$; (d) $Re = 500$	30
Figure III-9 : Profil de vitesse à $x = 2,54$ mm (A-A') pour différents nombres de Reynolds.....	31
Figure III-10 : L'évolution des vecteurs vitesse à $x = 3,67$ mm (B-B') pour $Re = 500$	32
Figure III-11 : Profil de vitesse à $x = 3,67$ mm (B-B') pour différents nombres de Reynolds.....	32
Figure III-12 : Contours de pression : (a) $Re = 200$; (b) $Re = 300$;(c) $Re = 400$;(d) $Re = 500$	33
Figure III-13 : Profil de pression pour différents nombres de Reynolds à $x = 3,67$ mm (B-B').....	34
Figure III-14 : Contours de température : (a) $Re = 200$;(b) $Re = 300$;(c) $Re = 400$;(d) $Re = 500$	35
Figure III-15 : L'évolution de la température à $x = 4,97$ mm (C-C').....	36
Figure III-16 : Contour du flux de chaleur : (a) $Re = 200$; (b) $Re = 300$	37

Figure III-17 : Contour du flux de chaleur : (c) $Re = 400$; (d) $Re = 500$38

Figure III-18 : Contours de concentration: (a) $Re = 200$;(b) $Re = 300$;(c) $Re = 400$;(d) $Re = 500$39

Figure III-19 : L'évolution de la concentration à $x = 4,97$ mm (C-C').....40

Tableau III-1 : Résultats de l'effet du maillage.....27

Nomenclature

c : Concentration, masse de soluté par unité de masse de solution

C_m : Concentration à la paroi de la membrane (g/L) (g/kg)

C_p : Concentration du perméat (g/L) (g/kg)

C_p : Chaleur spécifique ($J.kg^{-1}K^{-1}$)

C_{ret} : Concentration du rétentat (g/L) (g/kg)

d : Diamètre des espaceurs (m)

D : Diffusivité de masse (m^2/s)

J_w : Flux à l'eau ($L.h^{-1}.m^{-2}$)

k : Conductivité thermique ($W.m^{-1}K^{-1}$)

L : La longueur du canal (m)

L_p^w : Perméabilité à l'eau de la membrane ($L.h^{-1}.m^{-2}.Pa^{-1}$)

m : fraction massique (sans unité)

P : Pression (Pa)

P_d : La pression de la phase dispersée (Pa)

$P_{c,in}$: La pression à l'entrée du module (Pa)

$P_{c,out}$: La pression à la sortie du module (Pa)

q : Flux de chaleur (W/m^2)

R_m : Résistance hydraulique de la membrane (m^{-1})

Re : Nombre de Reynolds

Ret_{obs} : Rétention observée (%)

Ret_{int} : Rétention intrinsèque (%)

S : Terme source ($W.m^{-3}$)

T_{top} : Température (K)

u : La vitesse selon x ($m.s^{-1}$)

v : La vitesse selon y ($m.s^{-1}$)

w : La vitesse selon z ($m.s^{-1}$)

Symboles grecs

ρ : Masse volumique ($kg.m^{-3}$)

ΔP : Pression appliquée transmembranaire (Pa)

μ : Viscosité dynamique (Pa.s)

Liste des abréviations

CFD : Computational Fluid Dynamics.

CFX : Logiciel de simulation numérique d'écoulement en mécanique des fluides et transfert thermique.

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Les procédés membranaires font partie des nouvelles technologies qui peuvent jouer un rôle environnemental important. Ces procédés permettent la production d'eau destinée soit à la consommation humaine (dessalement de l'eau) soit aux industries (réutilisation de l'eau) qui consomment de l'eau de pureté contrôlée dans leur chaîne de production (industries agroalimentaires, industrie pharmaceutique, etc.). L'utilisation des techniques membranaires connaît une croissance rapide, en raison notamment de la multiplication des domaines d'application. Ce développement devrait s'amplifier encore, du fait de l'émergence des problématiques liées à la préservation de la ressource (production durable), de l'environnement (dépollution des effluents industriels) et grâce aux performances énergétiques et technico économiques de ces nouveaux procédés de séparation.

Le but de notre travail est de modéliser et faire par la suite une simulation numérique de l'écoulement d'un fluide Newtonien avec transfert de chaleur et de masse dans une membrane. Ceci nous permet de connaître le phénomène ayant lieu à l'intérieur de la membrane, ainsi nous pouvons mieux prévoir son comportement dans différentes conditions et cela pour un coût global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes.

Dans la première partie de notre mémoire qui est présentée en deux chapitres on introduit le problème qu'on voudra résoudre qui consiste à étudier l'hydrodynamique et le transfert de chaleur et de masse dans un module membranaire. Le premier chapitre est consacré pour les généralités sur les membranes par contre le deuxième chapitre se focalise sur la description du problème (géométrie et équations de résolution « Equations de Navier-Stokes : équation de continuité, équation de quantité de mouvement » et l'équation d'énergie).

La deuxième partie inclut les résultats des simulations car on a effectué ces dernières à l'aide d'un code de calcul (la méthode des volumes finis qui est utilisée) sur un canal en deux dimensions de hauteur h et de longueur L , il contient à l'intérieur deux espaceurs de forme elliptique de diamètre d . Pour l'étude de l'hydrodynamique chaque fois on change la vitesse débitante en l'augmentant et on extrait les contours de vitesse et de pression ainsi que leurs profils dans des lignes bien déterminées pour la vitesse à x égal à 2,54 mm et 3,67 mm mais le profil de pression on la tracé que pour la deuxième valeur de x , la température et la concentration de CaCO_3 à $x = 4,97$ mm.

Chapitre I

Généralités et synthèse bibliographique

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présenteront des généralités sur les membranes, tels que les procédés de filtrations membranaires, les matériaux membranaires, ...etc.

A la fin nous passerons en revue quelques exemples d'étude dans le domaine des membranes.

I.2 Membranes et procédés de filtration membranaire :

I.2.1 Définition de la membrane :

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 Classification des membranes : Matériaux membranaires

Les membranes sont des matériaux poreux ou denses composés de matières minérales ou organiques ou hybrides, homogènes ou plus généralement composites. Il existe différents types de membranes :

a) Membranes organiques et minérales :

Les membranes organiques sont préparées à partir de polymères. Les dérivés cellulosiques restent très utilisés ainsi que les polyamides (en osmose inverse et en nanofiltration) [1]. D'autres polymères résistant mieux à l'oxydation, au pH ou à la température sont de plus en plus utilisés : polyacrylonitrile (PAN), polysulfone (PS), polyethersulfone (PES), polycarbonate (PC) . . .

Les membranes minérales ont une excellente résistance chimique, mécanique et thermique. Elles sont de type composite (zircone ZrO_2 sur support carbone macroporeux ou sur alumine Al_2O_3 , ou oxyde de titane TiO_2 sur alumine), ou totalement en carbone ou en alumine.

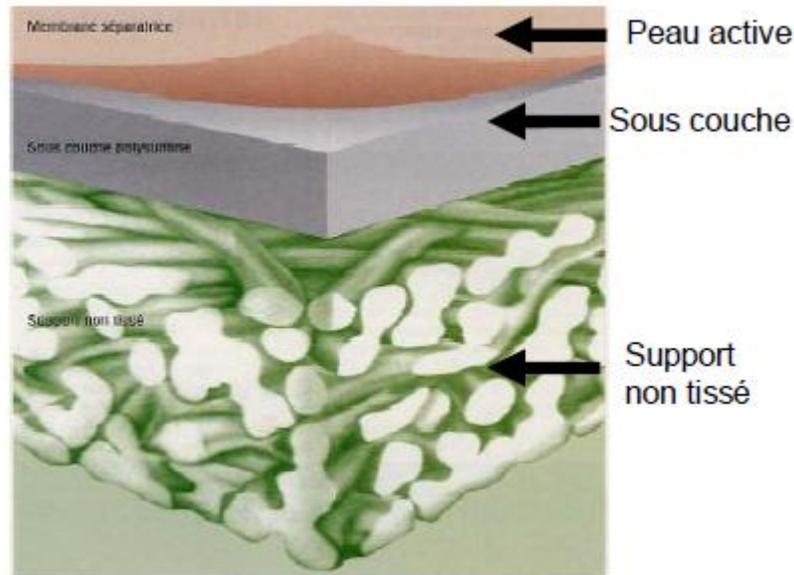


Figure I-1 : Schéma d'une membrane organique plane et asymétrique.

b) Membranes asymétriques ou anisotropes :

Ce sont des membranes préparées en une seule étape à partir du même matériau, généralement par séparation de phase à partir d'une solution homogène de polymère [2]. La couche permselective est une très fine pellicule (de l'ordre de $0,1 \mu\text{m}$ d'épaisseur) appelée " peau " qui repose sur un support beaucoup plus épais et poreux dont le rôle est d'assurer à l'ensemble une bonne tenue mécanique. La tenue mécanique peut encore être améliorée par l'incorporation d'un support textile. La peau peut être dense ou poreuse selon l'application envisagée. Comme la résistance au transfert de matière est proportionnelle à l'épaisseur de la couche permselective, ce type de membrane présente un intérêt évident dans tous les procédés de filtration ou de perméation (flux élevé).

c) Membranes composites :

Ce sont également des membranes à structures asymétriques qui se distinguent des précédentes par le fait qu'elles sont obtenues en déposant la peau sélective sur un support préexistant, lui-même le plus souvent asymétrique [3].

La peau sélective est formée soit par enduction et évaporation d'un collodion¹, soit par un mélange de polymères. Les deux matériaux associés ne sont en général pas de même nature chimique.

I.2.3 Tailles de pores :

a) Membranes macroporeuses :

Les membranes macroporeuses possèdent des pores dont le diamètre est supérieur à 1 μm .

b) Les membranes microporeuses et mésoporeuses :

Les membranes microporeuses et mésoporeuses (ou nanoporeuses) ont des pores avec des dimensions de l'ordre du nanomètre à quelques dizaines de nanomètres.

c) Membranes denses :

C'est les membranes non poreuses. Elles sont souvent utilisées en osmose inverse.

I.2.4 Configuration des modules et mise en forme des membranes :

Afin d'être utilisées à l'échelle industrielle ou au laboratoire, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Différentes géométries de modules ont été commercialisées: modules plans, spiralés, tubulaires, fibres creuses, (Figures I-2, I-3, I-4, I-5 respectivement). Leur utilisation est fonction de leur application, de leur facilité de montage et de nettoyage, de la maintenance.

a) Module plan :

Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres et sont séparées par des grilles ou support. Le module plan est un assemblage de type filtre-presse.

¹ **Le collodion** est une solution de nitrocellulose dans un mélange d'éther et d'alcool, qui se présente comme un vernis séchant rapidement et laissant derrière lui une feuille transparente assez semblable en texture à de la cellophane.

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 tangential 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.

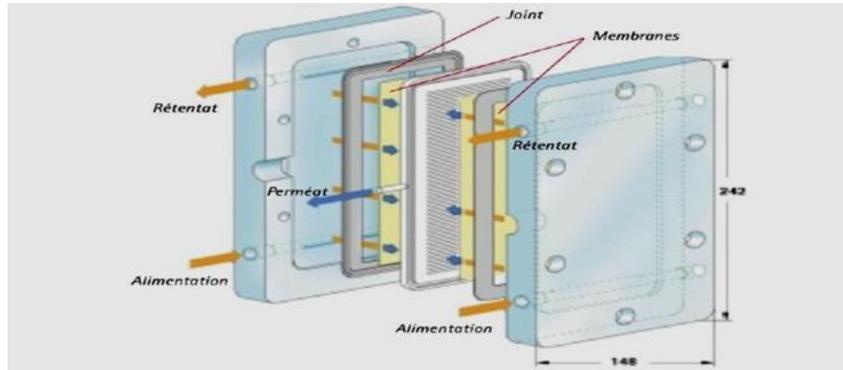


Figure I-2 : Schéma du module plan Ray-Flow X 100 (Orelis).

b) Module spiral :

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 rétentat. Le module spiral est composé de membranes planes collées dos à dos renfermant un espaceur perméat assurant l'écoulement du perméat dans le tube collecteur qui constitue l'axe central de la membrane. Du côté rétentat, les membranes sont séparées par des espaceurs qui jouent le rôle de promoteur de turbulence et sont enroulées autour du tube collecteur (Figure I-3). Un grillage extérieur maintient l'ensemble enroulé.

Le nombre de membranes collées dos à dos varie suivant les tailles des modules et des fabricants. Un module spiral est beaucoup plus compact qu'un module plan.

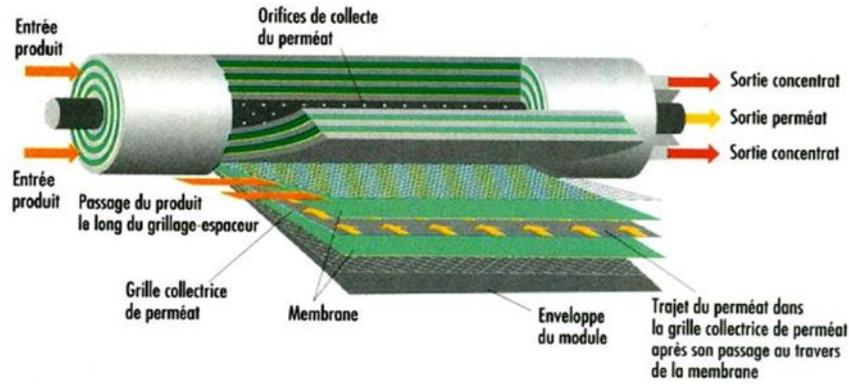


Figure I-3 : Schéma du module spiral.

c) Module tubulaire :

Ils 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 fait d'assemblage de tubes parallèles dans une même matrice représente la forme optimisée actuelle (Figure I-4).

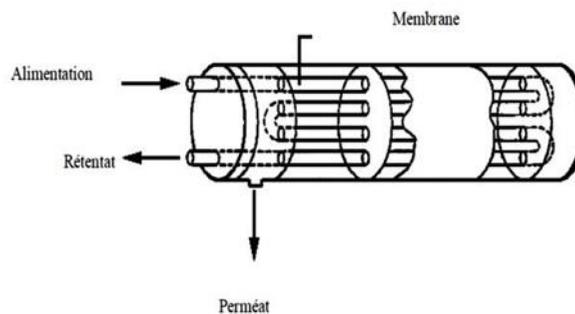


Figure I-4 : Schéma du module tubulaire.

d) Module fibres creuses :

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne-externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse.

Les membranes sont composées de différentes couches : un support et une sous-couche poreuse qui assurent la résistance mécanique de la membrane, et à la surface une peau active qui détermine les propriétés de la membrane (flux, sélectivité). La composition de la sous-couche et la composition de la peau active peuvent être différentes (Figure I-5).

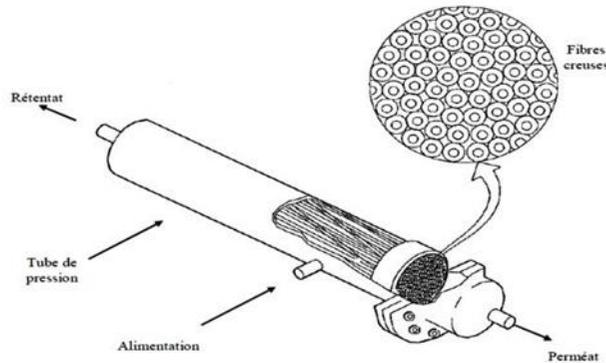


Figure I-5 : Schéma du module fibres creuses.

I.2.5 Modes de filtration :

Les membranes sont principalement utilisées en mode frontal ou tangential (figure I-6).

I.2.5.1 Filtration frontale :

Lors de la filtration frontale, le fluide à traiter circule perpendiculairement à la surface de la membrane [4]. Ce mode d'utilisation a pour inconvénient l'apparition d'une couche de dépôt à la surface de la membrane, appelée gâteau de filtration. Cette couche diminue la perméabilité rendant obligatoire un cycle de nettoyage. Lors du nettoyage de la membrane, les impuretés sont éliminées chimiquement ou physiquement, mettant temporairement le système hors service.

I.2.5.2 Filtration tangentielle :

Lorsqu'on effectue une filtration tangentielle, le fluide d'alimentation circule parallèlement à la surface de la membrane [5]. La vitesse du fluide d'alimentation est relativement élevée (typiquement entre $0,1$ et $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et permet de réduire la formation du gâteau de filtration. Les forces d'écoulement permettent d'emporter les solides en suspension dans le rétentat.

L'écoulement tangential permet de ralentir la diminution du débit de filtration.

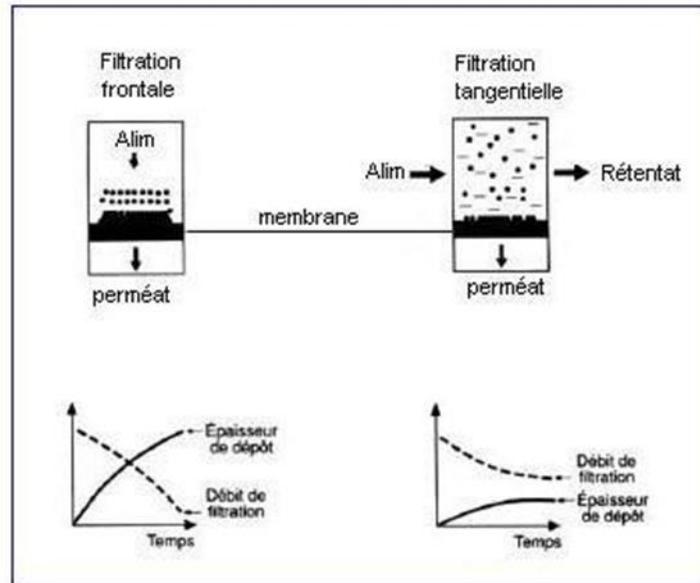


Figure I-6 : Comparaison entre la filtration classique (ou frontale) et la filtration tangentielle.

I.2.6 Différents procédés de filtration membranaire :

Dans cette présentation, nous décrivons succinctement les procédés classiques de filtration membranaire : osmose inverse (OI), nanofiltration (NF), ultrafiltration (UF) et microfiltration (MF). Ces procédés sont classés en fonction de la taille des espèces à séparer [6].

a) L'osmose inverse :

Les membranes utilisées sont "denses", sans microporosité apparente. Leur sélectivité résulte d'un mécanisme de solubilisation-diffusion. Elles laissent passer le solvant (l'eau le plus souvent) et arrêtent la quasi-totalité des sels. Les pressions appliquées en osmose inverse sont comprises le plus souvent entre 20 et 80 bars. Les applications industrielles concernent principalement le traitement des eaux et la concentration de solutions :

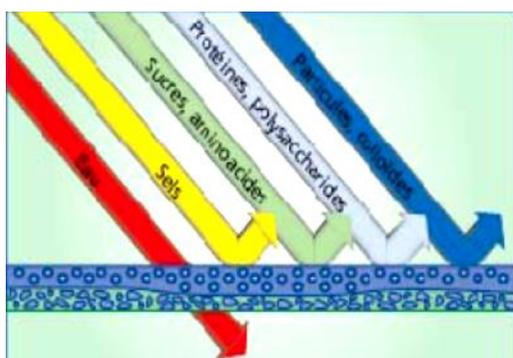
- dessalement des eaux saumâtres (salinité de 1 à 10 g.L⁻¹) et de l'eau de mer pour produire de l'eau potable,
- préparation d'eau " ultra-pure " pour l'électronique et les industries pharmaceutiques,
- concentration de jus de fruits, antibiotiques, acides aminés,

- traitement des lixiviats² de décharge d'ordures ménagères,
- réutilisation d'eaux usées.

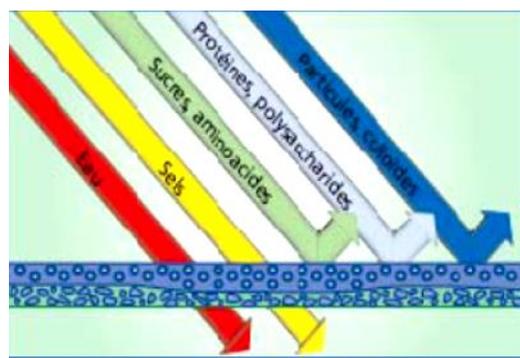
b) La nanofiltration :

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composés dont la taille en solution est de l'ordre du nanomètre. La pression se situe entre 4 et 20 bars. Les principales applications de la nanofiltration concernent :

- le traitement des eaux : adoucissement d'eaux souterraines ou de surface,
- l'industrie laitière et alimentaire : déminéralisation des lactosérums, séparation d'acides aminés et de peptides,
- le traitement d'effluents : industrie du papier, du bois, de la teinture.



a) L'osmose inverse



b) la nanofiltration

Figure I-7 : Schéma des procédés de filtration membranaire (l'osmose inverse et la nanofiltration).

c) L'ultrafiltration :

² **Le lixiviat** (ou percolat) est le liquide résiduel qui provient de la percolation de l'eau à travers un matériau. Ce terme désigne notamment tous les « jus » issus de décharges, de déchets, de composts, etc.

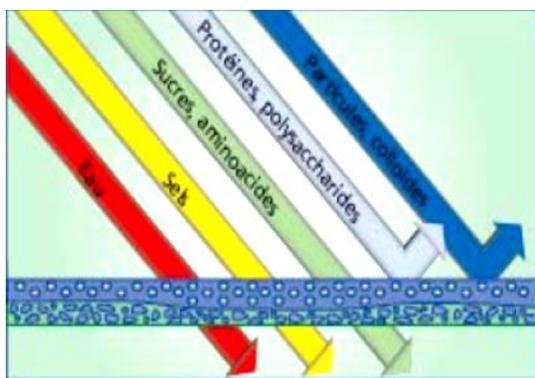
L'ultrafiltration permet de concentrer des solutions macromoléculaires ou des émulsions en ne laissant passer à travers la membrane que le solvant et les solutés de faible masse molaire. La pression appliquée en amont de la membrane est comprise entre 0,5 et 9 bars. Les principales applications industrielles de l'ultrafiltration sont :

- la clarification-désinfection des eaux potables,
- la concentration des protéines de lactosérum et de lait,
- la séparation d'émulsions eau-huile,
- le traitement de bain de peinture associé à l'électrophorèse . . .

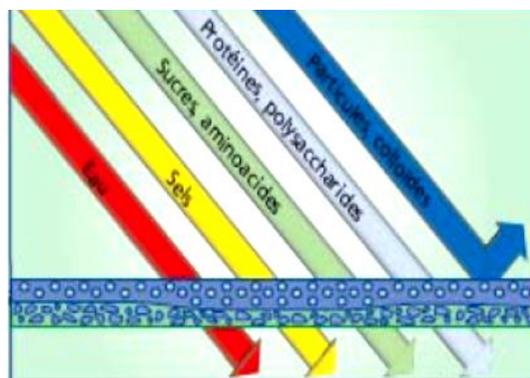
d) La microfiltration :

Cette technique se distingue de l'ultrafiltration par la nature des espèces à retenir : on traite en effet des suspensions et non des solutions.

La taille des particules retenues se situe généralement entre 0,2 et 10 μm . Les pressions appliquées sont comprises entre 0,1 et 5 bars. Les applications principales concernent la clarification des eaux, des liquides alimentaires et biologiques.



c) L'ultrafiltration



d) La microfiltration

Figure I-8 : Schéma des procédés de filtration membranaire (l'ultrafiltration et la microfiltration).

I.2.7 Caractéristiques des membranes :

Les membranes utilisées dans les procédés de séparation membranaire sont caractérisées par le diamètre des particules ou la masse molaire d'une molécule qui est retenue par la membrane.

- La perméabilité (L_p^w) à l'eau d'une membrane est une caractéristique intrinsèque de la membrane qui dépend de sa structure.

$$J_w = L_p^w * \Delta P \quad (I.1)$$

$$\text{Avec : } \Delta P = P_d - \frac{(P_{c,in} - P_{c,out})}{2} \quad (I.2)$$

- La résistance hydraulique (R_m) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est reliée à sa perméabilité :

$$R_m = \frac{1}{\mu L_p^w} \quad (I.3)$$

μ : La viscosité du perméat.

- Le taux de rétention (ou sélectivité) qui se divise en deux :

La rétention observée : qui est calculée à partir des concentrations du rétentat (C_{ret}).

$$Ret_{obs} = 1 - \frac{C_p}{C_{ret}} \quad (I.4)$$

La rétention intrinsèque : qui est calculée avec la concentration à la paroi de la membrane (C_m).

$$Ret_{int} = 1 - \frac{C_p}{C_m} \quad (I.5)$$

C_p : Concentration du constituant dans le perméat.

I.3 Synthèse bibliographique :

- ❖ Ahmad *et al.* [7] ont utilisé une condition modifiée pour modéliser la condition de convection-diffusion au niveau d'une membrane imperméable pour prévoir les profils de concentration au niveau de la membrane et étudier la couche limite de polarisation de concentration. Les résultats obtenus sont très acceptables même avec une vitesse de perméation nulle.

- ❖ Mazaheri *et al.* [8] et Fill *et al.* [9] a comparé les résultats de la modélisation directe de fibres individuelles et l'utilisation du modèle de support poreux dans un petit faisceau de fibres. Il a été montré que le modèle de support poreux pour le faisceau de fibres est une approche acceptable. En supposant des faisceaux de fibres comme des milieux poreux homogènes.

- ❖ M. Li *et al.* [10] ont étudié les caractéristiques d'hydrodynamique et de transfert de masse dans un canal d'alimentation de type spiral industriel en osmose inverse à l'aide de la CFD à trois dimensions entièrement couplées avec une géométrie d'espaceur détaillé. Une vitesse de paroi parallèle importante près de la surface de la membrane est observée, ce qui supprime le développement de la couche limite. Les cellules roulantes sont formées au centre du canal d'alimentation, ce qui favorise le mélange transversal. Le coefficient local de transfert de masse k_m oscille longitudinalement, mais la moyenne de cellules k_m apparaît assez constante dans les cellules adjacentes l'une à l'autre.

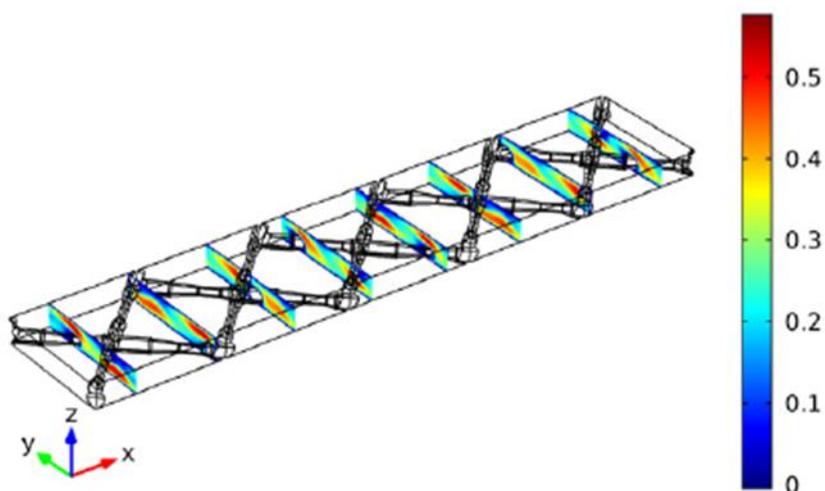


Figure I-9 : Champ de vitesse selon la composante x.

- ❖ F. Li *et al.* [11] ont effectué des simulations CFD pour déterminer les coefficients de transfert de masse et la consommation d'énergie des espaceurs. Les simulations montrent des tourbillons et un comportement d'écoulement instationnaire conduisant à un transfert de masse amélioré dans des canaux remplis d'espacement par rapport aux canaux vides. Les résultats des simulations ont été validés avec des expériences et comparés aux données rapportées dans la littérature, ce qui a donné lieu à un accord satisfaisant.

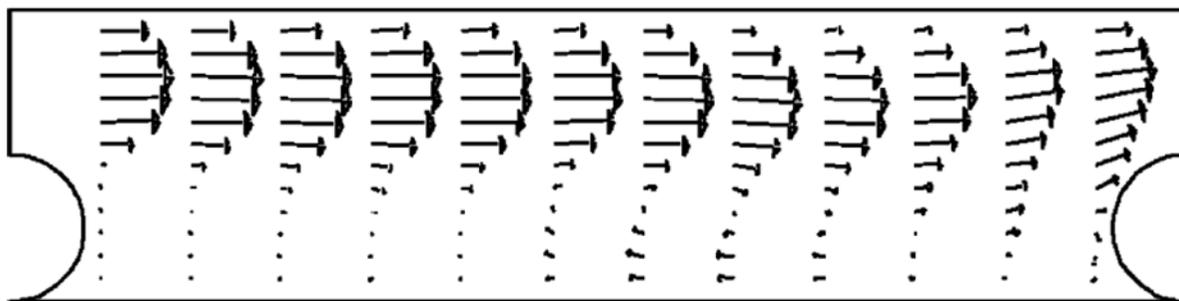


Figure I-10 : Distribution des vecteurs vitesse pour la configuration cavité à $Re = 188$.

- ❖ Chen *et al.* [12] ont effectué des simulations numériques pour étudier et évaluer la performance d'un absorbeur hybride innovant de membranes à fibres creuses. Ils ont indiqué que, pour les mêmes vitesses d'absorption, le volume d'un absorbeur de membrane à fibres creuses n'était que de 31% de celui d'un absorbeur de film tombant d'échangeur de plaques, alors que la surface interfaciale de transfert de masse était de 4,3 fois celle d'un échangeur de chaleur à plaques tombant Absorbeur de film.

- ❖ Wiley et Fletcher [13] ont simulé numériquement l'écoulement des deux côtés de la membrane en utilisant le code CFX, en considérant une vitesse de perméation selon la formule de Brian [14]. La viscosité et la diffusivité varient selon la concentration. Le modèle a été validé en comparant les résultats obtenus avec ceux des travaux antérieurs.

- ❖ La filtration membranaire a été fermement établie comme une technologie primaire pour assurer la pureté, la sécurité et / ou l'efficacité du traitement de l'eau ou des effluents. Dans cet article, R. Ghidossi *et al.* [15] ont examiné les améliorations réalisées concernant les membranes utilisées pour les processus de microfiltration, d'ultrafiltration, de nanofiltration et l'osmose inverse au cours des dernières décennies.

Ils ont examiné les différentes façons dont les méthodes CFD sont utilisées pour améliorer les performances de la membrane.

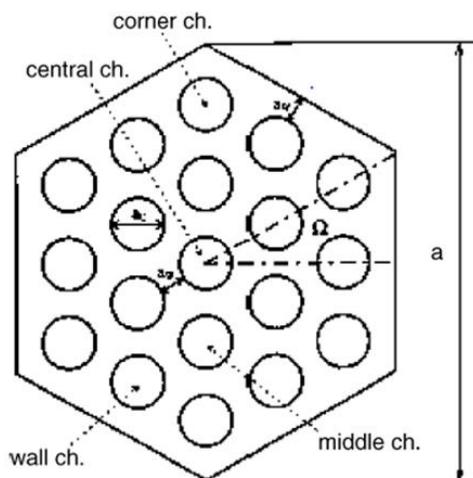


Figure I-11 : La géométrie de la membrane.

- ❖ L'étude numérique du transfert hydrodynamique et de masse dans une géométrie axisymétrique avec parois poreuses (microfiltration) a été réalisée par Damak *et al.* [16] en utilisant une discrétisation par différences finies. Le nombre de Reynolds à l'entrée, le nombre de Reynolds de perméation et le nombre de Schmidt ont été variés afin d'étudier les profils de concentration au niveau de la surface de la membrane.

- ❖ Pinho *et al.* [17] ont utilisé les données expérimentales des tests effectués sur un canal muni d'une membrane de nanofiltration comme condition aux limites dans un code de calcul, par suite ils ont comparé les coefficients intrinsèques de rejection obtenus numériquement avec ceux de l'expérience.

- ❖ S. Karode [18] a développé une solution analytique pour la chute de pression d'un flux laminaire dans des canaux à parois poreuses. Il supposait un flux constant traversant les parois qu'il utilisait comme condition aux limites pour calculer la chute de pression.

De plus, Karode a développé la solution en négligeant le gradient de pression radial. Le gradient de pression radial est un facteur clé influençant la perméation de masse à travers les parois.

- ❖ A. Saeed *et al.* [19] ont étudié la contrainte de cisaillement. Les résultats ont clairement indiqué que les valeurs moyennes de ces contraintes pour la surface supérieure de la membrane sont toujours plus élevées que ceux de la surface inférieure.

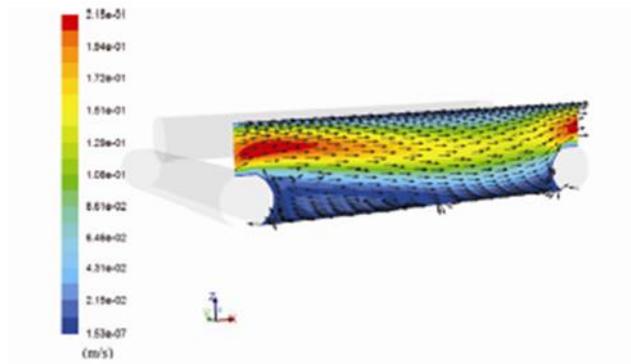


Figure I-12 : Contours de grandeur de vitesse superposés par les vecteurs de vitesse (longueur fixe) au plan vertical ($y = 0$ mm)

- ❖ M. Shakaib *et al.* [20] ont effectué des simulations numériques (CFD) qui montrent par la suite que la température, la viscosité turbulente et le coefficient de transfert de chaleur dépendent de l'espacement entre les espaceurs et le nombre de Reynolds.

Ils ont remarqué que la turbulence est plus élevée dans la région entre les espaceurs. L'espaceur avec un espacement de 6 mm se révèle être de caractéristiques supérieures.

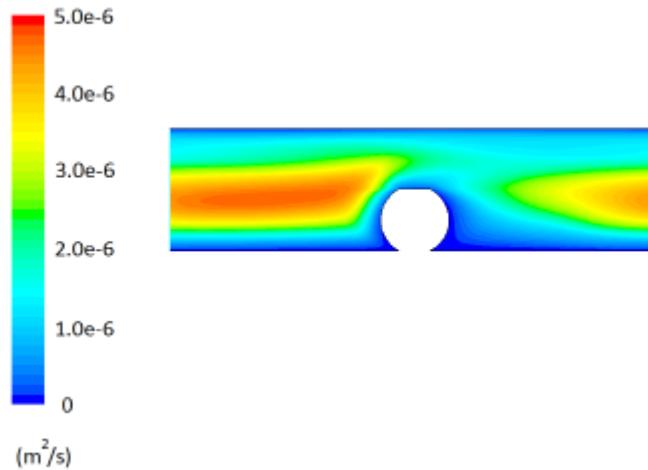


Figure I-13 : Viscosité turbulente dans pour un débit d'entré $m = 0,125 \text{ kg / s}$.

- ❖ A.I. Radu *et al.* [21] Ils ont étudié expérimentalement et avec un modèle numérique le dépôt de microsphères imitant des cellules bactériennes dans les canaux membranaires d'entretoise, utilisés dans les systèmes de membrane de nanofiltration enroulée en spirale (NF) et d'osmose inverse (RO). Les observations microscopiques in situ dans les simulateurs d'encrassement membranaire ont révélé la formation de schémas de dépôt de particules spécifiques pour différentes orientations d'espaceurs. Un modèle numérique tridimensionnel combinant le flux de fluide avec une approche lagrangienne pour les calculs de la trajectoire des particules pourrait décrire très bien les observations in situ sur le dépôt de particules dans les cellules d'écoulement. Ils ont constaté que la géométrie des espaceurs, le positionnement et la vitesse d'écoulement croisé ont influencé sensiblement le transport de particules et les schémas de dépôt.

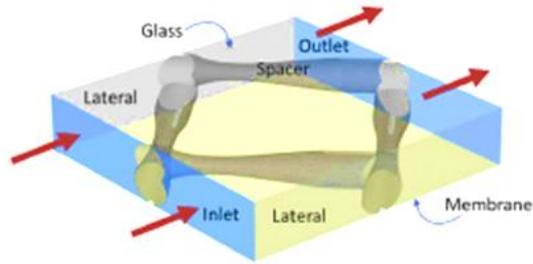


Figure I-14 : Domaine de calcul et conditions de bord utilisées pour calculer le champ d'écoulement. Les flèches rouges indiquent la direction d'écoulement principale. L'entretoise est affichée en gris.

La surface supérieure correspond au verre de la cellule d'écoulement, tandis que la surface inférieure représente la membrane.

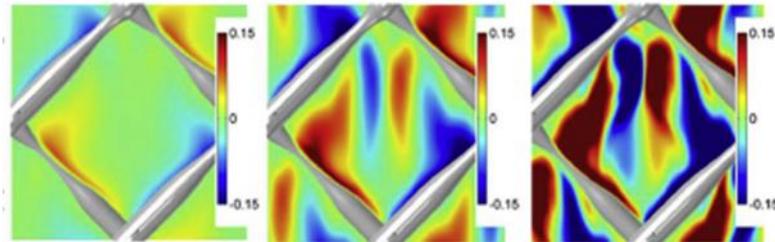


Figure I-15 : L'évolution de la vitesse selon l'axe z à mi-hauteur de la hauteur du canal. Le flux est de haut en bas.

- ❖ Dans cette étude, l'analyse CFD a été validée par Yu-Ling Li *et al.* [22] pour un canal rempli d'espaceurs en comparant les valeurs simulées de chute de pression avec celles obtenues par des expériences. Cette chute dépend des caractéristiques géométriques : l'angle, la taille du maillage, le diamètre du filament, la hauteur et la largeur du canal.

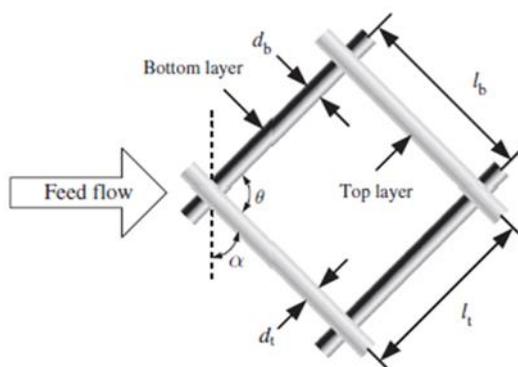


Figure I-16 : Les caractéristiques géométriques des espaceurs.

Sharmina Hussain [23] a consacré le présent travail à l'étude de l'hydrodynamique dans des canaux remplis d'entretoise à deux dimensions. Deux configurations différentes des entretoises cylindriques sont étudiées avec le numéro de Reynolds de canal différent. La taille et la forme différentes de la formation de la région de recirculation, en amont et en aval des entretoises sont étroitement observées. Ces régions de recirculation ont un rôle important dans l'amélioration du transfert de masse dans la région de rattachement.

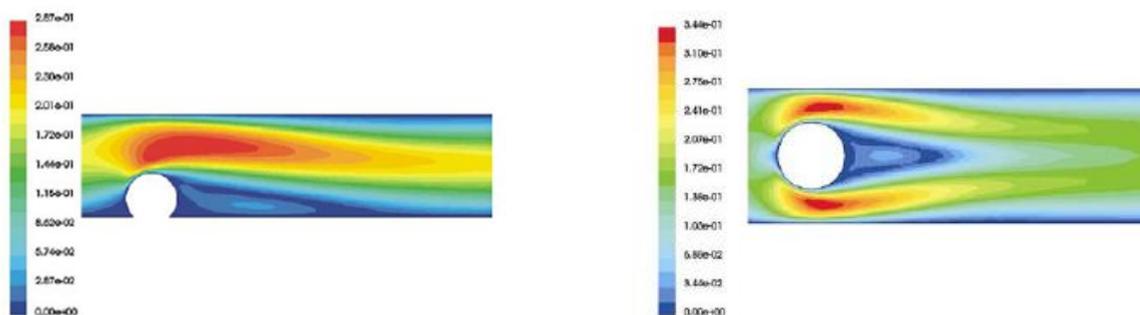


Figure I-17 : Contours de vitesse d'un seul espaceur pour un nombre de Reynolds égal à 200 : (a) cavité (b) immergé.

- ❖ Geraldès *et al.* [24] ont développé un code de calcul qui prédit la polarisation de concentration en osmose inverse et en nanofiltration en fonction des facteurs de rejections. Plusieurs schémas de discrétisation des équations de convection ont été testés et les résultats numériques comparés à ceux de l'expérience.

- ❖ V. Nassehi [25] et R. Ghidossi *et al.* [15] ont calculé les flux couplés Navier-Stokes et Darcy pour un canal tubulaire délimité par des parois poreuses. Cependant, les deux études ne considéraient qu'un processus de filtration à travers les parois sans membrane active comme cela est envisagé pour la séparation gaz-gaz.

- ❖ En utilisant la géométrie d'espaceur d'alimentation d'une cartouche d'osmose inverse enroulée en spirale disponible dans le commerce, Kevin J. Farrell [26] a utilisé la dynamique des fluides informatiques (CFD) pour évaluer le changement de la contrainte de cisaillement de surface et la concentration pourrait être effectuée par l'incorporation d'un élément dynamique dans l'espaceur d'alimentation.

Les résultats de la simulation de plusieurs modèles ont montré qu'un ruban en porte-à-faux avec un mouvement de flottement a entraîné une augmentation de la concentration de sel et de la contrainte de cisaillement de surface de 1 pour cent et de 25 pour cent, respectivement.

Chapitre II

Positionnement du Problème

II.1 Introduction :

Ce chapitre présente le problème physique étudié et sa mise en équation. Les équations présentées concernent le transfert de chaleur et de masse dans un module membranaire d'un fluide visqueux newtonien incompressible en écoulement laminaire et stationnaire.

II.2 Le modèle physique :

Le régime laminaire dans une conduite est caractérisé avec un nombre adimensionnel appelé nombre de Reynolds (Re) :

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu} \quad (\text{II.1})$$

V : Vitesse moyenne de l'écoulement à travers la section considérée (m/s).

d : Diamètre de la conduite (m).

ν : Viscosité cinématique du fluide (m²/s).

Alors le régime est laminaire si $\text{Re}_c < 2000$.

II.2.1 Equations de Navier-Stokes en coordonnées cylindriques :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (\text{II.2})$$

- L'équation de quantité de mouvement :

$$\rho(\nabla(\rho V)) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (\text{II.3})$$

Le fluide est incompressible on aura donc : $\rho = \text{Cst}$

- Pour l'équation de continuité :

$$\nabla V = 0 \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.5})$$

- L'équation de quantité de mouvement :

$$\rho(V\nabla V) = -\nabla P + \mu\nabla^2 V \quad (\text{II.6})$$

Selon x :

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

Selon y :

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

Selon z :

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (\text{II.9})$$

- L'équation d'énergie

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S \quad (\text{II.10})$$

- L'équation de transfert de masse (transport d'espèces) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.11})$$

- L'écoulement étant supposé permanent : $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$.
- L'écoulement est supposé établi : $\left(\frac{\partial u}{\partial x} = 0\right)$.
- L'écoulement est bidimensionnel.
- On néglige les forces de pesanteur.

L'équation de continuité s'écrit comme suit :

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

L'équation de quantité de mouvement peut s'écrire sous la forme suivante :

- Selon x :

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.13})$$

- Selon y :

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (\text{II.14})$$

L'équation d'énergie :

$$\rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + S \quad (\text{II.15})$$

L'équation de transfert de mass :

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.16})$$

II.3 Géométrie du problème étudié :

On suppose que la membrane est un canal de longueur $x = L$, et de hauteur h .

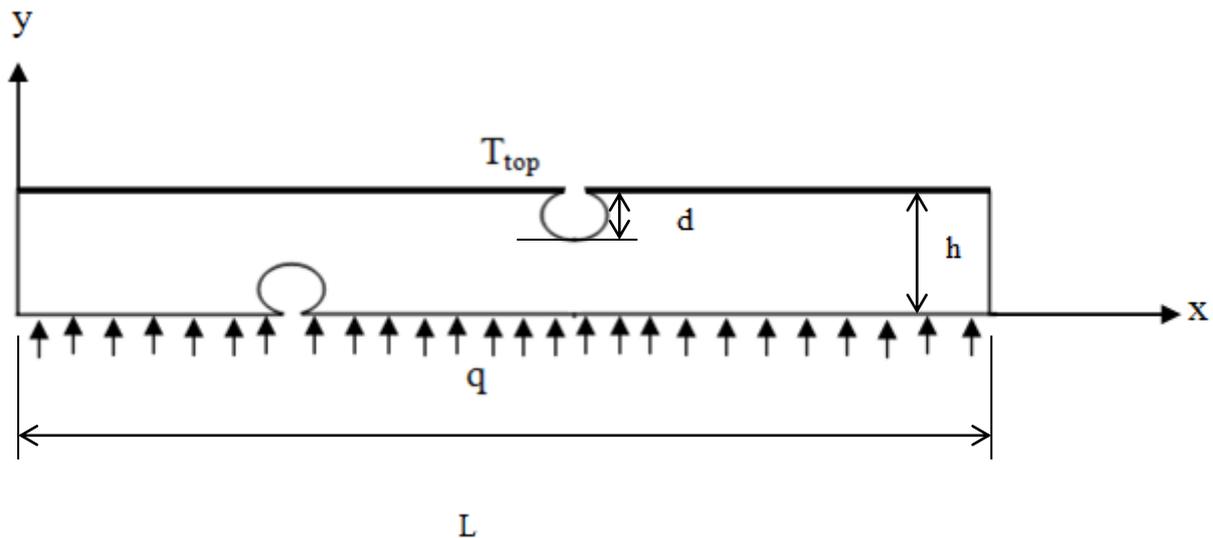


Figure II-1 : Représentation de la géométrie.

• Les conditions aux limites :

- A l'entrée du tube ($x = 0, 0 < y < h$) : $u = U_0$ et $v=0$.
- A la sortie du tube ($x = L, 0 < y < h$) : $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$.
- $y = h$ et $y = 0$: $u = v = 0$.
- $y = h$: $T=T_{top}$ $y = 0$ on impose un flux de chaleur q .

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a décrit et on a formulé le modèle physique, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées pour qu'on puisse faire une modélisation.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Résultats et discussions :

Des simulations ont été effectuées sur une gamme de nombres de Reynolds (200 ; 300 ; 400 ; 500). Le fluide est pris comme de l'eau à une température de 298 K et il est supposé être incompressible et isotherme et avoir des propriétés de fluide constantes (masse volumique = 1000 kg/m³, chaleur spécifique = 4182 j/kg.K, conductivité thermique = 0.6 W/m.s, viscosité dynamique = 0.001003 kg/m.s). Les équations générales de Navier-Stokes régissant le champ d'écoulement sont résolues en utilisant un package CFD. Le code utilise la méthode des volumes finis, et un schéma de différenciation second order upwind est utilisé dans toutes les simulations. Les équations sont résolues en utilisant l'algorithme SIMPLE avec un solveur de matrice itératif ligne par ligne. Pour les nombres de Reynolds faibles, le flux reste stationnaire et aucun déversement de vortex n'est produit. La convergence est réalisée en moins de 1000 itérations. Une grille non structurée avec une résolution suffisamment fine est choisie pour s'assurer que les résultats sont indépendants de la taille de la grille.

III.2. Conditions initiales :

Les conditions initiales représentent l'état de base du modèle à l'instant où commence la simulation. Elles s'appliquent sur des arrêtes du domaine de calcul, la déclaration de ces dernières se fait après avoir maillé les surfaces sous le logiciel de calcul.

On peut définir alors la valeur de la pression si on travaille à pression imposée mais dans notre étude on impose des vitesses à l'entrée du canal (0,286 m/s ; 0,429 m/s ; 0,571 m/s ; 0,714 m/s).

III.3. Condition aux limites :

Dans une modélisation, on ne peut pas toujours représenter la totalité de l'ouvrage. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code calcul. Nous en utilisons essentiellement deux : vitesse d'entrée et condition de paroi.

III.4. La convergence :

Un calcul est convergent si l'erreur décroît continuellement au cours des itérations. Il a convergé lorsque toutes les itérations ne produisent plus de changements significatifs sur les variables selon un critère que l'utilisateur doit définir au préalable. Ce critère de convergence est donc utilisé pour stopper le processus itératif lorsqu'il est satisfait. Le critère de convergence utilisé

repose sur le résidu d'une équation du problème défini par l'utilisateur. Le résidu correspond à la somme, sur toutes les cellules du maillage, des erreurs effectuées sur l'équation discrétisée en question lorsque les variables déterminées par le calcul sont réintégrées dans l'équation discrétisée.

Nous avons utilisé comme critères de convergence les valeurs par défaut des résidus implémentées dans le logiciel. Le critère de convergence est alors de 10^{-6} pour toutes les quantités, c'est-à-dire l'équation de continuité et les trois composantes du champ de vitesse (V_x , V_y , V_z).

La convergence du calcul est visible graphiquement au cours de la simulation par l'affichage de l'évolution des résidus au cours des itérations. Par exemple, le graphique de la Figure III-1 montre que le calcul converge (861 itérations). Les courbes ne présentent pas d'oscillation préjugant ainsi de la qualité correcte du maillage et des résultats numériques.

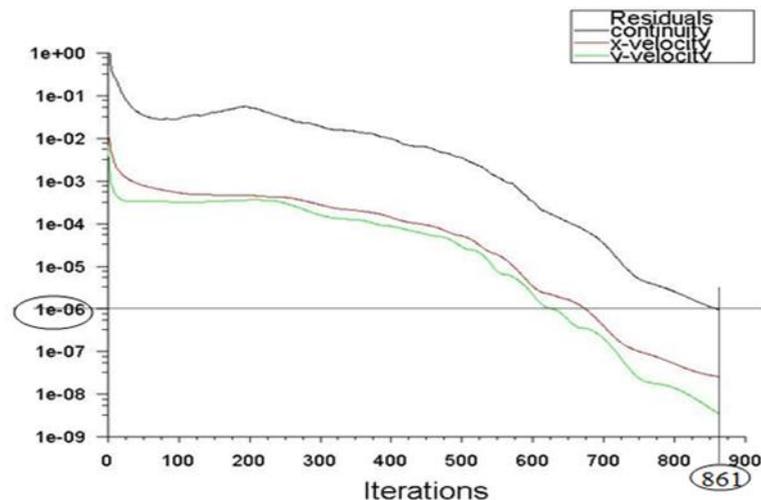


Figure III-1 : Evolution des résidus au cours des itérations.

III.5. La géométrie étudiée :

Le domaine d'intérêt physique est une coupe transversale bidimensionnelle d'un module de membrane enroulé en spirale représentant une configuration en zigzag de deux espaceurs de forme d'une ellipse espacée par l . Ces espaceurs avec les mêmes sections transversales (hauteur) sont montées entre deux plaques horizontales et parallèles de longueur $L = 9,88$ mm, $l_1 = 4,80$ mm, $l_0 = 2,54$ mm séparées par $H = 0,7$ mm. Le rapport d'aspect de l'ellipse est $a / b = 1/2$ avec $b = 0,12$ mm voir la figure III.3. En outre, de longues longueurs d'entrée et de sortie sont appliquées pour

atteindre un flux entièrement développé avant le premier espaceur et pour éviter toute interférence entre la recirculation et le dernier espaceur. On applique à l'entrée une vitesse u_0 .

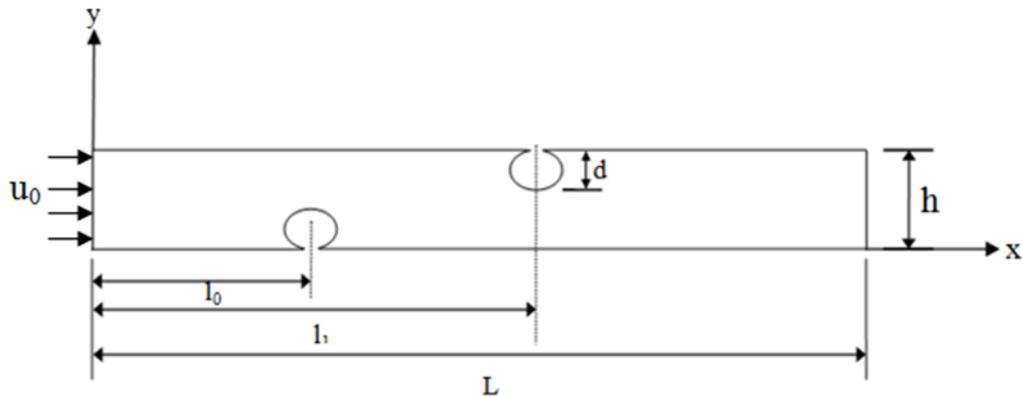


Figure III-2 : La géométrie étudiée.

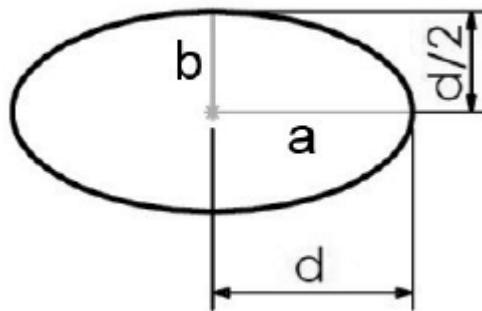


Figure III-3 : Les dimensions de l'ellipse.

III.6. Choix du maillage :

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne qualité des éléments.

- Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

Les maillages non structurés (triangulaires) sont réalisés dans le code CFD. Le nombre de nœuds a été pris en considération pour la validation de notre maillage.

Les détails les plus abouties de ces maillages sont donnés dans le tableau III-1. Ces résultats ont été sélectionnés selon le critère d'optimisation du maillage principal après convergence des profils de vitesses.

Paramètres Maillages	La vitesse (m/s)	Nombre de nœuds
M1	0.5743164	8299
M2	0.5745565	9291
M3	0.5743164	9757

Tableau III-1 : Résultats de l'effet du maillage.

Dans notre cas, on a élaboré plusieurs maillages et pour chacun on extrait le profil de vitesse. Ce dernier devient insensible au nombre de nœuds à partir du maillage qui contient 9291 nœuds, et la vitesse moyenne devient constante.

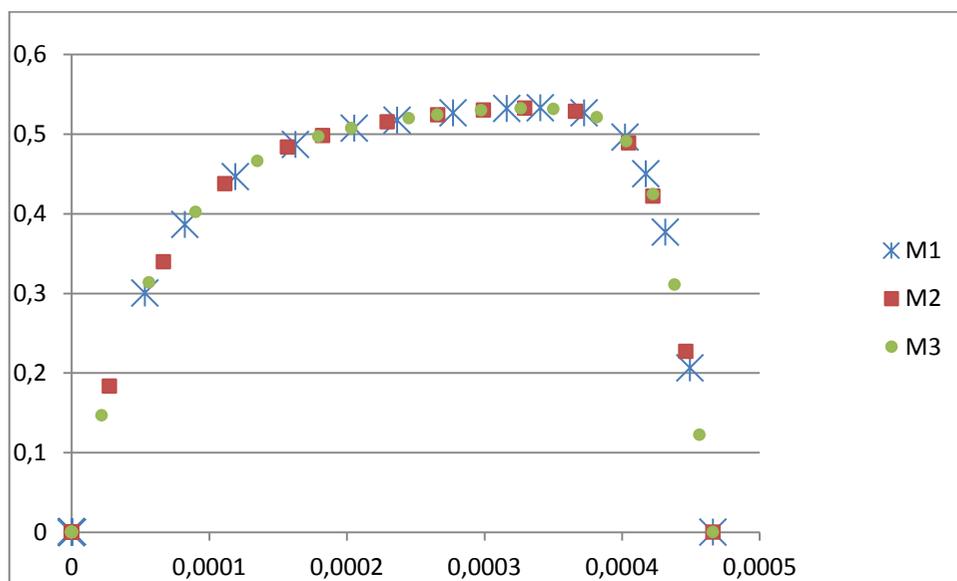


Figure III-4 : Influence de la densité du maillage sur les profils de vitesse.

Pour notre étude on a choisi le maillage qui est constitué de 9291 nœuds, la Figure III-5 représente le maillage de la géométrie étudiée.

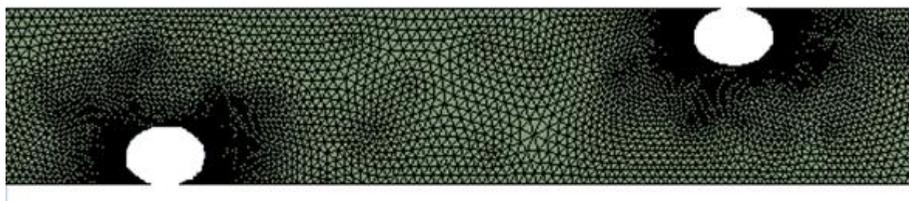


Figure III-5 : Maillage de la géométrie étudiée.

III.7. Validation du travail :

Pour vérifier l'exactitude de l'étude actuelle, le calcul a été validé avec le travail de Kevin J. Farrell [8] pour le contour de vitesse (Figure III-7) à $Re = 200$.

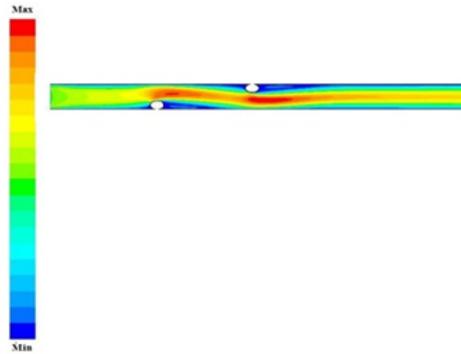


Figure III-6 : Contour de vitesse de la simulation numérique.

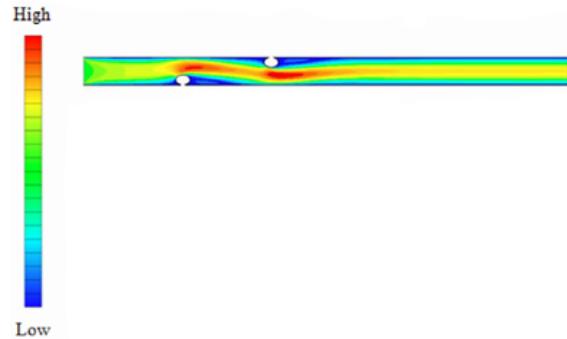


Figure III-7 : Contour de vitesse (Kevin J. Farrell).

III.8. Hydrodynamique :

Dans cette première partie on veut étudier l'hydrodynamique pour différents nombres de Reynolds (200, 300, 400, 500).

III.8.1. La vitesse :

Pour le cas régulier, le nombre de Reynolds de la chaîne, Re_{ch} est pris de 200-2000. Les contours de vitesse pour différents nombres de Reynolds la Figure III-8 (a, b, c, d). Pour chaque cas, les régions de recirculation sont observées en amont et en aval des espaceurs. Une très petite région de recirculation est formée devant les espaceurs mais une plus grande région de recirculation est formée derrière ces espaceurs. La taille de la région de recirculation augmente avec le nombre de Reynolds. Pour les nombres de Reynolds 400 et 500, une grande région de recirculation peut être observée et se développe plus rapidement que pour les nombres de Reynolds 200 et 300. La région de vitesse la plus élevée se trouve entre l'espaceur et la paroi opposée et cette répartition de vitesse est presque symétrique autour de chaque espaceur. Dans cette région, la vitesse est presque 2 fois supérieure à la vitesse d'entrée et la queue de la région de vitesse la plus élevée devient plus longue pour un nombre supérieur de Reynolds et la vitesse aux parois est nulle.

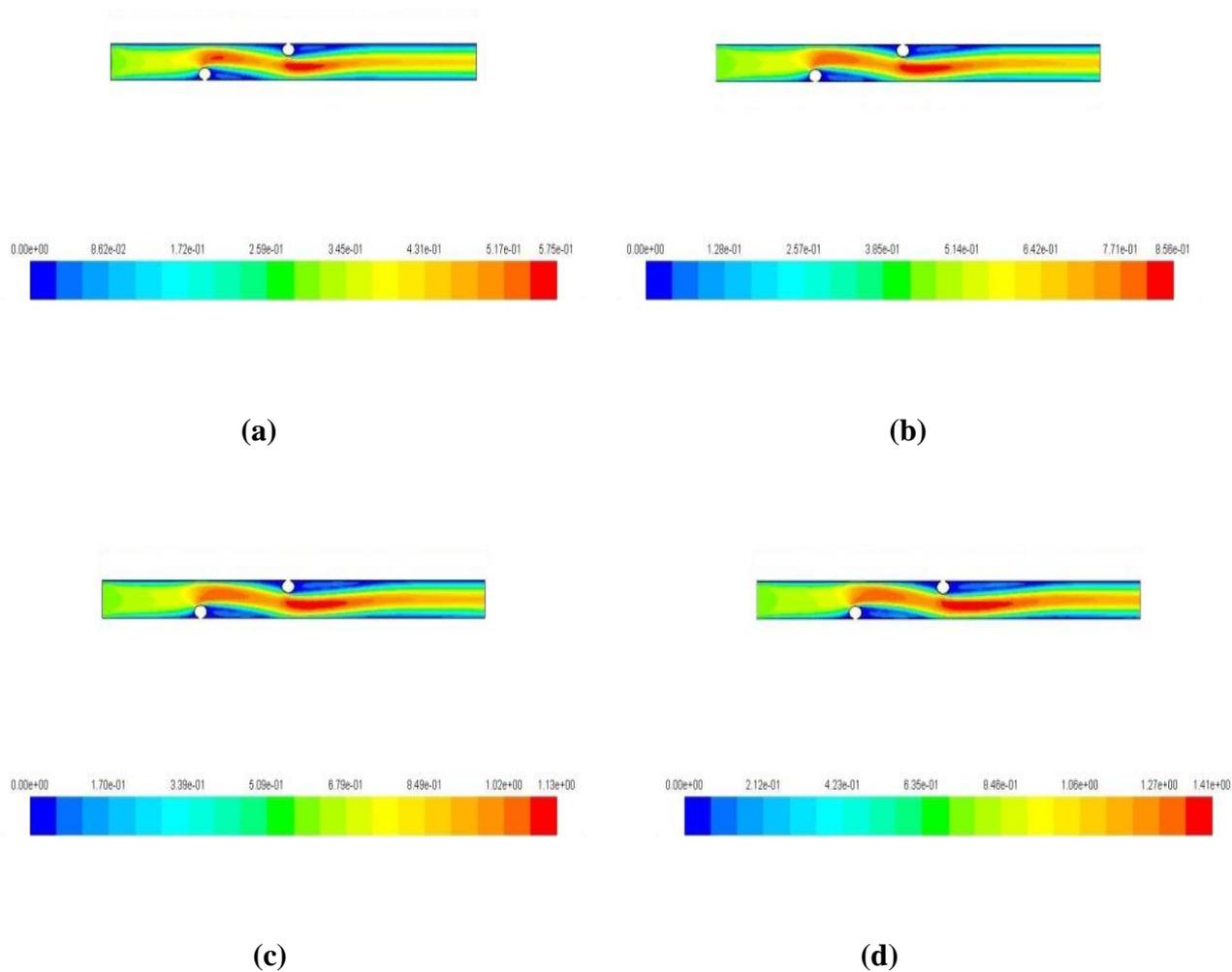


Figure III-8 : Contours de vitesse : (a) $Re = 200$, (b) $Re = 300$, (c) $Re = 400$, (d) $Re = 500$.

Pour le profil de vitesse à $x = 2,54$ mm (A-A') et à $x = 3,67$ (B-B') mm la vitesse maximale augmente en augmentant le nombre de Reynolds.

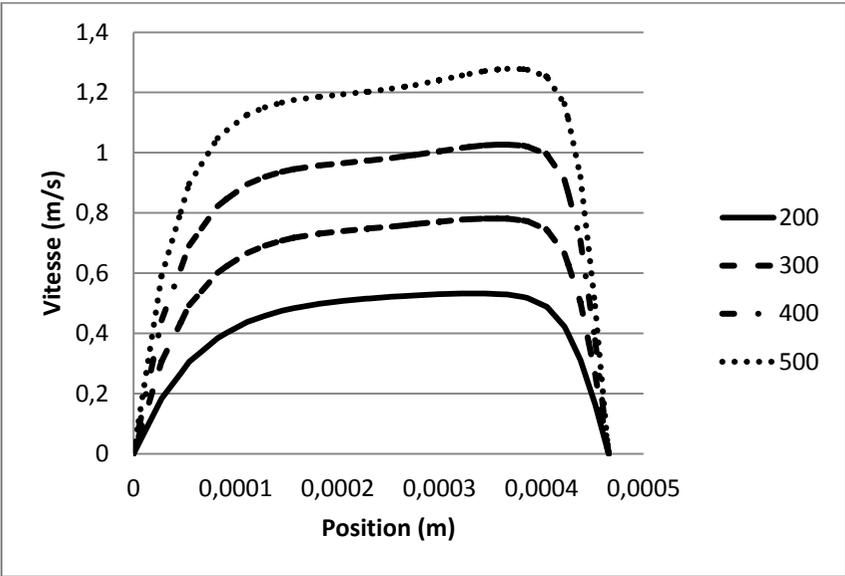
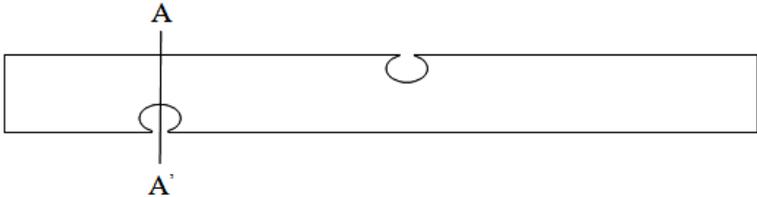


Figure III-9 : Profil de vitesse à $x = 2,54 \text{ mm}$ (A-A') pour différents nombres de Reynolds.



La distribution des vecteurs vitesses est tracé dans la Figure III-10 ($Re = 500$) pour affûter davantage le débit de fluide dans les canaux remplis par entretoise. Cette configuration aboutit à un renversement de flux entre les deux espaceurs.

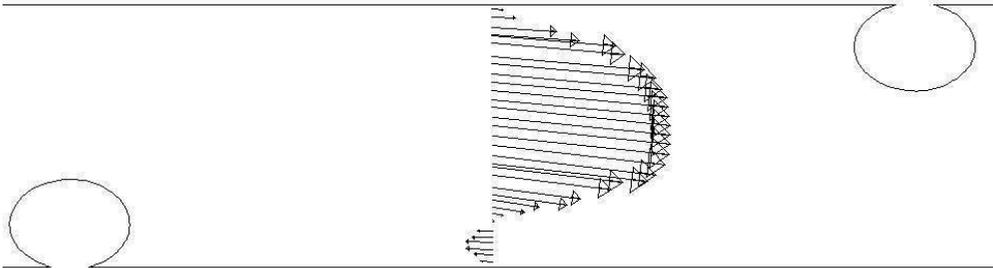


Figure III-10 : L'évolution des vecteurs vitesse à $x = 3,67 \text{ mm}$ (B-B') ppour $Re = 5.00$

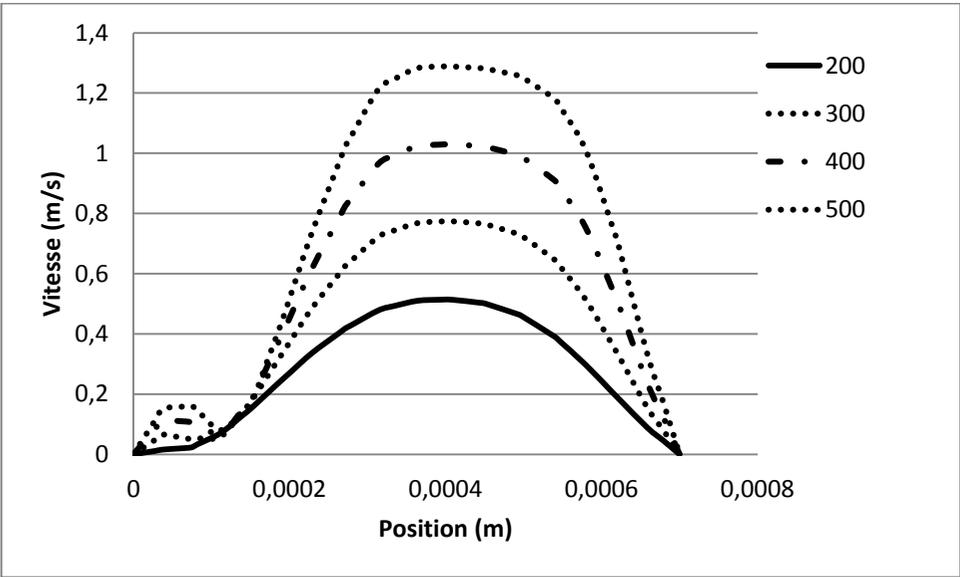
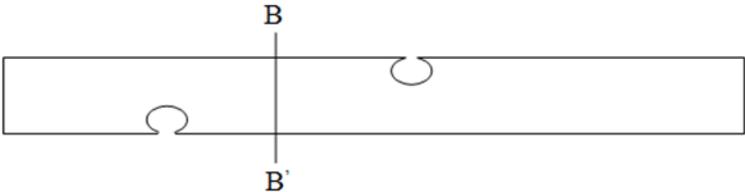


Figure III-11 : Profil de vitesse à x = 3,67 mm (B-B') pour différents nombres de Reynolds.



III.8.2. La pression :

La pression augmente à l'entrée du canal, elle diminue au milieu du canal à une valeur minimum et elle reste constante près de la paroi supérieure.

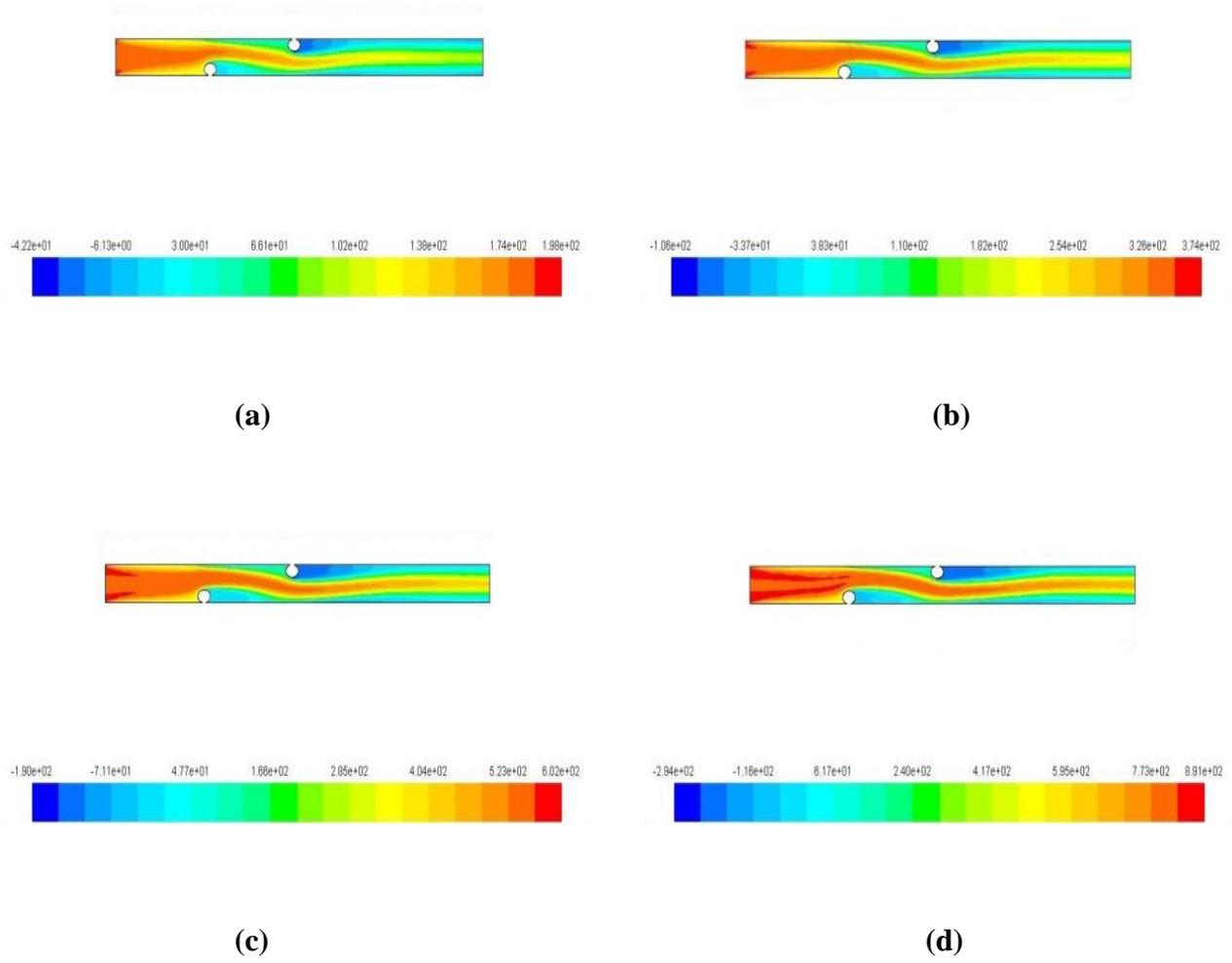


Figure III-12 : Contours de pression : (a) $Re = 200$, (b) $Re = 300$, $Re = 400$, $Re = 500$.

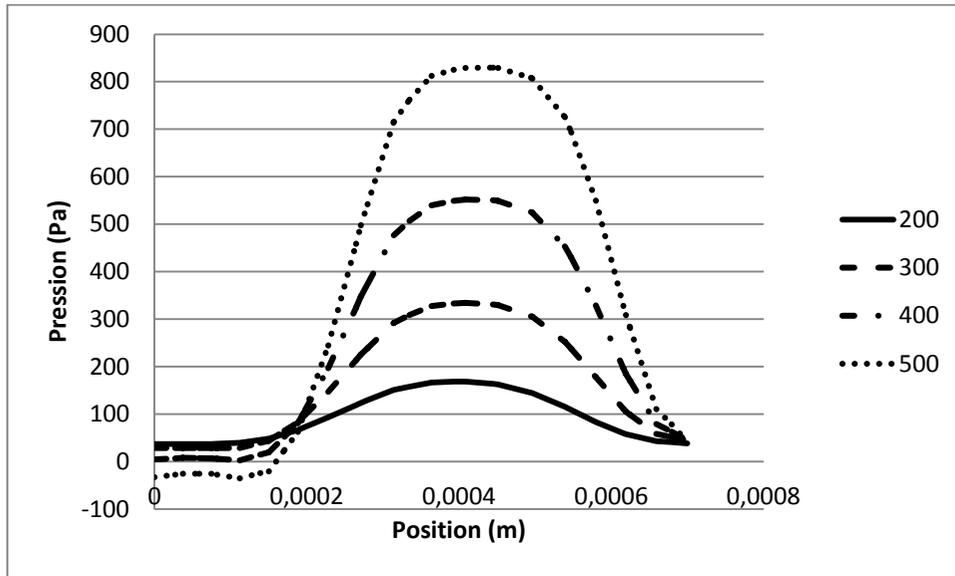
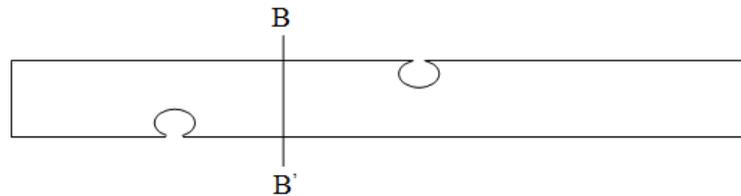


Figure III-13 : Profil de pression pour différents nombres de Reynolds.



III.9. Transfert de chaleur :

Les profils de vitesse et de pression pour cette étude sont semblables aux résultats obtenus dans l'hydrodynamique et cela veut dire que la température et le flux de chaleur imposés n'ont aucune influence sur les caractéristiques de l'écoulement.

III.9.1. La température :

La température maximale se localise sur la paroi supérieure là où elle est imposée. Elle se diffuse aussi devant et derrière chaque espaceur. D'après le graphique de la température on voit qu'elle est inversement proportionnelle au nombre de Reynolds mais elle est constante pour tous les nombres de Reynolds entre y égal à 0,2 mm et 0,3 mm.

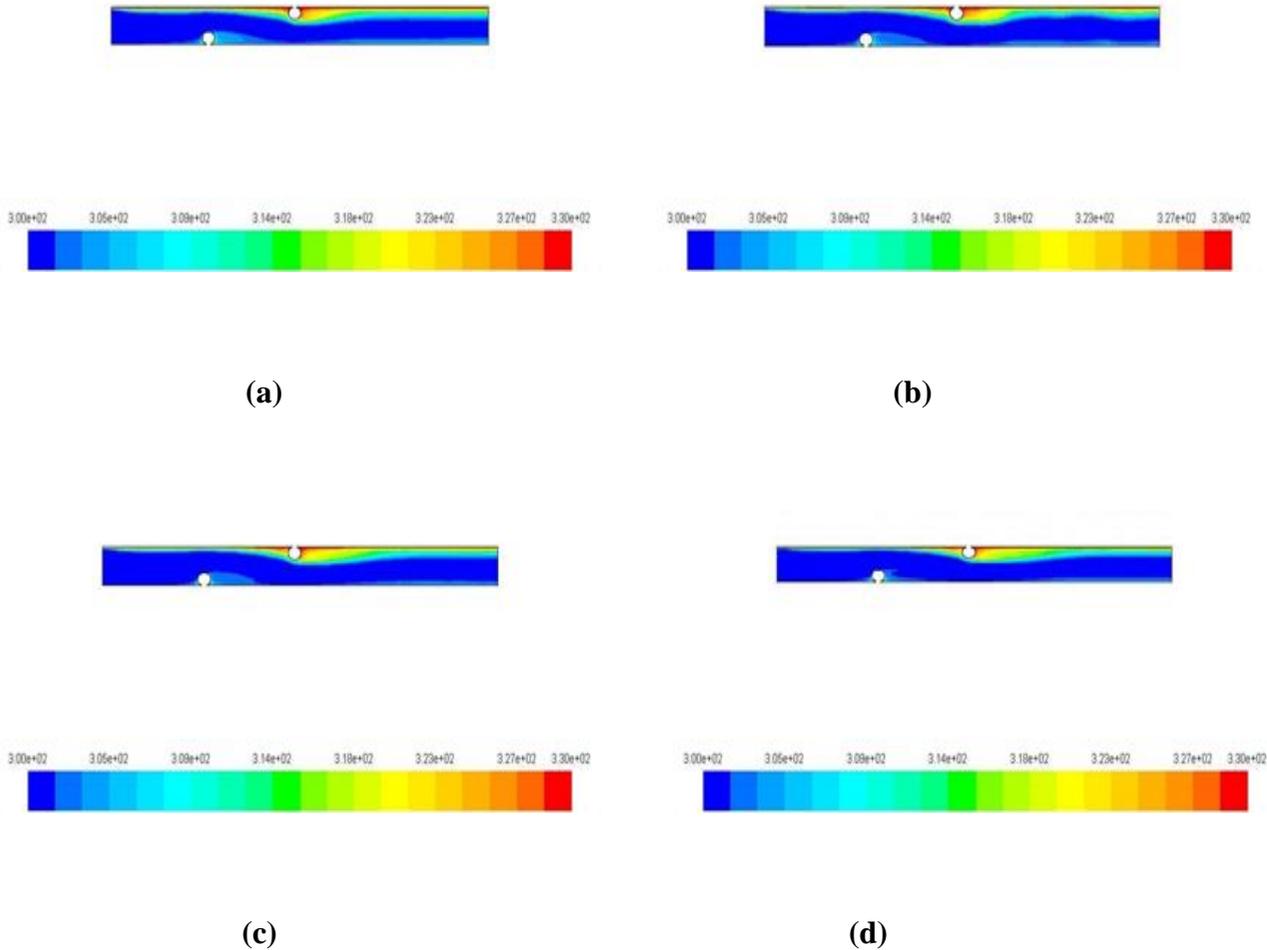


Figure III-14 : Contours de température : (a) $Re = 200$;(b) $Re = 300$;(c) $Re = 400$;(d) $Re = 500$.

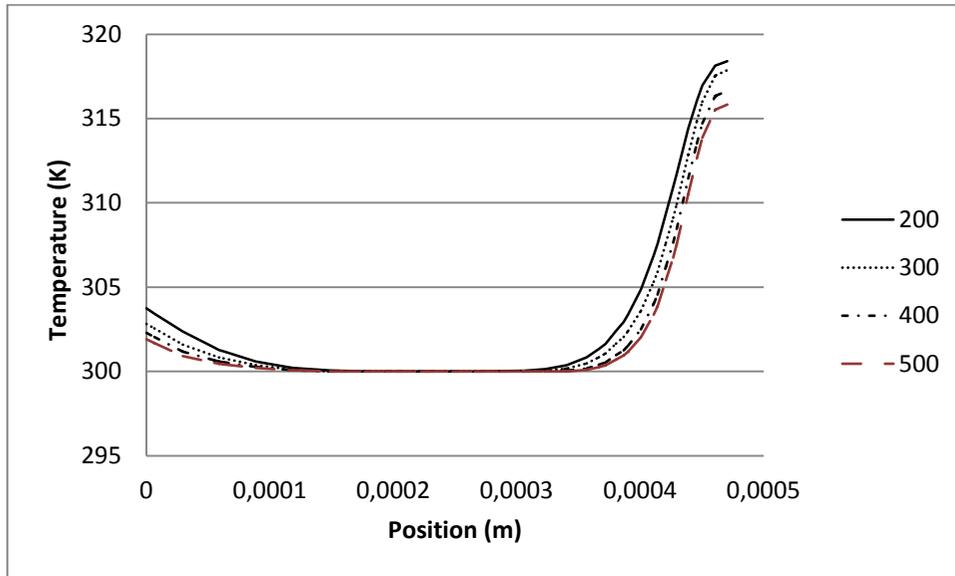
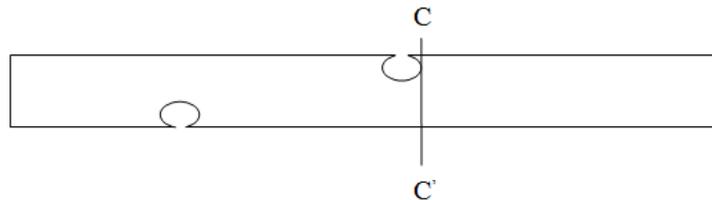


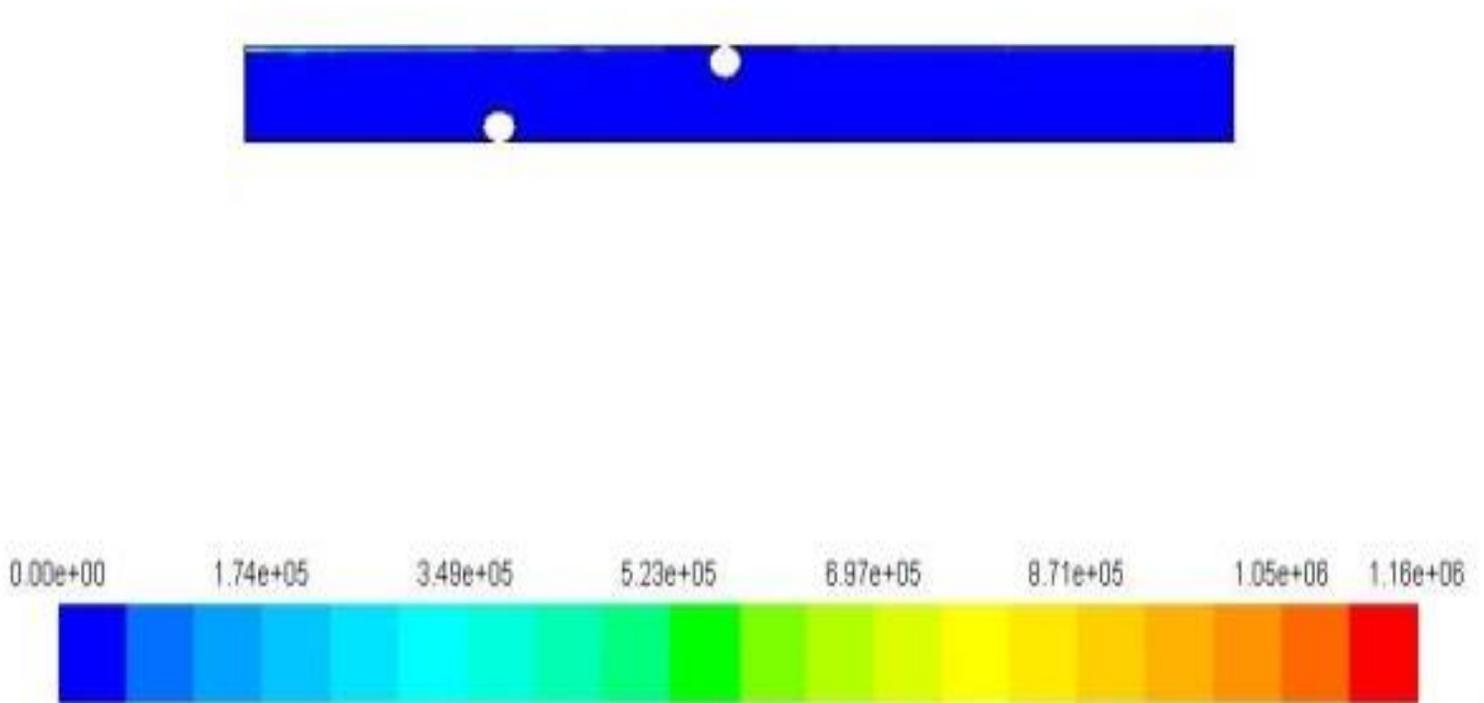
Figure III-15 : L'évolution de la température à $x = 4,97$ mm (C-C').



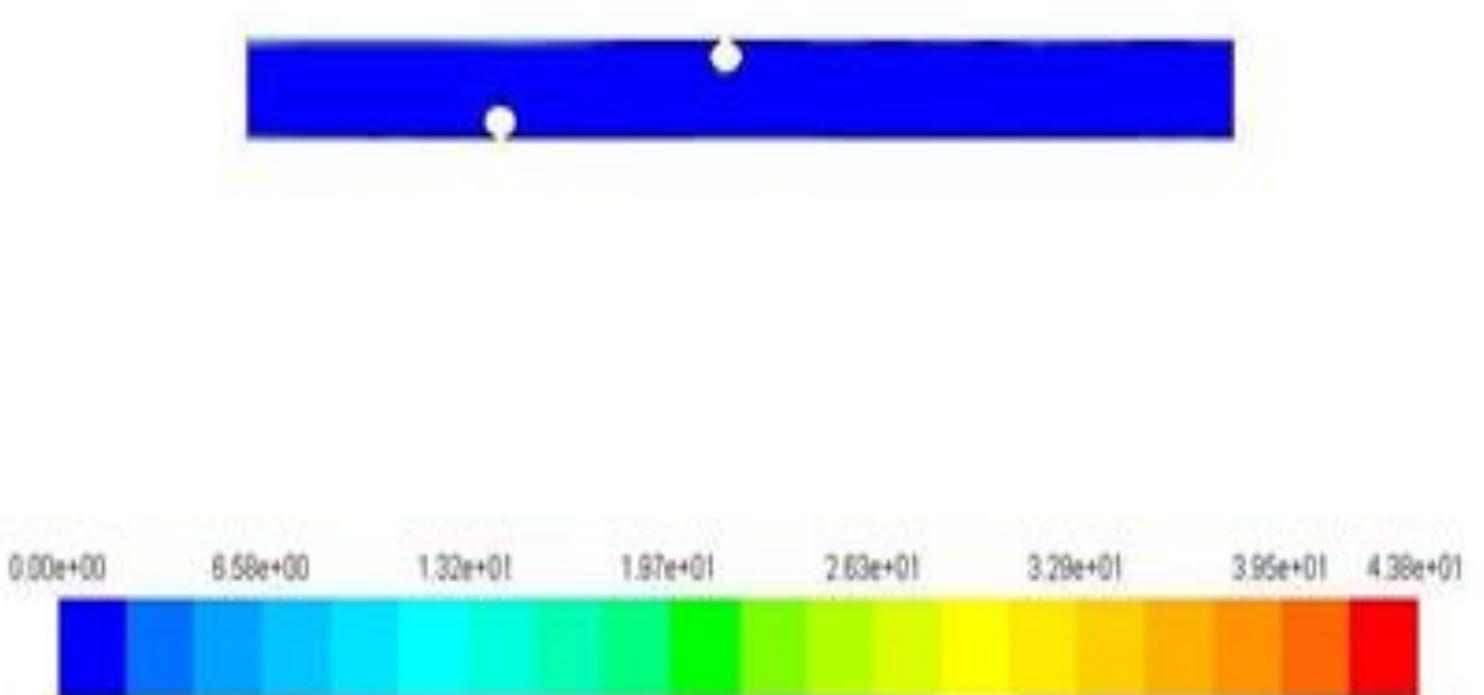
III.9.2. Le flux de chaleur :

Le flux de chaleur est imposé à la paroi inférieure ($q = 30000 \text{ W/m}^2$) mais les résultats de simulation montrent qu'il est maximum à la paroi supérieure à côté de l'entrée du canal. C'est un transfert de chaleur par conduction.

La figure III-16 et III-17 représente le contour du flux de chaleur pour les différents nombres de Reynolds

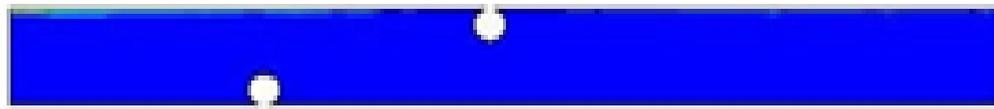


(a)



(b)

Figure III-16 : Contour du flux de chaleur : (a) $Re = 200$; (b) $Re = 300$.



(c)



(d)

Figure III-17 : Contour du flux de chaleur : Re = 400; (d) Re = 500.

III.10. La concentration de CaCO_3 :

Pour mieux analyser l'effet du nombre de Reynolds (Re) sur le champ de concentration et le développement de la polarisation de concentration, des simulations numériques sont réalisées pour quatre nombres de Reynolds ($Re = 200, 300, 400$ et 500) pour une fraction massique de $0,6$. Les résultats correspondants sont présentés en termes de valeurs locales et moyennes.

La figure III-18 représente des contours de concentration pour les différents nombres de Reynolds. Dans la configuration en zigzag, l'augmentation du nombre de Reynolds permet l'augmentation de la concentration de CaCO_3 dans l'eau, en particulier dans les zones de recirculation localisées en amont et en aval des espaceurs. Néanmoins, la concentration est toujours constante à l'intérieur du flux principal, et la concentration de masse de gradient normale près des membranes augmente entre les deux espaceurs avec l'augmentation de Re .

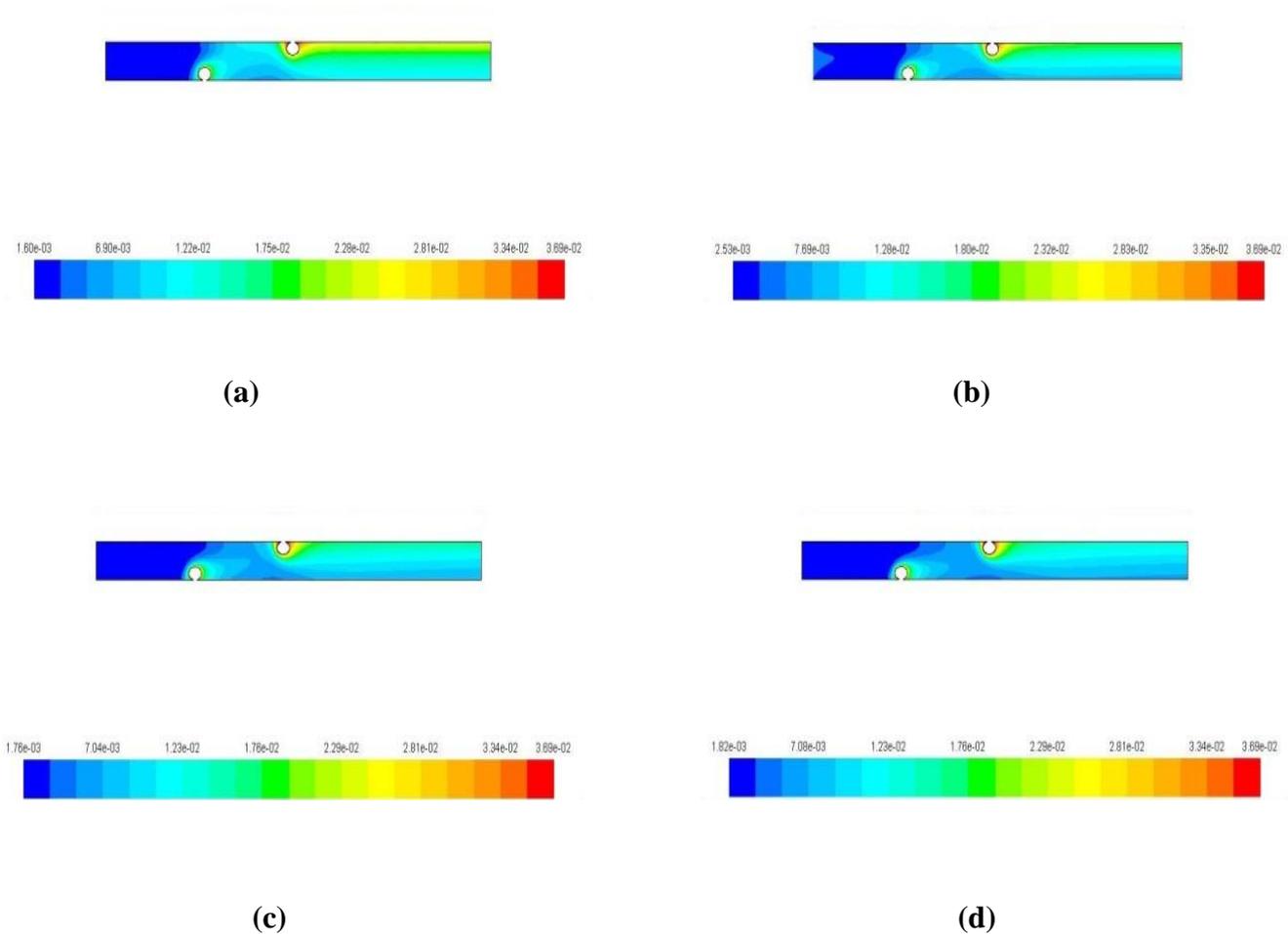


Figure III-18 : Contours de concentration: (a) $Re = 200$;(b) $Re = 300$;(c) $Re = 400$;(d) $Re = 500$.

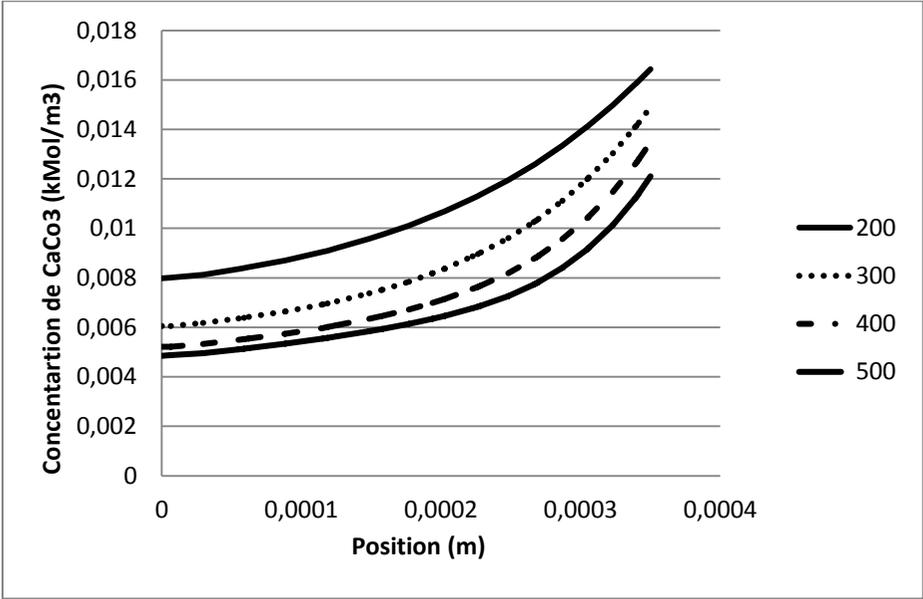
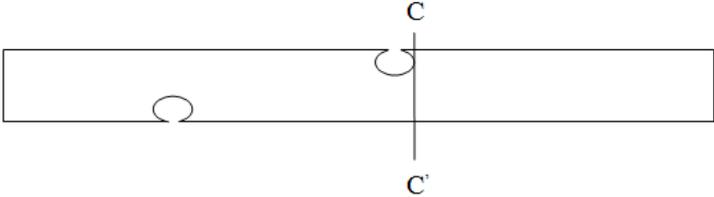


Figure III-19 : L'évolution de la concentration à x = 4,97 mm (C-C').



III.11 Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre tous les résultats de simulation obtenus sous forme de contours de vitesse et de pression pour l'étude de l'hydrodynamique, contours de température et de flux de chaleur en ce qui concerne le transfert de chaleur et à la fin les résultats de concentration pour le transfert de masse.

Conclusion générale

Conclusion générale

On a défini les différents procédés membranaires ainsi que les caractéristiques physiques des membranes pour parvenir à positionner notre problème à résoudre qui est l'étude hydrodynamique et transfert de chaleur et de masse à l'aide des équations de Navier-Stokes à fin de déterminer le profil de vitesse, le gradient de pression et de température par l'outil de simulation numérique qui utilise la méthode des volumes finis. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence ($K\epsilon$, $K\omega$, ...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Il est aussi un solveur très utilisé dans l'industrie donc on l'a exploité pour mieux comprendre et développer les procédés de filtration membranaire (module spiral). D'après les résultats obtenus le flux de chaleur augmente en augmentant la vitesse d'entrée du canal et la concentration de CaCO_3 diminue autour des espaceurs se qui nous mène à dire que cette configuration (zigzag) et l'augmentation de la vitesse (en restant dans le régime laminaire) favorise une meilleur filtration de l'eau de toute particules solides c'est un avantage mais en y trouve aussi un inconvénient qui est l'accumulation de ces solides rejeté par la membrane ce qui induit au colmatage.

En fin ces résultats nous mène à prévoir des études approfondis sur le phénomène de colmatage afin de le réduire.

Conclusion générale

Bibliographie

- [1] A. M. Hollman, N. T. Scherrer, A. Cammers-Goodwin et D. Bhattacharyya : Separation of dilute electrolytes in poly (amino acid) functionalized microporous membranes : model evaluation and experimental results. *Journal of Membrane Science*, 239 (1):65–79, 2004.
- [2] H. Matsuyama, M. Yuasa, Y. Kitamura, M. Teramoto et D. R. Lloyd : Structure control of anisotropic and asymmetric polypropylene membrane prepared by thermally induced phase separation. *Journal of Membrane Science*, 179(1-2):91–100, 2000.
- [3] C. J. Brinker, R. Sehgal, S. L. Hietala, R. Deshpande, D. M. Smith, D. Loy et C. S. Ashley: Sol-gel strategies for controlled porosity inorganic materials. *Journal of Membrane Science*, 94(1):85–102, 1994.
- [4] B. Cabane, M. Meireles et P. Aimar : Cake collapse in frontal filtration of colloidal aggregates : mechanisms and consequences. *Desalination*, 146(1-3):155–161, 2002.
- [5] R. Van Reis et S. Saksena : Optimization diagram for membrane separations. *Journal of Membrane Science*, 129(1):19–29, 1997.
- [6] P. Aptel, P. Moulin et F. Quemeneur : Les Cahiers du CFM n°2. Club Français des Membranes, 2002.
- [7] 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.
- [8] A.R. Mazaheri, G. Ahmadi, Uniformity of the fluid flow velocities with in hollow fiber membranes of blood oxygenation devices, *Artif. Organs* 30 (1) (2006)10–15.

- [9] B.J. Fill, M. J. Gartner, G. Johnson, J. Ma, M. Horner, Porous media technique for computational modeling of a novel pump-oxygenator, *ASAIOJ*.51(2) (2006) 18A.
- [10] M. Li, T.Bui, S.Chao, Three-dimensional CFD analysis of hydrodynamics and concentration polarization in an industrial RO feed channel, *Desalination* 397 (2016) 194–204.
- [11] F. Li, W. Meindersma, A.B. de Haan, T. Reith, Optimization of commercial net spacers in spiral wound membrane modules, *Journal of Membrane Science* 208 (2002) 289–302.
- [12] Chen J, Chang H, Chen S. Simulation study of a hybrid absorber-heat exchanger using hollow fiber membrane module for the ammonia-water absorption cycle. *Int J Refrig* 2006;29:1043e52.
- [13] D. E .Wiley, D .F. Fletcher, Techniques for computational fluid dynamics modeling of flow in membrane channels. *Journal of Membrane Science*, 211(2003) 127–137.
- [14] P.L.T. Brian, Concentration polarization in reverse osmosis desalination with variable flux and incomplete salt rejection, *Ind. Eng. Chem. Fund.* 4, (1965) 439.
- [15] R. Ghidossi, J.V. Daurelle, D. Veyret, P. Moulin, Simplified CFD approach of a hollow fiber ultrafiltration system, *Chemical Engineering Journal*, 123 (2006) 117-125.
- [16] K. Damak, A. Ayadi , P. Schmitz, B. Zaghmati, Modeling of crossflow membrane separation processes under laminar flow conditions in tubular membrane, *Desalination* 168 (2004) 231-239.
- [17] M. N. Pinho, V. Semiao, V. Geraldes, Integrated modeling of transport processes in fluid/nanofiltration membrane systems, *Journal of Membrane Science* 206 (2002) 189–200.
- [18] S.K. Karode, Laminar flow in channels with porous walls, revisited, *Journal of Membrane Science*, 191 (2001) 237-241.
- [19] Asim Saeed, Rupa Vuthaluru, Hari B.Vuthaluru , Impact of feed spacer filament spacing on mass transport and fouling propensities of RO membrane surfaces, *Chemical Engineering Communications*. 202.(5): pp. 634-646.

[20] M. Shakaib, Iqbal Ahmed, Rosli M. Yunus, CFD modeling for fluid flow and heat transfer in membrane distillation, 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology ,pp. 265-268.

[21] A.I. Radu , M.S.H. van Steen , J.S. Vrouwenvelder , M.C.M. van Loosdrecht , C. Picioreanu, Spacer geometry and particle deposition in spiral wound membrane feed channels, Water research 48 (2014) 160 –176.

[22] Yu-Ling Li, Kuo-Lun Tung, CFD simulation of fluid flow through spacer-filled membrane module: selecting suitable cell types for periodic boundary conditions, Desalination 233 (2008) 351–358.

[23] Sharmina Hussain, Computational fluid dynamics study of flow behaviour in a single spacer filled membrane module, BRAC University Journal, vol. V, no. 1, 2008, pp. 1-8.

[24] V. Geraldes, V. Semiao, M.N. Pinho, Numerical modelling of mass transfer in slits with semi-permeable membrane walls, Engineering Computations, Vol. 17 No. 3, (2000) 192-217.

[25] V. Nassehi, Modelling of combined Navier–Stokes and Darcy flows in cross flow membrane filtration, Chemical Engineering Science, 53 (1998) 1253-1265.

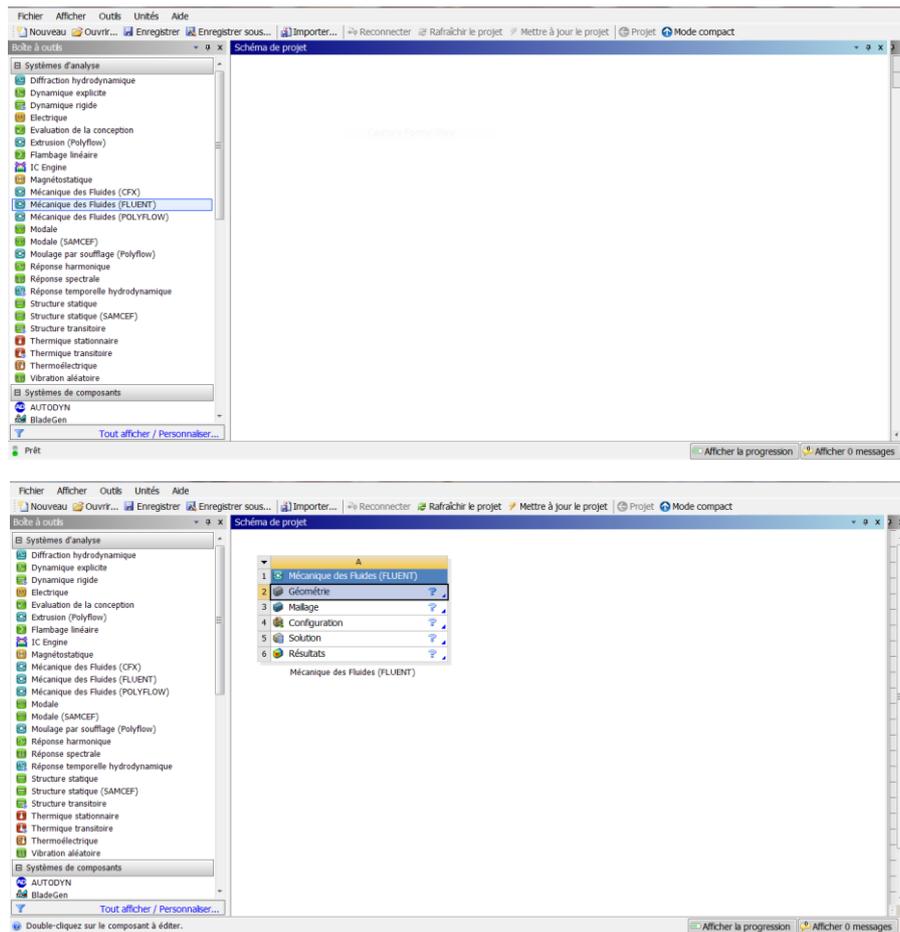
[26] R. Ghidossi, D. Veyret, P. Moulin, Computational fluid dynamics applied to membranes: State of the art and opportunities, Chemical Engineering and Processing 45 (2006) 437–454.

[27] Kevin J. Farrell, Reduced membrane fouling potential by tailored fluid/structure interaction, Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 143.

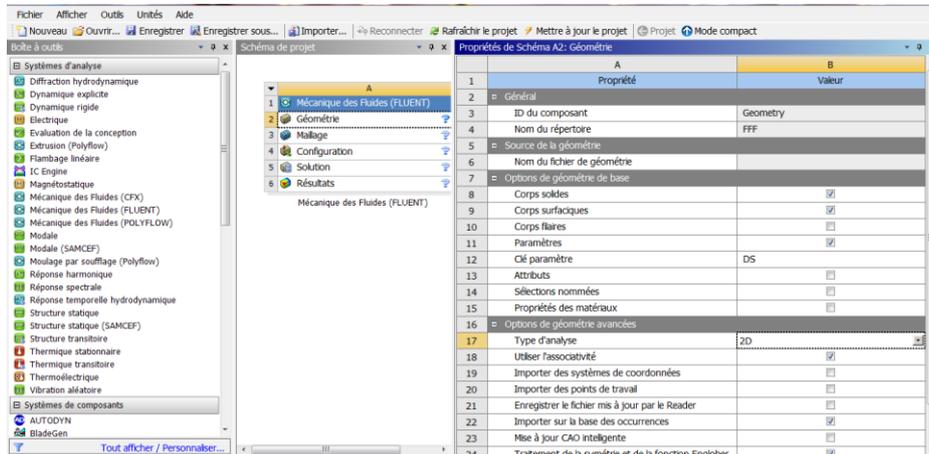
Annexe

On présente en ci-joint la procédure suivi dans les simulations.

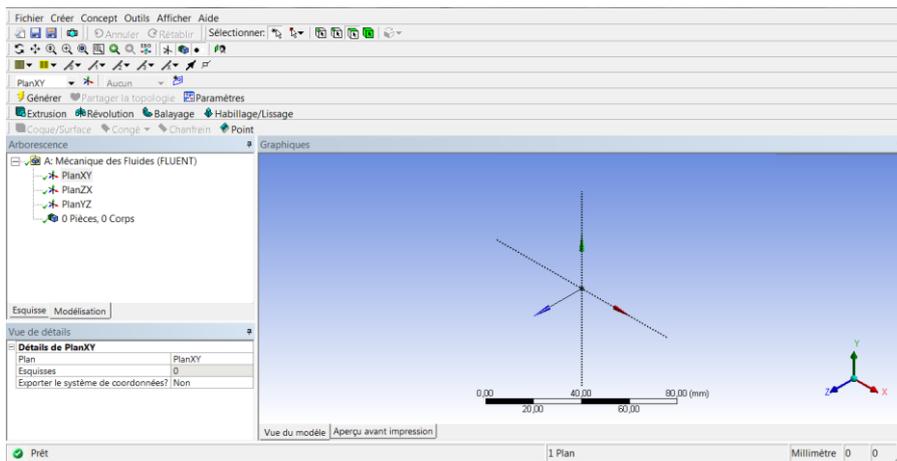
On lance ANSYS Workbench qui est au menu démarrer. , on obtient cette fenêtre.



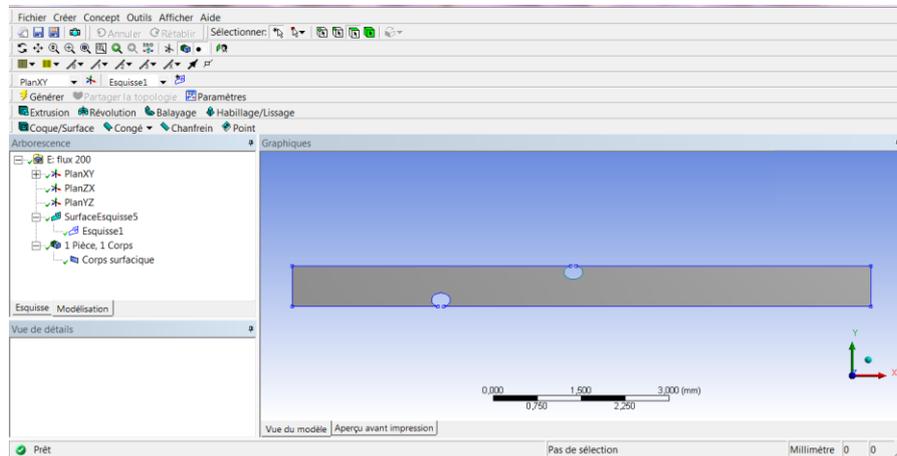
On clique une fois sur géométrie pour avoir toutes les propriétés de celle-ci, on choisit 2D comme type d'analyse.



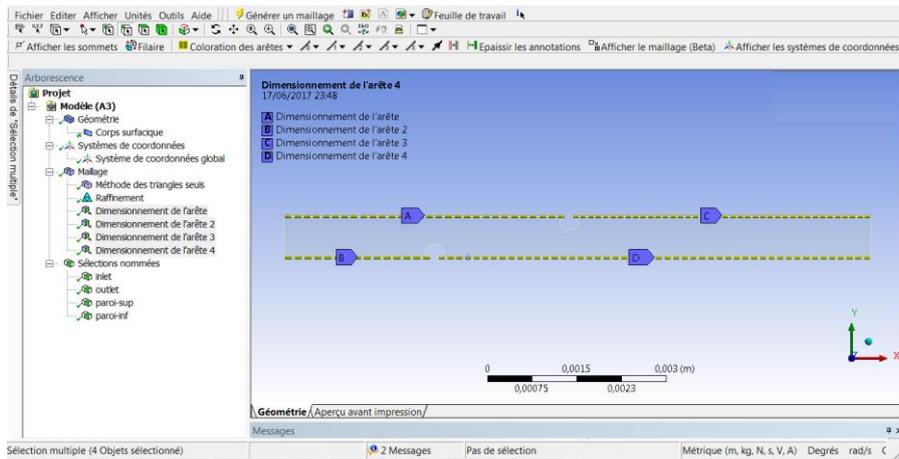
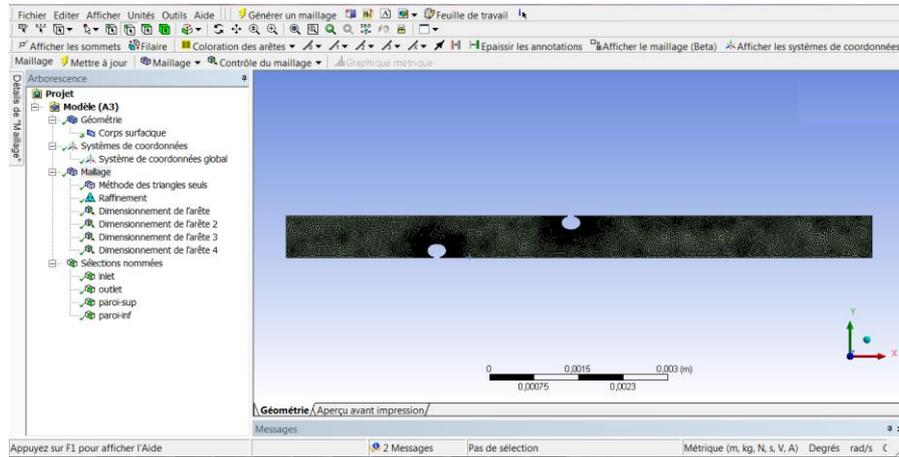
En suite un double clic sur géométrie pour démarrer DesignModeler.



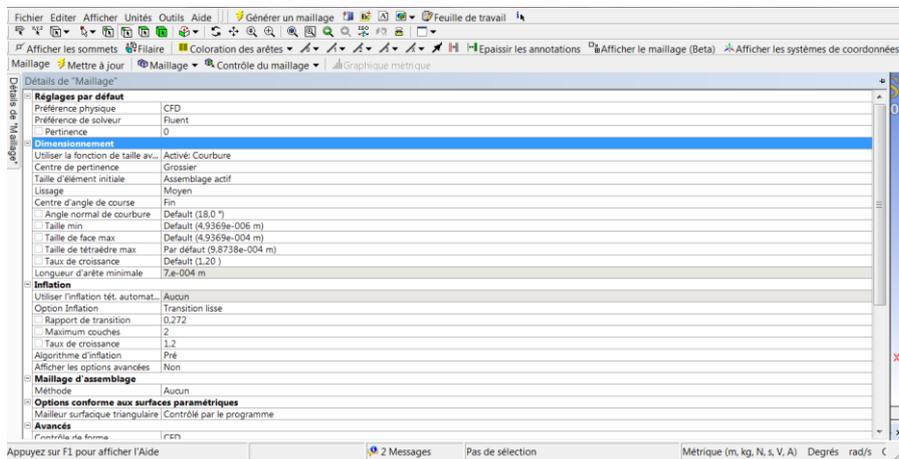
On dessine notre géométrie.

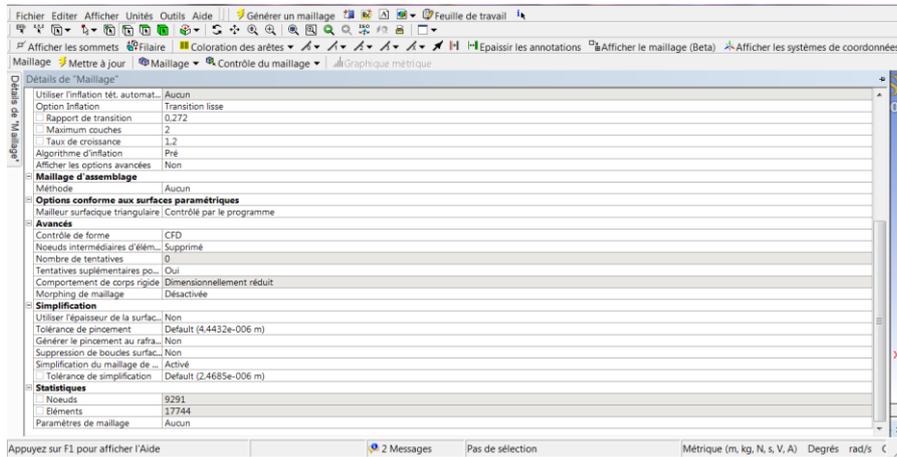


On retourne jusqu'à la première fenêtre et on clique sur « **maillage** »



On présente ci-dessous quelques propriétés du maillage



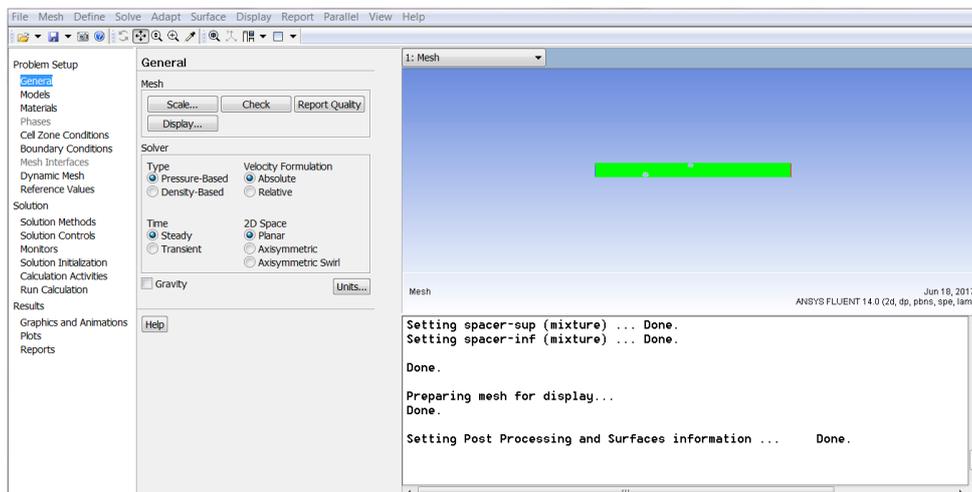


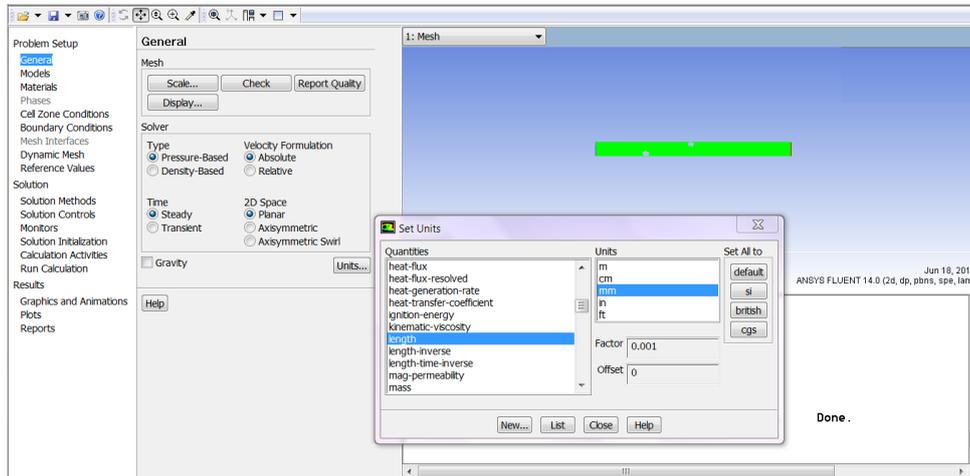
Après avoir terminé avec le maillage on clique sur « **mettre à jour le projet** »

Ensuite on passe à la configuration, on clique sur « **Double Precision** »

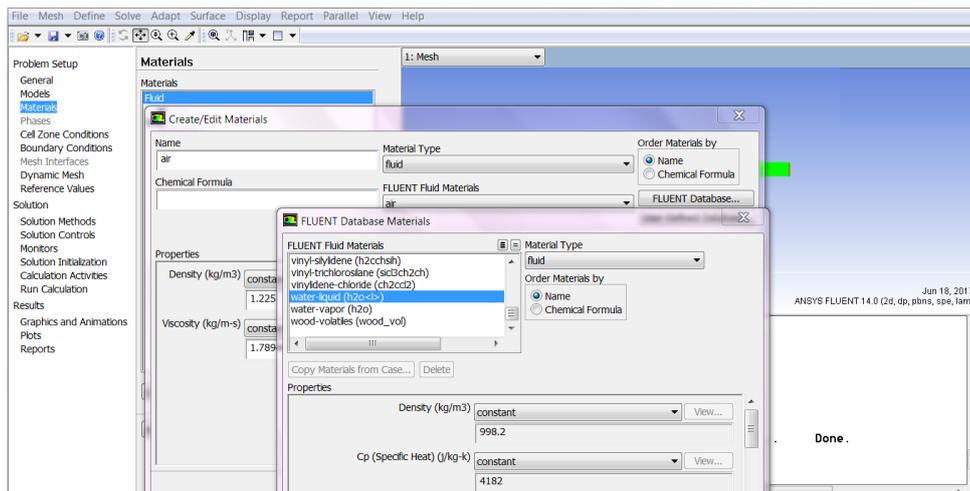
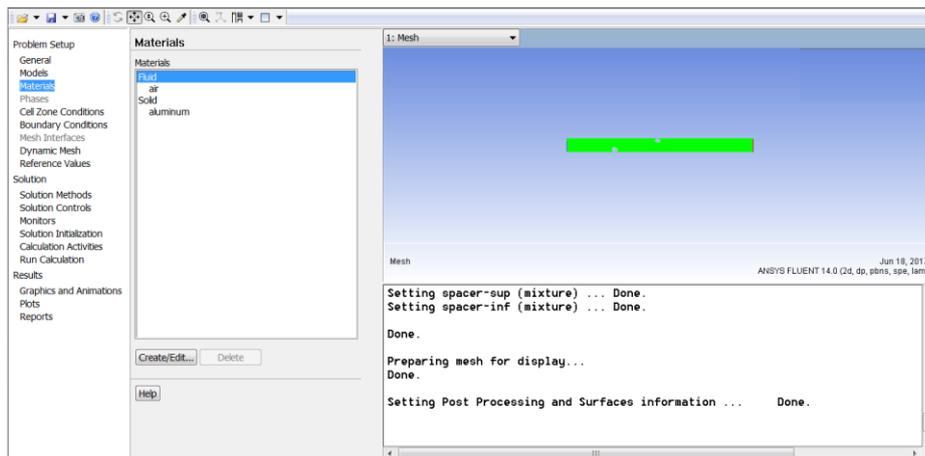


On se dirige d'abord vers le menu General pour choisir l'unité millimètre dans « **Units** » →
 « **length** » → **mm**

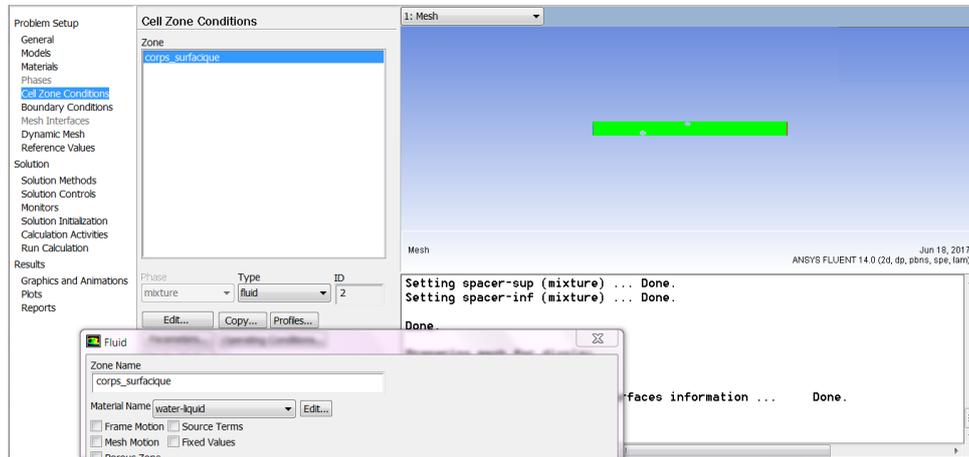




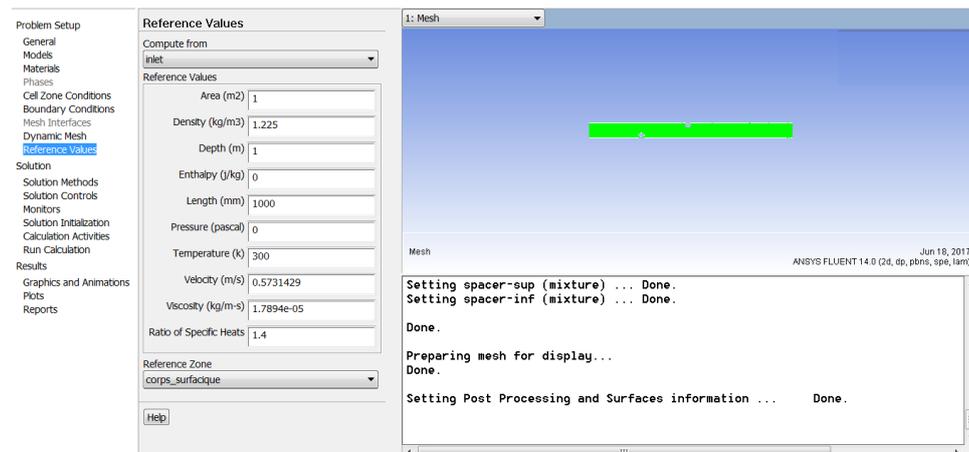
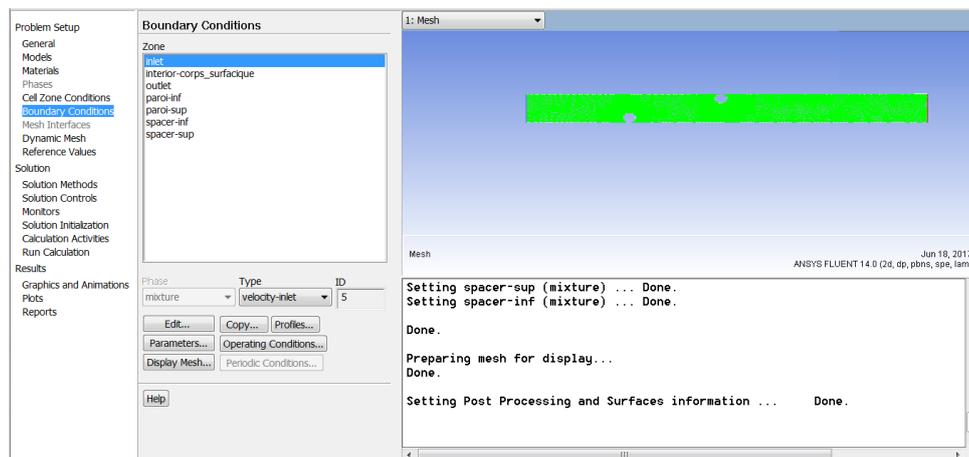
Ensuite le menu **Material** → **Fluid** → **Edit** → **Fluent Database** et on choisit de l'eau liquide.



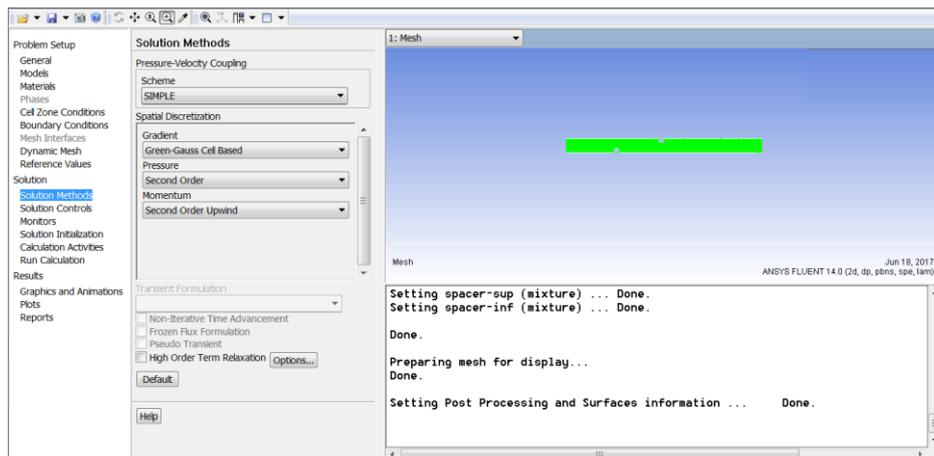
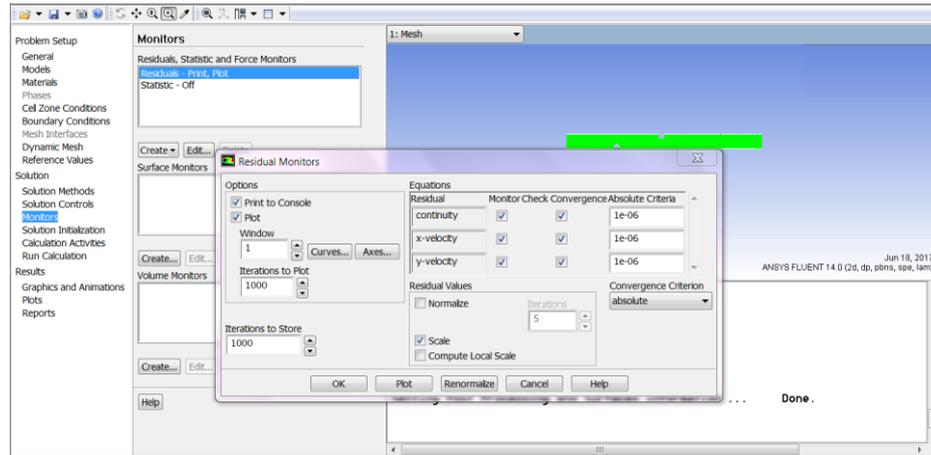
Le menu Cell zones conditions → Edit → Water liquid



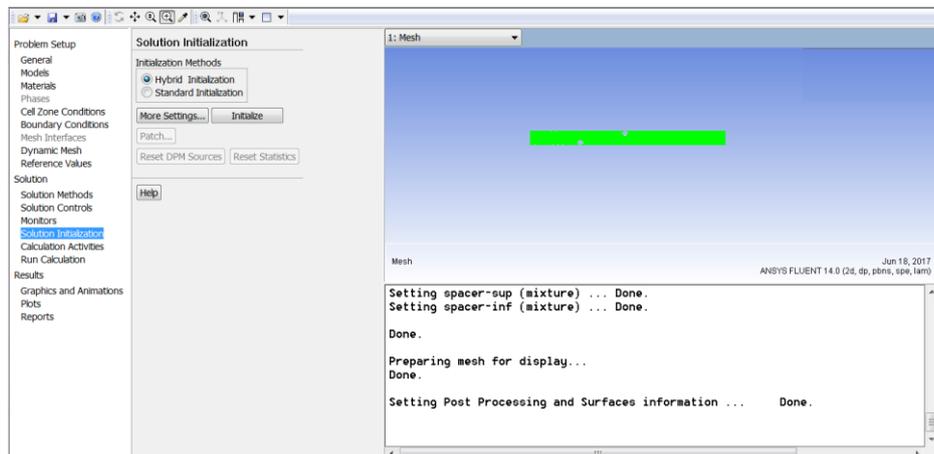
On impose une vitesse d'entrée V_0 (Inlet)



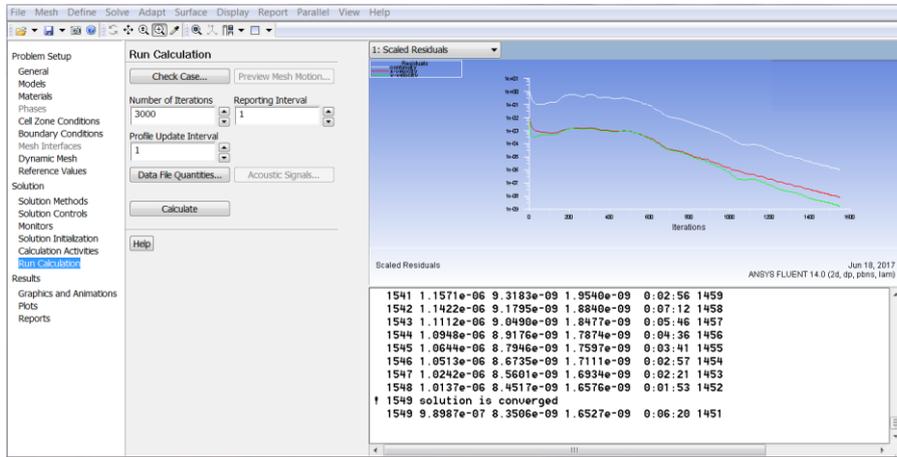
Pour que nos résultats converge on clique sur le menu **Monitors** et on change les résidus (10^{-6})



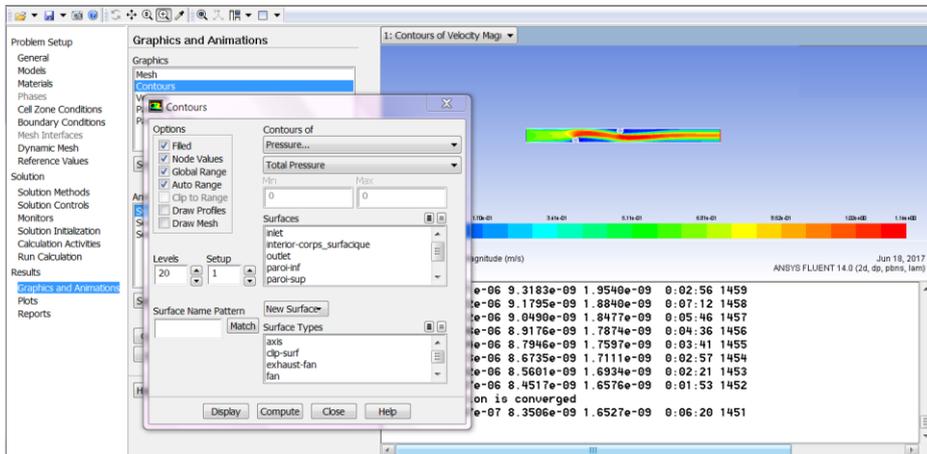
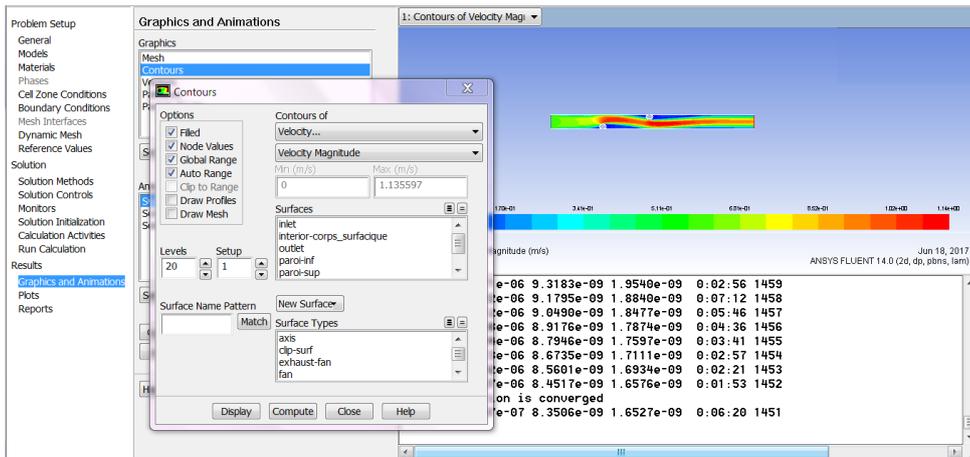
Le menu **solution initialisation** pour initialiser le calcul



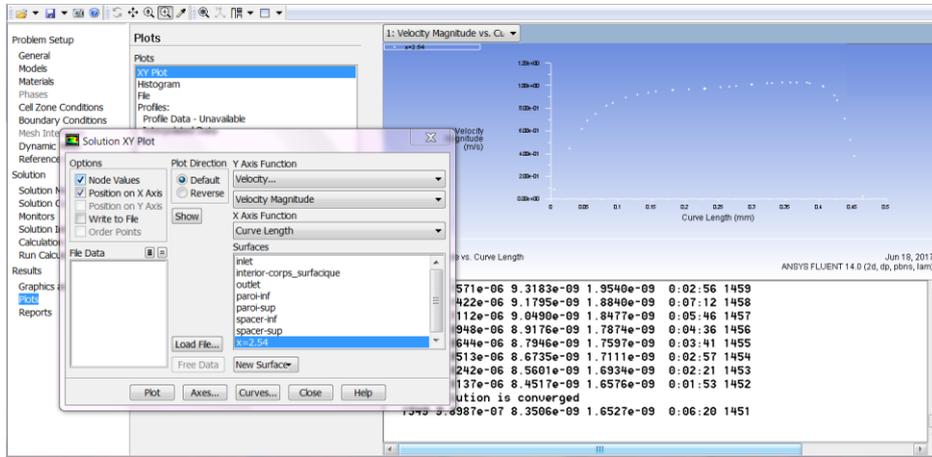
Le menu **Run Calculte** pour calculer la solution



Après le calcul on a le menu **Graphics and Animations** pour voir l'évolution du fluid à l'intérieur du canal et dans n'importe qu'elle zone



Et enfin le menu **Plot** peut dessiner les graphes



Résumé

Une filtration sur membrane est un procédé de séparation physique se déroulant en phase liquide. Le but est de purifier, fractionner ou concentrer des espèces dissoutes ou en suspension dans un solvant à travers une membrane.

Dans notre étude on a effectué des simulations numériques bidimensionnelles sur un canal qui contient deux espaceurs afin de préciser l'influence de la vitesse d'entrée ainsi que le transfert de chaleur et de masse à l'aide d'un code de simulation utilisant la méthode des volumes finis.

Abstract

Membrane filtration is a physical separation process taking place in the liquid phase. The goal is to purify, fractionate or concentrate dissolved or suspended species in a solvent through a membrane.

In our study we performed two-dimensional numerical simulations on a channel that contains two spacers to specify the influence of the input velocity as well as the heat and mass transfer using a simulation code using the finite volume method.