

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab, Blida USDB
Faculté des Sciences.
Département de chimie industrielle



**Mémoire pour l'obtention
Du diplôme de Master 2 en science de l'eau et l'environnement
Option : Eau, Environnement et Développement Durable**

Sujet :

Modélisation des écoulements dans les membranes d'osmose inverse

Présenté par : **M. HANED Mounir**

Encadreur : **Dr. SOUKANE Sofiane**

Soutenance devant le jury

Mr. NACEUR Wahib

Maître de conférence

Président

Mr. DJEGDJEGH

Maître de conférence

Examineur

Mr.

Maître de conférence

Examineur

- 2010/2011-

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu pour le courage et la volonté sans lesquels mon travail n'aurait jamais vu le jour.

J'exprime mes profonds remerciements à mon encadreur Dr. SOUKANE Sofiane, pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement à finir ce travail.

Je tiens à remercier le Directeur de laboratoire de recherche Monsieur BOUAYAD Nour Eddine et le directeur de centre de développement des technologies avancées (CDTA).

Mes vifs remerciements s'adressent à la lumière de ma vie, le plus beau don de Dieu, avec eux je partage le plus sacré lien spirituel et affectif : mes parents ; que Dieu les protège.

Dédicaces

Cette thèse est dédiée :

A mes chers parents pour leur affection, leurs souffrances et sacrifices, ainsi que pour leurs encouragements tout au long de mes études, que ce travail soit pour eux un témoignage de ma profonde reconnaissance et mon affection la plus chaleureuse.

A mes frères, mes sœurs, et mes tantes, mes oncles, mes cousins et mes cousines, à toute ma famille et mes amis, pour leur soutien.

A tous ceux et celles que j'aime et qui m'aiment.

Résumé

Les formes des espaceurs utilisés dans les modules membranaires influent fortement le flux résultant et donc la performance du module. Des études récentes ont prouvé que ces espaceurs contribuent également à l'augmentation de la chute de pression. Ce travail vise à améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'un écoulement de l'eau entre les membranes d'osmose inverse. Notre but a été de caractériser l'effet du type d'espaceur, de par sa géométrie tissée ou non tissée, sur la chute de pression, le coefficient de frottement et l'effet de cisaillement. Des procédures de simulation sous le code fluent v 3.2.16 ont été dressées. Les résultats de ce projet montrent, d'un côté, les avantages des espaceurs non tissés quant à la faible chute de pression qui en découle, en d'un autre côté leur incapacité à fournir un cisaillement relativement élevé qui permette de maintenir la surface des membranes propre, et donc une meilleure performance des osmoseurs.

Summary

The shapes of the spacers used in membrane modules strongly influence the resulting flow and therefore the performance of the module. Recent studies have shown that these spacers are also contributing to the increase in pressure drop. This work aims to improve knowledge and understanding of the phenomena involved in a flow of water between the reverse osmosis membranes. Our goal was to characterize the effect of the type of spacer, by its geometry woven or nonwoven, the pressure drop, the coefficient of friction and shearing effect. Simulation procedures with the code fluent v 3.2.16. have been drawn. The results of this project show, on the one hand, the benefits of non-woven spacers on the low pressure drop resulting on the other hand in their inability to provide a relatively high shear that will maintain the surface of own membranes, and thus improved performance of reverse osmosis.

ملخص

أشكال الفواصل المستخدمة في وحدات غشاء تؤثر تأثيراً قوياً على التدفق الناتج عن ذلك وبالتالي فهي تؤثر في أداء الوحدة النمطية. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن هذه الفواصل تساهم أيضاً في زيادة هبوط الضغط. هذا العمل يهدف إلى تحسين معرفة وفهم الظواهر ذات الصلة في تدفق المياه بين أغشية التناضح العكسي. كان هدفنا وصف تأثير نوع الفاصل من خلال دراسة هندسته المنسوجة و اللامنسوجة على انخفاض الضغط، معامل الاحتكاك وتأثير القص باستعمال الرمز 3.2.16V fluent. نتائج هذا المشروع تبين، من جهة، فوائد الفواصل غير المنسوجة على انخفاض ضغط و من جهة أخرى عدم قدرتها على توفير القص عالية نسبياً والتي ستحافظ على سطح الأغشية الخاصة، وبالتالي تحسين الأداء من التناضح العكسي.

Liste des tableaux et des figures

Tableau. I.1.Composition standard de l'eau de mer océanique

Tableau.III.1.Les travaux les plus importants effectués en 3D

Figure I.1. Représentation d'un module spirale

Figure I.2. Représentation d'un espaceur

Figure. I.3.Principe de l'osmose inverse

Figure .I.4.Polarisation de la concentration

Figure .II.1. Principe du calcul numérique

Figure.III.1. Vue de dessus d'un espaceur

Figure.III.2. Espaceur tissé et non-tissé : $L=5\text{mm}$ 90° , $\alpha=90$

Tableau III.2. Caractéristiques des géométries étudiées

Figure.III.3. La cellule unitaire de calcul (a) non tissé, (b) tissé

Figure.III.4. Maillage d'une cellule unitaire

Figure III.5. Les conditions aux limites

Figure.III.6.Lignes de courant : espaceur non-tissé, $L=5$, $V=0.5\text{m.s}^{-1}$

Figure.III.7. Lignes de courant : espaceur tissé, $L=5$, $v=0.5\text{m.s}^{-1}$

Figure.III.8. Chute de pression en fonction de la vitesse d'entrée du fluide

Figure.III.9. Friction en fonction du nombre de Reynolds

Figure III.10. Cisaillement sur les parois en fonction de la vitesse d'entrée du fluide

Figure.III.11. Cisaillement sur la membrane inférieure (SI) cas non tissé $L/D=10$ $v=0.5\text{m.s}^{-1}$.

Figure.III.12. Cisaillement sur la membrane inférieure (SI) cas tissé $L/D=10$ $v=0.5\text{m.s}^{-1}$

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	7
CHAPITRE I NOTIONS FONDAMENTALES SUR L'OSMOPSE INVERSE.....	9
I.1 Introduction	10
I.2 Généralités	10
I.2.1 Définition de dessalement	10
I.2.2 Composition de l'eau de mer.....	10
I.3 Définitions et descriptions	11
I.3.1 L'osmose inverse.....	11
I.3.2 Membrane d'osmose inverse.....	11
I.3.3 Les modules.....	12
I.3.4 Les espaceurs.....	12
I.4 Principe de l'osmose inverse	14
I.5 Pression osmotique	14
I.6 Mode d'action des membranes d'osmose inverse	15
I.7 Caractéristiques principales d'une unite d'osmose inverse.....	16
I.7.1 Le taux de conversion	16
I.7.2 La sélectivité	16
I.7.3 Débit spécifique ou densité de flux volumique.....	16
I.8 Mécanisme de transfert.....	17
I.8.1 Influence de la pression sur le taux de rejet	18
I.8.2 Sélectivité entre les différents ions	18
I.8.3 Influence de la température	18
I.9 Mise en œuvre et performance	19
I.9.1 Techniques d'amélioration des performances de procédés.....	19
I.9.2 Choix des conditions de fonctionnement	19

I.10	Transfert de matière et accumulation	21
I.10.1	Description de transfert de matière	21
I.10.2	Coefficient de transfert de matière	21
I.10.3	Polarisation de la concentration	22
I.10.4	Les conséquences de phénomène de polarisation de la concentration.....	24
CHAPITRE II LA MODELISATION NUMERIQUE		25
II.1	Principe de la modélisation numérique	26
II.2	Avantages et inconvénients	27
II.2.1	Avantages	27
II.2.2	Inconvénients	27
II.3	L’outil CFD utilise.....	27
II.4	Les équations constitutives.....	28
CHAPITRE III MODELISATION DES ESPACEURS		29
III.1	Introduction.....	30
III.2	L’objectif de travail.....	30
III.3	Analyse tridimensionnelle des espaceurs.....	32
III.3.1	Création des géométries et génération du maillage.....	34
III.3.2	Le calcul	36
III.3.3	Résultats et discussions	37
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		45

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément vital, précieux et rare. Son rôle économique et social est très important. Les ressources naturelles (conventionnelles) en eau douce sont limitées voire épuisées pour certaines régions, et le recours vers les ressources non conventionnelles s'impose. Parmi les alternatives on cite le dessalement de l'eau mer et de l'eau saumâtre qui constitue une solution adéquate pour palier à cette insuffisance, surtout dans les pays à climat aride et semi-aride, et étant donné l'importance des quantités d'eau salée disponibles dans le globe (plus de 97% de la quantité totale d'eau).

Les opérations de séparation par membranes (osmose inverse (OI), nanofiltration (NF), ultrafiltration (UF) sont des techniques potentielles pour palier à ces problèmes. En effet, comme les membranes jouent le rôle de barrières physiques, elles produisent avec une grande fiabilité une eau de qualité pour la consommation humaine et l'industrie. Malheureusement, ces procédés souffrent généralement de polarisation de concentration et d'encrassement causé par une accumulation progressive de matière ainsi que le dépôt des espèces dissoutes et/ou suspensions à proximité et sur la surface des membranes. Ces phénomènes limitent la productivité en réduisant le flux du perméat en augmentant le coût de l'énergie en raison d'une chute de pression plus importante. Un certain degré de contrôle de l'encrassement peut être atteint par le choix approprié des paramètres de fonctionnement et l'introduction des espaceurs entre les membranes.

Notre travail consiste à comprendre le comportement du fluide à l'intérieur des canaux inter-membranaires, et d'étudier l'influence de la géométrie des espaceurs sur le transport de masse au niveau des membranes d'osmose inverse et la chute de pression engendrée, par l'utilisation d'outil de dynamique des fluides computationnelle (CFD), en l'occurrence le code commercial *fluent*, en vue de contribuer à la performance du procédé.

**CHAPITRE I NOTIONS FONDAMENTALES
SUR L'OSMPSE INVERSE**

I.1 Introduction

Les opérations de filtration membranaire (OI, NF, UF) sont des procédés dynamiques de séparation en phase liquide par perméation à l'aide de membranes semi sélectives sous l'action d'un gradient de pression. La membrane permselective est une barrière qui permet certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare et qui en interdit d'autres ou, de façon moins restrictive, qui en favorise certains par rapport à d'autres

I.2 Généralités

I.2.1 Définition de dessalement

Le dessalement est pratiquement l'extraction de l'eau douce de l'eau de mer, à l'aide d'un moyen ou un procédé pour accroître les ressources en eau potable et diminuer les pénuries dans le monde [1]

I.2.2 Composition de l'eau de mer

La composition de l'eau de mer varie d'un milieu et/ou d'une saison à l'autre. Un échantillon prélevé près ou loin des cotés ne présente pas les mêmes caractéristiques. Pour cela, il est indispensable de caractériser l'eau de mer afin d'identifier ces différents constituants qui sont :

- sels dissous,
- métaux lourds,
- matières organiques.

Elle est caractérisée par une salinité élevée 35 à 50 g.l⁻¹ et une activité (chimique et biochimique) intense [2].

Cations	(mg/l)	Anions	(mg/l)
Sodium	11055	Chlorures	1948
Magnésium	1330	Bicarbonates	2769
Calcium	418	Bromures	146

Potassium	397	Fluorures	14
Strontium	14		
Salinité totale = 36,047(g/l)			

Tableau I.1 .Composition standard de l'eau de mer océanique[2]

I.3 Définitions et descriptions

I.3.1 L'osmose inverse

L'osmose inverse est le procédé par lequel l'eau passe au travers d'une membrane ultra fine, semi-perméable. Cette membrane n'est perméable qu'aux molécules relativement petites, telle que H₂O. C'est un procédé basé sur les propriétés semi-sélectives qu'ont certaines membranes permettant la diffusion préférentielle de l'eau et la rétention des éléments minéraux dissous, des colloïdes et des bactéries. Ce procédé abouti à de très bons résultats, car il élimine les polluants (trihalométhane, pesticides, insecticides, pcb...), les bactéries, mais aussi les minéraux contenues dans l'eau.[1]

I.3.2 Membrane d'osmose inverse

Les matériaux utilisés pour la fabrication des membranes d'osmose inverse sont de nature organique (polymères de deux classes, à savoir les acétates de cellulose et les polyamides) ou minérale. Les membranes à base de polyamide sont à la fois plus sélectives et plus perméables et plus utilisées aujourd'hui que les membranes en acétate. Elles se présentent le plus communément sous forme de modules spiraux.

Le bon rôle que peut jouer une membrane consiste en une haute perméabilité associée à une haute sélectivité ainsi qu'une bonne résistance thermique, chimique et mécanique, pour un coût d'installation et de renouvellement contrôlé, relativement à l'application/produit considérés. La perméabilité des membranes est liée la taille et à la densités des pores, mais aussi à l'épaisseur de la couche sélective.[3]

I.3.3 Les modules

Les membranes les plus répandues sont assemblées sous forme de modules regroupant généralement plusieurs membranes. Actuellement, quatre principaux types de modules sont commercialisés, il s'agit des modules spirales (les plus utilisés), les modules tubulaires et les modules fibres creuses [3].

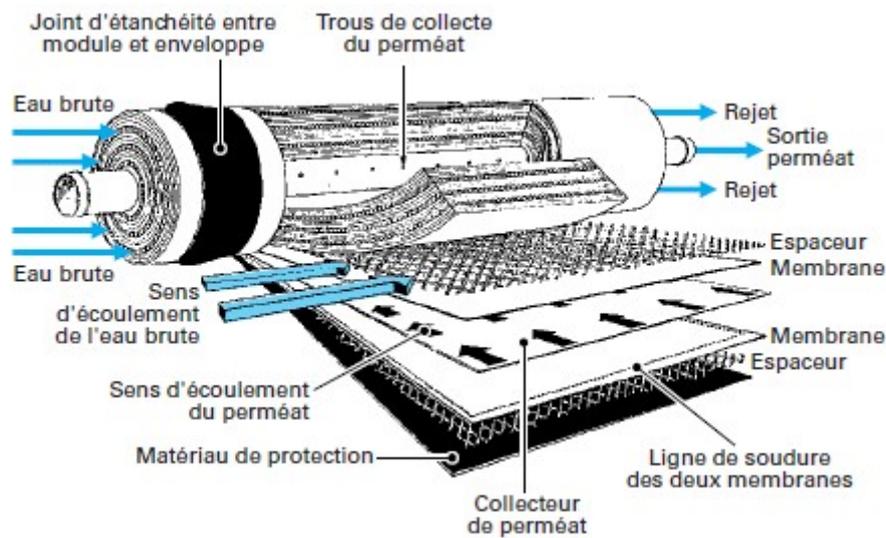


Figure I.1. Représentation d'un module spirale [4].

I.3.4 Les espaceurs

I.3.4.1 Définition

Les espaceurs sont considérés comme un composé de deux ensembles de droites parallèles tissées ou non-tissées de filaments (cylindriques ou carrés) en plastique, insérés entre les membranes d'osmose inverse, dans les modules en spirale (voir figure I.2). Deux types d'espaceurs sont commercialisés avec différentes caractéristiques d'espacement, à savoir, le diamètre du filament et la distance inter-filament. Ils provoquent des changements de direction du fluide qui s'écoule différemment dans le canal et sont par conséquent l'objet de plusieurs réflexions afin d'augmenter leur efficacité [5].

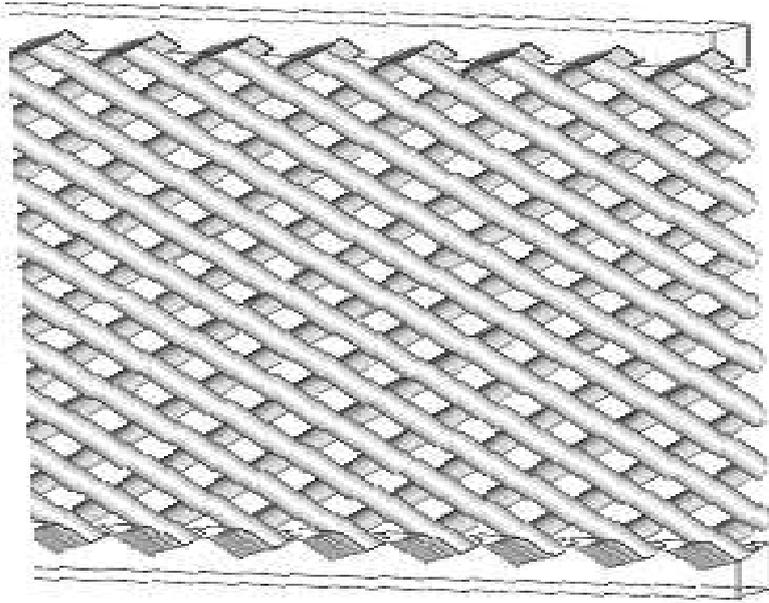


Figure I.2. Représentation d'un espaceur

I.3.4.2 Rôle des espaceurs

Ces espaceurs jouent un double rôle, à savoir :

- Garder les membranes adjacentes en écart de manière à former un canal d'alimentation.
- Contribuer à la perturbation du fluide essentiellement sur les surfaces des membranes, de façon à maintenir par l'effet de cisaillement la surface de la membrane relativement propre.

L'efficacité et la performance des membranes dépendent de la fiabilité des espaceurs pour augmenter le transport de masse loin de la surface de la membrane et de réduire la polarisation de concentration en augmentant la vitesse du fluide à la surface de la membrane [5].

I.4 Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si 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 p (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 [1]. (voir figure I.3)

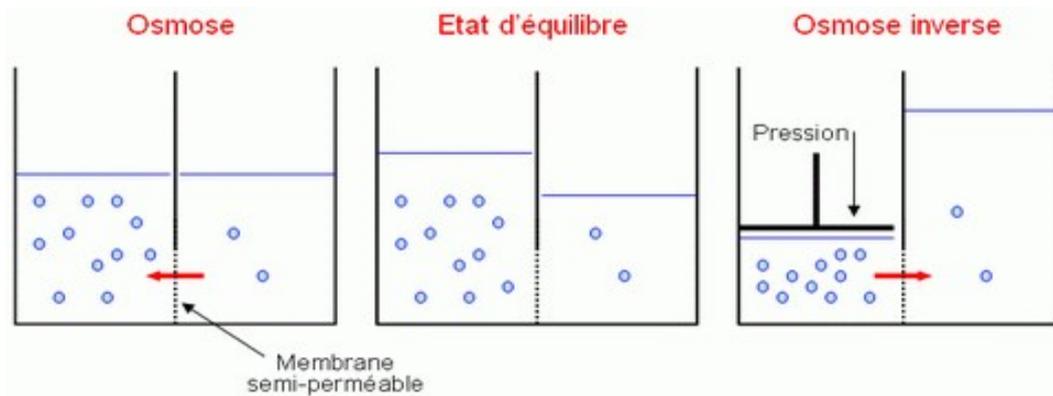


Figure. I.3.Principe de l'osmose inverse

I.5 Pression osmotique

En première approximation, la pression osmotique peut être calculée en assimilant le comportement des molécules du soluté à celles de molécules gazeuses. Dans le cas d'une solution diluée, on peut appliquer la loi des gaz parfaits. La loi de Van't Hoff exprime que la pression osmotique exercée par le soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait 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 [2].

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en soluté selon la relation [2]:

$$\pi = i.C.R.T \quad (1)$$

i : est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté

C : la concentration molaire du soluté (mol. l^{-1})

T : la température (K)

R : la constante des gaz parfaits ($0,0821.\text{bar. mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

π : est exprimée en bar.

A noter que cette relation est valable pour des solutions diluées.

I.6 Mode d'action des membranes d'osmose inverse

Les membranes d'osmose inverse sont composées d'une *couche mince*, ou *couche active*, ou encore *peau*, de faible épaisseur, comprise entre 0,1 et 1,5 μm , comportant des micropores; cette couche active est supportée par une ou plusieurs couches, à la fois plus poreuse et mécaniquement plus résistante.

C'est la couche mince qui contrôle le passage sélectif des substances. Il est couramment admis que la sélectivité et la perméabilité des membranes d'osmose inverse résultent des effets récurrents dus à la solubilité et à la diffusion des substances dans les matériaux membraneux. Ainsi, chaque constituant du milieu traité, solvant ou soluté, se dissout plus ou moins dans le matériau de la peau. Ensuite, les molécules ou ions dissous diffusent au travers du matériau de la couche mince sous l'action de la force motrice de transfert due au gradient de pression, essentiellement hydrostatique. En général, l'étape de dissolution est prépondérante, déterminant la nature des substances qui pourront traverser la membrane [6].

I.7 Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse

I.7.1 Le taux de conversion

Le taux de conversion Y est, par définition, la fraction du débit du liquide qui traverse la membrane :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0} \quad (2)$$

Q_p : débit de perméat,

Q_0 : débit de l'eau à traiter.

Le choix de Y (exprimé souvent en %) résulte d'un compromis entre des considérations économiques et des impératifs techniques.[1]

I.7.2 La sélectivité

La sélectivité d'une membrane est généralement définie par le taux de rétention ou le taux de rejet de l'espèce que la membrane est sensée retenir [1]:

$$r = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0} \quad (3)$$

Où

C_0 : est la concentration de l'espèce à retenir dans la solution.

C_p : est la concentration de la même espèce dans le perméat.

I.7.3 Débit spécifique ou densité de flux volumique

Le débit par unité de surface (densité de flux volumique), pour une sélectivité donnée, doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et l'investissement. Il est souvent exprimé en $l.h^{-1}.m^{-2}$. [1]

I.8 Mécanisme de transfert

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation-diffusion, i.e. Toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane.

Le flux massique de solvant J_1 ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et le débit volumique Q_p de solvant ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) traversant la membrane sont donnés par les relations suivantes:

$$J_1 = b.(C_0 - C_p) \quad (4)$$

$$Q_p = a.S / \rho.(\Delta P - \Delta \Pi) \quad (5)$$

Où

b : est la perméabilité moyenne de la membrane au soluté (m.s^{-1}).

C_0 et C_p sont respectivement la concentration massique en soluté de l'alimentation et du perméat de part et d'autre de la membrane (kg.m^{-3}) [1].

a : la perméabilité de la membrane au solvant ($\text{m}^{-1}.\text{s}$).

s : la surface de la membrane (m^2).

ρ : la masse volumique du solvant (kg. m^{-3}).

ΔP : la différence de pression de part et d'autre de la membrane.

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

Le flux massique du soluté J_2 ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de soluté traversant la membrane est donné par la relation:

$$J_2 = b.(C_0 - C_p) \quad (6)$$

Où

b : est la perméabilité moyenne de la membrane au soluté (m.s^{-1}), C_0 et C_p sont respectivement la concentration massique en soluté de l'alimentation et du perméat de part et d'autre de la membrane (kg.m^{-3}).[1].

I.8.1 Influence de la pression sur le taux de rejet

$$J_2 = b.(C_0 - C_p) \quad (7)$$

Pour les membranes hautement sélectives ($C_p \ll C_0$) les équations précédentes peuvent être combinées pour déterminer le taux de rejet de la membrane t_R [1].

Le principe de la conservation de masse nous permet d'écrire les relations (1.8) et (1.9) [1]:

$$J_2 = J_1.C_p \quad (8)$$

$$t_R = \frac{A(\Delta P - \Delta \Pi)}{A(\Delta P - \Delta \Pi) + B} \quad (9)$$

D'après l'équation (9) le taux de rejet d'une membrane augmente lorsque la pression efficace augmente et tend vers 1 lorsque la pression efficace tend vers l'infini. L'expérience montre que cela n'est pas tout à fait exact. En effet, il y a en général couplage des flux de solvants et de soluté, ce qui implique que, lorsque la pression efficace augmente, le débit de soluté augmente aussi. Il en résulte de cela que le taux de rejet ne tendra pas vers 1 pour les hautes pressions, mais plutôt vers une valeur inférieure. [1]

I.8.2 Sélectivité entre les différents ions

Pour un composé donné, la sélectivité d'une membrane d'osmose inverse, est d'autant plus important que ce composé est solvato c'est-à-dire que son énergie d'hydratation est élevée [1].

I.8.3 Influence de la température

Le débit de perméat à travers une membrane d'osmose inverse augmente avec la température d'environ 3% par degrés Celsius ce qui correspond approximativement à une augmentation proportionnelle à l'inverse de la viscosité de l'eau [1].

En effet la viscosité d'un liquide en fonction de la température est donnée par la relation [1] :

$$\mu = \mu_0 \exp \frac{E_0}{RT} \quad (10)$$

E_0 : l'énergie d'activation de liquide qui est égale pour l'eau à 15675 j.mol^{-1}

La variation de la viscosité de l'eau en fonction de la température peut être calculée par la relation [1] :

$$\frac{d\mu}{dT} = \mu_0 \left(\exp \frac{E_0}{RT} \right) \frac{E_0}{RT^2} \quad (11)$$

Soit :

$$\frac{d\mu}{dT} = \mu \frac{E_0}{RT^2} \quad (12)$$

En général les perméabilités des membranes sont données à 20°C. Pour connaître la perméabilité à T °C (ou K) l'équation précédente permet d'écrire dans le cas de l'eau [1]:

$$a_t = a_{20} \exp \left(6.433 - \frac{1885}{T} \right) \quad (13)$$

I.9 Mise en œuvre et performance

I.9.1 Techniques d'amélioration des performances de procédés

Une variété de techniques ont été développées afin de surmonter les problèmes de polarisation de concentration et de l'encrassement responsable de la baisse de performance induite dans les applications de filtration membranaire [5].

Il s'agit notamment:

- Choix des conditions de fonctionnement (pression, température.....)
- Des méthodes physiques tel que le lessivage de la surface de la membrane,
- Des méthodes hydrodynamiques, en l'occurrence l'introduction des espaceurs.

I.9.2 Choix des conditions de fonctionnement

La performance des procédés d'osmose inverse est reliée à plusieurs variables qui sont :

I.9.2.1 Choix de taux de conversion

Sur le plan économique, il est intéressant de choisir une conversion Y élevée pour diminuer simultanément la quantité d'eau brute à pomper (investissement plus faible pour les pompes, filtres...etc, et énergie consommée plus faible) et les rejets à éliminer.

Ce dernier point est important puisque le rejet dans le milieu naturel d'une eau saumure concentrée n'est pas toujours possible et son retraitement par lagunage ou même par distillation est alors indispensable.

Sur le plan technique, un taux de conversion élevé a pour conséquence une augmentation de la concentration en sels pouvant dépasser la limite de solubilité de certains d'entre eux entraînant l'entartrage des modules. Une autre conséquence est l'augmentation de la salinité de l'eau produite. En pratique, avec un prétraitement correct, le taux de conversion atteint 60 % en eau de mer et 90 % pour les eaux saumâtres.[7]

I.9.2.2 Choix de la pression

La sélectivité et le flux augmentent avec la pression; on choisira donc la pression la plus élevée compatible avec les recommandations du fabricant du module [6]. Notons cependant que, pour une vitesse de circulation donnée, le flux n'augmente pas proportionnellement à la pression en raison de la polarisation de concentration. Dans la pratique, la pression est fixée entre 55 et 75 bars en dessalement d'eau de mer et entre 8 et 25 bars en dessalement d'eau saumâtre. Si la température augmente, le flux augmente d'environ 3% par degré : il faudra veiller éventuellement à diminuer la pression en cas d'augmentation forte de la température [7].

I.9.2.3 Importance de prétraitement

Le choix du prétraitement est fondamental dans une filière incluant des membranes haute pression (osmose inverse ou nanofiltration) car il permet de protéger la membrane vis-à-vis du colmatage minéral, organique ou bactérien qui engendrerait rapidement un dysfonctionnement de l'étape membranaire, s'il s'avérait insuffisant[8].

Le prétraitement est destiné à [8] :

- réduire très fortement la turbidité de l'eau brute ainsi que les matières en suspension qui y sont associées,
- éliminer toute forme d'hydrocarbures présents dans l'eau brute,
- éliminer les algues lors de leur développement saisonnier,
- réduire très fortement le pouvoir colmatant de l'eau en traitant par adsorption, absorption ou précipitation toutes les substances minérales ou organique qui y prennent part.

I.9.2.4 Nettoyage

Même avec un prétraitement bien conçu et des conditions opératoires bien choisies, on constate toujours une altération des performances, et des nettoyages chimiques doivent être prévus régulièrement [9].

I.10 Transfert de matière et accumulation

On a vu jusqu'à présent que le bon fonctionnement des procédés à membranes est relatif au bon rôle que peut jouer la membrane. L'amélioration des performances des membranes n'est possible qu'avec une meilleure compréhension des phénomènes de transferts de matière sur celle-ci, afin d'arriver à traduire la vitesse d'accumulation de la matière sur la membrane. A cette fin, les bases théoriques qui permettent de décrire le transfert de soluté à la surface d'une membrane sont résumées dans le paragraphe suivant.

I.10.1 Description de transfert de matière

Les phénomènes qui gèrent le transfert de matière (solvant et solutés) dans les procédés de filtration membranaire sont classiquement d'ordres diffusif et convectif, souvent fortement couplés et dépendant des paramètres opératoires que sont la différence de pression transmembranaire, de l'écoulement tangentiel, des propriétés des fluides et bien entendu de celles des membranes utilisées.

I.10.2 Coefficient de transfert de matière

Le coefficient de transfert de matière k a été conceptualisé en génie des procédés afin de traduire un flux de matière à une interface. Pour une espèce donnée, le coefficient de transfert de matière k dépend des propriétés physico-chimiques de la solution (viscosité, coefficient de diffusion...) et des conditions hydrodynamiques du système.[10] Il peut être relié à l'épaisseur de la couche limite de diffusion δ qui définit la zone dans laquelle est localisé le gradient de concentration à l'interface par la relation suivante (1.14)[10]:

$$k = D_i / \delta \quad (14)$$

Avec D_i (m^2s^{-1}) :le coefficient de diffusion de l'espèce.

Le coefficient de transfert est aussi relié empiriquement, au nombre de Sherwood, aux paramètres hydrodynamiques (nombre de Reynolds) et physico-chimiques (nombre de Schmidt) du système par des corrélations adimensionnelles (1.15)[10]:

$$\frac{Kd_h}{D} = Sh = \alpha_1(Re)\alpha_2(Sc)\alpha_3 \quad (15)$$

Avec,

Sh : nombre de Sherwood,

Re : nombre de Reynolds,
$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (16)$$

Sc = $\mu/(pd)$ nombre de schmidt,

d_h (m) : diamètre hydraulique,

V (m/s) : vitesse moyenne du fluide

ρ (kg/m³) : masse volumique du fluide

μ (Pa.s) : viscosité dynamique du fluide,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: des coefficient déterminées expérimentalement.

Le nombre de Sherwood est une mesure du transfert de matière convectif rapporté au transfert de masse diffusif ou moléculaire. Ces relations montrent que le coefficient de transfert de matière (et par la même le flux) peut être amélioré en augmentant la vitesse de passage du fluide U pour un diamètre hydraulique donné (expression de Re) et pour un débit donné, en diminuant le diamètre hydraulique.[10]

I.10.3 Polarisation de la concentration

La particularité de la filtration membranaire, par rapport à la filtration classique, réside dans le fait que l'on fait circuler, tangentiellement à la membrane, le liquide à filtrer de manière à limiter, par effet de cisaillement hydrodynamique en paroi, l'accumulation de la matière retenue. Ce dernier mécanisme, lorsqu'il se développe en solution, est appelé polarisation de concentration et lorsqu'il se traduit par un dépôt de matière sur la membrane, provoque un colmatage de cette dernière [9].

Ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2), du sulfate de calcium (CaSO_4)... [1].

Le facteur de polarisation est défini par la relation (1.17) [10]:

$$\lambda = \frac{C_m}{C_0} \quad (17)$$

Avec :

C_m : concentration de soluté arrêtée dans la membrane.

C_0 : concentration moyenne de soluté dans la solution.

En régime stationnaire, le bilan de matière relatif à l'espèce retenue, dans la portion de couche limite comprise entre la membrane et la cote x (figure I.4), nous permet d'écrire la relation :

$$J_1 C_{(x)} - D_2 \frac{dC}{dx} = J_1 \cdot C_p \quad (18)$$

Où

$J_1 C_{(x)}$: Densité de flux massique convectif.

$D_2 \frac{dC}{dx}$: Densité de flux massique diffusif.

$J_1 \cdot C_p$: Densité de flux massique transféré à travers la membrane.

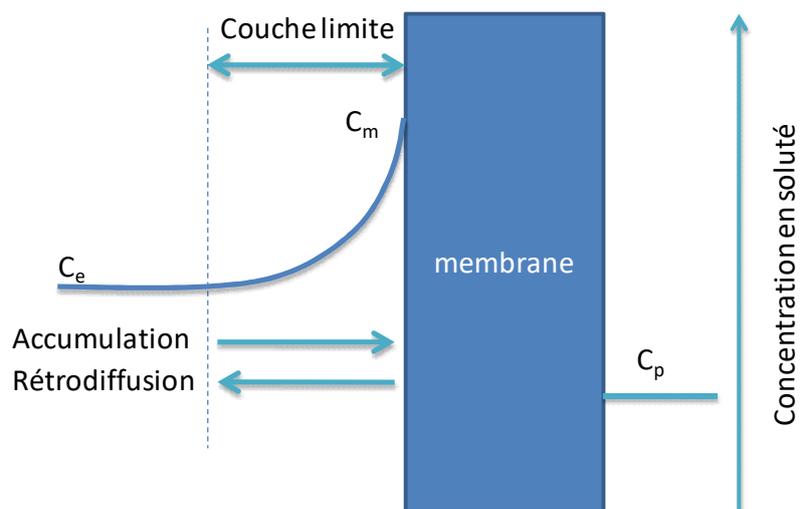


Figure .I.4. Polarisation de la concentration

I.10.4 Les conséquences de phénomène de polarisation de la concentration

- La baisse dans la performance.
- La chute de pression (perte de l'énergie).
- Le colmatage, donc diminution de la durée de vie et augmentation de la fréquence de nettoyage.
- La réduction de la qualité de l'eau produite.

C'est pour ces raisons que plusieurs études ont été orientées vers ces problèmes afin de proposer des solutions et mieux définir ce phénomène très délicat [11].

CHAPITRE II LA MODELISATION NUMERIQUE

II.1 Principe de la modélisation numérique

Le principe du calcul numérique consiste à résoudre numériquement les équations différentielles aux dérivées partielles (EDP) ou des systèmes d'EDP, qui régissent des problèmes physiques complexes, tout en les transformant, à l'aide d'une méthode de discrétisation à un système d'équations algébriques, tel qu'illustré sur la figure II.1.

Différentes méthodes numériques permettent le passage du domaine continu vers un domaine discret. On peut citer, la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, et la méthode des volumes finis. La principale différence entre ces quatre méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisation. Sur la base de cette philosophie un certain nombre de codes commerciaux sont apparus, pour répondre aux besoins de l'ingénierie [12].

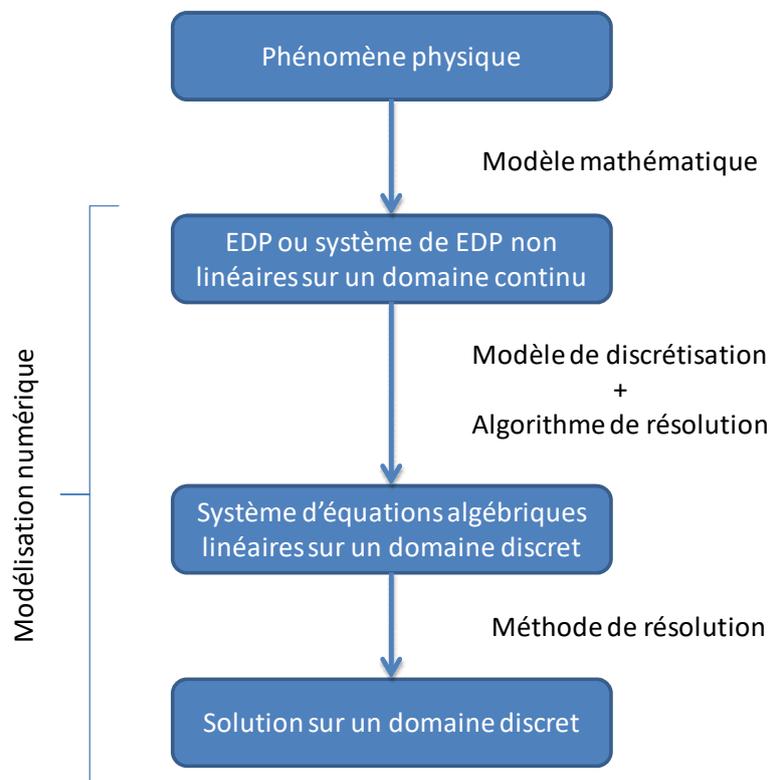


Figure .II.1. principe du calcul numérique [12]

II.2 Avantages et inconvénients

II.2.1 Avantages

Le calcul numérique :

- Permet le calcul d'une solution numérique pour la majorité des problèmes pratiques ayant un modèle mathématique,
- les coûts de calcul sont faibles, ayant une tendance à la baisse,
- présente de la rapidité (permet de modifier la géométrie, les conditions aux limites, etc.),
- à l'aide d'interpolations appropriées, présente une information complète sur tous les champs, en tout point et à tout instant,
- à la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles,
- à la possibilité de simuler des conditions idéales.

II.2.2 Inconvénients

- difficulté pour sélectionner la "bonne" solution en cas de solutions multiples au problème mathématique;
- Souvent la non-disponibilité de certains paramètres physiques.

II.3 L'outil CFD utilise

Gambit et *fluent* sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec *Gambit* à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec *fluent*. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique,...etc) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations sur tout types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent, etc...). Le logiciel *Gambit* est un mailleur 2D/3D; pré- processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie complexe d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics), il regroupe trois fonctions principales : définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie à partir d'un outil de CAO),

le maillage et sa vérification, la définition des frontières (types de conditions aux limites) et définition des domaines de calculs. Il génère des fichiers *.msh pour *fluent*. *Fluent* est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques et de matière avec réactions chimiques [12].

II.4 Les équations constitutives

Dans cette recherche, les simulations ont été effectuées à l'aide du code commercial *fluent*. Les équations qui régissent l'écoulement incompressible de fluide dans le canal rempli d'espaceurs sont les équations de Navier-Stokes. La formulation différentielle de ces équations en coordonnées cartésiennes s'écrit :

Equation de continuité [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (19)$$

Equation de bilan de la quantité de mouvement [13] :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\overrightarrow{\text{grad}}(p) + \text{div}(\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{f} \quad (20)$$

CHAPITRE III MODELISATION DES ESPACEURS

III.1 Introduction

Les espaceurs sont conçus pour créer des changements de direction dans l'écoulement à travers les membranes. Ces changements de direction ont pour objectif la réduction de la polarisation de concentration et du colmatage dans les membranes. Les formes des espaceurs utilisés dans les modules influent fortement le flux de matière résultant et donc la performance du module. Plusieurs travaux se sont concentrés sur l'élaboration des procédures pour la modélisation/simulation des phénomènes physiques intervenant dans ces espaces en utilisant des codes de calcul puissants, basés sur la CFD, tels que *Phoenix*, *CFX*, *fluent*...etc. Ces outils ont offert de nouvelles perspectives d'analyse destinées à réduire la polarisation de concentration.

III.2 L'objectif de travail

L'objectif de ce travail s'inscrit donc dans une logique de poursuite des travaux de simulation déjà entrepris pour analyser le comportement du fluide entre les espaceurs en utilisant le code de calcul *fluent* [14]. Les efforts de simulation antérieurs se sont concentrés sur la détermination de formes d'espaceurs optimales et de conditions opératoires favorables à la réduction du phénomène de polarisation de concentration et de l'encrassement, et par conséquent une meilleure performance des membranes d'osmose inverse. De nombreux travaux dans ce sens ont été menés en 2D, en revanche en 3D les études sont moins nombreuses mais relativement récentes [14]. Les travaux les plus importants effectués en 3D [14] sont regroupés dans le tableau suivant :

Référence	Importance	Observations
Karode et Kumar [15]	Etude hydrodynamique et estimation des pertes de charge dans les unités de la membrane.	Sensibilité a la résolution des maillages utilises.
Li et al. [16]	Recherche de géométries de mailles optimales	Ne décrit pas la mise en œuvre des conditions aux limite périodiques pour le soluté.
Li et al. [17]	Propose des conceptions multicouches.	Sensibilité a la résolution des maillages utilises.
Ranade et Kumar [18]	Prise en compte de la courbure.	Mise en œuvre des conditions imprécise pour la périodicité. Utilisation des modèles de turbulence pour les régimes étudiés est discutable.
Koutsou et al. [19]	Effet de l'écoulement sur le mur. Estimation des cisaillements.	Condition de périodicité discutable pour le transitoire.
Koutsou et al. [20]	Corrélations pour le nombre de Sherwood en fonction du nombre de Reynolds et les paramétrés géométriques de l'espaceurs.	Validation du transport de masse.
Santos et al. [21]	Propose des modifications du coefficient de frottement	Pas de transfert de masse périodiques sur la membrane. Conditions non représentatives de l'ensemble du module a membranes.
Shakaib et al. [22]	L'analyse du cisaillement détermination du Reynolds critique a partir duquel l'écoulement devient instable.	Modélisation de cellules multiples augmentant Ainsi la demande de calcul sans apport pertinent.
Fimbres-Weihs and Wley [23]	Effets de la forme sur le transfert de masse.	Décrit la condition de périodicité pour le transport de soluté en 3d. Etude limitée au régime laminaire.

Tableau.III.1.Les travaux les plus importants effectués en 3D

III.3 Analyse tridimensionnelle des espaceurs

L'approche ici vise à analyser le transport de quantité de mouvement dans deux familles d'espaceurs, à savoir, les espaceurs tissés et les espaceurs non-tissés et leur effet sur le transfert de masse sur les parois des canaux membranaires et sur la différence de pression générée par chaque géométrie. Des simulations tridimensionnelles à l'échelle de la maille de l'espaceur ont été réalisées. Une gamme de géométries tridimensionnelles est simulée afin d'évaluer les avantages et inconvénients de chaque type d'espaceur.

Les espaceurs tel que cité précédemment sont introduits dans le but d'augmenter le transfert de matière sur les parois de la membrane, et par conséquent améliorer la production des modules membranaires, tout en évitant une hausse des pertes de charge. Dans cette étude les espaceurs sont composés de deux ensembles de filaments cylindriques parallèles tissés ou non-tissés, dont les caractéristiques géométriques sont la distance entre les filaments parallèles(L) et le diamètre du filament (D), ainsi que l'angle β entre les filaments. Relativement à l'écoulement, on définit un angle d'attaque α et l'épaisseur du canal d'écoulement $H=2D$.

La première étape de modélisation consiste à considérer les possibilités de simplification de la géométrie à étudier. En effet, la prise en compte de tout l'espaceur mènera à des temps de calcul irréalistes causés par un nombre d'éléments trop élevé. Il serait donc préférable de réduire la zone d'étude à un espace représentatif des caractéristiques globales de l'espaceur. La figure 6 montre une vue de dessus d'un espaceur typique. On remarque que le même schéma se répète (zone en pointillés) sur toute la surface de l'espaceur. Des simulations détaillées en 3D en utilisant l'approche cellule unitaire avec des conditions de périodicité est un choix naturel.

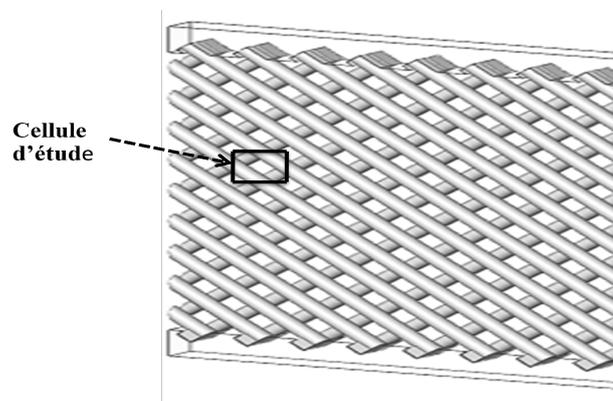


Figure.III.1. Vue de dessus d'un espaceur

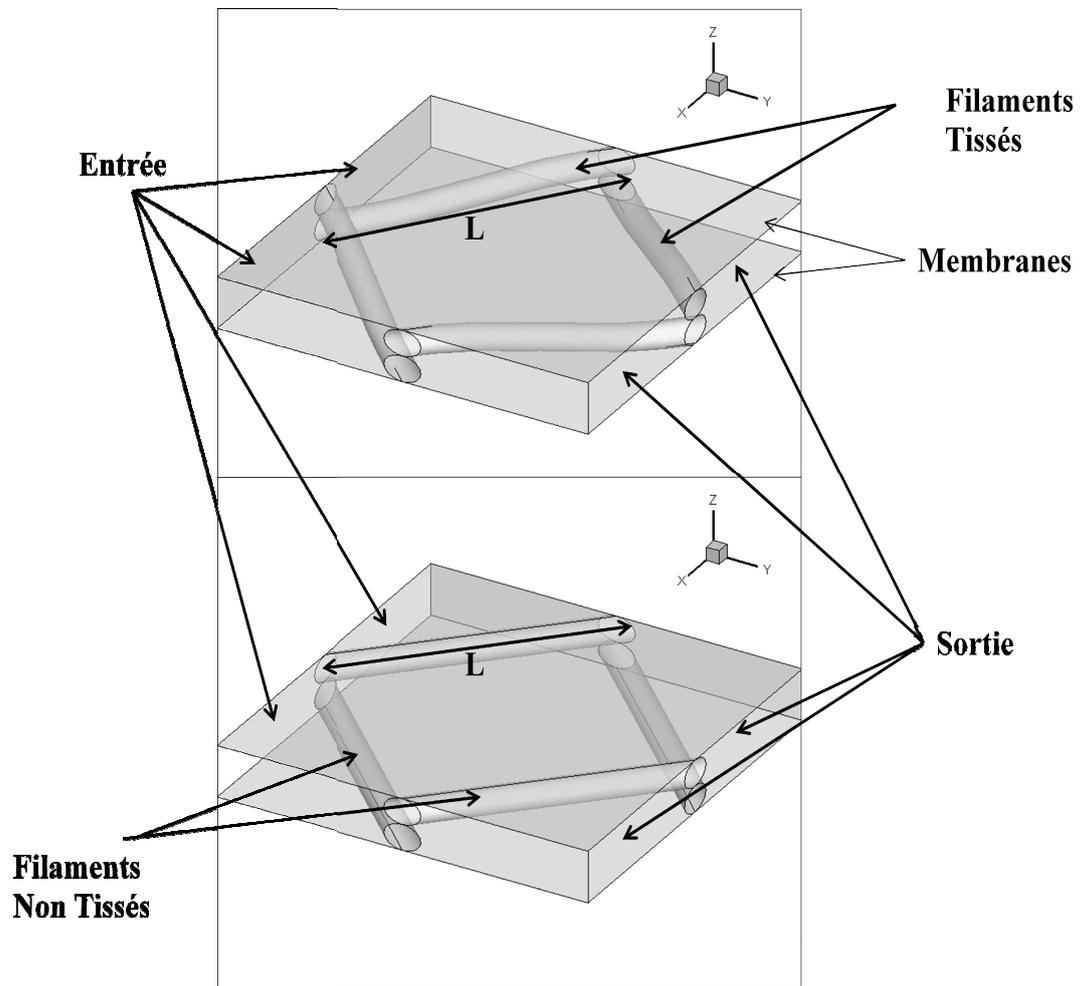


Figure.III.2. Espaceur tissé et non-tissé : $L=5\text{mm}$ 90° , $\alpha=90^\circ$

Type	$D=0.5\text{mm}, \beta=90^\circ, \alpha=90^\circ$		
	L		
Tissé	4	5	6
Non tissé	4	5	6

Tableau III.2. Caractéristiques des géométries étudiées.

III.3.1 Création des géométries et génération du maillage

La première étape dans un processus de simulation consiste à générer le maillage de la géométrie à analyser. La génération du maillage s'effectue dans le mailleur *Gambit* en plusieurs étapes, à savoir :

- Construction de la géométrie destinée à supporter le maillage.
- Insertion des caractéristiques des volumes générés.
- Insertion des types de conditions aux limites.
- Génération du maillage.
- Export du maillage vers le solveur *fluent*.

La construction de la géométrie ne passe pas par une méthodologie fixe et dépend de la créativité de l'utilisateur. L'outil *Gambit* se base surtout sur une approche « bottom-up » où toutes les entités topologiques de différentes classes sont disponibles (points, lignes, splines, surfaces, volumes). Dans notre cas, la géométrie du système est une maille de l'espaceur dont la construction a été effectuée comme suit :

1. Création de la base du volume subdivisée en plusieurs surfaces.
2. Deux extrusions consécutives suivant l'épaisseur du canal, avec création automatique des volumes.
3. Création de repères locaux pour la construction des portions de filaments.
4. Création de la ligne centrale des filaments (segment pour le non-tissé et « nurb » pour le tissé).
5. Création de la base des filaments.
6. Extrusion des bases selon les lignes centrales pour la création des volumes des filaments.
7. Retrancher les volumes des filaments du volume de canal créé dans l'étape 2.

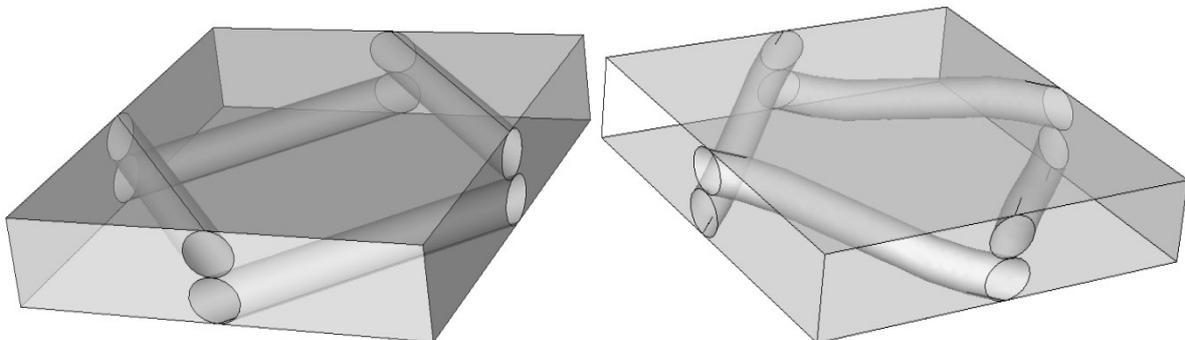


Figure.III.3. La cellule unitaire de calcul (a) non tissé, (b) tissé

L'insertion des types de conditions aux limites est une étape importante dans la préparation du calcul avant le transfert vers le solveur. Ces conditions aux limites sont relevées des conditions de fonctionnement du procédé. On opte pour :

- Imposition d'un profil plat de vitesse de fluide à l'entrée.
- Les portions de membranes et de filaments présentent des conditions de non glissement.
- Les faces latérales ont des conditions de périodicité.
- La sortie n'a pas de condition particulière ni en vitesse ni en pression.

Une étape importante avant la création du maillage est la spécification des faces de périodicité. Un maillage structuré (hexaèdres) des espaceurs est impraticable dû à la complexité introduite par l'intersection des volumes cylindriques (déformés pour le tissé) et le parallélépipède représentant le canal inter-membranaire. Le maillage généré est donc composé de tétraèdres, les éléments tridimensionnels qui épousent le mieux les formes géométriques complexes.

Plusieurs tests numériques ont été effectués avec différentes résolutions de maillage. Un critère de raffinement de 0,1 est retenu. Ce critère résulte en un nombre total d'éléments de l'ordre de 20000, à partir duquel les résultats de simulation sont identiques. Le maillage obtenu est ainsi exporté vers le solveur *fluent*.

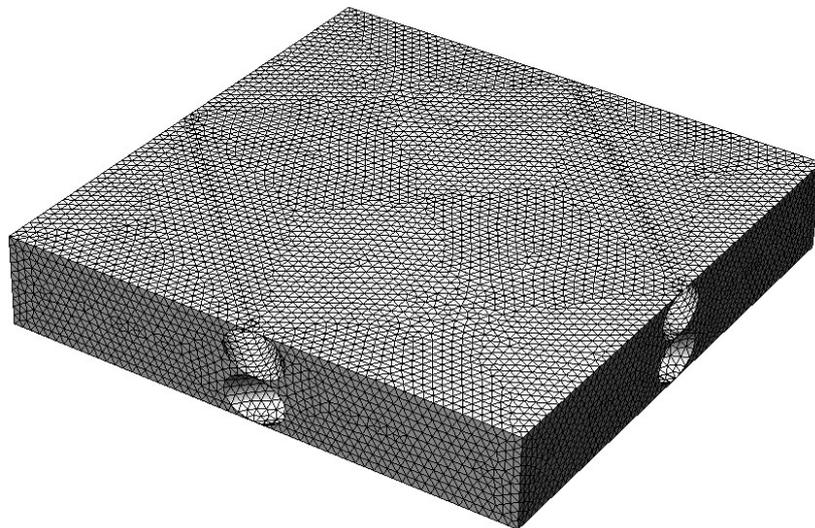


Figure.III.4. Maillage d'une cellule unitaire

III.3.2 Le calcul

Les calculs sont réalisés grâce au logiciel *fluent* [26], qui résout les équations de Navier-Stokes couplées au transport de chaleur et de matière par la méthode des volumes finis et visualisés par Tecplot [27] .

Fluent offre deux modes de calcul : le mode double précision et le mode simple précision. Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. C'est pour cette raison que le mode simple précision est utilisé. L'utilisation de *fluent* passe par des étapes importantes, à savoir :

- Choix du solveur, qui dans notre cas est le solveur implicite stationnaire.
- Choix du modèle visqueux. Dans cette analyse l'écoulement est laminaire.
- Choix du fluide à transporter. L'étude étant exclusivement hydrodynamique, le fluide choisit sera de l'eau pure.
- Imposition des conditions aux limites. Un profil plat de vitesse de module (compris entre 0.1 et 0.5 m.s^{-1}) est imposé à l'entrée du canal d'écoulement (voir figure III.4).
- Initialisation des champs de calcul.
- Choix des critères d'arrêt. Une précision est choisie pour la satisfaction de l'équation de continuité et les composantes de la vitesse.

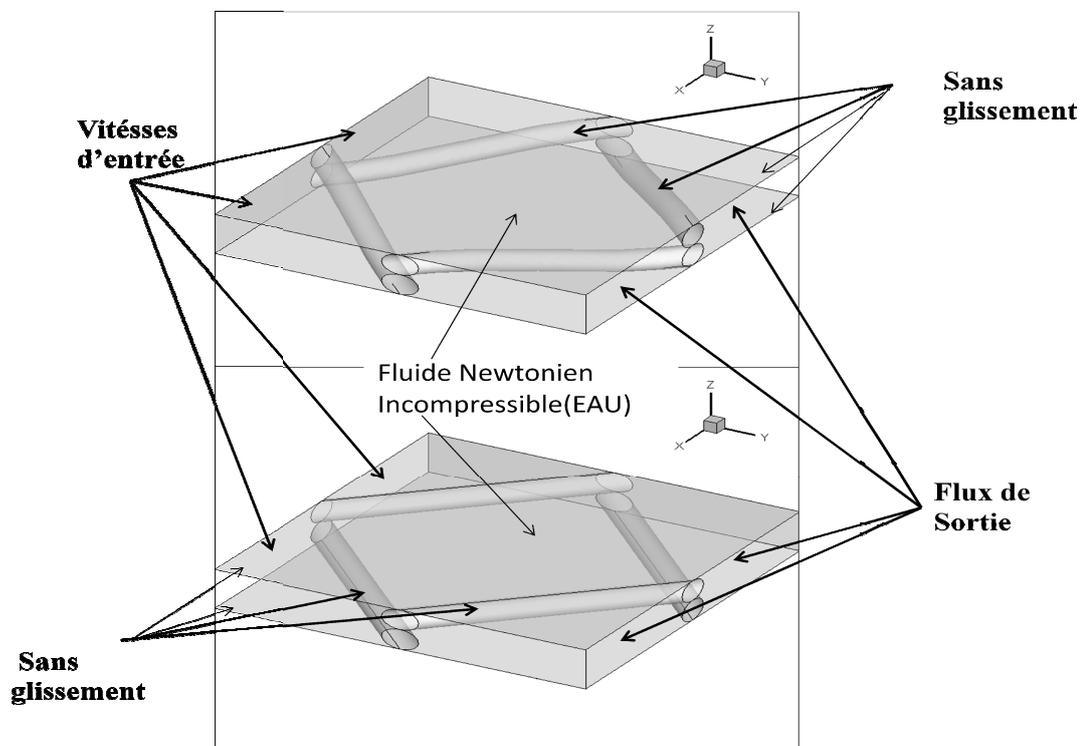


Figure III.5. Les conditions aux limites

III.3.3 Résultats et discussions

III.3.3.1 Le calcul de nombre de Reynolds

On le définit de la manière suivante :

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (21)$$

Avec

V - vitesse du fluide [m/s]

L - dimension caractéristique [m] dans notre cas L= le diamètre [19].

μ - viscosité dynamique du fluide [Pa.s] ou Poiseuille [P_l]

III.3.3.2 Le calcul de coefficient de frottement

$$Cd = 2\Delta p d_h / \rho(V / \varepsilon)^2 L \quad [24] \quad (22)$$

Avec,

d_h :le diamètre hydraulique

$$d_h = 4A / P \quad (23)$$

A(m²) : est la surface de la diagonale de section de la cellule de calcul [19]

$$A = 4.D.L \sin(B / 2) \quad (24)$$

P(m) : le périmètre de la diagonale de section de la cellule de calcul [19]

$$P = 2D + L.\sin(B / 2) \quad (25)$$

V (m/s):la vitesse moyenne

ε : Porosité d'une cellule d'espaceur

L'exploitation des résultats de calcul se fait à l'aide de post-processeurs tels que Enight CFD et Tecplot, destinés à récupérer les résultats de CFD. Ces outils permettent une analyse détaillée des écoulements avec une importante aptitude de calcul moyennant les variables primaires (vitesses d'écoulement et pression). Ainsi, on peut estimer des moyennes surfaciques ou volumiques, des gradients, la vorticité et ces composantes...etc.

III.3.3.3 Analyse de l'écoulement

L'analyse de l'écoulement se fait naturellement par l'observation des lignes de courant. Les deux cas tissés et non tissés sont représentés respectivement sur les figures III.5 et III.6 pour un rapport d'espace inter-filamentaire sur le diamètre du filament de 10.

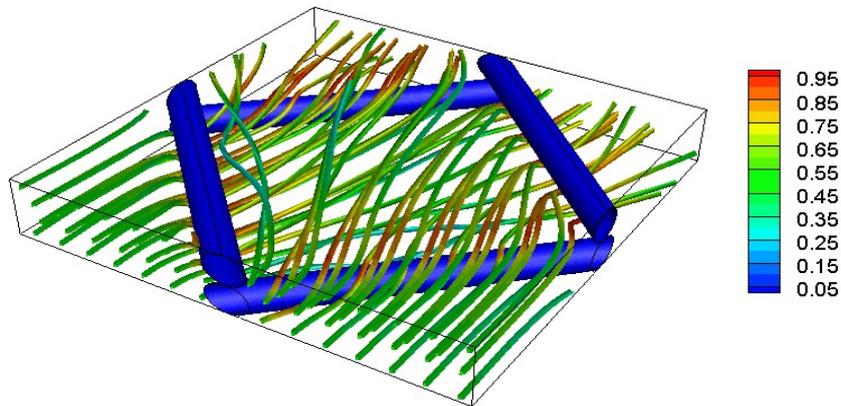


Figure.III.6. Lignes de courant : espaceur non-tissé, $L=5$, $V=0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

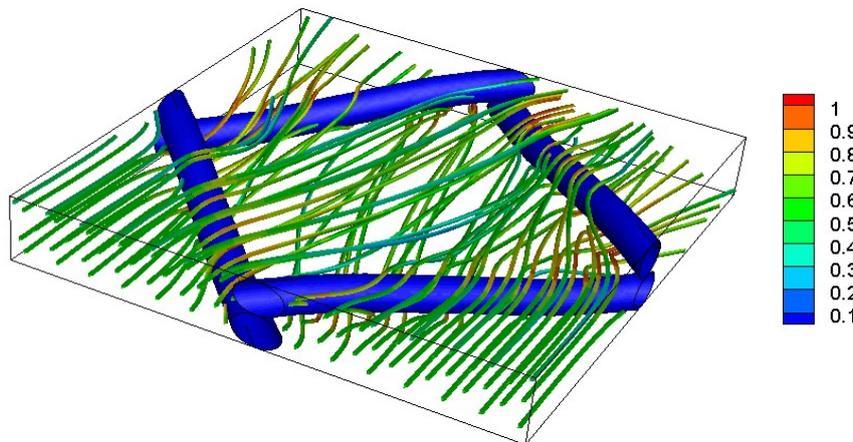


Figure.III.7. Lignes de courant : espaceur tissé, $L=5$, $v=0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Les lignes de courant sont représentées par des rubans dont la couleur correspond au module de la vitesse (voir légende). Les lignes démarrent de l'entrée du domaine de calcul pour contourner les filaments et sortir majoritairement par la surface de sortie. Une augmentation de la vitesse est observée avec le rétrécissement de la section d'écoulement au passage au dessus et en dessous des filaments. Bien que non représentée sur cette figure, la déformation des lignes de courant prédissent une vorticité plus importante dans les cas tissés.

III.3.3.4 La chute de pression

Dans le cas de la géométrie non tissée, les résultats de la chute de pression ont présenté une certaine similarité aux travaux existants. En effet, la pression augmente proportionnellement à la vitesse du fluide à l'intérieur du canal, et est inversement proportionnelle à la distance inter-filament.

Pour les géométries tissées, les résultats montrent aussi comme dans le non tissé, que la chute de pression augmente proportionnellement à la vitesse du fluide à l'intérieur du canal, et inversement à la distance inter-filament. Mais on note surtout que la chute de pression se manifeste d'avantage dans les géométries tissées que dans les géométries non tissées. Plus précisément, pour une même longueur inter-filament, la chute de pression est élevée dans les géométries tissées que dans les géométries non tissées. Cela est dû à la singularité provoquée par la présence des filaments, présentant un obstacle quasi-diagonal pour l'écoulement du fluide.

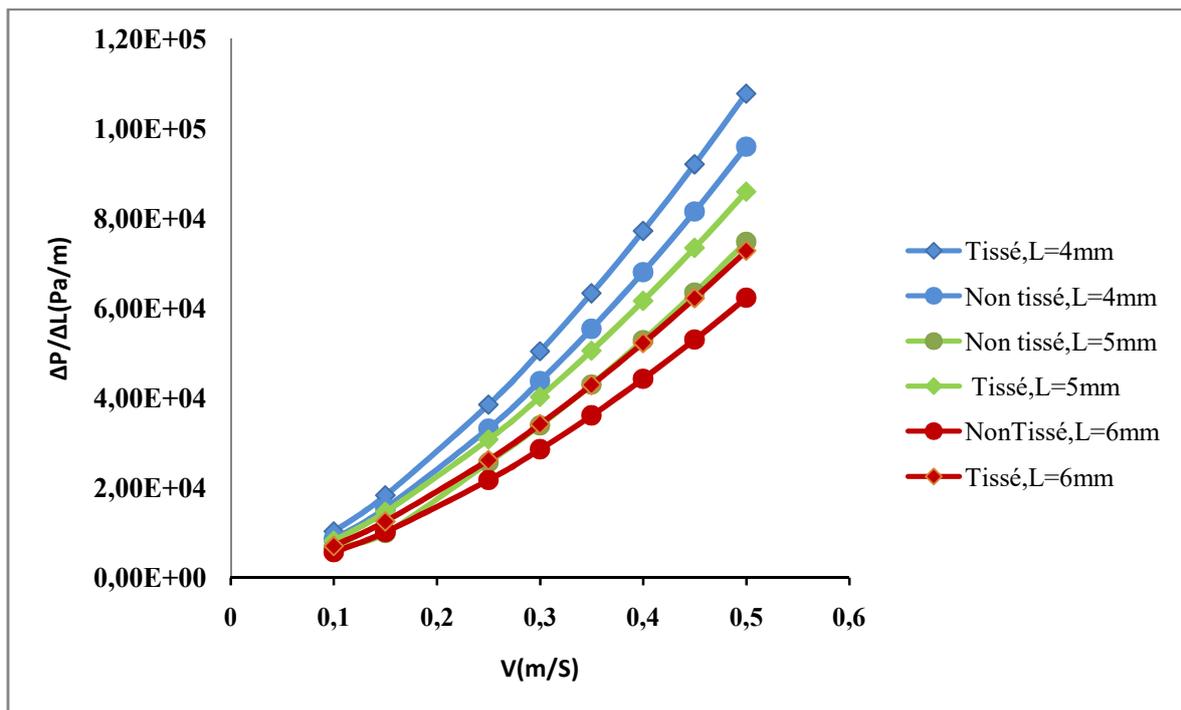


Figure.III.8. Chute de pression en fonction de la vitesse d'entrée du fluide

III.3.3.5 La friction

Dans le type de géométrie non tissée, le coefficient de frottement augmente inversement à de la distance inter-filament comme cela est montré sur la figure III.8. Aussi, il est inversement proportionnel à la vitesse du fluide à l'intérieur du canal et par conséquent au nombre de Reynolds. Ceci peut être expliqué par le fait de la diminution de l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique, en raison de l'augmentation de la vitesse.

Par rapport à la géométrie tissée, les résultats sont analogues au cas non tissé. Ainsi, on observe une augmentation du coefficient de frottement lorsque la distance inter-filament diminue et une diminution du coefficient avec l'augmentation du Reynolds pour les raisons citées précédemment. La comparaison des coefficients de frottement entre les géométries tissées et non tissées montre que le tissé donne plus de frottement par rapport au non tissé. En effet, pour la même longueur inter-filament et pour les mêmes conditions opératoires, le coefficient de frottement est plus élevé dans le tissé, ce qui confirme les résultats de la chute de pression. Entre autres, d'après ces résultats, on constate qu'en matière de perte d'énergie traduite par l'importance de la chute de pression et au frottement, les non tissés présentant une faible chute de pression sont plus économiques. Cette première conclusion nous permet de dire que l'introduction des espaceurs tissés nécessite une élévation des énergies d'exploitation donc du coût d'exploitation.

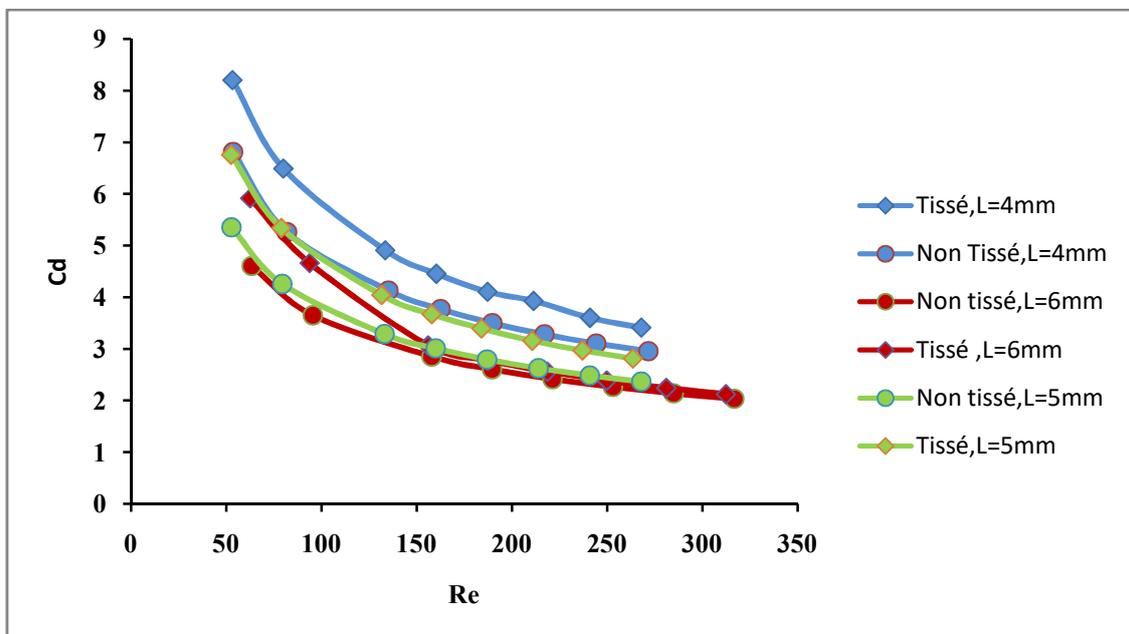


Figure.III.9. Friction en fonction du nombre de Reynolds

III.3.3.6 Le cisaillement

L'estimation des effets de cisaillement au niveau des parois, (Figures III.9, III.10 et III.11) montre qu'ils augmentent avec la vitesse du fluide à l'intérieur des canaux d'alimentation, et sont inversement proportionnels à la distance inter-filament en raison de la diminution de la perturbation du fluide avec l'écart de l'espaceur. Contrairement à la chute de pression et au frottement, la comparaison montre que le tissé présente plus de cisaillement par rapport au non tissé. Le cisaillement favorise le transfert de matière sur les membranes et laisse les membranes propres, autrement dit il limite le phénomène de polarisation de concentration au niveau des membranes, et par conséquent un rendement plus élevé (meilleure performance, qualité supérieure du produit, une réduction des coûts relatifs au nettoyage, renouvellement des membranes, énergies de fonctionnement...).

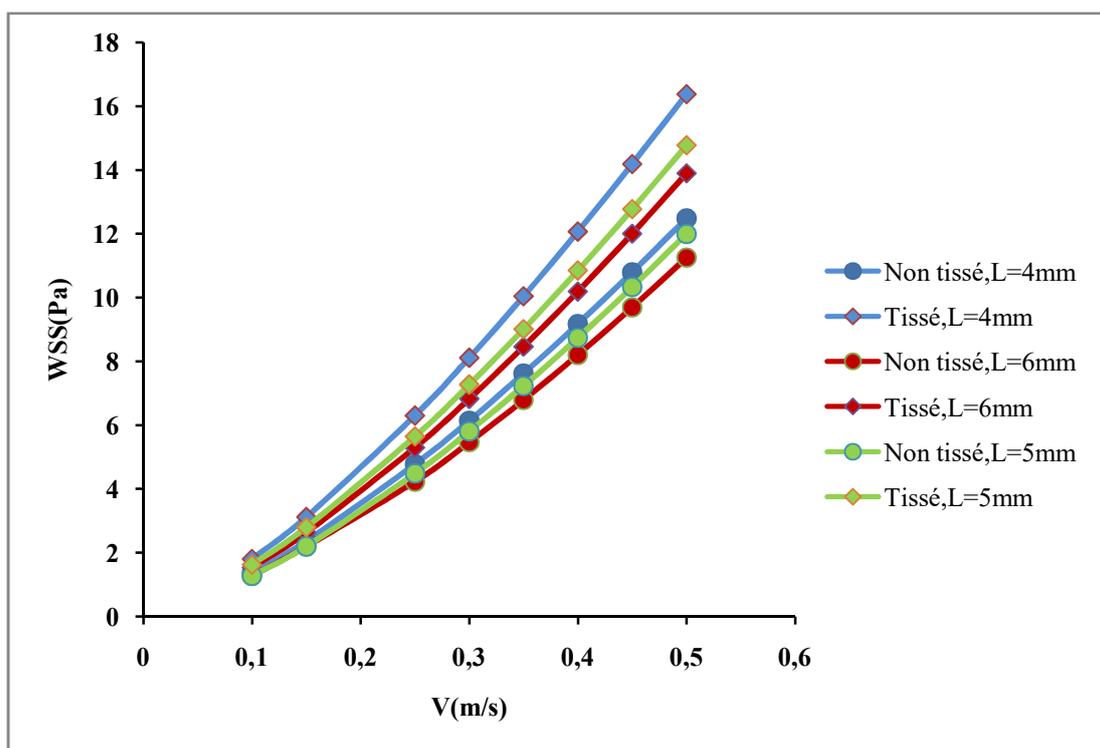


Figure III.10. Cisaillement sur les parois en fonction de la vitesse d'entrée du fluide

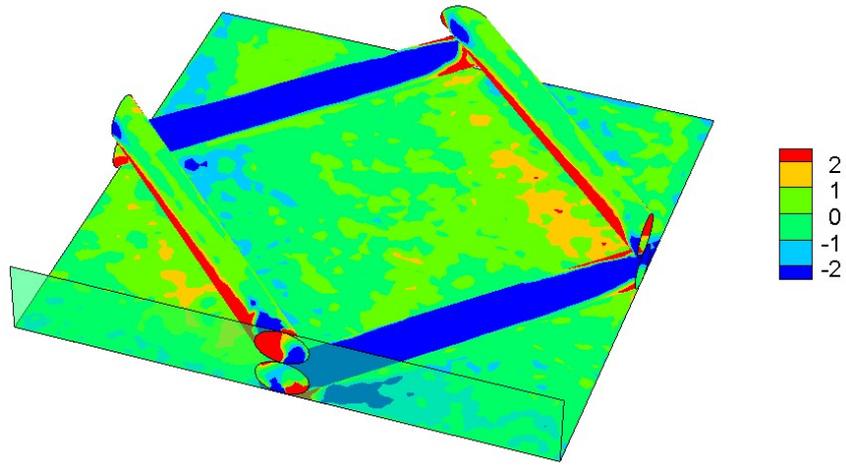


Figure.III.11. Cisaillement sur la membrane inférieure (SI) cas non tissé $L/D=10$ $v=0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

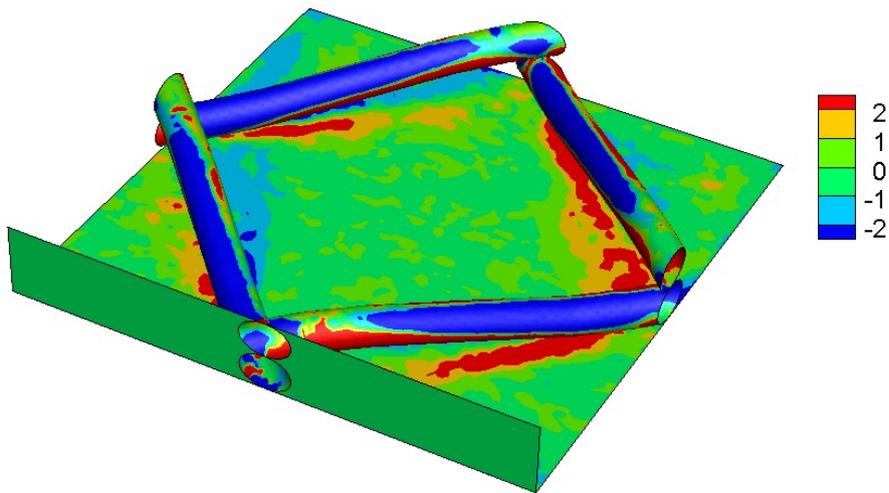


Figure.III.12. Cisaillement sur la membrane inférieure (SI) cas tissé $L/D=10$ $v=0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, le comportement des espaceurs utilisés dans les modules de membranes d'osmose inverse a été étudié à l'aide d'outils de dynamique de fluide computationnelle. La résolution des équations de quantité de mouvement dans une maille d'un espaceur a permis d'analyser le comportement du fluide à cette échelle. Les calculs ont été concentrés sur la comparaison de deux géométries utilisées en industrie, à savoir tissée et non tissée. A ce stade, on ne peut recommander une géométrie au détriment d'une autre mais l'avantage des types tissés sur l'augmentation de transfert de masse, et l'avantage des non tissés dans la faible chute de pression est clair. Afin de pouvoir choisir une géométrie optimale, l'estimation précise des valeurs ajoutée par une étude technico-économique est indispensable afin de vérifier si le rendement des membranes équilibre bien les pertes énergétiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Alain, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2006.
- [2] P. DANIS, Dessalement de l'eau de mer, Technique de l'ingénieur ed., 2003.
- [3] S.D. Jean-Christophe REMIGY, Filtration membranaire (OI, NF, UF) Présentation des membranes et modules, Techniques de l'ingénieur ed., 2007.
- [4] Dégrement, Mémento technique de l'eau, Dégriment ed., 2005.
- [5] V.V.R. Ashwani Kumar, Y.H. Zurigat, in, The Middle East Desalination Research Center Muscat, Sultanate of Oman, 2004.
- [6] R. AUDINOS, Membranes semi-perméables: Membranes d'osmose inverse, Techniques de l'ingénieur ed., 2000.
- [7] P. APTEL, Filtration membranaire (OI, NF, UF), Applications en traitement des eaux Techniques de l'ingénieur ed., 2006.
- [8] Kader Gaid, Yvan Treal, Le dessalement des eaux par osmose inverse : l'expérience de Véolia Water, Desalination, 203 (2007) 1-14.
- [9] P. AIMAR, Filtration membranaire (OI, NF, UF), Mise en oeuvre et performances Techniques de l'ingénieur ed., 2006.
- [10] P.B. Pierre AIMAR, Alain MAUREL, Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT), Aspects théorique : mécanisme de transfert, Technique de l'ingénieur ed., 2006.
- [11] A. MAUREL, Techniques séparatives à membranes. Considérations théoriques, Techniques de l'ingénieur ed.
- [12] I.c. .Popa, Modélisation numérique du transfert thermique (méthode des volumes Finis), 2002.
- [13] Suhas V. Patanar, Numerical heat transfert and fluid flow, 1798.
- [14] G.A. Fimbres-Weihs, D.E. Wiley, Review of 3D CFD modeling of flow and mass transfer in narrow spacer-filled, channels in membrane modules, Chemical Engineering and Processing, 49 (2010) 759–781.

- [15] S.K. Karode, A. Kumar, Flow visualization through spacer filled channels by computational fluid mechanics I. Pressure drop and shear stress calculations for flat sheet geometry, *J. Membr. Sci.*, 193 (2001) 69–84.
- [16] F. Li, W. Meindersma, A.B. De Haan, T. Reith. Optimization of commercial net spacers in spiral wound membranes modules, *Membr. Sci.*, 208 (2002) 289–302
- [17] F. Li, W. Meindersma, A.B. De Haan, T. Reith, Novel spacers for mass transfer enhancement in membrane separations, *J. Membr. Sci.*, 253 (2005) 1–12.
- [18] Vivek V. Ranade a, Ashwani Kumarb, Fluid dynamics of spacer filled rectangular and curvilinear channels, *Journal of Membrane Science*, 271 (2006) 1–15.
- [19] S.G.Y. C.P. Koutsou, A.J. Karabelas, Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics, *Journal of Membrane Science* 291 (2007) 53–69.
- [20] C.P. Koutsou, S.G. Yiantsios, A.J. Karabelas. A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number, *Membr. Sci.*, 326 (2009) 234–251.
- [21] J.L.C. Santos, V.M. Geraldés, S. Velizarov, J.G. Crespo, Investigation of flow patterns and mass transfer in membrane module channels filled with flow aligned spacers using Computational Fluid Dynamics (CFD), *J. Membr. Sci.*, 305, (2007) 103–117.
- [22] M. Shakaib, S.M.F. Hasani, M. Mahmood, Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling, *J. Membr.*, 297 (2007) 74–89.
- [23] G.A. Fimbres-Weihs, D.E. Wiley, Numerical study of mass transfer in three dimensional spacer-filled narrow channels with steady flow, *J. Membr. Sci.*, 306 (2007) 228–243.
- [24] A.R. Da Costa, A.G. Fane, D.E. Wiley, Spacer characterization and pressure drop modelling in spacer-filled channels for ultra-filtration, *J. Membr. Sci.*, 87 (1994) 79–98.

Site Internet .

[25] www.ansys.com.

[26] www.Tecplot.com.

