

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

HAMZA ROUMAÏSSA

HAMZA RIHAM

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Simulation de l'ultrafiltration, influence de la concentration et la vitesse d'écoulement.

Soutenu le 22 /09 / 2021

Devant le jury:

KIAMOUCHE	Samir	MAA	Univ. Constantine 3	Examineur
DRIF	Sifeddine	MAA	Univ.M'sila	Examineur
HAMDACHE	Abderrazaq	MAA	Univ.Bouira	Encadrant

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicaces

On dédie ce travail

*A nos chers parents en guise de gratitude
pour tous leurs sacrifices, soutien,
confiance, compréhension et amour,*

A tous les membres de famille,

À tous nos amis.



Remerciements

A l'occasion de la rédaction de ce mémoire de fin d'étude, nous tenons particulièrement, à remercier en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir donné la possibilité d'étudier et de pouvoir terminer ce travail.

Toutes nos infinies gratitudees à notre promoteur, monsieur HAMDACHE ABDERRAZAQ (MAA) de l'université de Constantine 3 pour son encadrement et ses aides précieux.

Nos profonds remerciements vont aux deux membres de jury : monsieur KIAMOUCHE SAMIR (MAA) de l'université de Constantine 3 et monsieur DRIF SIFEDDINE (MAA) de l'université de M'sila pour avoir accepté d'examiner et juger ce modeste travail.

Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants de département de génie des procédés qui n'ont préservé aucun effort à fin de transmettre leur savoir et leurs expériences aux étudiants.

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur les procédés de traitement membranaires

I.1	Introduction	3
I.2	Les procédés membranaires	3
I.2.1	Notion de filtration membranaire	3
I.2.2	Les techniques membranaires à gradient de pression	4
I.2.2.1	La microfiltration (MF)	5
I.2.2.2	L'ultrafiltration (UF)	6
I.2.2.3	La nanofiltration (NF)	6
I.2.2.4	L'osmose inverse (OI)	7
I.3	Mode de fonctionnement des systèmes membranaires:	8
I.3.1	Mode frontal	8
I.3.2	Mode tangentiel	9
I.4	Structure des membranes et nature chimique de ses matériaux	10
I.4.1	Types des membranes par structures de ses matériaux	10
I.4.1.1	Les membranes symétriques (ou isotropes)	10
I.4.1.2	Les membranes asymétriques (ou anisotropes)	11
I.4.2	Types des membranes par natures de ses matériaux	11
I.4.2.1	Les membranes organiques	11
I.4.2.2	Les membranes inorganiques (ou minérales).....	12
I.4.2.3	Les membranes composites (hybrides)	12
I.4.2.4	Les membranes échangeuses d'ions	13
I.4.3	Membranes poreuses et membranes denses	13
I.5	Configuration des modules	14
I.5.1	Définition des modules	14
I.5.2	Les types de modules	14

I.5.2.1	Les modules plans	14
I.5.2.2	Les modules spiralés	15
I.5.2.3	Les modules tubulaires	16
I.5.2.4	Les modules à fibres creuses	17

Chapitre II : Le procédé d'ultrafiltration

II.1	Définition	18
II.2	Les grandeurs physiques les plus utilisées en ultrafiltration	18
II.2.1	Pression transmembranaire (ΔP_m)	18
II.2.2	Seuil de coupure	19
II.2.3	Perméabilité hydraulique	19
II.2.4	La sélectivité (taux de rétention)	20
II.2.5	Taux de conversion	21
II.2.6	Résistance de la membrane	21
II.2.7	Durée de vie des membranes	22
II.3	Mécanismes de transfert	22
II.4	Membranes utilisées et leurs caractéristiques	22
II.5	Mise en œuvre et condition de fonctionnement	23
II.5.1	Choix du type de procédés	23
II.5.1.1	Procédé discontinu	23
II.5.1.2	Procédés continu à recyclage	24
II.5.1.3	Procédés continu	25
II.5.2	Choix de la pression de fonctionnement	25
II.5.2.1	Considérations techniques	25
II.5.2.2	Considérations économiques	25
II.5.3	Choix de la température	26
II.5.4	Choix du taux de conversion	26
II.6	Phénomènes Limitant le Transfert de Matière	27
II.6.1	Phénomène de polarisation de concentration	27
II.6.2	Colmatage membranaire	28
II.7	Indicateurs de colmatages	29
II.7.1	Silt Density Index (SDI)	29
II.7.2	Modified fouling index (MFI)	30
II.7.3	Modified Fouling Index – Ultrafiltration (MFI-UF)	31

II.8	Paramètres influençant le colmatage	32
II.9	Prévention du colmatage	33
II.10	Types de nettoyages	33
II.10.1	Le nettoyage mécanique	33
II.10.2	Le nettoyage chimique	34
II.10.3	Le nettoyage enzymatique	36
II.11	Eau utilisée pour le nettoyage	36
<u>Chapitre III : Les méthodes numériques de résolutions</u>		
III.1	Introduction	37
III.2	Les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles	37
III.3	Principe du calcul numérique	37
III.4	Méthode des différences finis (MDF)	38
III.5	Méthodes des volumes finis (MVF)	39
III.6	Méthodes des éléments finis (MEF)	39
III.6.1	Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis	40
III.6.2	Logiciels utilisant les éléments finis	40
<u>Chapitre IV : Comsol multiphysics.</u>		
IV.1	Introduction.....	42
IV.2	Description du logiciel	42
IV.2.1	Les avantages de logiciel	43
IV.2.2	Les inconvénients de logiciel	43
IV.3	Description de l'interface COMSOL	43
IV.4	Procédure de simulation	44
<u>Chapitre V : Résultats et discussions.</u>		
V.1	Simulation des différents paramètres	52
V.1.1	Profil de la concentration au niveau de la paroi perméable	52
V.1.2	Profil de la vitesse	53
V.1.3	Profil de la pression	54
V.2	Effet de la vitesse sur la couche de polarisation	54
V.3	Effet de la concentration sur la couche de polarisation	56
Conclusion générale.....		57

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux.....4

Tableau I.2: Procédés membranaires classés selon la taille des pores.....5

Tableau I.3: Procédés concurrents aux différentes techniques membranaires.8

Chapitre II

Tableau II.1: Pressions d'opération habituelles des procédés membranaires.....26

Tableau II.2: Valeurs repère du SDI.....30

Tableau II.3: Produits utilisés lors de nettoyages chimiques.35

Chapitre IV

Tableau IV.1: Les différents paramètres de la simulation.51

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Schéma de principe de la filtration membranaire.	4
Figure I.2: Hiérarchie des procédés membranaires.	5
Figure I.3: Principe de la nanofiltration.	7
Figure I.4: Procédé de l'osmose inverse.	8
Figure I.5: Schéma de principe de la filtration frontale.	9
Figure I.6: Schéma de principe de la filtration tangentielle.	9
Figure I.7: Membrane symétrique.	10
Figure I.8: Membranes asymétriques ou anisotropes.	11
Figure I.9: Représentation d'une membrane composite.	13
Figure I.10: Représentation schématique de membranes poreuses et denses.	14
Figure I.11: Module plan: schéma de circulation des fluides.	15
Figure I.12: Schéma du module spiral.	15
Figure I.13: Principe de fonctionnement d'une membrane spirale vue en coupe.	16
Figure I.14: Exemple d'un module tubulaire monocanal et multicanaux.	16
Figure I.15: Module à fibres creuses.	17

Chapitre II

Figure II.1: Flux de perméat de l'eau en fonction de la pression transmembranaire.	20
Figure II.2: Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration.	20
Figure II.3: Principe de fonctionnement par procédé discontinu	24
Figure II.4: Principe de fonctionnement en continu, 1 étage, a boucle de recirculation.	24
Figure II.5: Principe de fonctionnement par procédé continu.	25
Figure II.6: Représentation schématique du phénomène de polarisation de concentration. ...	28
Figure II.7: Différentes formes de colmatage (a)- formation d'un gâteau, (b)- bouchage des pores, (c)- adsorption, (d)- blocage des pores.	29
Figure II.8: Montage expérimental pour déterminer le SDI.	30
Figure II.9: Représentation graphique t/V versus V	31

Chapitre III

Figure III.1: Principe du calcul numérique.	38
Figure III.2: Configuration géométrique en 2D.	38

Figure III.3: Volume de contrôle.....	39
Figure III.4: maillage d'un domaine en éléments finis.....	40

Chapitre IV

Figure IV.1: L'icône de COMSOL MULTIPHYSICS 4.3.....	42
Figure IV.2: Interface de COMSOL.....	44
Figure IV.3: La fenêtre de lancement du logiciel.....	45
Figure IV.4: Les différentes dimensions de simulation.....	46
Figure IV.5: Le choix de la physique à utiliser.....	47
Figure IV.6: Le choix de l'étude.....	47
Figure IV.7: Création d'une géométrie voulue.....	48
Figure IV.8: Le choix de divers matériaux.....	48
Figure IV.9: Exemple sur le maillage.....	49
Figure IV.10: Exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau.....	49
Figure IV.11: Représentation du module d'ultrafiltration.....	50
Figure IV.12: Maillage du modèle utilisé.....	51

Chapitre V

Figure V.1: profil de concentration au niveau de la paroi perméable.....	52
Figure V.2: profil de vitesse.....	53
Figure V.3: profil de pression.....	54
Figure V.4: profil de concentration pour différentes vitesses.....	55
Figure V.5: profil de concentration au niveau de la paroi perméable pour différentes concentrations.....	56

Nomenclature

Abréviation

MBP	Membranes basse-pression
MHP	Membranes haute-pression
OI	Osmose inverse
NF	Nanofiltration
UF	Ultrafiltration
MF	Microfiltration
SDI	Silt Density Index
ASTM	American Society for Testing and Materials
MFI	Modified fouling index
MFI-UF	Modified Fouling Index – Ultrafiltration
EDP	Equations aux dérivées partielles
MDF	Méthodes des différences finis
MEF	Méthodes des éléments finis
MVF	Méthodes des volumes finis

Caractères romains

Qa	Débit de solution	m ³ /s
Qp	Débit de perméat	m ³ /s
ΔP_m	Pression transmembranaire	bar
$\Delta \pi$	Pression osmotique	bar
S	Surface de la membrane	m ²
Jp	Flux de perméat	L.h ⁻¹ .m ⁻²
Lp	Perméabilité hydraulique	L/h.m ² .bar
Tr	Taux de rétention	%
Y	Taux de conversion	%
Rm	Résistance de la membrane	m ⁻¹

N_p	Nombre de pores par unité de surface	-
R_p	Rayon de pore moyen	m
pH	Potentiel hydrogène	-

Caractères grecs

δ	Épaisseur de la couche active de la membrane	m
μ_{20}	Viscosité dynamique à la température de référence	Pa.s
μ_T	Viscosité dynamique à la température de travail	Pa.s

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution que connaît l'environnement urbain et industriel pose, dans de nombreux pays, le problème de l'eau et sa contamination se pose avec acuité. En effet, l'eau est affectée de façon croissante par des matières minérales et organiques et même des microorganismes dont certains sont pathogènes et donc dangereux pour la santé. Par ailleurs il est certain que nos besoins en eau ne cesseront de croître alors que les réserves en eau de bonne qualité diminuent.

Lors des précipitations, l'eau ruisselle ou s'infiltré et se charge en composants des sols et des roches mères. Ainsi, elle peut acquérir des sels minéraux en grande quantité (Ca, Mg, Mn, Fe ...) et, d'autres éléments, liés à l'activité de l'homme [1]. Qu'elle soit utilisée par l'homme et les différents usagers, l'eau doit être traité afin d'éliminer les éléments susceptibles de modifier ses caractéristiques physico-chimiques, organoleptiques et/ou d'agents pathogènes responsables de maladies dites hydriques [2].

Heureusement, ces dernières décennies témoignent d'un grand développement des nouvelles technologies de traitement des eaux. En particulier plusieurs types de procédés ont démontré être d'une grande valeur. Parmi les exemples, nous trouvons : l'osmose inverse, électrodialyse, nano filtration, distillation... etc.

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.

L'ultrafiltration est un procédé membranaire utilisé dans différents secteurs industriels, agroalimentaires, médicaux et traitement de l'eau. En l'absence de changement de phase, la membrane agit comme une barrière permselective qui laisse passer certains composés et qui

en retient d'autres. Le flux qui passe à travers la membrane est appelé le perméat et le flux qui est retenu par la membrane est appelé le retentât [3].

Le problème intrinsèquement lié à la séparation est la rétention de particules ou solutés de taille supérieure au diamètre des pores de la membrane, entraînant l'accumulation de matière et la formation d'un dépôt à la surface de la membrane [4].

La polarisation de concentration est l'un des facteurs critiques déterminant les performances générales de l'ultrafiltration et empêche le développement industriel de cette technique de séparation.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, notre travail s'est porté sur l'étude de l'évolution de phénomène de la polarisation de concentration dans une cellule d'ultrafiltration et l'influence de la concentration et la vitesse d'entrée sur cette dernière.

Nous avons articulé la présentation de notre mémoire autour de quatre chapitres :

- ⇒ Dans le premier chapitre nous abordons des généralités sur les procédés de traitement membranaires ;
- ⇒ Le deuxième chapitre est consacré sur le procédé d'ultrafiltration ;
- ⇒ Le troisième chapitre consiste à la détermination des méthodes numériques de résolution ;
- ⇒ Le quatrième chapitre consiste à la description de logiciel COMSOL multiphysics ;
- ⇒ Dans le dernier chapitre nous présentons les résultats de la modélisation de la cellule d'ultrafiltration, ou les transferts sont simulés numériquement avec COMSOL multiphysics.

Chapitre 1 : Généralités sur les procédés de traitement membranaires.

I.1 Introduction :

Les procédés de séparation par membranes sont impliqués dans de nombreuses opérations industrielles. Le domaine d'application de ces techniques est très étendu et concerne en particulier: l'agro-alimentaire, la pharmacie, le traitement de l'eau et des effluents, la chimie et les biotechnologies.

Les membranes, éléments déterminants de ces procédés, font l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche dans leur conception et dans leurs modes de mise en œuvre.

D'un point de vue général, les procédés membranaires présentent par rapport aux technologies séparatives alternatives (distillation, centrifugation,...) divers avantages et inconvénients au nombre desquels [5]:

✓ Avantage :

- Grande qualité du produit final obtenu: performances de séparation élevées, traitement doux (basse température)...
- Facilité d'emploi et d'extrapolation: automatisation, compacité, conception modulaire...
- Economies d'énergie (par rapport aux procédés thermiques).

✓ Inconvénients :

- Niveau d'investissement et temps de retour en amortissement élevé avec un coût de fonctionnement "membrane" important,
- Limitations technologiques, en général liées aux caractéristiques du fluide à traiter et à la non-disponibilité de membranes adaptées.

I.2 Les procédés membranaires :

I.2.1 Notion de filtration membranaire :

La filtration membranaire est un procédé de séparation qui consiste à séparer ou à concentrer des constituants contenus dans une phase mobile. Elle est basée sur le passage plus ou moins aisé d'une espèce en solution à travers une membrane sous l'effet d'une force motrice. Cette dernière est appliquée de part et d'autre des parois de la membrane et entraîne un déplacement du solvant et/ou des espèces en solution à travers la couche filtrante. La force motrice peut être engendrée par trois phénomènes, selon le procédé utilisé : un gradient de pression, un gradient de concentration ou un gradient de potentiel électrique [6].

La figure (I.1) illustre le principe de base de la filtration membranaire. Les constituants contenus dans un fluide, circulant à un débit Q_A , sont séparés de façon sélective (taille, poids moléculaire, charge, ...) lorsque le fluide arrive au contact avec la membrane.

Une partie de ce fluide traverse la membrane (perméat de débit Q_p) et celle qui reste est appelée réténat [6].

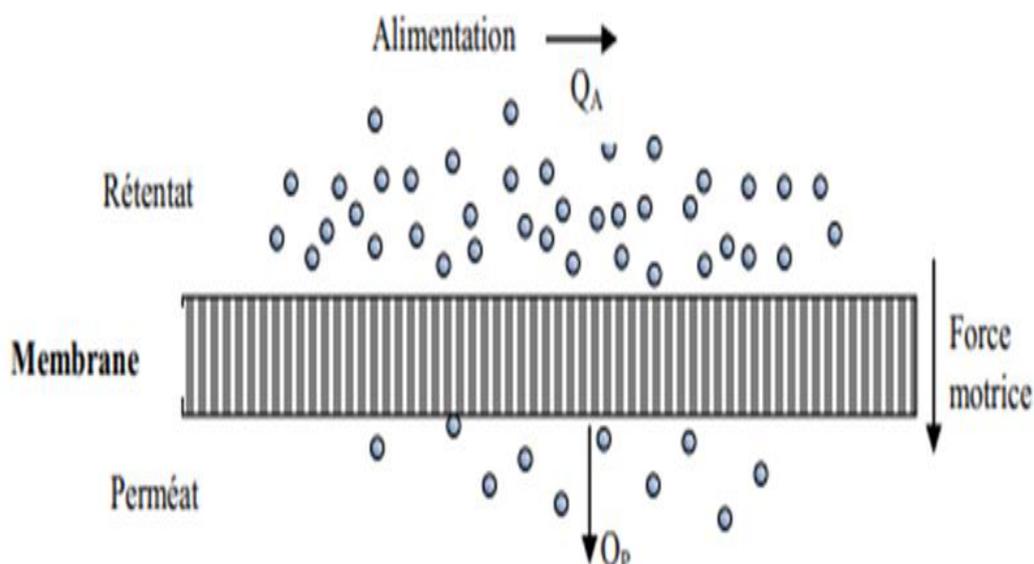


Figure I.1 : Schéma de principe de la filtration membranaire.

Tableau I.1 : Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux [8].

Force motrice	Domaine d'application
Différence de pression	Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse
Différence de concentration	Dialyse
Différence de potentiel électrique	Electrodialyse

I.2.2 Les techniques membranaires à gradient de pression :

Ces techniques, appelées également techniques baro-membranaires, ce sont des procédés de filtration membranaire qui utilisent un gradient de pression comme force motrice. Chaque procédé baro-membranaire est caractérisé par une plage de pression transmembranaire précise et se distingue également par la taille des espèces pouvant être retenues par la membrane comme le présente le tableau (I.2) [6].

La littérature scientifique distingue aussi souvent deux catégories de membranes : les membranes basse-pression (MBP) et les membranes haute-pression (MHP). Les MHP, composées des membranes à osmose inverse (OI) et des membranes de nanofiltration (NF).

Les membranes d'ultrafiltration (UF) et de microfiltration (MF) font partie des MBP et sont les plus utilisées dans la filtration membranaire d'eau de surface [7].

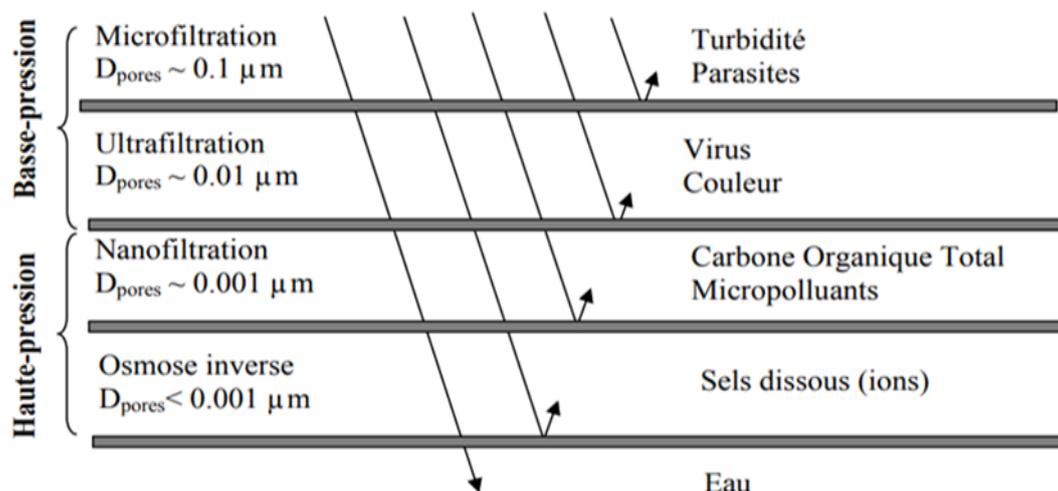


Figure I.2 : Hiérarchie des procédés membranaires.

Tableau I.2 : Procédés membranaires classés selon la taille des pores.

Procédé de séparation	Osmose inverse (OI)	Nanofiltration (NF)	Ultrafiltration (UF)	Microfiltration (MF)
Taille des pores	Membrane dense	0,5-2 nm	2-100 nm	0,1-10 μm
Nature des plus petites espèces retenues	Ions monovalents	Ions et petites molécules	Macromolécules	Microorganismes, colloïdes, particules solides
Pression de service (bar)	30-100	5-30	1-5	0,5-2

I.2.2.1 La microfiltration (MF) :

C'est un procédé de séparation solide-liquide à travers des membranes poreuses dont le diamètre des pores sont compris entre 0,1 et 10 μm . Elle utilise une différence de pression comme force motrice. Les pressions appliquées sont comprises entre 0.5 et 2 bar pour éviter un colmatage important. Les membranes de microfiltration (diamètre de pore de 0,1 à quelques micromètres) permettent de retenir entre autres : les matières en suspension, les levures, les plus gros colloïdes, les gros pigments et les gros virus... La microfiltration est le

procédé de séparation membranaire le plus utilisé actuellement à l'échelle industrielle (en étape finale ou en prétraitement). Ses principales applications sont :

- La clarification des eaux ;
- La séparation d'émulsions eau / huile ;
- La débactérisation de solutions ;
- La production d'eau potable (la microfiltration intervient ici comme une étape de prétraitement) [9].

I.2.2.2 L'ultrafiltration (UF) :

L'ultrafiltration est une filtration où le liquide traverse une membrane semi-perméable grâce à une différence de pression. Les particules en solution ou en suspension de haut poids moléculaire sont retenues tandis que l'eau et les molécules de faible poids moléculaire passent à travers la membrane. Elle utilise des membranes dont les diamètres des pores sont compris entre 2 et 100 nm.

Les applications industrielles en ultrafiltration sont nombreuses :

- clarification de jus de fruit ;
- concentration de solutions macromoléculaires (protéines, polysaccharides, polymères variés) ;
- Production d'eau potable ;
- traitement des bains de dégraissage (élimination des matières en suspension et des émulsions d'huile) [10].

I.2.2.3 La nanofiltration (NF) :

La nanofiltration se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. La membrane est de type poreux. Les mesures prises au microscope à force atomique indiquent que, la plupart des pores de la membrane de nanofiltration (NF) sont distribués entre 0,5 et 2 nm de diamètre [11] [12]. La membrane de nanofiltration permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle de nanomètre. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium,

aluminium, sulfates...) et les molécules organiques non ionisées de masse molaire supérieure à 250 g/mol y sont fortement retenus [13].

Les domaines d'application de ce type de la membrane ne cessent d'augmenter. Ainsi, elle est de plus en plus utilisée dans l'adoucissement des eaux, la désulfatation et la rétention des complexes de métaux lourds. Elle est également utilisée pour l'élimination des couleurs, de la matière organique naturelle et de quelques polluants organiques tels que les pesticides [14].

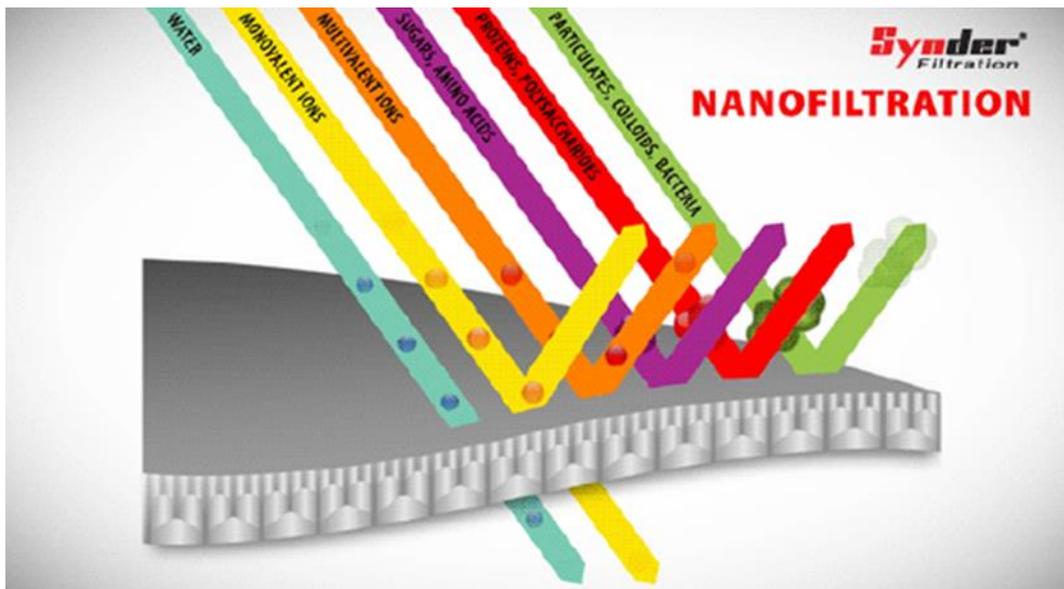


Figure I.3 : Principe de la nanofiltration.

I.2.2.4 L'osmose inverse (OI) :

L'osmose inverse (OI) est un procédé déjà ancien qui met en œuvre des membranes denses qui ne laissent passer que le solvant et qui arrêtent tous les sels. La séparation solvant-soluté se fait par un mécanisme de solubilisation-diffusion: le solvant s'adsorbe dans la phase membranaire puis diffuse à travers le matériau. La pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée pour observer un flux de perméat à travers la membrane. Les pressions appliquées varient de 30 à 100 bars [15]. Les membranes d'osmose inverse (membranes denses) peuvent retenir les ions monovalents par un mécanisme différent qui fait appel à la solubilisation et la diffusion. Celui-ci considère que le taux de transmission d'un soluté à travers une membrane d'osmose inverse résulte d'un processus dans lequel le soluté se solubilise dans la phase membranaire puis diffuse à travers celle-ci pour rejoindre le compartiment perméat. Les principales applications industrielles de l'osmose inverse sont les suivantes : le dessalement de l'eau de

mer et des eaux saumâtres, la concentration des fluides alimentaires (lait, jus de fruits...), la production d'eau ultra pure et le traitement d'effluents liquides [16].

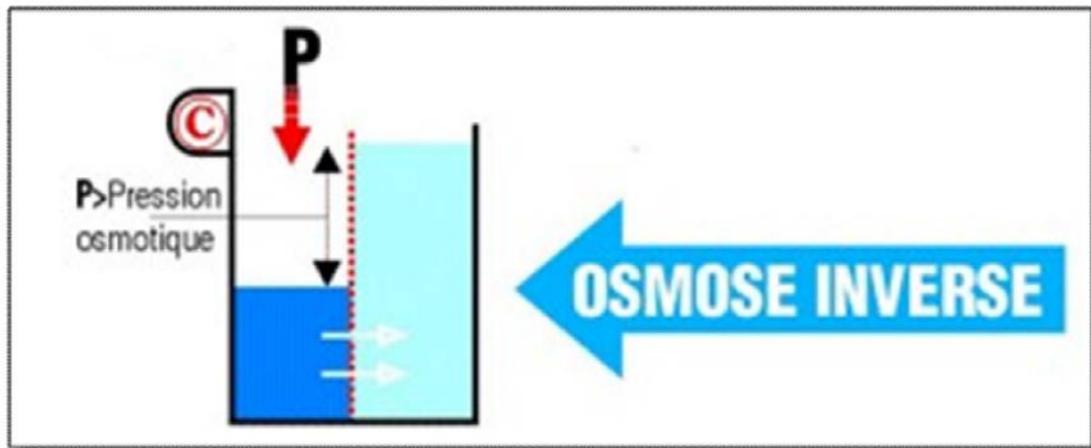


Figure I.4 : Procédé de l'osmose inverse.

Les procédés membranaires s'utilisent en général dans une cascade de procédés de traitement. Ce sont des procédés facilement intégrables et contrôlables ; ils n'altèrent pas la qualité des produits et sont respectueux de l'environnement. Un certain nombre de procédés se révèlent concurrents des procédés membranaires. Ils sont résumés dans le Tableau (I.3).

Tableau I.3 : Procédés concurrents aux différentes techniques membranaires.

Osmose inverse	Nanofiltration	Ultrafiltration	Microfiltration
* Evaporation	* Echange d'ions	* Précipitation chimique	* Centrifugation
* Electrodialyse	* Chromatographie	* Chromato sur gel	* Filtration sur diatomées
* Echange d'ions		* Dialyse	* Décantation

I.3 Mode de fonctionnement des systèmes membranaires:

Les installations de filtration membranaire peuvent fonctionner selon deux modes en fonction de la direction de circulation du fluide par rapport à la membrane : le mode frontal ou le mode tangential.

I.3.1 Mode frontal :

En mode frontal, l'écoulement se fait dans la direction perpendiculaire à la surface de la membrane. Ce système de filtration comporte une entrée pour le fluide à traiter et une sortie

pour le produit filtré (figure I.5) [17]. Les particules solides et les solutés sont retenus à la surface et leur dépôt entraîne une superposition de couches qui vont progressivement provoquer le colmatage par la formation d'un gâteau. Cela exige un nettoyage périodique [18].

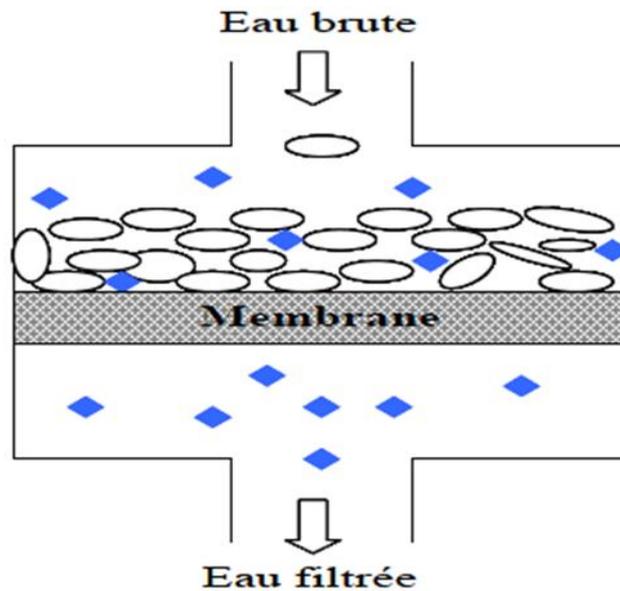


Figure I.5 : Schéma de principe de la filtration frontale.

I.3.2 Mode tangential :

En filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module pour venir au contact de la membrane suivant un flux tangential. Dans ce mode de mise en œuvre, il y a donc nécessairement une entrée correspondant à l'alimentation et deux sorties que sont le perméat qui correspond au passage d'une partie du flux initial à travers la membrane et le concentrât ou retentât qui représente le flux qui n'est pas passée à travers la membrane comme l'illustre la figure (I.6) [17].

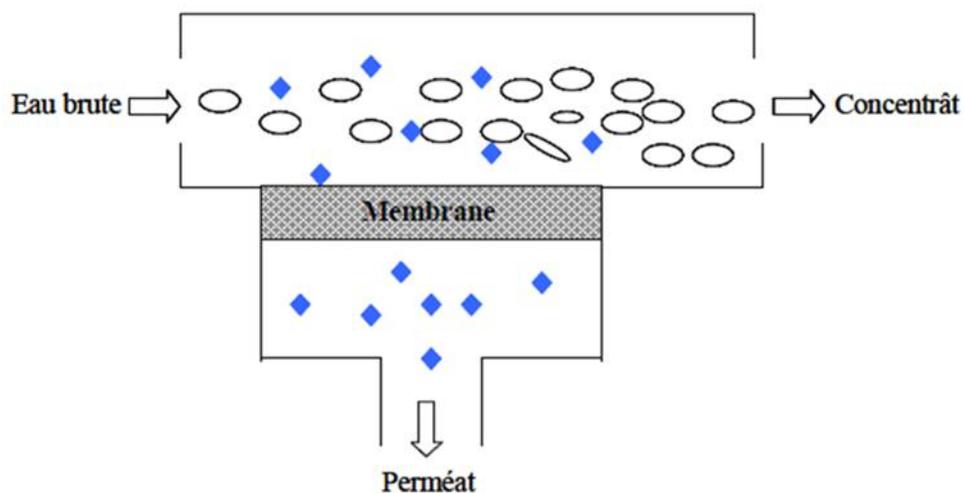


Figure I.6 : Schéma de principe de la filtration tangentielle.

Le principal avantage de l'écoulement tangentiel, par rapport à l'écoulement frontal, est le fait que le mouvement tangentiel de l'alimentation balaie la surface de la membrane limitant ainsi l'accumulation des particules et réduit par conséquent le processus de colmatage. Ce balayage accélère la remise en suspension des particules déposées ou accumulées à proximité de la membrane. Cela accélère aussi le transport des solutés qui tendent à s'accumuler à la surface de la membrane vers le cœur de l'écoulement. Plus la vitesse d'écoulement tangentiel est élevée, plus les effets de rétro-transport vers le cœur de l'écoulement sont accentués, et par conséquent, plus le colmatage peut être réduit d'une façon significative. C'est pour cette raison que l'écoulement tangentiel est très répandu dans les applications industrielles [17].

I.4 Structure des membranes et nature chimique de ses matériaux :

Il existe une grande diversité de membranes qui se différencient les unes des autres par leur nature, leur structure et leur géométrie. Les caractéristiques chimiques et structurales de ces matériaux leur confèrent des performances de séparation clairement identifiées les rendant ainsi aptes à réaliser des séparations spécifiques dans divers secteurs de l'industrie (pharmaceutique, agroalimentaire,...etc.) [19].

I.4.1 Types des membranes par structures de ses matériaux :

La structure des matériaux permet de distinguer différentes types de membranes:

I.4.1.1 Les membranes symétriques (ou isotropes) :

Elles possèdent des propriétés structurelles constantes et homogènes sur toute leur épaisseur (Figure I.7). Ainsi, les critères de résistance au transfert sont conditionnés principalement par leur épaisseur respective [20].

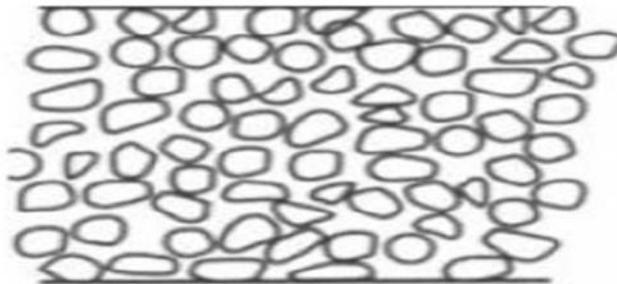


Figure I.7 : Membrane symétrique [21].

I.4.1.2 Les membranes asymétriques (ou anisotropes) :

Elles présentent une structure hétérogène, leur structure composite varie de la surface de la membrane vers l'intérieur (Figure I.8). Elles sont constituées soit du même polymère, dont la porosité varie à travers l'épaisseur de la membrane, soit de plusieurs polymères différents aux propriétés distinctes (membranes composites) disposés en couches. Les membranes composites comportent en général un support macroporeux sur lequel est déposée une couche filtrante de faible épaisseur gouvernant les propriétés de tamisage moléculaire [22].

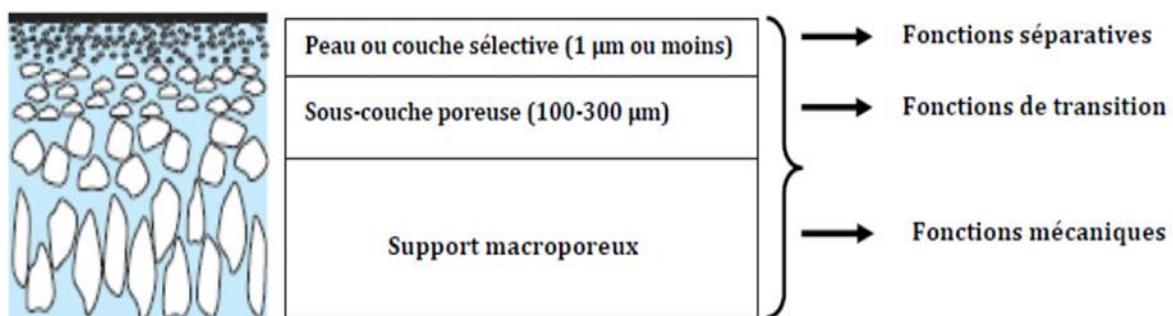


Figure I.8 : Membranes asymétriques ou anisotropes.

I.4.2 Types des membranes par natures de ses matériaux :

Les matériaux membranaires doivent pouvoir être mis en forme facilement et permettre la fabrication d'une membrane fine, résistante, sélective et perméable. Selon la nature des matériaux constitutifs des membranes, quatre grandes catégories existent : les membranes organiques (polymères), les membranes inorganiques (minérales) et les membranes composites (hybrides), et les membranes échangeuses d'ions [22].

I.4.2.1 Les membranes organiques :

Les membranes organiques sont les premières à avoir fait leur apparition sur le marché. On distingue généralement Les membranes à base d'acétate de cellulose, Les membranes à base des polymères de synthèse [21].

a. Les membranes à base d'acétate de cellulose :

Parmi les polymères organiques, les membranes dites de « 1ère génération » se composent de dérivés cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...). Utilisées pour les séparations attenantes au milieu aqueux, elles présentent une forte perméabilité à l'eau, une facilité technique de mise en œuvre et des coûts de production avantageux. Cependant, leurs performances se limitent à des conditions biologiques et physico-chimiques relativement

restreintes. Elles sont en effet vulnérables aux risques microbiologiques, ne peuvent être utilisées que dans des gammes de pH étroites (généralement $\text{pH} = 4-6$), sont sensibles à l'hydrolyse et présentent une faible résistance thermique (dégradation manifeste à partir de $35-40\text{ }^\circ\text{C}$) [20].

b. Les membranes à base des polymères de synthèse :

Les membranes dites de « 2^{ème} génération » sont représentées par l'ensemble des polymères organiques de synthèse (polyamides cycliques, polysulfones, polycarbonates, polymères fluorés ou silicones...). Elles possèdent des résistances thermiques, chimiques et biologiques accrues et ont donc fortement contribué à l'extension des domaines d'application de la technologie membranaire [20].

I.4.2.2 Les membranes inorganiques (ou minérales) :

L'apparition des membranes inorganiques (ou minérales) réalisées à partir de matériaux céramiques et/ou métalliques (alumine, dioxyde de titane...) (sont composées de corps entièrement minéraux), a permis d'envisager l'application de la technologie membranaire dans des conditions encore plus drastiques. Elles sont généralement de durée de vie plus importante et plus résistantes que leurs concurrentes organiques (résistance à des températures jusqu'à 1000°C pour les membranes céramiques) Cependant, des possibilités restreintes de modification de surface ainsi qu'un coût élevé de production entachent leur compétitivité face aux membranes de nature organique. L'arrivée de ces membranes inorganiques, a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles voies dans la séparation par membrane [22].

I.4.2.3 Les membranes composites (hybrides) :

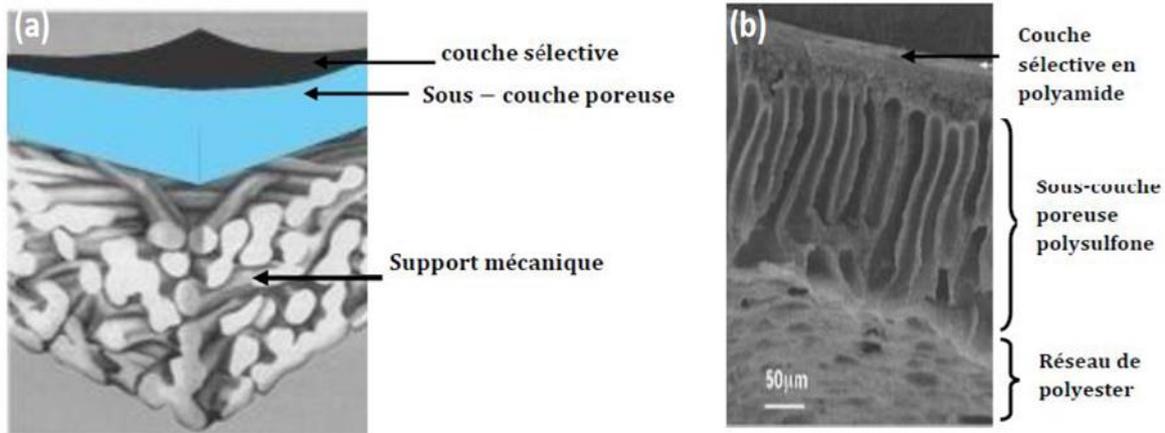
La synthèse des membranes composites (également nommées membranes hybrides), constituées d'une association entre polymères organiques et matériaux inorganiques (Figure I.9), qui offrent des avantages spécifiques pour la préparation de membranes exigeant une sélectivité importante et des débits élevés, ou une résistance chimique et thermique considérable [23].

Cette famille de membranes comporte deux classes, établies en fonction de la nature des interactions permettant l'association des polymères constitutifs. On distingue alors [20]:

- Les membranes où seules des interactions non-covalentes régissent leur structure. Il s'agit de matériaux composites (à l'échelle micro- ou nanoscopique) dans lesquels une

des deux phases (organique ou inorganique) est dispersée dans une matrice de nature différente [20].

- Les membranes hybrides regroupent les matériaux dont les parties organiques et inorganiques sont liées de manière covalente. Il peut consister soit en un milieu hybride homogène, soit en un milieu hétérogène dont une matrice principale (support) est modifiée en sa surface par greffage de fonctions variables [20].



(a) : Représentation schématique d'une membrane composite [22].

(b) : Exemple de membrane composite : sous couche en polysulfone – couche active en polyamide [24].

Figure I.9 : Représentation d'une membrane composite.

I.4.2.4 Les membranes échangeuses d'ions :

Les membranes échangeuses d'ions, fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux [1].

I.4.3 Membranes poreuses et membranes denses :

Une membrane poreuse présente une structure semblable à une éponge avec des pores continus pouvant être interconnectés entre eux (Figure I.10). Un pore est défini comme un interstice entre les constituants solides de la membrane. Dans le cas des membranes organiques, la structure poreuse résulte des espaces entre les chaînes de polymère tandis que dans le cas des membranes inorganiques les pores sont constitués par les espaces intergranulaires. Même s'il existe quelques types de membranes ayant des pores droits et de géométrie bien définie, la plupart des matériaux commercialisés sont caractérisés par un réseau de pores tortueux et interconnectés [25].

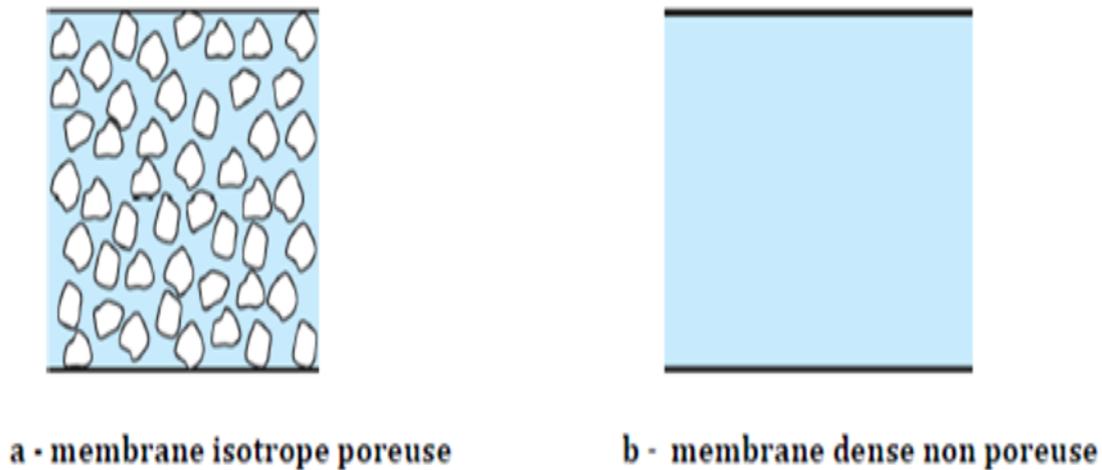


Figure I.10 : Représentation schématique de membranes poreuses et denses [22].

I.5 Configuration des modules :

I.5.1 Définition des modules :

Les appareils unitaires de séparation, mettant en œuvre des membranes, sont appelés « cartouches » ou « modules ». Leur conception est différente suivant la forme de la membrane et doit, à la fois, assurer une circulation suffisante à la surface de celle-ci et présenter une bonne compacité. Ils sont aussi conçus en fonction de l'application à venir et doivent satisfaire aux facilités d'exploitation (montage, démontage, nettoyage) [26].

I.5.2 Les types des modules :

Les modules supportent les membranes. Actuellement quatre types de modules sont commercialisés :

I.5.2.1 Les modules plans :

Il s'agit de la forme de module la plus simple (Figure I.11). Ils peuvent comporter une seule (échelle laboratoire) ou une succession d'un grand nombre de membranes (échelle industrielle type filtre presse). Son inconvénient majeur réside en sa plus faible densité de membranes envisageable, entraînant des coûts d'installation et opératoires accrus. En outre, cette configuration présente également des difficultés de maintien de l'étanchéité interne et externe (discontinuités dans le cas d'empilements par exemple). Malgré la possibilité de remplacement individuel des éléments constitutifs de l'installation de filtration, une espérance de vie plus faible des membranes concoure à des frais de maintenance élevés [20].

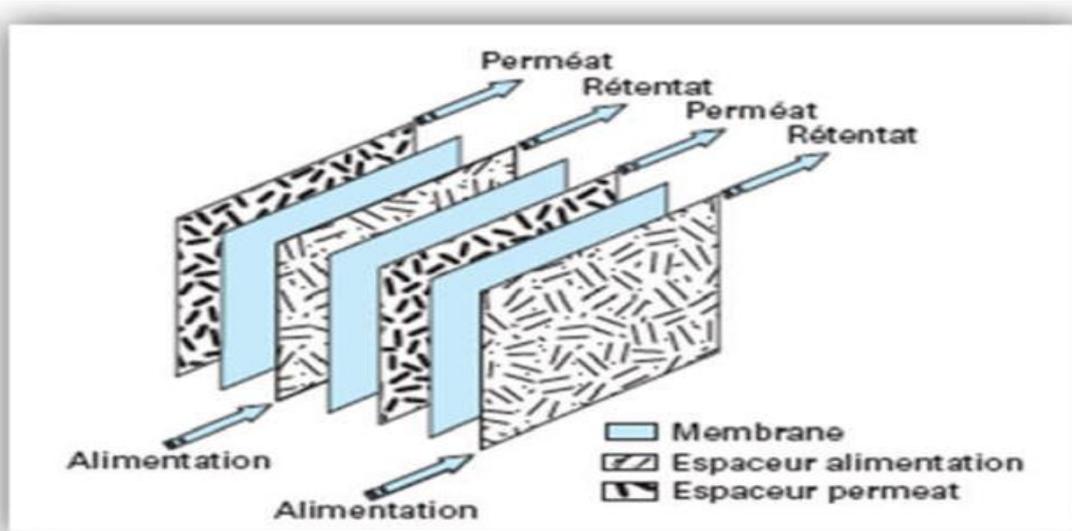


Figure I.11 : Module plan : schéma de circulation des fluides.

I.5.2.2 Les modules spiralés :

Les feuilles de membranes planes sont empilées et enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le perméat, c'est un collecteur de perméat. On obtient ainsi un cylindre multi couche ou le perméat s'écoule selon un chemin spiralée vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux [1].

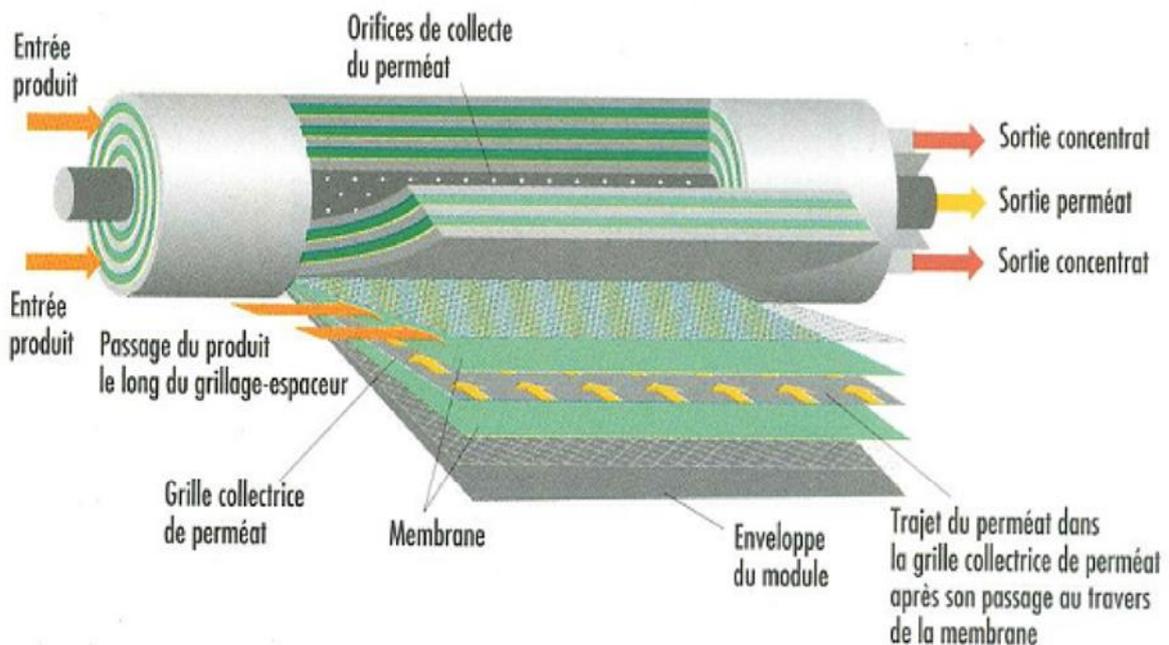


Figure I.12 : Schéma du module spiral.



Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'une membrane spirale vue en coupe.

I.5.2.3 Les modules tubulaires :

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui sont regroupés en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent, voire très turbulent. A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations [1].

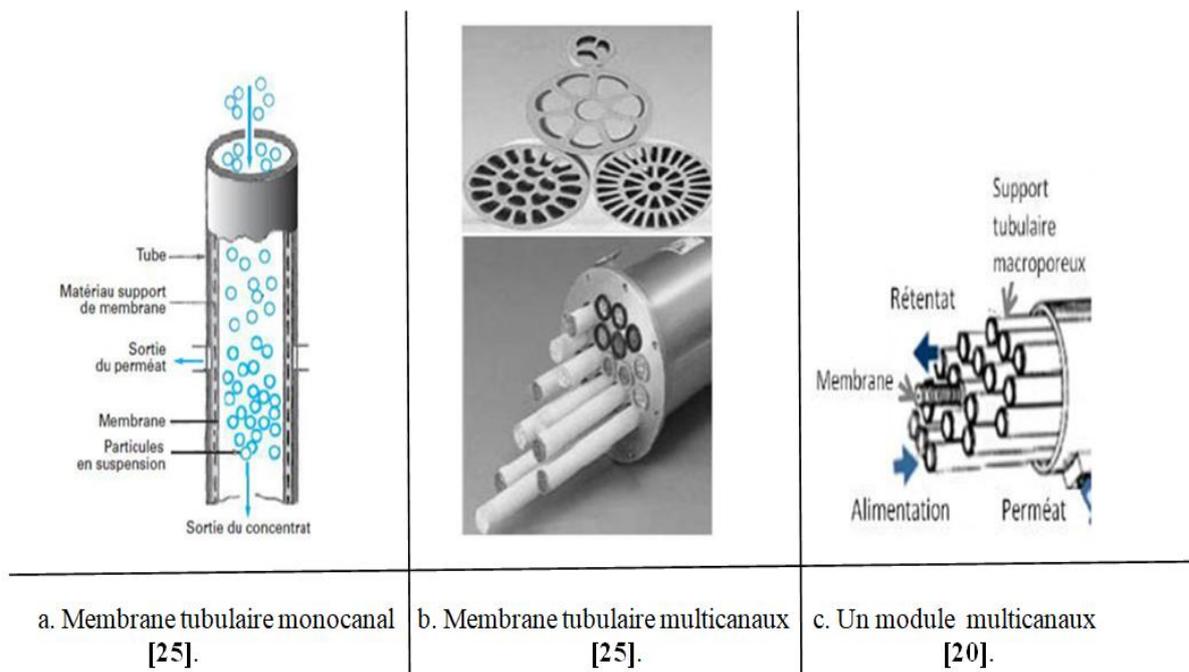


Figure I.14 : Exemple d'un module tubulaire monocanal et multicanaux.

I.5.2.4 Les modules à fibres creuses :

Les modules à fibres creuses sont produits par extrusion au travers de filières annulaires. D'un diamètre variant entre quelques millimètres et quelques dizaines de microns, elles sont dites « autosupporteurs » puisque les fibres creuses jouent à la fois le rôle de membrane et de support. Ces fibres sont ensuite regroupées en un faisceau de plusieurs milliers, voire millions. L'écoulement du liquide à traiter, à des vitesses comprises entre 0,5 et 2,5 m/s, s'effectue soit à l'intérieur des fibres soit à l'extérieur [27].

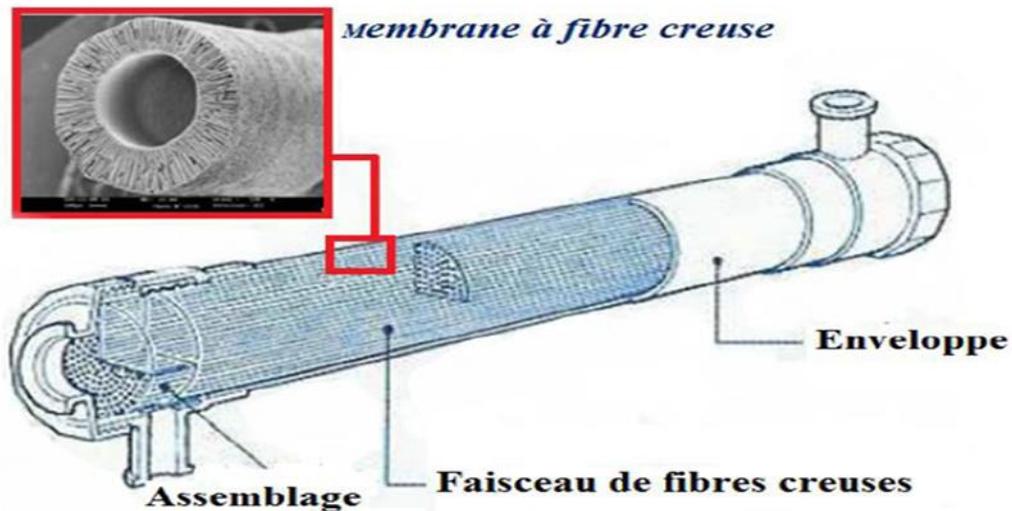


Figure I.15: Module à fibres creuses.

Chapitre II :

Le procédé d'ultrafiltration

II.1 Définition :

L'ultrafiltration permet un transfert de matière, à travers une membrane microporeuse, sous l'effet d'un gradient de pression. Elle se différencie de la filtration et de la microfiltration par la taille des particules retenues de 0.002 à 0,1 μm (de 2 à 100nm). L'ultrafiltration est une méthode qui nécessite un gradient de pression pour vaincre les pressions capillaires. La pression appliquée est comprise entre 1 et 5 bars [28].

L'ultrafiltration industrielle permet d'atteindre trois objectifs:

- La concentration de solutions macromoléculaires, (protéine, polymères,) où le retentât est l'objectif principal.
- La rétention de macro solutés nocifs (virus, bactéries, colloïdes...) présents dans les effluents industriels. Le filtrat est dans ce cas l'objectif principal.
- Le fractionnement d'un mélange pour l'élimination des solutés de faible taille. Le filtrat et le retentât, sont dans ce cas tous les deux valorisables [28].

La filtration s'opère le plus souvent en mode tangentiel afin de limiter l'accumulation des espèces arrêtées à la surface de la membrane et par conséquent la baisse du flux d'eau filtrée, contrairement à la filtration frontale.

II.2 Les grandeurs physiques les plus utilisées en ultrafiltration :

II.2.1 Pression transmembranaire (ΔP_m) :

Afin de générer le mouvement du perméat à travers la membrane on applique une différence de pression (pression transmembranaire) entre les deux côtés de la membrane. Le flux du perméat est proportionnel à cette pression selon la loi de Darcy. Pour l'ultrafiltration ces pressions sont comprises entre 1 et 5 bars environ [29].

$$\Delta P_m = \frac{P_A + P_R}{2} - P_P \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P_A : Pression liquide à l'entrée de module ;

P_R : Pression retentât à la sortie de module ;

P_P : Pression perméat.

II.2.2 Seuil de coupure :

Le seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90% des solutés sont retenus par la membrane. Celui-ci se mesure en g/mol ou en Dalton. Le seuil de coupure est une façon pratique de caractériser les membranes, mais pas tout à fait rigoureuse d'un point de vue scientifique, car il dépend aussi des autres caractéristiques du soluté ainsi que des conditions d'opérations. Aussi le seuil de coupure doit-il être défini par rapport à un soluté donné.

II.2.3 Perméabilité hydraulique :

C'est le flux transmembranaire qui est un indicateur important de la fonctionnalité d'une membrane d'ultrafiltration [29]. De façon pratique, la perméabilité peut être définie comme étant le rapport entre le flux de perméation (J_p) et la différence de pression transmembranaire effective ΔP_m (équation II.2) :

$$L_p = \frac{J_p}{\Delta P_m} \quad (\text{II.2})$$

Le flux de perméation (appelée aussi vitesse de perméation) est un débit de perméation unitaire, c'est-à-dire, le rapport entre le débit volumétrique de perméation Q_p et la surface effective de la membrane S (équation II.3) :

$$J_p = \frac{Q_p}{S} \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant le flux de perméation J_p défini par l'équation (II.3), dans l'équation (II.2), on obtient :

$$L_p = \frac{Q_p}{S \cdot \Delta P_m} \quad (\text{II.4})$$

En pratique, la perméabilité d'une membrane, est déterminée comme la pente de la droite J_p en fonction de ΔP_m .

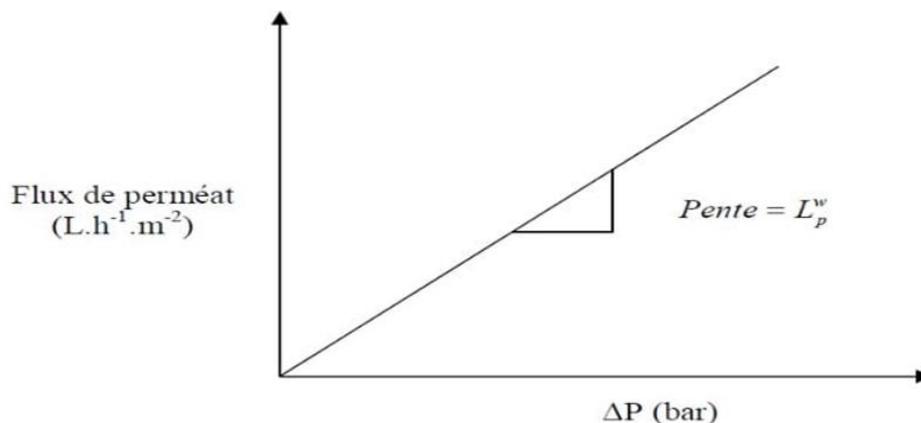


Figure II.1 : Flux de perméat de l'eau en fonction de la pression transmembranaire.

II.2.4 La sélectivité (taux de rétention) :

La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rétention ou le taux de rejet de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir [30].

$$\text{Tr} (\%) = \left[1 - \frac{c_p}{c_0} \right] \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec:

c_p : Concentration finale (perméable) ;

c_0 : Concentration initiale.

Il y a deux valeurs particulières du Tr (valeurs exprimées en pourcentages) :

- Tr =0% signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane ;
- Tr =100% signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane.

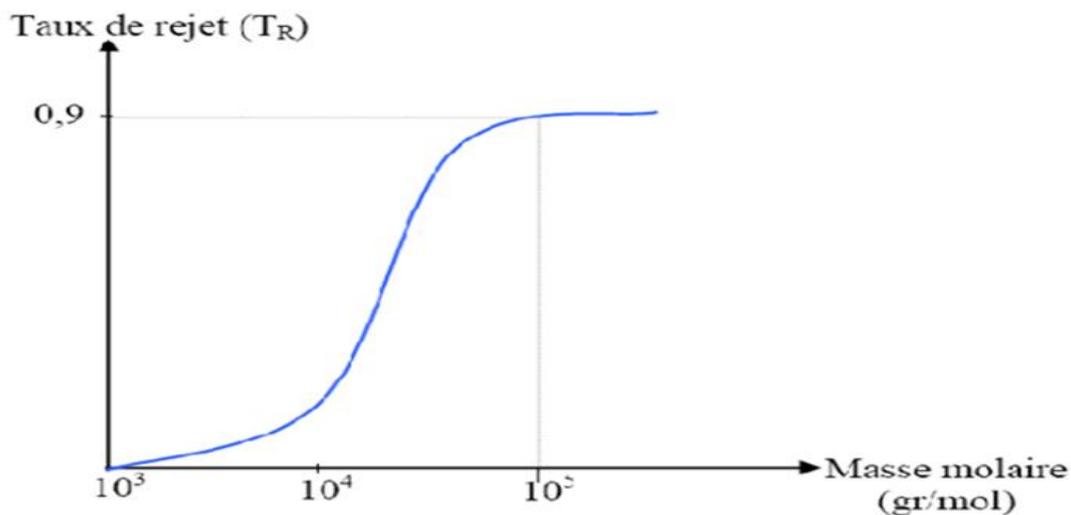


Figure II.2 : Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration.

II.2.5 Taux de conversion :

Le taux de conversion (Y) est défini par la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane et est donné par la relation suivante :

$$Y (\%) = (Q_p / Q_0) * 100 \quad (\text{II.5})$$

Avec :

Q_p : Débit de perméat ;

Q_0 : Débit d'alimentation.

Le choix de la valeur de ce paramètre répond à des considérations économiques et techniques. Pour tenir compte de l'aspect économique, il faut fixer un taux de conversion le plus élevé possible afin de réduire la quantité d'eau brute entrant dans l'installation, d'où des Investissements plus faibles et une consommation énergétique réduite.

II.2.6 Résistance de la membrane :

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 l'inverse de sa perméabilité [31].

$$R_m = \frac{1}{L_p} = \frac{S \cdot \Delta P_m}{Q_p} \quad (\text{II.6})$$

Cette relation nous permet de calculer de façon pratique la résistance d'une membrane à partir des mesures de flux de perméation et de la pression transmembranaire.

En supposant que les pores d'une membrane soient cylindriques et rectilignes, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la résistance d'une membrane comme :

$$R_m = \frac{8\delta}{N_p \cdot \pi \cdot r_p^4} \quad (\text{II.7})$$

Où

δ : Épaisseur de la couche active de la membrane (m).

N_p : Nombre de pores par unité de surface.

r_p : Rayon de pore moyen (m).

L'équation (II.7) montre que la résistance de la membrane augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la membrane et diminue avec sa porosité.

II.2.7 Durée de vie des membranes :

Les performances d'une membrane peuvent se dégrader avec le temps à cause du phénomène de colmatage qui se traduit, à concentration constante, par une baisse du flux au cours du temps, pouvant aller jusqu'au blocage complet de la membrane.

La durée de vie des membranes dépend de la nature de la membrane mais aussi des conditions d'utilisations :

- Pression de fonctionnement.
- Température de l'eau.
- pH.
- qualité du prétraitement.

En général, on change les membranes lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil [32].

II.3 Mécanismes de transfert :

En ultrafiltration, tout comme en microfiltration, la sélectivité entre les solutés est d'origine essentiellement physique (convection) car liée au coefficient de transfert et fonction de la taille des solutés par rapport à celle des pores de la membrane. Compte tenu de leur taille, les macromolécules n'exercent qu'une pression osmotique modérée et par conséquent, les pressions nécessaires pour le fonctionnement des membranes de MF et d'UF sont relativement basses [33].

II.4 Membranes utilisées et leurs caractéristiques :

En ultrafiltration, les membranes les plus utilisées sont obtenues par inversion de phase. Les polycondensats aromatiques ainsi que les membranes minérales en zircone sont très utilisées. Les membranes d'UF peuvent être réalisées avec des matériaux organiques ou minéraux. Les premières membranes d'UF et de MF commercialisées étaient en nitrate ou en acétate de cellulose [33].

Les caractéristiques des membranes, qui dépendent de leur utilisation, doivent répondre aux exigences suivantes :

- Efficacité de séparation : seuil de coupure (ultrafiltration) bien connu.
- Débit de perméation élevé : ce qui induit une diminution des pertes de charge par augmentation de la porosité et diminution de l'épaisseur de la membrane.

- Résistances mécaniques, chimiques et thermiques élevées : entraîne la possibilité de nettoyages efficaces, économiques et simples.

Le diamètre moyen des pores et leur répartition sont des paramètres essentiels au bon fonctionnement de la membrane.

II.5 Mise en œuvre et condition de fonctionnement :

Le choix des conditions de fonctionnement (pression, vitesse, et température) à appliquer à l'ensemble module-membrane est primordial si l'on veut maintenir constantes le plus longtemps possible les performances du système à savoir perméabilité au niveau le plus élevé et sélectivité à la hauteur désirée [34].

Chaque installation comprend les éléments suivants :

- Une pompe de mise en pression :
 - OI : 30 à 100 bars ;
 - NF : 5 à 30 bars ;
 - UF : 1 à 5 bars ;
 - MF : 0.2 à 5 bars.
- Un ou des modules de filtration ;
- Une pompe de recirculation (suivant le mode de fonctionnement) ;
- Une vanne de détente ;
- Un échangeur de chaleur (suivant les cas) ;
- Une ou plusieurs cuves de stockages.

II.5.1 Choix du type de procédés :

Trois procédés existent :

- procédés discontinu ou batch ;
- procédés continu a recyclage ;
- procédés continu.

II.5.1.1 Procédé discontinu :

Une solution est injectée dans le module, la partie concentrée retourne dans le réservoir jusqu'à ce que l'on ait atteint une valeur limite recherchées [34].

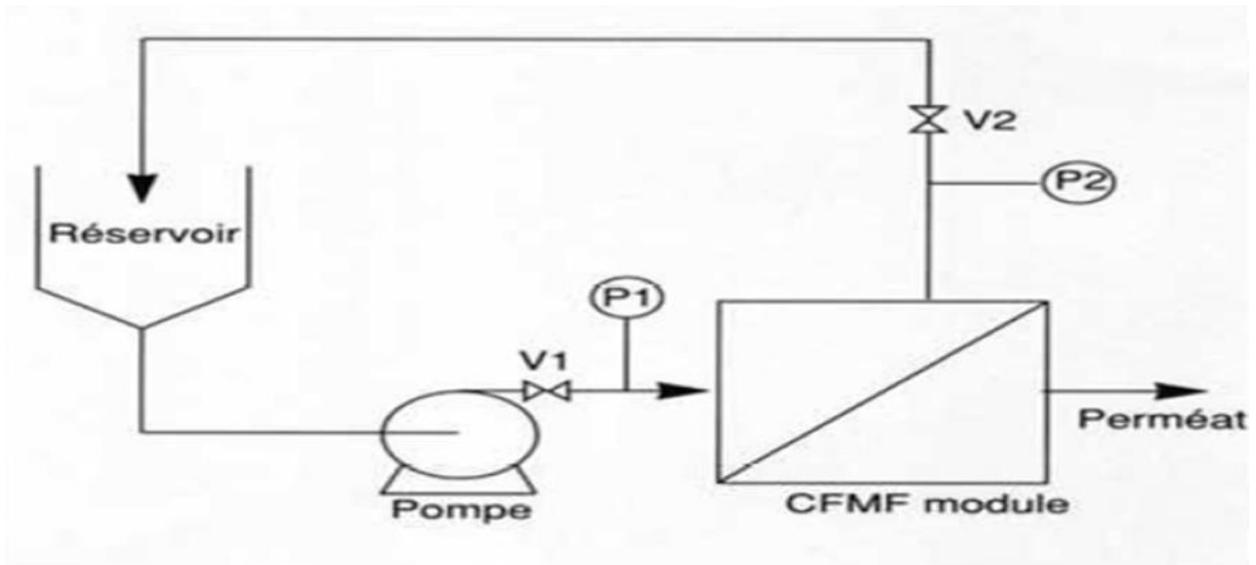


Figure II.3: Principe de fonctionnement par procédé discontinu.

II.5.1.2 Procédés continu à recyclage :

C'est le mode de fonctionnement le plus employé en production d'eau potable par microfiltration ou ultrafiltration en continu avec recirculation. La pompe d'alimentation envoie la solution à traiter dans une boucle, où une pompe de recirculation confère au fluide une vitesse importante. C'est la pompe d'alimentation qui donne la pression voulue. Une vanne de détente permet de régler cette pression dans la boucle de recirculation et d'évacuer le concentrât. Ce système est souple, consomme moins d'énergie que le procédé discontinu, ce qui justifie l'emploi de ce système lorsque le débit est important, par contre les flux de perméat sont plus faibles [34].

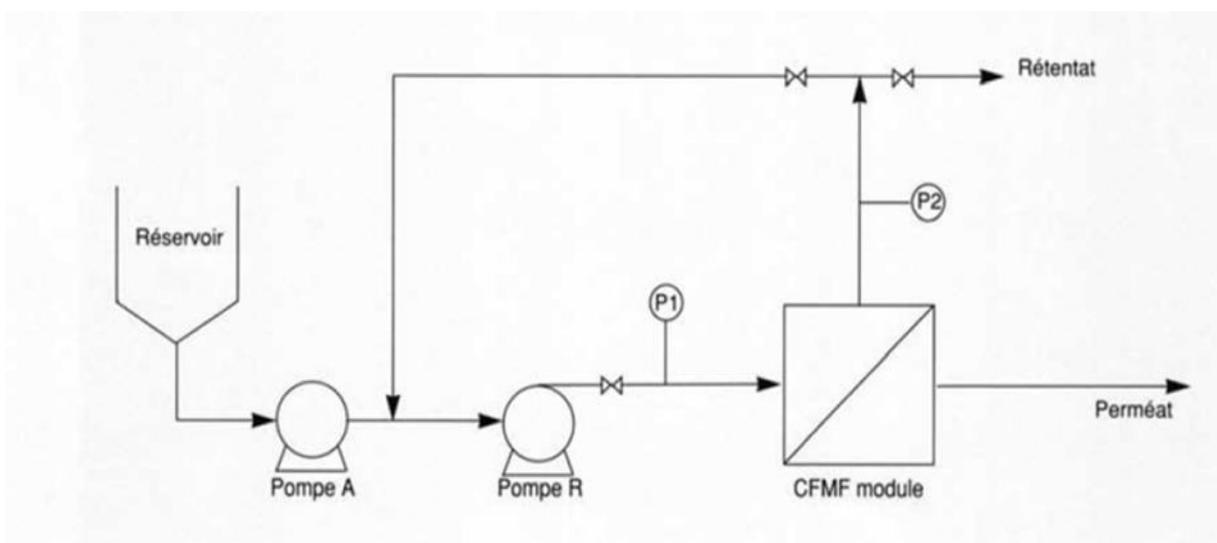


Figure II.4: Principe de fonctionnement en continu, 1 étage, à boucle de recirculation.

II.5.1.3 Procédés continu :

Pour ce procédé, la boucle de filtration est alimentée en permanence. Industriellement, plusieurs modules sont placés en série pour obtenir un bon rendement [34].

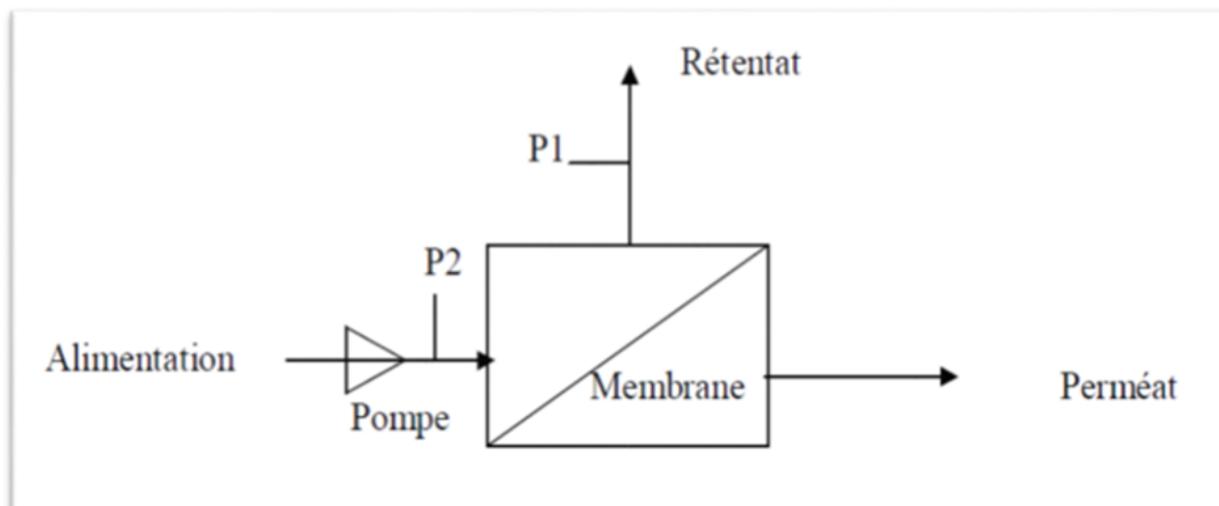


Figure II.5: Principe de fonctionnement par procédé continu.

II.5.2 Choix de la pression de fonctionnement :

Le choix de la pression de fonctionnement est lié à des considérations d'abord techniques ensuite économiques.

II.5.2.1 Considérations techniques :

La pression de fonctionnement doit évidemment être supérieure à la pression osmotique. La sélectivité d'une membrane augmente avec la pression on pourra dans certains cas être amené à choisir la pression en fonction de la sélectivité souhaitée pour la membrane. Pour une vitesse de circulation donnée, il existe une pression limite au-delà de laquelle le flux de perméat n'augmente plus par suite du phénomène de polarisation de concentration. Il est donc impératif de connaître cette valeur limite, de manière à se situer nettement au-dessous.

Lorsque la pression est trop élevée se posent des problèmes de tenue mécanique des membranes, ainsi que des modules.

II.5.2.2 Considérations économiques :

Tout procédé de séparation, le choix de la pression de fonctionnement doit faire l'objet d'une optimisation entre le coût de la consommation énergétique et le coût lié à la surface de membranes. En effet, lorsque la pression augmente, la consommation d'énergie devient plus

importante. Par contre, pour une production donnée, la surface de membrane nécessaire devient plus faible [30].

Tableau II.1: Pressions d'opération habituelles des procédés membranaires.

Procédé	MF	UF	NF	OI
ΔP_m minimale (kPa)	50	100	500	3000
ΔP_m maximale (kPa)	200	500	3000	10000

II.5.3 Choix de la température :

Le choix de la température de fonctionnement est déterminé en fonction des considérations suivantes :

- ✓ Pour une pression donnée, le compactage d'une membrane est d'autant plus important quand la température est élevée.
- ✓ Le débit d'eau à travers la membrane augmente avec la température par suite de la diminution de la viscosité.

Il en résulte que l'on peut :

- ✓ Soit augmenter la température en récupérant éventuellement des calories disponibles.
- ✓ Soit diminuer la pression de fonctionnement si la température est trop élevée [30].

II.5.4 Choix du taux de conversion :

Le choix de la valeur de ce paramètre résulte d'un compromis entre des considérations économiques et des considérations techniques.

- du point de vue économique, on a en effet intérêt à adopter un taux de conversion le plus élevé possible, de manière à diminuer la quantité d'eau brute entrant dans l'installation, d'où des investissements plus faibles et une consommation d'énergie réduite.
- du point de vue technique, un taux de conversion élevé a pour conséquence une concentration du circuit saumure plus importante d'où des risques de précipitation des sels peu solubles et une augmentation de la salinité de l'eau produite [30].

II.6 Phénomènes Limitant le Transfert de Matière :

Lors de la filtration d'un solvant pur, le flux de perméat J varie linéairement avec la pression transmembranaire, par contre lors de la filtration de solutés et au-delà d'une certaine valeur de PTM, il n'y a plus de linéarité entre pression transmembranaire et J , et le flux atteint une valeur limite maximum (J_{limite}), puis une augmentation de la pression transmembranaire ne conduit plus à une augmentation de flux. Cette diminution de flux s'explique principalement par l'accumulation de matière au voisinage de la membrane, expliquée par deux phénomènes.

II.6.1 Phénomène de polarisation de concentration :

Lors de la filtration, les espèces retenues (ions, macromolécules, colloïdes, particules) s'accumulent progressivement à la surface de la membrane sous l'effet de la pression. Le gradient de pression mis en jeu entraîne le solvant et le soluté par convection de la solution d'alimentation vers la membrane. Elle représente une barrière physique qui provoque une surconcentration dans le retentât à la paroi de la membrane. Il s'établit alors un gradient de concentration entre la surface membranaire et le sein de la solution d'alimentation. Cette différence de concentration induit un flux diffusionnel dans le sens opposé au flux convectif. Ce phénomène appelé polarisation de concentration est réversible et disparaît. Lors de l'annulation de la pression transmembranaire. La première conséquence de ce phénomène est l'augmentation de la différence de la pression osmotique $\Delta\pi$ de part et d'autre de la membrane et donc la réduction de la force motrice de perméation de l'eau à travers la membrane. La différence de pression osmotique est en fait la pression minimale qu'il faut dépasser pour qu'il y ait perméation d'eau au travers des pores dans le cas d'une membrane d'OI et des petites molécules (lactose et ions) dans le cas de la nanofiltration.

Une conséquence de l'augmentation de $\Delta\pi$ due à la polarisation de la concentration, est qu'il faut augmenter la pression transmembranaire pour conserver un flux de perméation constant. Cela se traduit par une augmentation de la consommation d'énergie et donc en une hausse des coûts d'opération. La pression osmotique est spécifique à chaque soluté et elle est d'autant plus forte que la masse molaire du soluté est faible et donc que sa vitesse de diffusion est rapide.

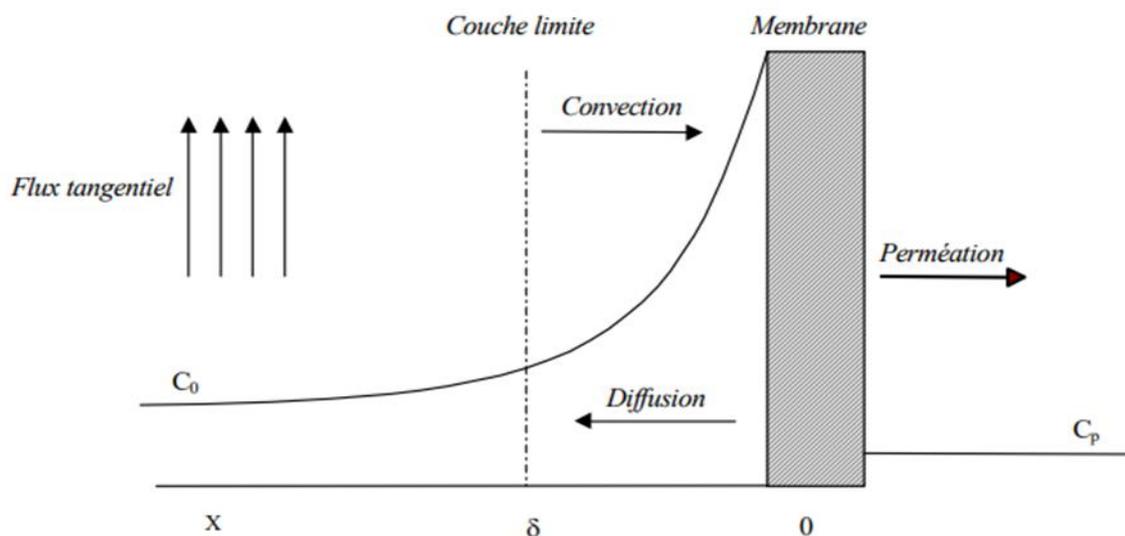


Figure II.6: Représentation schématique du phénomène de polarisation de concentration.

II.6.2 Colmatage membranaire :

Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, se produisant à l'interface membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité. On distingue en général les différents types de colmatage suivant [35].

- Par formation d'un gâteau (figure II.7.a) : il s'agit d'un empilement de particules à la surface de la membrane ; ce type de colmatage par dépôt de surface est en général réversible c'est-à-dire qu'il peut être éliminé par rinçages à l'eau, on réalise ce lavage à contre-courant [36].
- Par bouchage des pores (figure II.7.b): si la taille des particules est suffisamment faible par rapport à celle des pores, celles-ci vont rentrer à l'intérieur des pores et les boucher progressivement [36].
- Par adsorption (figure II.7.c): l'adsorption est un phénomène irréversible dû aux interactions physico-chimiques entre le soluté et la membrane [36].
- Par blocage des pores (figure II.7.d): il s'agit d'une obstruction mécanique des pores conduisant à une diminution du nombre de pores disponibles de la membrane [36].

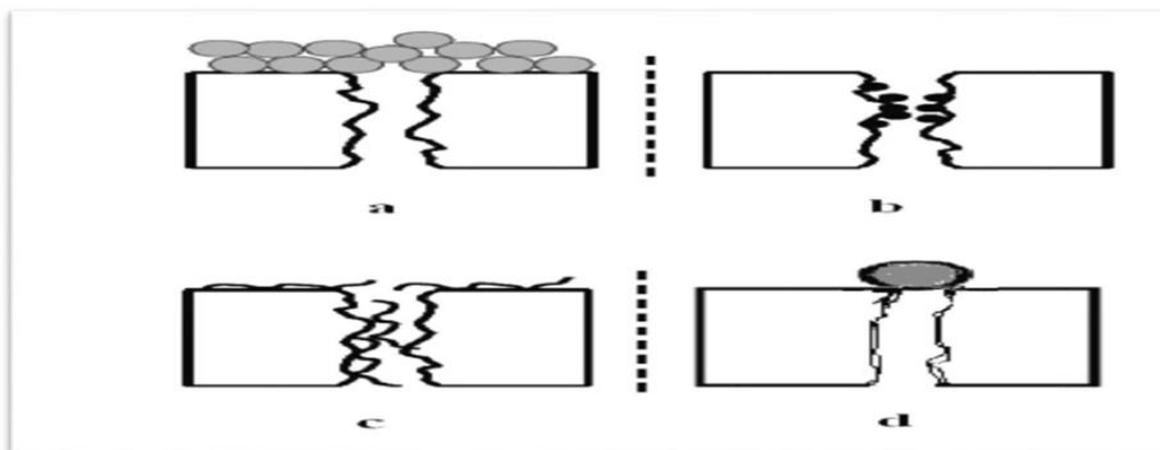


Figure II.7 : Différentes formes de colmatage (a)- formation d'un gâteau, (b)- bouchage des pores, (c)- adsorption, (d)- blocage des pores [37].

II.7 Indicateurs de colmatages :

Les indicateurs de colmatage ont été développés dans l'objectif d'intégrer les facteurs susceptibles de jouer un rôle sur le colmatage (taille, nature, caractéristiques physicochimiques des composants ...) en un seul paramètre.

II.7.1 Silt Density Index (SDI):

Le pouvoir colmatant des particules en suspension d'une eau s'exprime en termes de « Silt Density Index » (SDI). IL s'agit d'un test adopté en 1995 par l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Le principe de ce test consiste à déterminer l'encrassement d'un filtre en acétate de cellulose de 47 mm de diamètre et présentant une taille de pores de 0,45µm après 15 minutes de filtration frontale de la suspension à traiter, et consiste aussi à mesurer la baisse de vitesse de perméation associée au colmatage. La pression est maintenue constante à 2,1 bars.

$$SDI_{15} = [(1 - (t_1/t_2))/15] * 100 \quad (II.8)$$

t_1 : est le temps nécessaire pour filtrer les premiers 500 ml de solution ;

t_2 : le temps nécessaire pour filtrer 500 ml de solution à compter de 15 min du début de la filtration.

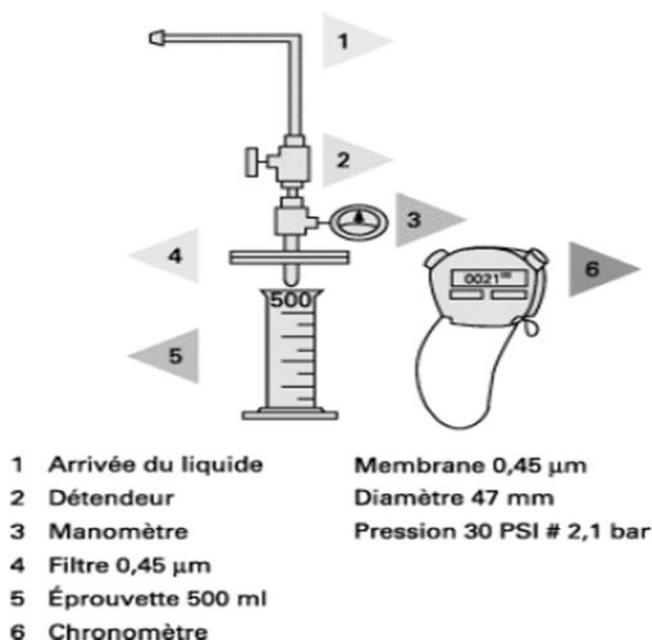


Figure II.8 : Montage expérimental pour déterminer le SDI.

Un indice de colmatage supérieur à 5 dénotera le caractère particulièrement colmatant de l'eau à traiter [38].

Tableau II.2: Valeurs repère du SDI.

SDI < 3	Peu ou pas de colmatage
3 < SDI < 5	Colmatage classique
SDI > 5	Colmatage excessif

II.7.2 Modified fouling index (MFI):

Schippers et Verdouw (1980) ont proposé un indicateur de colmatage appelé « Modified Fouling Index » (MFI). Cet indicateur de colmatage tient compte des mécanismes qui contrôlent le colmatage. Schippers et Verdouw (1980), et par la suite Boerlage et al. (2003), considèrent que le colmatage d'une membrane en filtration frontale où le gradient de pression est constant a lieu en 3 étapes [39]:

- Blocage des pores;
- Formation d'un gâteau incompressible;

- Formation d'un gâteau compressible.

Les trois phases de la filtration frontale, d'après Schippers et Verdouw (1980), sont représentées sur la figure (II.9). La phase qui correspond à la formation d'un gâteau incompressible est la partie linéaire du graphe t/V versus V comme cela apparaît sur cette figure. L'indicateur MFI correspond spécifiquement au colmatage par formation d'un gâteau à la surface de la membrane.

De façon pratique la détermination du MFI est similaire à celle du SDI. Le même dispositif expérimental est utilisé. Le volume de perméat est mesuré avec un cylindre gradué à chaque intervalle de 30 secondes, pour une durée totale maximale de 20 min, l'origine du temps correspondant au moment où la pression d'opération de 210 kPa (30 psi), est stabilisée. Comme une membrane de $0,45 \mu\text{m}$ est utilisée dans le MFI original, et pour se différencier d'un autre indicateur qui a été développé ultérieurement, l'indice « 0,45 » est ajouté. L'indicateur est donc appelé $MFI_{0,45}$.

Les résultats du test sont donc une série de mesures de temps et de volumes cumulés de perméat. L'indicateur de colmatage est la pente de la partie linéaire du graphe t/V versus V , c'est-à-dire la tangente de l'angle α (voir Figure II.9). Le MFI s'exprime comme :

$$MFI_{0,45} = \tan \alpha \quad (\text{II.9})$$

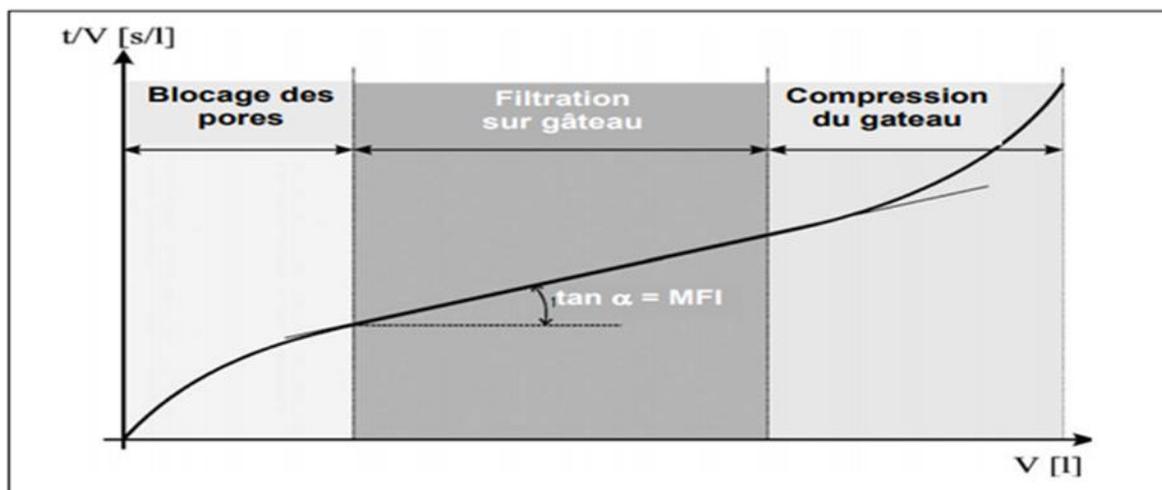


Figure II.9 : Représentation graphique t/V versus V .

II.7.3 Modified Fouling Index – Ultrafiltration (MFI-UF):

Schippers et al. (1980) ont démontré l'effet de la taille des pores de la membrane sur la valeur MFI en utilisant le même type d'alimentation. La valeur MFI augmente avec la

diminution de la taille des pores de la membrane. La valeur MFI a augmenté de façon spectaculaire lorsque des membranes de 0,05 m et 0,015 m ont été utilisées, indiquant que $MFI_{0,45}$ n'est pas capable de tenir compte de la présence de petites particules colloïdales ($<0,05$ m). Ceci a été confirmé par Braun et al. (2002) qui ont ensuite déclaré qu'il serait plus approprié et pratique d'avoir le test d'encrassement basé sur la taille des pores correspondant à la situation réelle.

Pour cette raison, Boerlage et al, ont récemment développé le test MFI-UF afin d'intégrer l'influence de colloïdes plus petits de taille inférieure à $0,45 \mu\text{m}$ dans la mesure de l'indice d'encrassement [40].

Le MFI-UF est défini comme :

$$\text{MFI}_{\text{-UF}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \frac{\Delta P_m}{\Delta P_0} \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \tan \alpha \quad (\text{II.10})$$

Avec :

S : Surface de la membrane (m^2) ;

S_0 : Surface de la membrane du test de MFI ($17,34 \times 10^{-4} \text{m}^2$).

II.8 Paramètres influençant le colmatage:

Il est important de bien connaître les facteurs influençant le colmatage afin de développer des stratégies visant à minimiser ce phénomène et ainsi réduire les coûts d'opération et augmenter la durée de vie des membranes. Ces facteurs sont :

- Paramètres relatifs à la membrane et ces caractéristiques: Matériau membranaire, seuil de coupure et mode de filtration;
- Paramètres relatifs à la Chimie de la solution, pH et force ionique, et les caractéristiques de l'eau à traiter;
- Influence du prétraitement;
- Les conditions d'opération du procédé membranaire.

Ces conditions sont la vitesse de perméation, le taux de récupération global, la vitesse d'écoulement tangentielle et la pression d'opération. La vitesse d'écoulement tangentielle est

simplement le débit d'écoulement tangentiel divisé par la section du canal d'écoulement tangentiel [35] [37].

II.9 Prévention du colmatage :

La stratégie générale de prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes :

- Pré-filtration;
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;
- Ajustement de pH (acidification) pour déplacer les équilibres de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de fer, de manganèse, de calcium, de baryum...) ;
- Ajout d'un agent antitartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes;
- Coagulation de la Matière Organique Naturelle. En effet, l'effet colmatant des floes est, a priori, moins fort que celui des colloïdes ;
- Enlèvement du fer (Fe^{2+}) qui pourrait précipiter [37].

II.10 Types de nettoyages :

Le colmatage des membranes implique qu'il est nécessaire d'effectuer des rinçages et des lavages de façon périodique afin d'enlever la matière qui s'est déposée à la surface des membranes causant ainsi une baisse de leur perméabilité [41].

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes.

Trois types de nettoyage sont de façon générale pratiqués :

- Le nettoyage mécanique ;
- Un nettoyage chimique ;
- Le nettoyage enzymatique.

II.10.1 Le nettoyage mécanique :

Le principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques, d'origines hydrodynamiques. La procédure généralement utilisée est le rétro lavage : une partie du perméat est retourné a contre courants à travers la membrane. Une

telle pratique nécessite une membrane qui soit en mesure de supporter physiquement un gradient de pression inversé. Enfin, par injection continue ou occasionnelle d'air (ou de gaz) à travers la membrane. La matière déposée en surface peut éventuellement se détacher. Très efficace dans le cas de dépôt faiblement liés au support, ce type de nettoyage ne concerne que les configurations tubulaires ou spiralées [41].

II.10.2 Le nettoyage chimique :

Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage. La durée d'une séquence de nettoyage peut aller de 30 à 60 min. Les nettoyages sont généralement effectués à la température la plus élevée que la membrane peut supporter sans dégradation. Les principales étapes de nettoyage sont se déroulent ainsi :

- le premier nettoyage à base d'acide, a pour objectif de solubiliser les couches d'entartrage contenant calcium, tartre et minéraux, et ainsi d'éviter la formation d'hydroxyde insoluble donc très difficile à éliminer ;
- Rinçage à neutralité ;
- le deuxième nettoyage, alcalin, a principalement pour effet d'hydrolyser la matière organique et biologique ;
- Rinçage à neutralité.

La séquence de nettoyage dépend bien évidemment du contexte d'utilisation, la connaissance de la nature du matériau membranaire et de son environnement conduit à exclure certains réactifs et impose la limite en pH, en température, en temps de contacts et en concentration [41].

Suivant la nature des éléments colmatants est celle des matériaux composant la membrane, différents produits de nettoyage peuvent être utilisés :

- ✓ **produits alcalin** : soude et potasse saponifient les graisses et solubilisent les protéines;
- ✓ **produits acide** : ils participent à la dissolution de précipités de sels minéraux. Leur efficacité est limitée sur les dépôts de nature organique. Les plus utilisés sont l'acide nitrique et phosphorique.
- ✓ **produit tensioactifs** : leur rôle est d'augmenter la mouillabilité de la surface filtrante et de favoriser le contact entre l'agent de nettoyage et le dépôt. Les tensioactifs anioniques et non ioniques sont en général les plus efficaces [38].

Le Tableau suivante présente les différents produits de nettoyage que l'on peut rencontrer :

Tableau II.3 : Produits utilisés lors de nettoyages chimiques.

Origine	Produits	Action	Inconvénients
Alcalins	Hydroxyde (sodium et potassium)	<ul style="list-style-type: none"> • Saponification des graisses et solubilisation des protéines. • Dispersant, émulsifiant des graisses, agent d'hydrolyse des protéines, solubilisant des carbonates. 	<ul style="list-style-type: none"> • pH>11 dans le cas d'alcalins chlorés pour éviter la corrosion. • Élément nutritif pour les microorganismes.
Acides	Acide nitrique, phosphorique, hydroxyacétique, gluconique, citriques, lactique, sulfamique...	<ul style="list-style-type: none"> • Dissolution des précipités de sels minéraux 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité limitée sur les dépôts de nature organique.
Tensioactif	Cationiques, anioniques et non ioniques.	<ul style="list-style-type: none"> • Peu d'action • Améliorent l'efficacité du nettoyage et réduisent le temps de rinçage 	<ul style="list-style-type: none"> • Inopérant à pH acides. • Adsorption sur certains matériaux membranaires.

L'agent nettoyant se doit d'être efficace pour éliminer le colmatage tout en étant inoffensif vis-à-vis des membranes et du procédé. C'est pourquoi le choix des agents de nettoyage s'effectue en fonction de la nature des éléments colmatant lorsqu'ils sont identifiés et de la stabilité chimique du matériau membranaire [38].

II.10.3 Le nettoyage enzymatique:

Ce type de nettoyage constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans les cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes requièrent des temps de traitement plus long que les traitements chimiques et sont aussi plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont peut-être souvent adoptés [38].

II.11 Eau utilisée pour le nettoyage :

La qualité de l'eau utilisée pour le nettoyage des membranes est déterminante. Idéalement l'eau de nettoyage des membranes (eau de rinçage ou eau de préparation des solutions) doit satisfaire de façon générale aux conditions suivantes :

- ✓ indice de colmatage entre 1-5 ;
- ✓ dureté totale entre 1 à 5 milliequivalent/l ;
- ✓ teneur en silicate 1-5mg/l ;
- ✓ teneur en fer 0.1-0.5 mg/l ;
- ✓ teneur en manganèse 0.02-0.2 mg/l [41].

Chapitre III :

Les méthodes numériques de résolutions

III.1 Introduction :

Pour résoudre un problème physique posé sous la forme d'une équation différentielle, ou aux dérivées partielles, par un schéma numérique, on procède par trois étapes successives : discrétisation, transformation et résolution. Premièrement, on ramène le problème à un problème discret par la division du domaine global en sous domaine: c'est la discrétisation. La deuxième étape consiste, à faire une approximation des équations gouvernantes par des équations algébriques pour chaque sous domaine : c'est la transformation. Finalement, le système d'équations algébriques est résolu en utilisant des méthodes numériques: c'est la résolution.

III.2 Les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles :

Le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé à l'aide d'une méthode de discrétisation dans un système d'équations algébriques.

Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- Méthodes des différences finis (MDF) ;
- Méthodes des éléments finis (MEF) ;
- Méthodes des volumes finis (MVF).

Comme tout calcul, le calcul numérique a des avantages comme il a des inconvénients, parmi ces avantages on peut citer la rapidité d'exécution, la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles et il peut nous donner une solution numérique pour nombreux problèmes pratiques ayant un modèle mathématique. L'inconvénient de ce calcul est sa difficulté pour sélectionner la bonne solution en cas de plusieurs solutions au problème mathématique [42].

III.3 Principe du calcul numérique :

Le principe du calcul numérique est schématisé comme suit [43] :

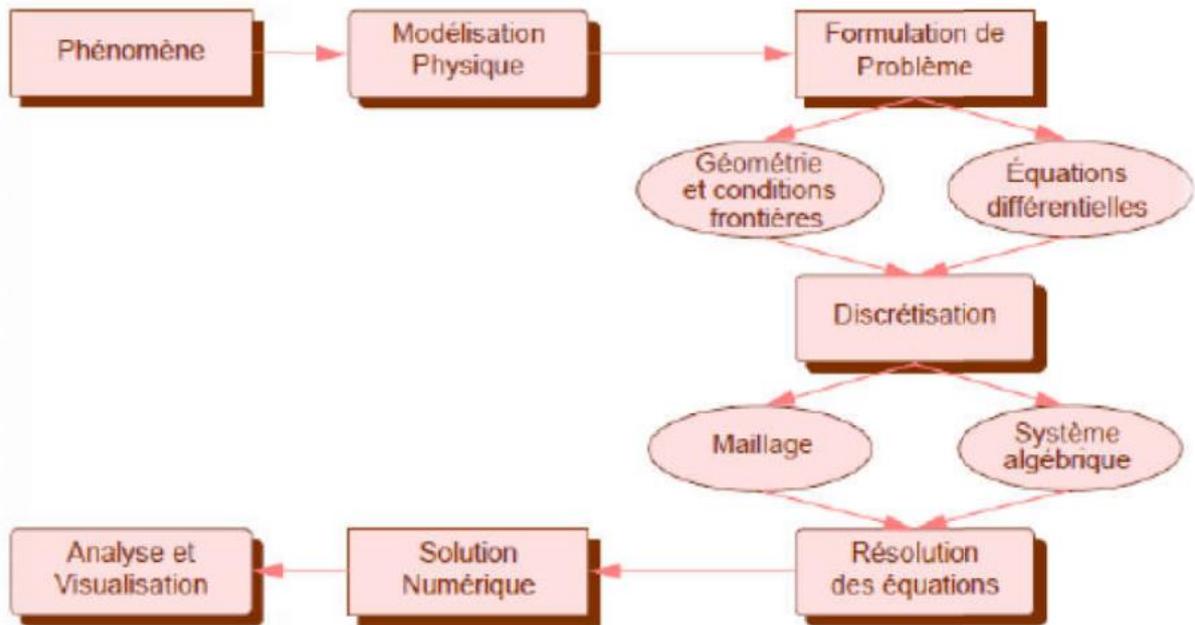


Figure III.1: Principe du calcul numérique.

III.4 Méthode des différences finis (MDF) :

C'est une méthode basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, pour cela on aura un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds. [44].

La figure (III.2) représente un exemple de maillage pour le cas bidimensionnel.

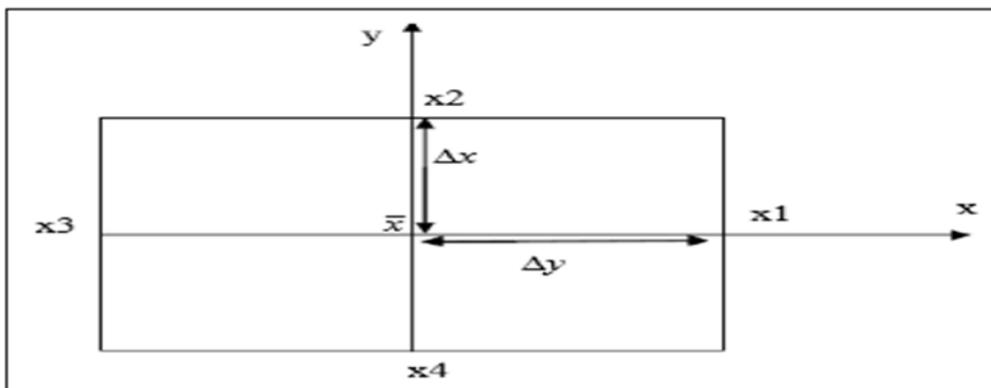


Figure III.2 : Configuration géométrique en 2D.

Où les points x_1 , x_2 , x_3 et x_4 étant les nœuds du maillage.

La méthode des différences finies est très simple à mettre en œuvre, mais elle ne peut pas être précise puisqu'elle prend le développement en série de Taylor de l'inconnue jusqu'au troisième terme seulement. C'est une méthode qui est difficilement applicable aux domaines à géométrie compliquée, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles.

III.5 Méthodes des volumes finis (MVF) :

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolue numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. La formulation différences finies adoptées ici, consiste en une approche du type volume de contrôle. Son principe est basé sur le fait de proposer un champ de pression qui permet d'obtenir une première approximation du champ de vitesse de l'écoulement. Puis on applique des corrections du champ de pression dans le but de rendre le champ de vitesse résultant conforme avec l'équation de continuité [45].

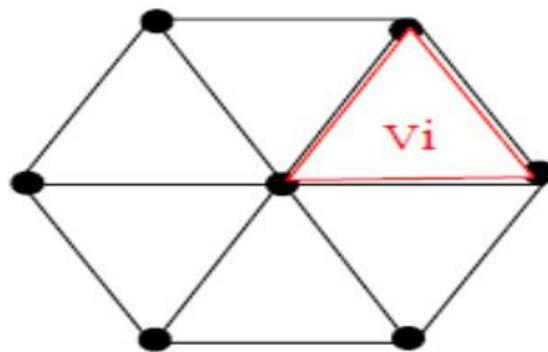


Figure III.3 : Volume de contrôle.

III.6 Méthodes des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation nodale basée sur la discrétisation du domaine en sous domaines ou éléments. La méthode est un ensemble d'approximation consécutives de la géométrie, la variable physique et de l'intégration mathématique sur le domaine [46].

Bien que la méthode des éléments finis soit théoriquement généralisable à toutes les dimensions d'espace et à tous les ordres de dérivation, dans la pratique, l'augmentation de ces paramètres accroît de manière dramatique la difficulté et on se contente de résoudre des problèmes limités à trois dimensions en espace et deux ordres de dérivation. [47].

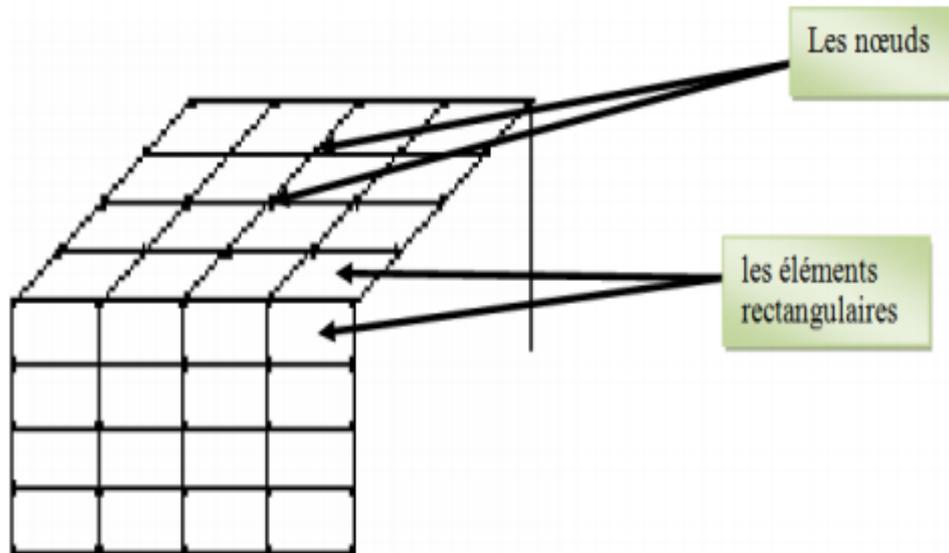


Figure III.4 : maillage d'un domaine en éléments finis.

III.6.1 Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis :

a) Les avantages :

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

b) Les inconvénients :

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important.

III.6.2 Logiciels utilisant les éléments finis :

Parmi les Logiciels utilisant éléments finis on peut citer :

- ABAQUS.

- ANSYS.
- CAST3M.
- ASTER.
- COMSOL-MULTIPHYSICS.
- ICAB.
- CALCULIX.
- EuroPlexus.
- Flux2D/ 3D.

Chapitre IV :

Comsol multiphysics

IV.1 Introduction:

Depuis l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, la simulation numérique a pris une grande place dans la recherche et l'industrie et a remplacé l'expérimentation directe trop coûteuse et longue à mettre en œuvre. La simulation numérique est fondée sur la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) conduisant à l'obtention de solutions approchées.

IV.2 Description du logiciel :

COMSOL MULTIPHYSICS (ex : FEMLAB), est un logiciel d'analyse par éléments finis, qui permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. COMSOL a été lancé par les étudiants diplômés à GERMUND DAHLQUIST reposant sur des codes mis au point pour un cours universitaire à l'Institut Royal de Technologie (KTH), à STOCKHOLM, en 1986[48] [49].

La première version 1.0 de COMSOL Multiphysics est sortie en 01 septembre 1998.il existe aujourd'hui plusieurs versions, la plus récente est 5.6 est sortie en 11 novembre 2020.

Dans notre simulation, nous avons choisis de travailler avec le COMSOL MULTIPHYSICS 4.3 qui apporte un assez bon niveau de clarté à notre simulation.



Figure IV.1 : L'icône de COMSOL MULTIPHYSICS 4.3.

IV.2.1 Les avantages de logiciel :

- Touche plusieurs domaines (électronique, électrotechnique, Médecine...);
- Étude 0D, 1D, 2D, 3D ;
- Programmation directe ;
- Utilise une interface graphique.

IV.2.2 Les inconvénients de logiciel :

- Il manque de certaines fonctions utiles comme le dérivé...etc.
- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...).

IV.3 Description de l'interface COMSOL :

Le Bureau COMSOL aide à organiser notre simulation en présentant un clair aperçu au modèle à tout moment. Il utilise la forme fonctionnelle, la structure et l'esthétique comme le moyen d'atteindre la simplicité pour la modélisation des réalités complexes. Par exemple, des outils spécifiques à la tâche apparaissent sur le bureau à droite quand nous en avons besoin, montrant seulement ce qui est actuellement possible, ce qui élimine l'incertitude de la construction de modèles et apporte un certain ordre à nous simulation. Le bureau est composé de plusieurs fenêtres, ce qui peut ou ne peut pas être affiché en fonction des besoins. Ces fenêtres comprennent le constructeur du modèle, paramètres, graphiques, messages, progrès, aide et d'autres.

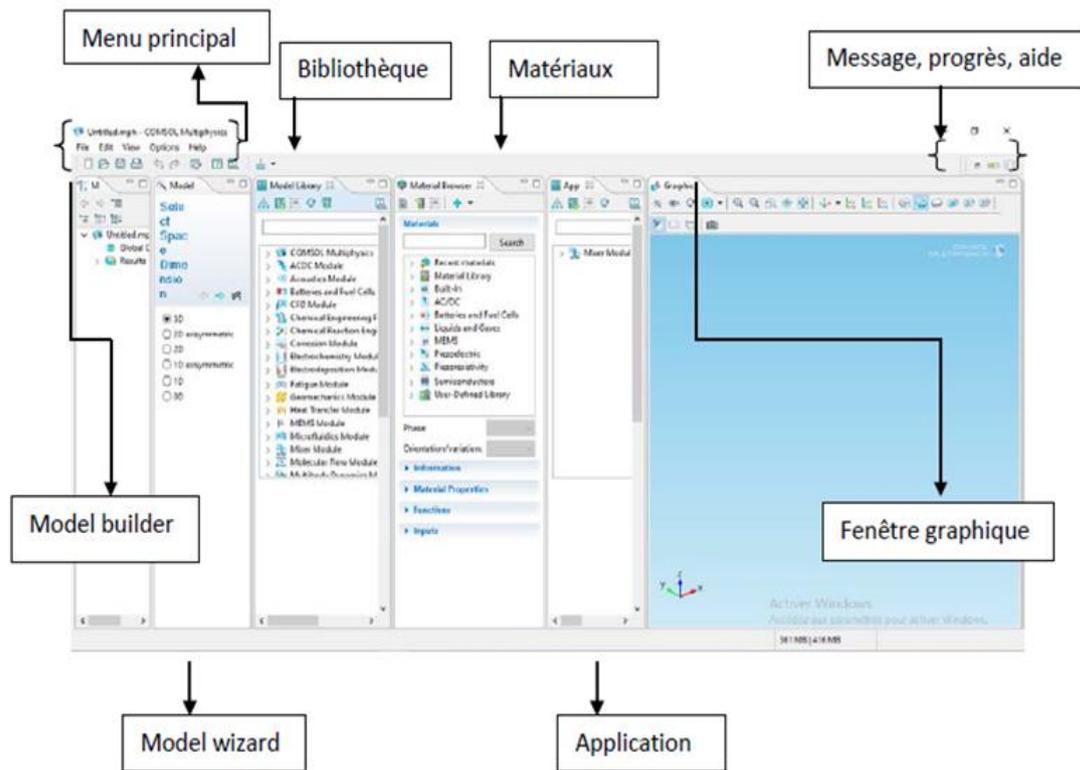


Figure IV.2 : Interface de COMSOL.

IV.4 Procédure de simulation :

Les étapes essentielles à suivre pour une conception d'une structure sur COMSOL MULTIPHISICS 4.3 sont :

- ✓ Sélectionner la dimension d'espace ;
- ✓ Sélectionner la physique ;
- ✓ Sélectionner le type d'étude (stationnaire, temporel) ;
- ✓ Définir la géométrie ;
- ✓ Sélectionner les matériaux ;
- ✓ Maillage ;
- ✓ Lancer la simulation ;
- ✓ Traiter et analyser les résultats.

a) Lancement du logiciel :

Pour lancer le logiciel on clique sur l'icône de COMSOL MULTIPHYSICS, la fenêtre du logiciel s'ouvre.



Figure IV.3 : La fenêtre de lancement du logiciel.

b) Sélection de la dimension d'espace :

Il existe plusieurs dimensions d'espace, nous choisissons une dimension spécifique pour chaque étude.

Select Space Dimension

- 3D
- 2D axisymmetric
- 2D
- 1D axisymmetric
- 1D
- 0D

Figure IV.4 : Les différentes dimensions de simulation.

c) Choix de la physique :

Après la sélection de la dimension d'espace, on procède au choix de la physique à utiliser selon la simulation qu'on va faire, la figure IV.5 montre les différentes physiques existantes dans le logiciel.

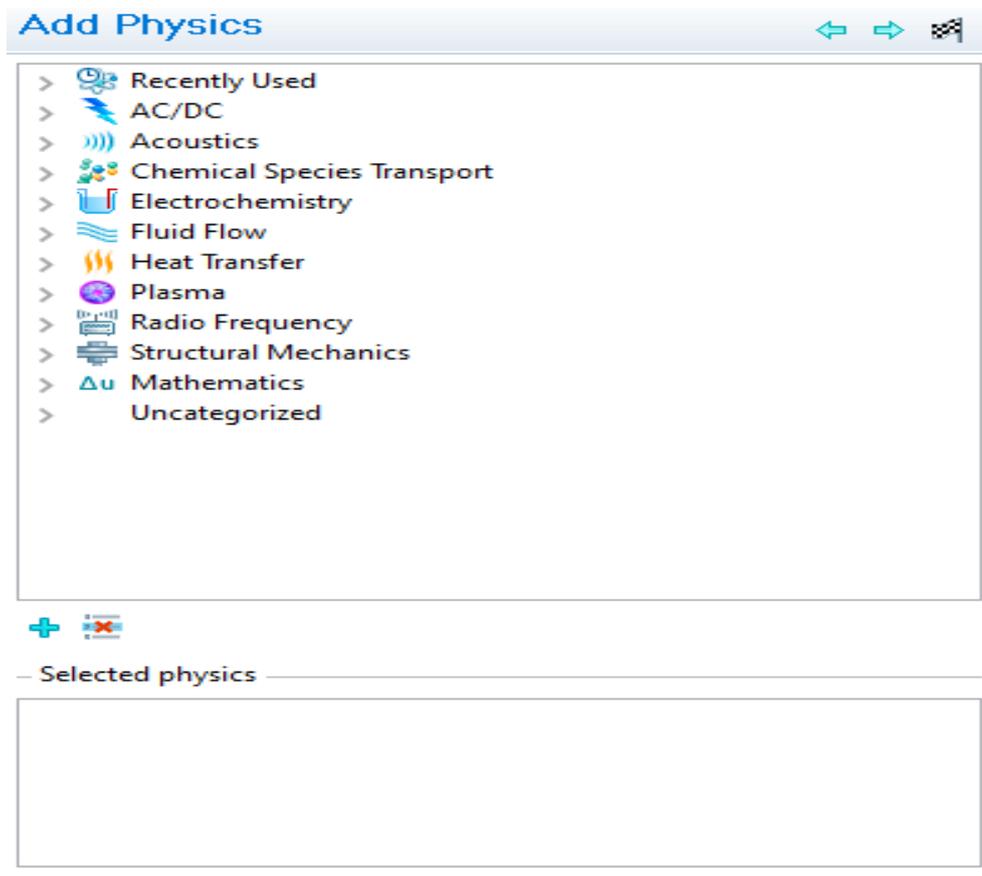


Figure IV.5 : Le choix de la physique à utiliser.

d) Sélectionner l'étude :

La rubrique d'étude nous permet de sélectionner ou bien de définir un domaine d'étude approprié à la physique utilisé.

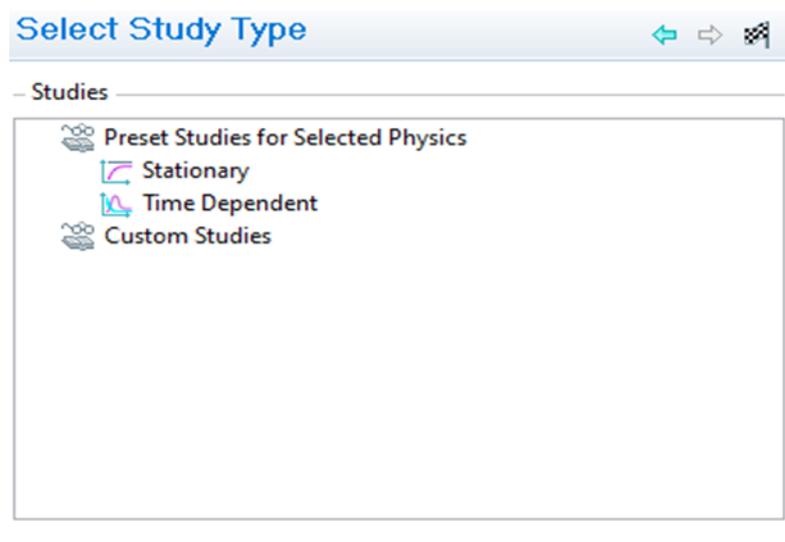


Figure IV.6 : Le choix de l'étude.

e) Définir la géométrie :

Une fois le domaine physique et le domaine d'étude ont été choisis, on commence à déterminer la géométrie de notre structure. La figure IV.7 montre l'interface de travail qui nous permet d'obtenir la géométrie voulue.

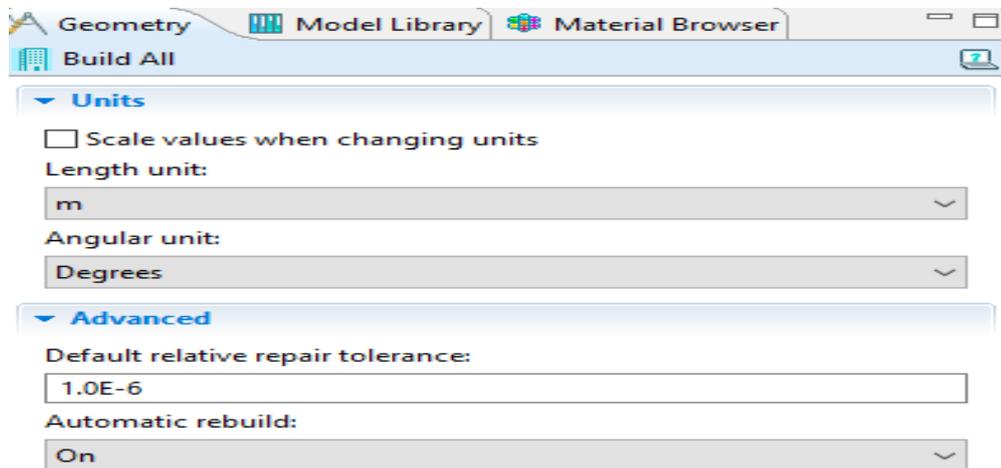


Figure IV.7 : Création d'une géométrie voulue.

f) Choix des matériaux :

La rubrique de choix des matériaux comporte une large gamme de matériaux qui sont disponible sur le logiciel, et du même, ce logiciel nous offre une possibilité de créer un matériau en lui associant toutes les caractéristiques disponible dans les études théoriques.

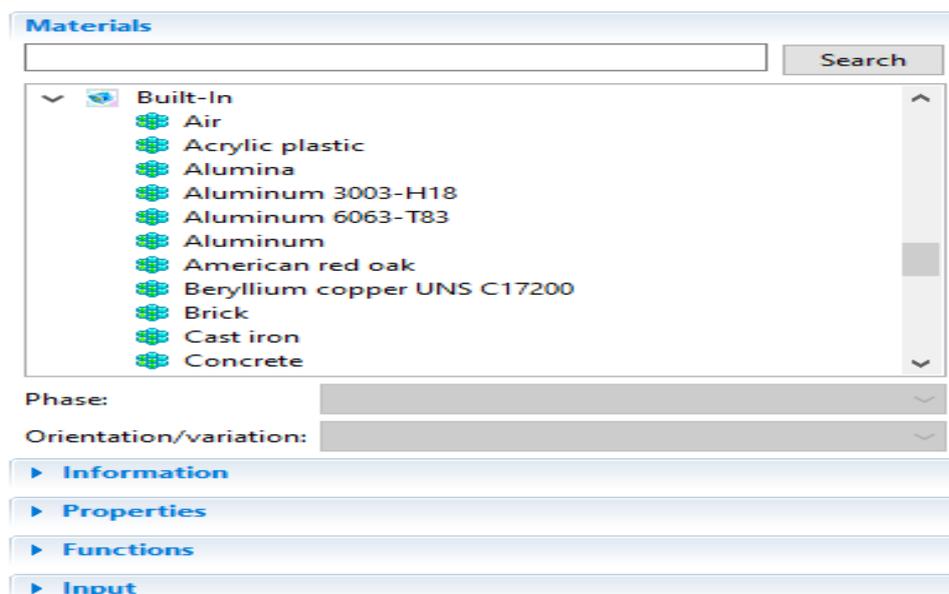


Figure IV.8 : Le choix de divers matériaux.

g) Maillage :

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires appelés mailles. Le maillage est réalisé automatiquement par le logiciel. On peut utiliser les tailles prédéfinies extra grossier ; grossier ; normal ; fine ou extra fine...etc.

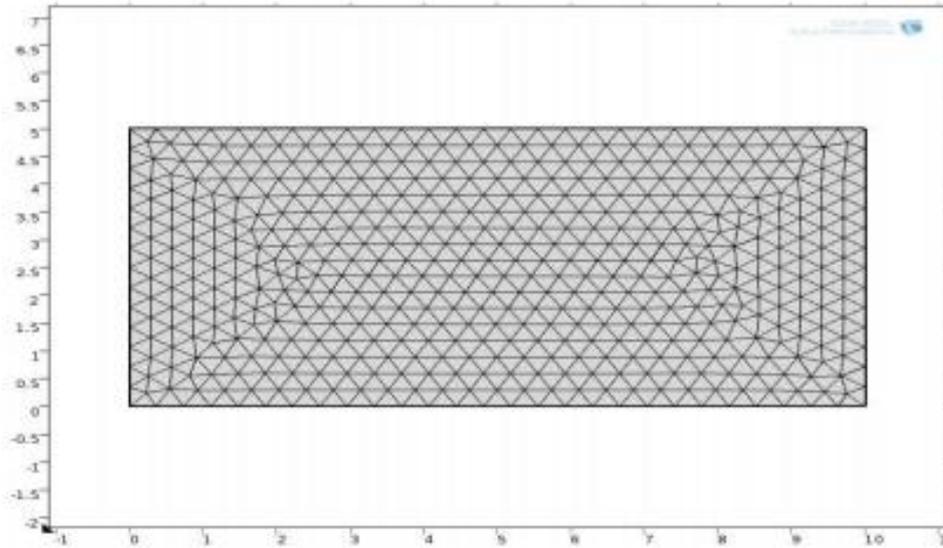


Figure IV.9 : Exemple sur le maillage.

h) Lancement de la simulation et analyse des résultats :

Le lancement de la simulation se fait une fois que toutes les étapes citées au part avant sont réalisées. Le logiciel compile toutes les données, et nous donne à la fin tous les résultats obtenu lors de la simulation.

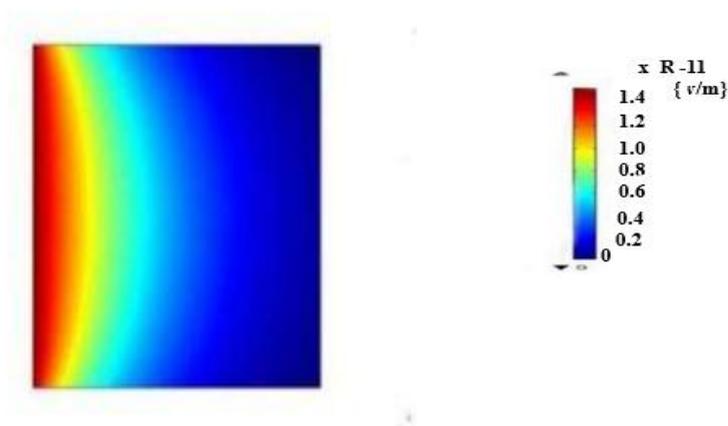


Figure IV.10 : Exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau.

Notre travail consiste à faire une simulation du phénomène de la polarisation de concentration dans un module spiralé avec une membrane d'ultrafiltration, et pour cela, nous procédons premièrement au choix de la dimension d'espace qui est de deux dimensions (2D). Ensuite nous sélectionnons une physique bien déterminé pour notre structure nous allons utiliser les deux physiques suivantes : écoulement laminaire et transport d'espèces diluées (transfère de matière), suivi d'une étape d'étude qui est une étude stationnaire.

Après le choix de la dimension d'espace, de la physique et l'étude, nous procédons à la création de la géométrie suivie par l'étape du maillage.

La figure IV.11 montre la géométrie de module d'ultrafiltration.

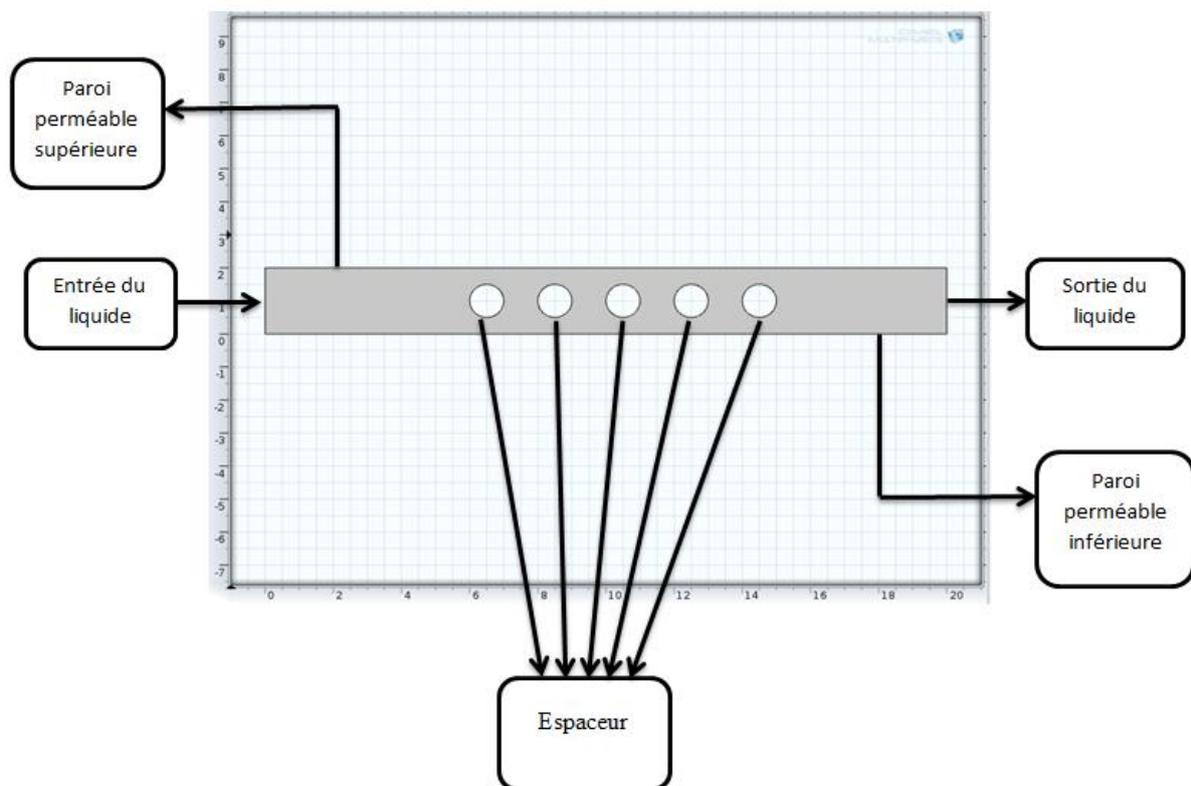


Figure IV.11 : Représentation du module d'ultrafiltration.

Comme le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires (appelés mailles), définis par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

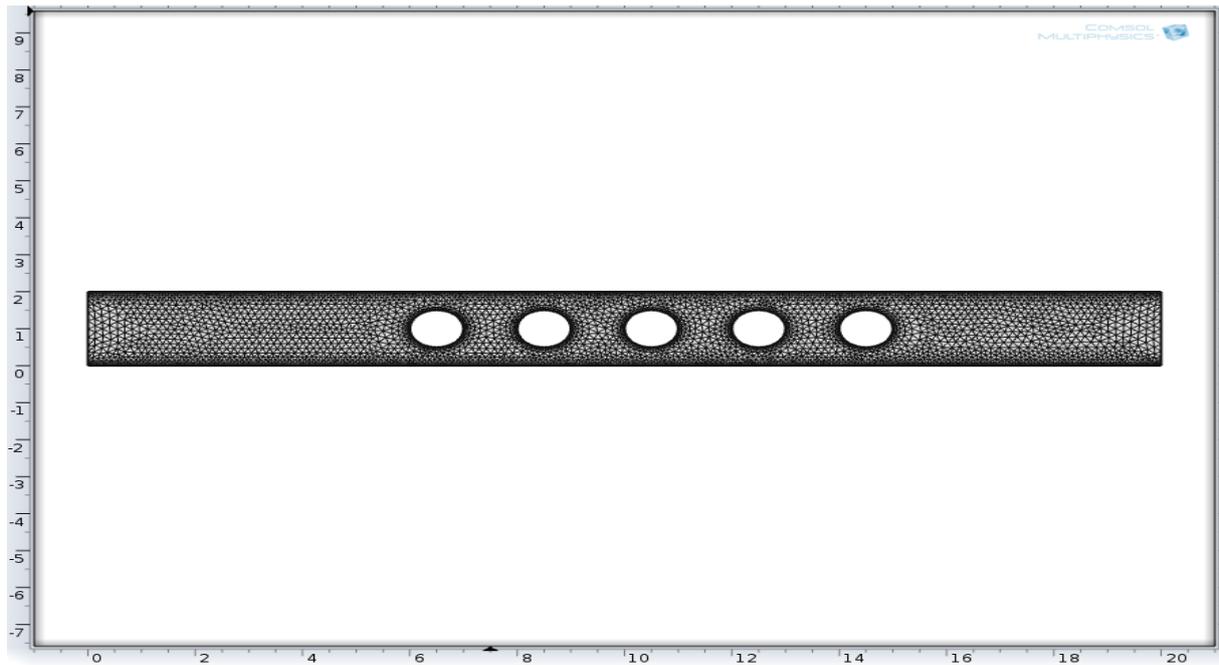


Figure IV.12 : Maillage du modèle utilisé.

Une fois que l'étape du maillage est achevée, on lance la simulation.

Le tableau IV.1 présente une liste des paramètres tenus en compte pour notre simulation.

Tableau IV.1 : Les différents paramètres de la simulation.

Vitesse		Concentration
Suivant l'axe X	Suivant l'axe Y	$C_0 = 3 \text{ mol/m}^3$
$U_0 = 0.02 \text{ m/s}$	$V_0 = 0 \text{ m/s}$	

Chapitre V :

Résultats et

discussions

V.1 Simulation des différents paramètres :

V.1.1 Profil de la concentration au niveau de la paroi perméable :

Pour $C_0 = 3 \text{ mol/ m}^3$ et $U_0 = 0.02 \text{ m/s}$.

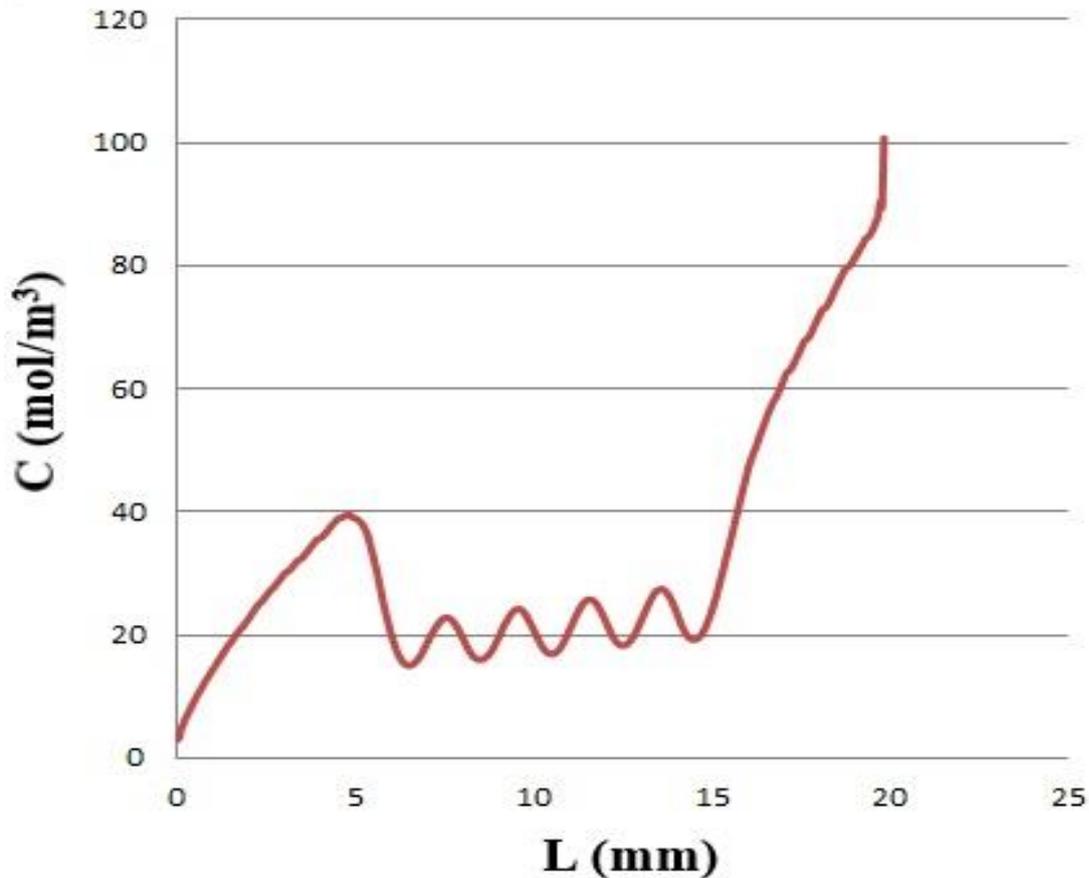


Figure V.1 : profil de concentration au niveau de la paroi perméable.

La figure (V.1) représente l'évolution de la concentration au niveau de la paroi perméable. Dans cette figure on observe bien l'augmentation de la concentration à l'entrée du canal jusqu'à 40 mol/m^3 , on remarque aussi une augmentation claire de concentration avant et après chaque espaceurs qui représente bien le phénomène de polarisation de concentration. Au contraire il y a une diminution de concentration sous les espaceurs à cause de l'augmentation de la vitesse autour de ces derniers (ce qu'on remarquera dans le profil de la vitesse).

V.1.2 Profil de la vitesse :

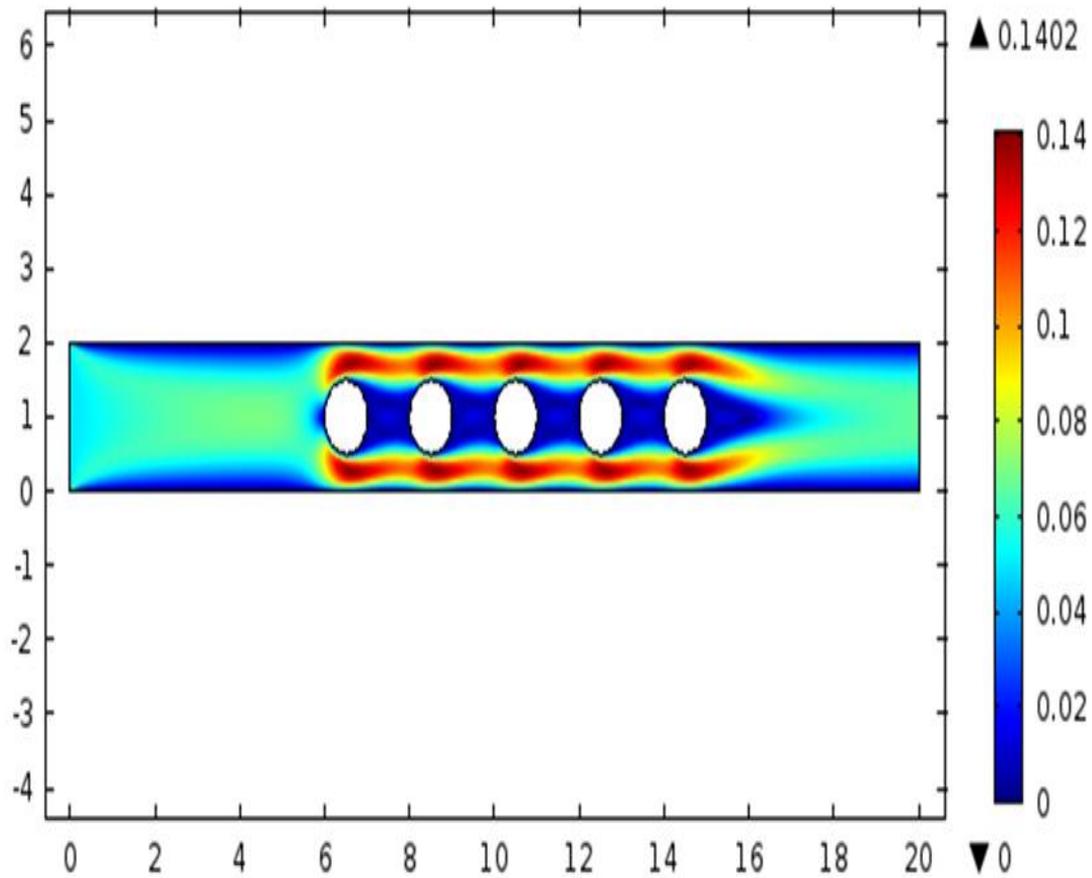


Figure V.2 : profil de vitesse.

La figure (V.2) représente la distribution de la vitesse d'écoulement le long du module, on voit clairement l'évolution d'un écoulement laminaire à l'entrée du canal, mais au cours de la longueur la vitesse prend une forme parabolique donc au voisinage des parois la vitesse est négligeable. On constate aussi une vitesse maximale autour des espaceurs ce qui implique une diminution de la concentration, qui provoquera une diminution du phénomène de polarisation de concentration sous les espaceurs.

V.1.3 Profil de la pression :

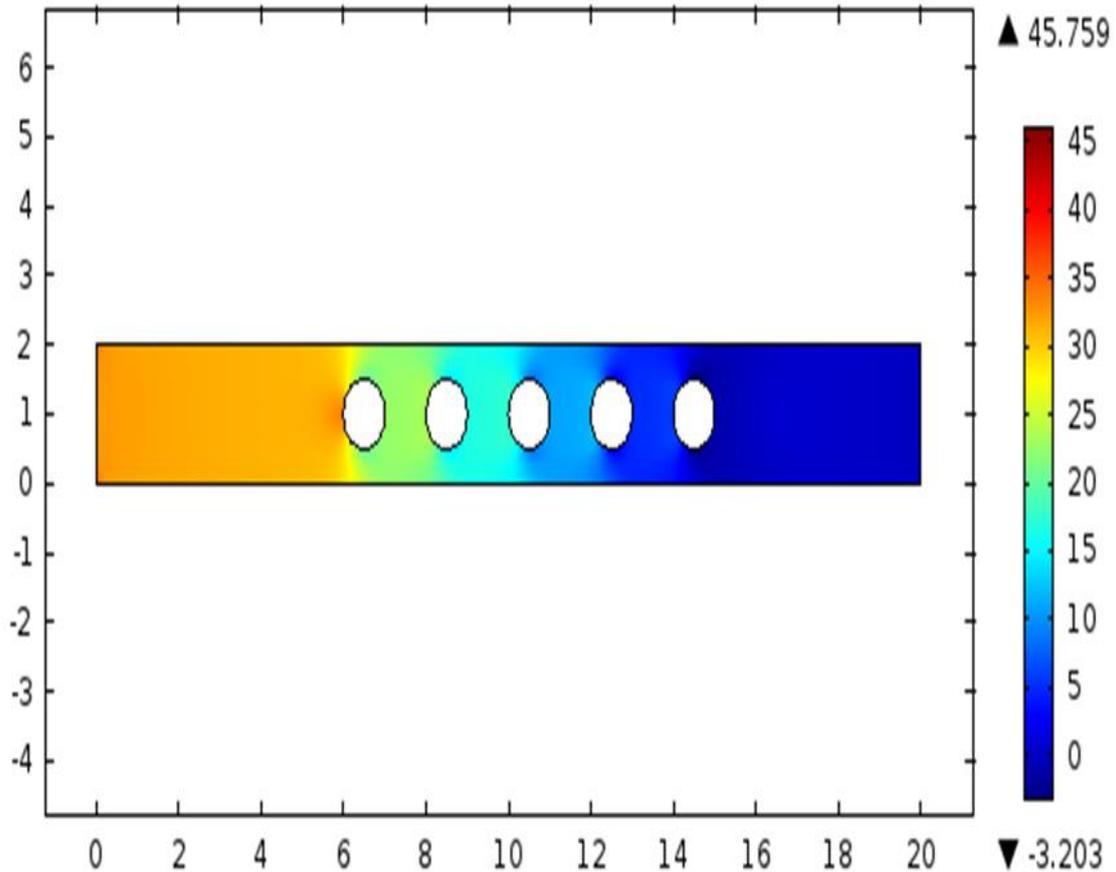


Figure V.3 : profil de pression.

Selon le théorème de Bernoulli " lorsque la canalisation se rétrécit, le fluide accélère et sa pression diminue ". C'est ce qu'on remarque dans la figure (V.3), la pression du liquide à l'entrée égale à 32 Pascal et 0.01 pascal à la sortie du canal, donc on voit une chute de pression importante due aux espaceurs.

La figure montre que les espaceurs ont un mauvais effet sur la perte de charge donc pour assurer l'écoulement à toute la longueur du canal d'ultrafiltration il faut assurer une pression important à l'entrée.

V.2 Effet de la vitesse sur la couche de polarisation :

Ici on fait varier la vitesse et on fixe la concentration, pour une concentration égale à 3mol/m^3 et des différentes vitesses égale à 0.02, 0.05 et 0.08 mol/m^3 .

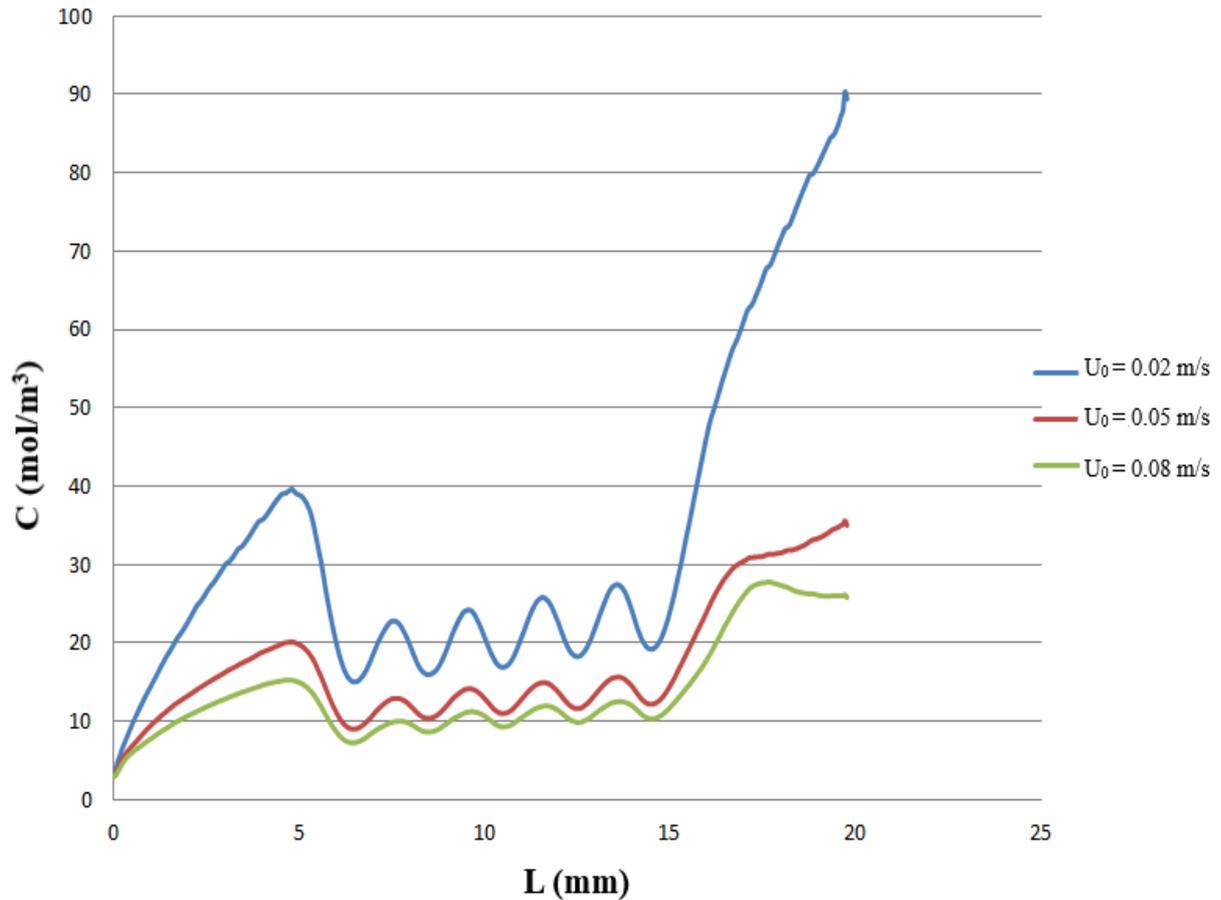


Figure V.4 : profil de concentration pour différentes vitesses.

La figure (V.4) représente l'évolution de la concentration au niveau de la paroi perméable pour différentes vitesses. Lorsqu'on a appliqué une vitesse de 0.02 m/s la concentration augmente et atteint 90 mol/m^3 , par contre lorsqu'on a augmenté la vitesse progressivement ($0.05, 0.08 \text{ m/s}$), la concentration diminue jusqu'à 27 mol/m^3 d'où on déduit qu'il y a une relation inverse entre la vitesse et la concentration. Lorsqu'on augmente la vitesse d'écoulement de fluide, sa concentration diminue et la couche de polarisation diminue aussi.

V.3 Effet de la concentration sur la couche de polarisation :

Dans ce paragraphe on va étudier l'effet de la concentration sur la couche de polarisation. Pour cela, on propose de fixer la vitesse (0.02 m/s) et varier la concentration (3,6 et 9 mol/m³).

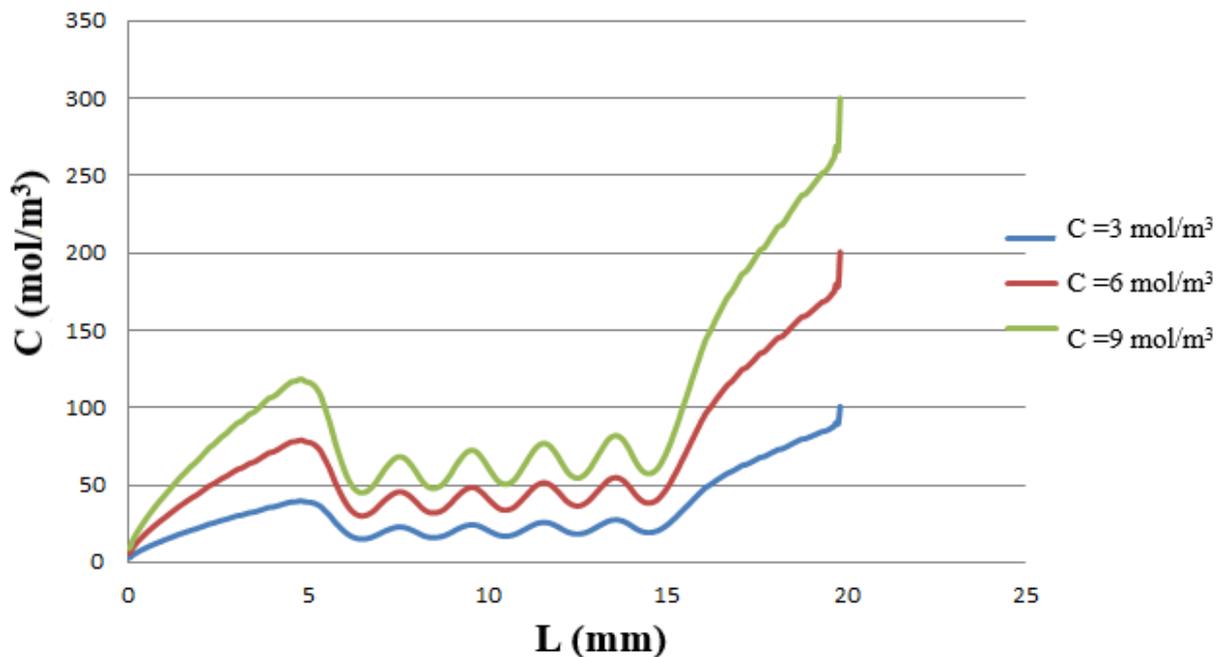


Figure V.5 : profil de concentration au niveau de la paroi perméable pour différentes concentrations.

La figure (V.5) représente l'évolution de la concentration au niveau de la paroi perméable pour différentes concentrations. Dans ce résultat on observe que pour une concentration à l'entrée du canal égale à 3 mol/m³, la couche de polarisation est faible. Lorsqu'on augmente la concentration à l'entrée du canal la couche de polarisation augmente aussi.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La filtration membranaire est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point et dimensionner. La cause de ces difficultés est le phénomène de polarisation de concentration qui reste difficile à éviter ou limiter et complexe à décrire.

La modélisation de la polarisation de concentration dans un module spiralé avec une membrane d'ultrafiltration en continu en présence des espaceurs par le logiciel COMSOL multiphysics est importante pour connaître l'évolution de la couche de la polarisation créée sur la paroi perméable au cours de la filtration, ainsi que l'effet des espaceurs et les paramètres opératoires tel que la vitesse et la concentration sur la formation de la couche de la polarisation.

Les résultats obtenus en simulant une cellule d'ultrafiltration en continu avec COMSOL montre que :

- L'augmentation de la concentration d'aliments renforce la formation de la couche de la polarisation de façon considérable.
- La vitesse a un effet important sur la formation de la couche de la polarisation. Si la première est élevée, la deuxième sera faible.
- L'utilisation des espaceurs permet de réduire le phénomène de polarisation et limite le colmatage de la membrane, mais aussi provoque une perte de charge considérable.

À partir des résultats de simulation, nous concluons que pour améliorer les techniques de séparation membranaire en continu, il faut réduire la concentration d'alimentation, utiliser les espaceurs et augmenter la vitesse d'écoulement de fluide.

Références bibliographiques

- [1] BERLND J., et CATHERINE J., 2002. Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Document technique, France, disponible sur <http://www.fndae.fr> . Consulté le : 20/06/2021.
- [2] NOUREDDINE N., 2008. Etude d'impact des Rejets des Eaux de la station de Déminéralisation de Brédéah sur l'environnement. Mémoire de Magister, Université d'Oran.
- [3] CHIKHI M., 2008. Etude de la complexation des cations métalliques en vue de leur séparation par un procédé membranaire. Thèse de doctorat, Université de Mentouri de Constantine.
- [4] GÜNTHER J., 2009. Caractérisation et optimisation des phénomènes de transfert dans un double bioréacteur à membranes. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [5] SARRADE S., 1994. Etude du couplage de l'extraction par CO₂ supercritique avec la séparation par membrane de nanofiltration. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- [6] BIKAI J., 2015. Etude de l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en œuvre dans des tests d'ultra/nanofiltration. Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace.
- [7] GEISMAR N., 2011. Réduction du colmatage membranaire par ozonation et filtration sur charbon actif. Thèse de magister. Université de Montréal.
- [8] WEHBE N., 2008. Dénitratation de l'eau potable en réacteur catalytique membranaire et photocatalytique. Thèse de doctorat, Université de Claude Bernard – Lyon I.
- [9] AIT KHALDOUN I., 2011. Optimisation du transport des cations Cu(II), Zn(II) et Cd(II) par le Tri-n-butylphosphate (TBP) à travers les membranes d'affinité. Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou.
- [10] EL KHABBAZE H., 2008. Traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse. Thèse de doctorat, Université de rabat.
- [11] BANDINI S., et BRUNI L., 2010. Transport phenomena in nanofiltration membranes. In: Fundamentals of cross-flow microfiltration. Edition by DRIOLI E., et GIORNO L., Italy. pp 67-88.

- [12] HILAL N., et JOHNSON D., 2010. The use of atomic force microscopy in membrane characterization. In: Basic aspects of membrane science and engineering. Elsevier Inc. pp 337-354.
- [13] PEEVA L., SAIRAM M., et LIVINGSTON A., 2010. Nanofiltration operations in nonaqueous systems. In: Membrane bioreactor in water treatment. Edition by DRIOLI E., et GIORNO L., Italy. pp 91-109.
- [14] BOUSSAHEL R., BAUDU M., et MONTIEL A., 2002. Influence de la matière organique et inorganique de l'eau sur l'élimination des pesticides par nanofiltration. Revue des sciences de l'eau. Journal of water science. 15(4), pp 709-720.
- [15] WIJMANS J., et BAKER R., 1995. The solution-diffusion model: a review. Journal of membrane science. 107 (1-2), pp 1-21.
- [16] WEMSY D., 2013. Le nettoyage : une étape-clé pour une production durable par procédé à membrane : réflexion sur le lien entre conceptions de production et nettoyabilité d'une membrane PES de l'industrie laitière. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- [17] SAIDOU N., 2010. Elimination partielle du fluor et de la salinité des eaux souterraines du bassin arachidier par nanofiltration et par adsorption sur argile. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- [18] BENJAMIN E., 2003. Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III.
- [19] FIEVET P., 2007. Les procédés de filtration membranaire appliqués au traitement des eaux dans : Traitement et épuration des eaux industrielles polluées – Procédés Membranaires, Bioadsorption et Oxydation chimique. Presses Universitaires de FRANCHE-COMTE, France.
- [20] LEITNER L., 2013. Etude d'un procédé de filtration membranaire à sélectivité variable et contrôlée utilisant des membranes de polydiméthylsiloxane en milieu organique : application à la séparation. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

- [21] FIEVET P., et CRINI G., 2009. Ultrafiltration assistée par du chitosane pour complexer des ions métalliques. Méthode et intérêts Chitine et chitosane. Du biopolymère à l'application. Presses Universitaires de FRANCHE-COMTE, France.
- [22] REMIGY J., et DESCLAUX S., 2008. Filtration membranaire (OI, NF, UF) Présentation des membranes et modules, Techniques de l'ingénieur, J 2 791.
- [23] SFORÇA M., YOSHIDA L., et NUNES P., 1999. Organic-inorganic membranes prepared from polyether diamine and epoxy silane. Journal of membrane science.
- [24] YUJUN S., FUAN L., et BENHUI S., 2005. Preparation, characterization and application of thin film composite nanofiltration membranes. Journal of Applied Polymer Science 9.
- [25] ADJED L., et BENANOUNE L., 2018. Etude de Colmatage des membranes d'osmose inverse du complexe de cevital-Bejaia. Mémoire de master, Université de Bejaia.
- [26] CHAY L., 2005. Etude comparative des membranes utilisées en production d'eau potable : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. Synthèse technique. <http://www.oieau.fr> Consulté le : 27/06/2021.
- [27] KOLLER E., 2010. Génie chimique. 3ème édition, Dunod, Paris, France, 248p.
- [28] MAMBAYE S., 1994. Rétention des ions métalliques par complexation ultrafiltration : application au cadmium. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- [29] DEGREMONT S.A., 2005. Mémento technique de l'eau. 10ème édition, Lavoisier, France.
- [30] MAUREL A., 2006. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. 2ème édition, Lavoisier, France.
- [31] BELFORT G., DAVIS R.H., et ZYDNEY A.L., 1994. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration, In: Journal of membrane science, p. 1-58.
- [32] ROMDHANE A., 2014. Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation. Génie des procédés. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

[33] BRUN J.P., 1989. Procédés de séparation par membranes. Transport, techniques membranaires, applications. Masson.

[34] HUSSON-MAREUX M., FABY J.A. Les procédés à membrane pour le traitement d'eau potable et l'épuration. Document technique, France, disponible sur <http://www.fndae.fr>. Consulté le : 01/07/2021.

[35] MENDRET J., 2007. Mise au point de méthodes de caractérisation du colmatage de membranes : application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé et de l'environnement. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

[36] AIMAR P., Filtration (OI, NF, UF) : Mise en œuvre et performances, disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr> Consulté le : 01/07/2021.

[37] MATHIEU B., 2005. Étude pilote d'affinage par nanofiltration pour la production d'eau potable. Université Laval Québec.

[38] BESSIERE Y., 2005. Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage. Université Paul Sabatier Toulouse.

[39] ADRIAN P., 2004. Etude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface. Université de Québec.

[40] SIM L.N., 2011. Crossflow sampler - modified fouling index ultrafiltration (CFS-MFIUF) as a potential fouling indicator for reverse osmosis filtration system. Thèse de doctorat, Université de New South Wales.

[41] ARZATE A., 2008. Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire. Document technique, disponible sur <http://www.centreacer.qc.ca>. Consulté le : 01/07/2021.

[42] FILLALI S., 2012. Etude d'un écoulement instationnaire dans un canal découvert à fond mobile et à charge variable. Mémoire de Magister, Université de Batna.

- [43] BENOUMESSAD K., 2012. Simulation des structures de vitesses dans un écoulement non permanent dans un canal non prismatique et non linéaire. Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [44] REZZOUG I., 2019. Introduction aux Différences finies. Cour, Université Oum El Bouaghi.
- [45] BOUDJELLAL S., 2003. Intégration numérique des écoulements brusquement instationnaires dans les canaux a surface libre. Mémoire de magister, Université de Batna.
- [46] DHATH G., LEFRANCOIS E., et TOUZOT G., 2005. Méthode des éléments finis. Lavoisier.
- [47] MANET V., 2012. La Méthode des Éléments Finis: Vulgarisation des aspects mathématiques, Illustration des capacités de la méthode. Eléments finis pour l'ingénieur, Lyon.
- [48] MESROUK M., 2013. Etude d'une électrode tri-couches à base de TCO /Métal /TCO pour une cellule solaire organique. Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou.
- [49] CHATKAEW T., 2009. Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Mémoire de doctorat, Université de Toulouse.

Résumé

De nos jours, de nombreux procédés à membranes s'imposent dans le domaine du traitement de l'eau (eau potable, eau industrielle et eau résiduaire). Cet engouement résulte du fait incontestable, en termes d'efficacité, du pouvoir de séparations de toutes les substances (organiques et/ou inorganiques) présentes dans l'eau brute. Notre travail vise à étudier le phénomène de polarisation de concentration dans un module spiralé avec une membrane d'ultrafiltration. Nos résultats indiquent que pour avoir une meilleure séparation, il faut réduire la concentration et augmenter la vitesse d'entrée de fluide. La modélisation a été faite avec le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis est utilisés pour résoudre numériquement les équations gouvernants le phénomène étudié.

Mots clés: COMSOL Multiphysics, membrane, eau, polarisation de concentration.

Abstract

Nowadays, many membrane processes are required in the field of water treatment (drinking water, industrial water and waste water). This enthusiasm results from the indisputable fact, in terms of efficiency, of the power to separate all the substances (organic and / or inorganic) present in raw water. Our work aims to study the phenomenon of concentration polarization in a spiral module with an ultrafiltration membrane. Our results indicate that to have better separation, it is necessary to reduce the concentration and increase the rate of fluid entry. The modeling was done with the COMSOL Multiphysics software which is based on the finite element method is used to numerically solve the equations governing the phenomenon studied.

Key words: COMSOL Multiphysics, membrane, water, concentration polarization.

ملخص

في الوقت الحاضر، هناك حاجة إلى العديد من العمليات الغشائية في مجال معالجة المياه (مياه الشرب والمياه الصناعية ومياه الصرف الصحي). ينتج هذا الحماس من الحقيقة التي لا جدال فيها، من حيث الكفاءة، عن القدرة على فصل جميع المواد (العضوية و / أو غير العضوية) الموجودة في المياه الخام. يهدف عملنا إلى دراسة ظاهرة استقطاب التركيز في وحدة لولبية ذات غشاء ترشيح فائق. تشير نتائجنا إلى أنه للحصول على فصل أفضل، من الضروري تقليل التركيز وزيادة معدل دخول السوائل. تم عمل النمذجة باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics الذي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة المستخدمة في حل المعادلات التي تحكم الظاهرة المدروسة عدديًا.

الكلمات المفتاحية: COMSOL Multiphysics ، الغشاء ، الماء ، استقطاب التركيز .