

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



UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER, CONSTANTINE 03

FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

DÉPARTEMENT GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT

N° d'ordre:.....

Série :.....

Mémoire

PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
GÉNIE DES PROCÉDÉS

OPTION : GÉNIE DES PROCÉDÉ DE L'ENVIRONNEMENT

L'OPTIMISATION DE LA GÉOMETRIE DE LA
MEMBRANE DANS LE PROCESSUS DE L'OSMOSE
INVERSE

Présenté par :

- *Khenchouche Ilham*
- *Khiat Meriem*

Dirigé par :

Hamdache Abderrazaq

Grade : MAA

Année universitaire

2019-2020

Saison : septembre

Remerciement:

Avant tout nous remercions Allah. Tout puissant de nous avoir accordé la force

Courage et moyens pour accomplir ce modeste travail

*Nous tenons tout d'abord à remercier notre Encadreur de recherches Mr.
HAMDACHE ABDERRAZAQ, pour sa patience, et surtout pour sa confiance,
ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance*

Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude

Nous remercions tout particulièrement Madame

ZAMOUCHE- ZARDAZI RANIA

.Maître de conférences et chef de département de génie d'environnement

*Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté
d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.*

Nos remerciements vont encore à:

*Nos collègues et amis pour leur soutien et leur aide à finaliser ce travail
Enseignants, et tous les travailleurs du département de génie des procédés pour
leur soutien moral et leur accueil chaleureux
Enfin, nous remercions beaucoup nos parents.*



Dédicace:

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qui m'ont donné le long de mon parcours, et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

Mes adorables frères "Nadir", "Tarek", "Amir" et ma petite sœur "Alaa" qui m'ont soutenu et encouragé à aller plus loin.

A toutes ma famille

A toute mes amis(e).

A toute personne qui m'a aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire

Tout la promotion 2019/2020

KHENCHOUCHE Ilham





Dédicace:

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qui m'ont donné le long de mon parcours, et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

Mes adorables frères "Walid", "Aymen", "Youcef", "Younes " qui m'ont soutenu et encouragé à aller plus loin.

A toutes ma famille

A toute mes amis(e).

A toute personne qui m'a aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire

Tout la promotion 2019/2020

KHIAT Meriem



INTRODUCTION GENERALE.....	01
<u>CHAPITRE I : Les Différents Procédés De Traitement D'eau</u>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Procédés de traitement d'eau.....	03
I.2.1. Chaîne élémentaire de traitement d'eau.....	03
I.2.2. Procédés physiques et physico-chimiques.....	03
I.2.2.1 Dégrillage et tamisage.....	03
I.2.2.2 Préoxydation.....	03
I.2.2.3 Clarification.....	04
I.2.2.4 Désinfection/Oxydation.....	04
a) Chloration.....	04
b) Ozonisation.....	04
c) Lumière ultraviolette.....	04
d) Déionisation.....	04
I.2.2.5 Procédés biologiques.....	04
I.2.2.6 La filtration membranaire.....	04
I.3. Procédés membranaires.....	05
I.3.1 Historique.....	05
I.3.2 Les différentes filières.....	05
I.3.2.1 La microfiltration.....	05
I.3.2.2 L'ultrafiltration.....	06
I.3.2.3 La nanofiltration.....	07
I.3.2.4 L'osmose inverse.....	07
I.3.3. Les différents types de membrane de filtration.....	08
I.3.3.1. Selon leur nature chimique.....	08
I.3.3.1.1 Les membranes minérales (ou inorganique).....	08
I.3.3.1.2 Les membranes organiques.....	08
I.3.3.1.3 Membrane hybride.....	09
I.3.3.2 Selon leur structure.....	09
I.3.3.3 Selon leur géométrie.....	09
I.3.3.4 Selon leur mécanisme de séparation.....	10
<u>CHAPITRE II : Osmose Inverse</u>	
II.1. Introduction.....	11
II.2. Définition.....	11
II.2.1. L'osmose.....	11
II.2.2. L'osmose inverse.....	11
II.3. Description du phénomène osmose inverse.....	12
II.3.1. Principe de l'osmose inverse.....	12
II.3.2. Force motrice.....	13
II.3.3. Mécanisme de transfert.....	13
II.3.3.1. La polarisation de concentration.....	14

Tableaux des matières

II.4. Paramètre de fonctionnement	14
II.4.1. Taux de conversion	14
II.4.2. Sélectivité.....	15
II.4.3. Débit spécifique.....	15
II.5. L'imitation de l'osmose inverse.....	15
II.5.1. Colmatage par entartage.....	16
II.5.2. Colmatage par dépôt	17
II.5.3. Le bio colmatage.....	17
II.5.4 Résistance de colmatage.....	18
II.6. Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse.....	18
II.6.1. Les avantage.....	18
II.6.2. Les inconvénients.....	18
II.7. Mise en œuvre des membranes.....	19
II.7.1. Ecoulement frontal.....	19
II.7.2. Ecoulement tangentiel.....	19
II.8. Dispositif d'osmose inverse.....	19
II.9. Types de modules.....	20
II.9.1. Modules tubulaire.....	20
II.9.2. Les Modules spiralé.....	20
II.9.3. Les modules plans.....	21
II.9.4. Modules fibres creuses.....	21
II.10. Technique de nettoyage des membranes.....	22
<u>CHAPITRE III : La Simulation (Les Méthodes Numériques De Résolution)</u>	
II.1. Introduction.....	23
III.2. Les méthodes de simulation.....	24
III.3. Le choix de la méthode de résolution	24
III.4. L'approche de la résolution de l'équation différentielle.....	24
III.5. Méthodes de discrétisation d'EDP.....	25
III.5.1. Méthode des éléments finis.....	25
III.5.1.1. Démarche éléments finis.....	26
III.5.1.2. Avantages.....	27
III.5.1.3. Inconvénients.....	28
III.5.1.4. Les caractéristiques de la méthode.....	28
III.5.1.5. Approximation nodale	28
III.5.1.6. Définition de l'approximation nodale	29
III.5.1.7. Approximation nodale de quelques éléments de référence	29
III.5.2. Méthode des différences finies	29
III.5.2.1. Les caractéristiques de la méthode.....	30
III.5.2.2. Avantages	30
III.5.2.3. Inconvénients	30
III.5.3 Méthode des volumes finis.....	30

Tableaux des matières

III.5.3.1. Caractéristiques de la méthode.....	30
III.5.3.2. Avantage.....	31
III.5.3.3. Inconvénient.....	31

CHAPITRE IV : Comsol Multiphasique

IV.1. Introduction.....	32
IV.2. Présentation du Logiciel.....	32
IV.3. La famille comsol au complet.....	33
IV.4. Comsol et autres programmes.....	34
IV.5. Avantages de conception avec comsol multiphasique.....	34
IV.6. Principe de l'utilisation de comsol.....	35
IV.7. Utilisation de Comsol.....	35
IV.7.1. Choix de la physique et du cas à l'étude.....	36
IV.7.2. Définition de la géométrie du problème.....	36
IV.7.3. Définition des matériaux solides et fluides.....	36
IV.7.4. Définition des interfaces physiques.....	36
IV.7.5. Définition des interfaces de couplage.....	37
IV.7.6. Définition du maillage.....	37
IV.7.7. Choix de l'algorithme de résolution.....	37
IV.7.8. Post . traitement et export des résultats.....	37

CHAPITRE V : Résultats Et Discussions

V.1 module de membrane d'osmose inverse.....	38
V.2 La géométrie	38
V.3 les physiques utilisés.....	40
V.3.1 Transfert de matière.....	40
V.3.2 écoulement laminaire (Navier-Stockes).....	40
V.4 Maillage.....	41
V.5 conditions aux limites	42
V.6. simulation des différents paramètres	43
V.6.1.Profil de concentration	43
V.6.2. Profil de la vitesse à la longueur de 20 mm et 40mm	44
V.6.4. Profil de pression à la longueur de 20mm et 40mm.....	46
Conclusion générale	47
Bibliographies	49
Annexe	54

Chapitre I

Fig. 1.1 : Les étapes de traitement d'eau 03
Fig. 1.2: La microfiltration 06
Fig. 1.3: L'ultrafiltration..... 06
Fig. 1.4 : La nano filtration 07
Fig. 1.5: L'osmose inverse 08

Chapitre II

Fig. 2.1 : Filtration à membrane..... 13
Fig. 2.2 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse 14
Fig. 2.3 : Phénomène de polarisation de la concentration sur membrane d'OI..... 15
Fig. 2.4 : Schématisation des différents mécanismes de colmatage d'une membrane... 17
Fig. 2.5 : Filtration frontale et tangentielle à travers une membrane..... 20
Fig. 2.6: Modules tubulaires..... 21
Fig. 2.7: Modules spiralés..... 22
Fig. 2.8: modules plans..... 22
Fig. 2.9 : module à fibre creuse..... 23

Chapitre III

Fig. 3.1 : procédure de la résolution numérique..... 26
Fig. 3.2 : Etapes générales de la méthode des éléments finis..... 27

Chapitre IV

Fig.4.1 : Logo de Logiciel COMSOL..... 33
Fig.4. 2: Interface principale du logiciel Comsol..... 36

Chapitre V

Fig. 5.1: Module (OI) osmose inverse..... 39
Fig. 5.2 : La configuration de module d'osmose inverse à 20mm..... 40
Fig. 5.3 : Configuration de module d'osmose inverse à 40 mm..... 40
Fig. 5.4 : Maillage utilisé par comsol pour notre modèle de 20mm..... 42
Fig. 5.5 : Maillage utilisé par comsol pour notre modèle de 40 mm..... 42
Fig. 5.6 : Profile de concentration (à $L_m= 20\text{mm}$, concentration initiale $=3\text{mol/m}^3$, vitesse initiale $= 0.2 \text{ m/s}$) 44
Fig. 5.7 : Profil de concentration (à $L_m= 40\text{mm}$, concentration initiale $=3\text{mol/m}^3$, vitesse initiale $= 0.2 \text{ m/s}$ 45

Liste des figures

Fig. 5.8 : profil de vitesse suivant X à $L_m=20\text{mm}$ 46

Fig. 5.9 : profil de vitesse suivant X à $L_m=40\text{mm}$ 46

Fig. 5 : 10 : profil de pression à $L_m=20\text{mm}$ 47

Fig. 5 .11 : profil de pression à $L_m=40\text{mm}$ 47

Abréviation

PTM	Pression transmembranaire
MES	Matières en suspension
UV	Ultraviolette
OI	Osmose inverse
NF	Nanofiltration
UF	Ultrafiltration
MF	Microfiltration
MEI	Membrane échangeuse des ions
MPI	Membrane perméable aux ions
FI	Force ionique
EDP	Equation aux dérivées partielles
MEF	Méthode des éléments finis
U*	Approximation nodale
1D	Unidimensionnel
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CaCO ₃	carbonate de calcium
Ca(SO ₄) ₂	sulfate de calcium
Mg(OH) ₂	hydroxyde de magnésium

Caractères romains et grecques

i :	est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté	-
C :	la concentration molaire du soluté	mol. m ⁻³
T :	la température	K
R :	la constante des gaz parfaits	8,31 J.mol.k ⁻¹
Π :	est exprimée en pascal	Pa
C_i :	représente la concentration de l'ion i	-
Z_i :	sa valence	-
J :	Flux d'eau à travers la membrane	L. h ⁻¹ .m ⁻²
ΔP :	Différence de pression de part et d'autre de la membrane	Pa
$\Delta \Pi$:	Différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane	Pa
μ :	Viscosité dynamique de l'eau	Pa.s

Nomenclature

R_m : Résistance de la membrane	m^{-1}
Y : Le taux de conversion	%
Q_p : Débit de perméat	m^3 /j
Q_0 : Débit d'alimentation	m^3 /j
U : vitesse suivant l'axe X	m/s
V : vitesse suivant l'axe Y	m/s
U_0 : Vitesse initiale suivant l'axe X	m/s
V_0 : Vitesse initiale suivant l'axe Y	m/s
V_m : Vitesse à travers la membrane	m/s
C_0 : concentration	mol/m^3
A : constant de perméabilité	m/Pa.s
L_m : longueur de la membrane	mm

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

L'utilisation de la technologie membranaire connaît un essor important ces dernières années dans le traitement des eaux que ce soit pour l'eau potable, les eaux usées urbaines ou les eaux industrielles. L'amélioration de la qualité des eaux traitées, l'évaluation de la réglementation ainsi que la prise en compte de nouvelles substances dans l'eau contribuent en partie au développement et à l'utilisation des membranes. Ce développement a permis de diversifier les différentes filières membranaires proposées par les constructeurs, et en parallèle d'améliorer les conditions d'utilisation et d'exploitation des installations.

L'osmose inverse est actuellement un des moyens les plus utilisés pour obtenir de l'eau ultra pure en milieu industriel.

L'osmose inversée est une technologie qui permet de séparer, par l'application d'une pression, le solvant d'une dissolution concentrée. Le solvant traverse une membrane semi-perméable, en passant de la solution concentrée à la solution diluée. Grâce à l'osmose inversée on obtient finalement deux flux, d'un côté, le solvant pratiquement pur et, de l'autre côté, une solution encore plus concentrée que la solution de départ. [1]

-Les équations aux dérivées partielles, décrivant le modèle, sont résolues par la méthode numérique des volumes finis, utilisant les conditions initiales et limites. L'influence de la PTM et la longueur de la membrane sur le flux moyen du perméat ont été étudiées. [2]

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. [3]

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

L'objectif de ce travail consiste à faire une étude sur l'optimisation de la géométrie de la membrane dans le processus de l'osmose inverse. On est intéressé d'étudier l'évaluation de la concentration en fonction de la longueur de membrane d'osmose inverse et influence de l'écoulement sur cette dernière et sur l'évaluation de la pression d'osmose inverse.

Le travail se décompose principalement en 2 parties : (partie A théorique), (partie B simulation) La première partie (partie A) : qui est relatif à l'étude bibliographique, contient quatre chapitres:

Chapitre I : Une étude bibliographique qui explique les différents procédés de traitement de l'eau.

Introduction Générale

- Classification des membranes selon le mécanisme, la structure, le type et la conception de la membrane.

Dans le deuxième chapitre, nous rassemblons une description de procédé d'osmose inverse auxquels nous avons eu recours lors de cette étude.

En ce qui concerne le troisième chapitre, nous avons déterminé les méthodes numériques de résolution.

Le quatrième chapitre concernera la description de logiciel COMSOL multiphysics.

La deuxième partie (partie B) : les résultats de l'optimisation de la géométrie de la membrane dans le processus de l'osmose inverse sont regroupés dans le cinquième chapitre où les transferts sont simulés numériquement avec COMSOL multiphysics. A la fin de notre travail, on fait une conclusion qui résume l'ensemble des résultats de modélisation.

Chapitre I

Les différents procédés de traitement de l'eau

I.1 Introduction

L'eau subit à plusieurs traitements avant d'être distribuée dans les circuits d'eau potable. Le traitement d'une eau brute après son captage dépend de sa qualité et de ses constituants critiques qui varient dans le temps.

L'eau puisée dans l'environnement doit donc être analysée en continu avant de subir le traitement de potabilisation approprié.

Le traitement de l'eau regroupe l'ensemble des techniques et méthodes permettant d'obtenir une eau dite potable à partir d'eau non propre à la consommation. La qualité d'une eau purifiée est fonction de sa conductivité électrique. Il y a plusieurs techniques de purification de l'eau : de la filtration, décantation et par traitement chimique.[4]

I.2 Procédés de traitement d'eau

I.2.1 Chaîne élémentaire de traitement d'eau

Le principal objectif d'une station de production d'eau potable est de fournir un produit qui satisfait à un ensemble de normes de qualité à un prix raisonnable pour le consommateur. Nous allons présenter les caractéristiques générales d'une usine de production d'eau potable la plus complète et la plus courante, tout en détaillant plus spécifiquement le procédé sur lequel porte notre étude.[4]

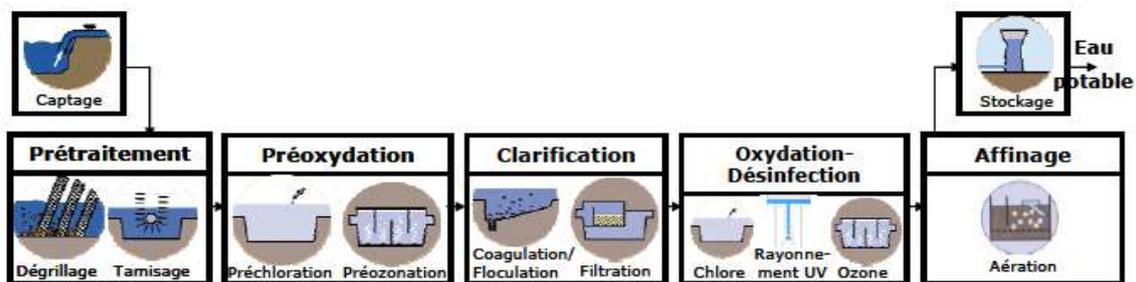


Figure 1.1 : Les étapes de traitement d'eau.[4]

I.2.2 Procédés physiques et physico-chimiques

I.2.2.1 Dégrillage et tamisage

Le passage de l'eau captée à travers des grilles et tamis élimine les plus gros débris.[5]

I.2.2.2 Préoxydation

C'est un procédé chimique qui utilise le chlore (ou l'hypochlorite de sodium) ; l'ozone le dioxyde de chlore ou le permanganate de potassium ; il est destiné à permettre l'élimination du fer et du manganèse (notamment pour les eaux souterraines) ; de la couleur et des algues (essentiellement pour les eaux superficielles).[6]

I.2.2.3 Clarification

La clarification regroupe les procédés de coagulation-floculation, décantation ou flottation et de la filtration. Le but est d'éliminer les MES (matières en suspension) minérales et organiques d'une eau brute ainsi qu'une partie des matières organiques dissoutes, fraction floculable.[7]

I.2.2.4 Désinfection/Oxydation

Les bactéries et virus pathogènes qui demeurent dans l'eau sont éliminés lors de l'étape de désinfection .on utilise deux types de désinfection: des désinfections chimiques comme le chlore ; de l'ozone ou des désinfections physiques tel la lumière ultra-violette.[8]

a) Chloration

Du chlore désinfectant est ajouté à plusieurs étapes de traitement d'eau. Le chlore tue les pathogènes efficacement. Une petite quantité de chlore reste dans l'eau produite pour éviter un développement bactérien plus en aval, dans le réseau d'eau.[4]

b) Ozonisation

En y ajoutant de l'ozone, l'eau est désinfectée et la plupart des microbes sont alors tués. Cependant, ce procédé a été associé à la formation de bromate dans l'eau et présente par conséquent un risque pour la santé c'est pourquoi il est de moins en moins utilisé.[4]

c) Lumière ultraviolette

Elles irradient les cellules vivantes indésirables. Suivant la qualité d'énergie UV reçue, elles sont soit stérilisées (effet bactériostatique) soit détruites (effet bactéricide).[9]

d) Déionisation

Le déionisation de l'eau consiste en élimination des substances dissoutes électriquement lourdes (ionisées) qu'elle contient .les substances non chargées électriquement ,comme les composés organiques, ne sont pas altérées lors de leur passage à travers la résine . Le procédé de déionisation est assuré par une résine d'échange ionique.[10]

I.2.2.5 Procédés biologiques

Les microorganismes sont les principaux acteurs des traitements biologiques, ils sont utilisés pour transformer la matière organique des effluents. c'est principalement les produits qui contiennent du carbone et de l'azote qui sont visés. Suivant la nature chimique de la pollution elle sera consommée totalement ou partiellement.[11]

I.2.2.6 La filtration membranaires

La filtration sur membrane est une technique de séparation liquide/liquide, liquide/solide, liquide/gaz ou gaz/gaz qui fait intervenir une membrane semi-perméable et sélective sous

l'effet d'une force motrice. Cette force motrice peut être soit un gradient de pression (cas de l'osmose inverse (OI), de la nanofiltration (NF), de l'ultrafiltration (UF) et de la microfiltration (MF)), un gradient de concentration (cas de la dialyse) ou un gradient de potentiel électrique (cas de l'électrodialyse). Lorsqu'il s'agit d'une action de séparation conduite sous gradient de pression, la classification des procédés se fait généralement selon la taille des pores des membranes et la tailles des composés retenus.[12]

I.3 Procédés membranaires

I.3.1 Historique

La perm sélectivité (se dit de membranes dont la perméabilité s'exerce de façon sélective vis-à-vis des ions) des membranes a été découverte dès le XVIIIe siècle par Abbé Jean-Antoine Nollet (1735). C'est à cette époque que l'Abbé observa pour la première fois le phénomène de l'osmose, soit le transfert de l'eau ou d'un solvant au-travers d'une membrane semi-perméable. En 1845, Matteucci et Cima, puis Schmidt en 1856, mirent en évidence le comportement anisotropique des membranes. Leur comportement est en effet différent selon la face de la membrane se trouvant en contact avec la solution. En 1855, Fick développa la première membrane synthétique probablement en nitrocellulose.

Parallèlement aux développements de la thermodynamique, ce domaine de recherche évoluera fortement durant la période 1870-1920. La première commercialisation de membranes se fait en 1927, tandis qu'en 1956, l'Agence américaine de protection de la santé publique reconnaît l'utilisation des membranes pour les processus de séparation de composés. Simultanément, les applications industrielles voient le jour et les perspectives, notamment en vue de la désalinisation de l'eau de mer sont explorées.[13]

I.3.2 Les différents filières

I.3.2.1 La microfiltration

La microfiltration se classe dans les procédés nécessitant une faible pression transmembranaire pour leur mise en œuvre (< 1 bar). Toutefois, la microfiltration s'applique plutôt à la clarification de suspensions contenant des particules solides ou des macromolécules de dimension colloïdale (0,1 à 20 μm). Les membranes utilisées ont des tailles de pores variant entre 0,1 et 10 μm . [14]

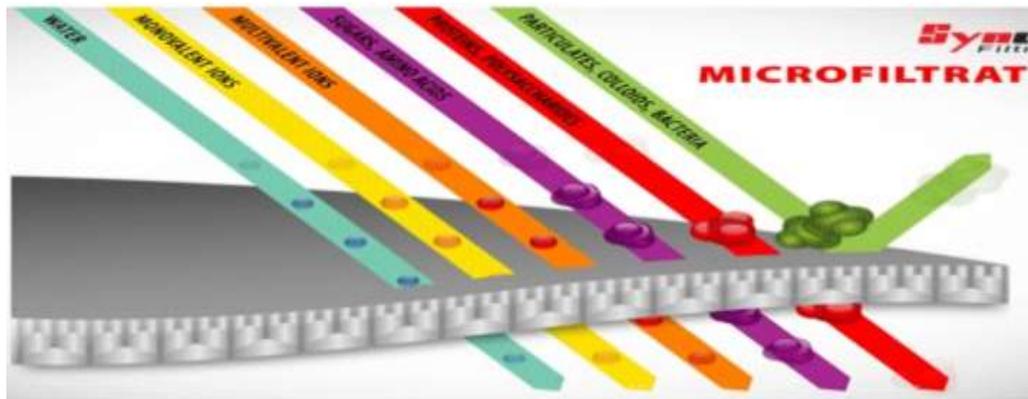


Figure 1.2:La microfiltration.[14]

I.3.2.2 L'ultrafiltration

L'ultrafiltration est une filtration à travers une membrane à pores plus fins. La technique nécessite la mise en œuvre de pressions élevées. L'ultrafiltration sur membrane permet d'améliorer le rendement des procédés classiques puisqu'elle retient des particules de 0,006 μm , et de lancer sur le marché de nouveaux ingrédients ou additifs. Les membranes sont minérales ou organiques. L'intérêt de l'ultrafiltration réside dans le fait qu'elle ne fait pas intervenir de changement d'état ou de réaction : elle est non destructrice. Dès lors elle s'avère énergétiquement économique et particulièrement adéquate pour le traitement de composés labiles comme les biomolécules.[15]

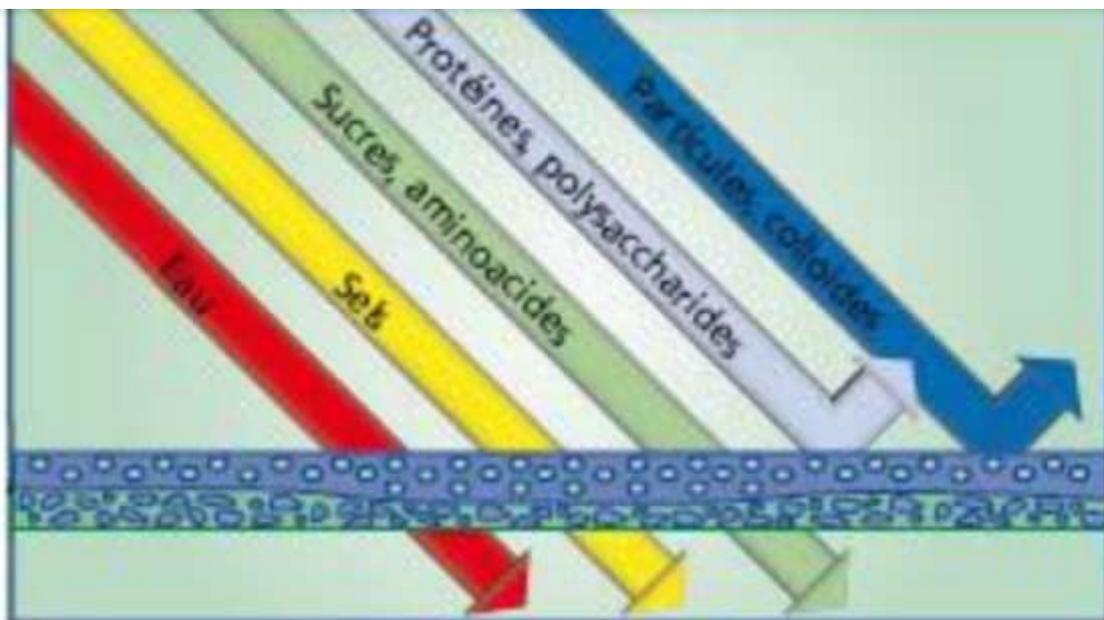


Figure 1.3:L'ultrafiltration.[4]

I.3.2.3 La nanofiltration

La Nanofiltration est un procédé de filtration unique dont le domaine d'application se situe entre l'Ultrafiltration et l'Osmose Inverse. Elle est conçue pour obtenir une séparation très spécifique de composés à faible poids moléculaire, tels que les sucres, des minéraux dissous et des sels. Ce procédé inclut la déminéralisation des produits laitiers, la récupération des protéines hydrolysées, la concentration des sucres ainsi que la purification des colorants solubles et des pigments.[16]

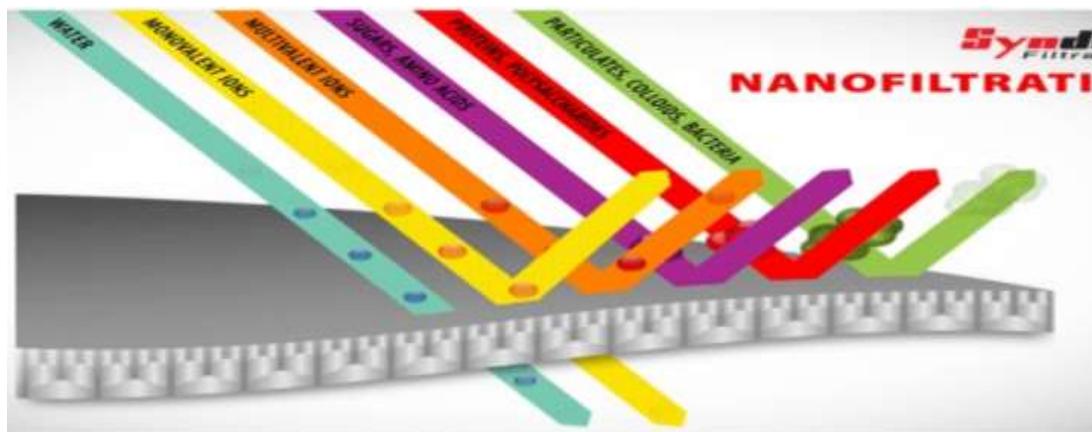


Figure1.4: La nanofiltration.[14]

I.3.2.4 L'osmose inverse

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer le solvant (eau dans la plupart des cas) et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour la déminéralisation des eaux, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, ou la production d'eau ultrapure. Son principe est explicité dans la "mise en œuvre des procédés de séparation membranaires - pression osmotique. Cette méthode est la moins onéreuse pour éliminer de 90 à 99% des contaminants d'un fluide.[17]

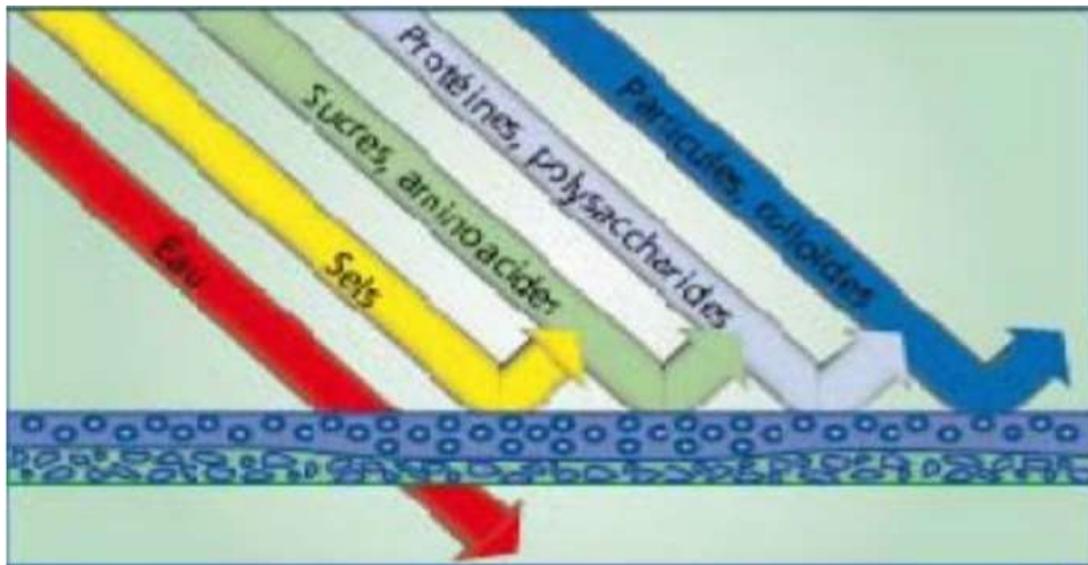


Figure 1.5: L'osmose inverse.[4]

I.3.3 Les différents types de membrane de filtration

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[18].

I.3.3.1 Selon leur nature chimique

I.3.3.1.1 Les membranes minérales (ou inorganique)

Les membranes inorganiques sont faites de céramique (oxydes d'aluminium, de zirconium ou de titane). Elles ont une stabilité chimique, mécanique et thermique supérieure aux membranes polymériques, mais, par contre, elles sont friables et beaucoup plus coûteuses que les membranes organiques. Leur arrivée sur le marché 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.[19]

I.3.3.1.2 Les membranes organiques

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.). Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications, une grande compacité et un coût imbattable. En effet, environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constituées de matériaux organiques.[19]

I.3.3.1.3 Membrane hybride

Les matériaux hybrides organiques-inorganiques offrent des avantages spécifiques pour la préparation de membrane exigeant une sélectivité importante et des débits élevés ; ou une résistance chimique et thermique considérable.[20]

I.3.3.1.4 Selon leur structure

Membranes asymétriques ou anisotropes

Ce sont des membranes préparées en une seule étape à partir du même matériau mais dans lesquelles la couche permselective est une très fine pellicule (quelques 100 ou 1000 Å) appelée peau. Celle-ci repose sur une couche support beaucoup plus épaisse et beaucoup plus poreuse dont le rôle est d'assurer à l'ensemble de bonnes propriétés mécaniques. Celles-ci sont encore améliorées par l'incorporation d'un support textile. La peau être dense ou mésoporeuses selon l'application visée. Les membranes asymétriques ont un intérêt évident dans tous les procédés de filtration ou de perméation, puisque la résistance au transfert de matière est proportionnelle à l'épaisseur.[21]

Les membranes symétriques

Les membranes symétriques ont une structure homogène (taille des pores uniforme) sur toute l'épaisseur de la membrane.[22]

Membranes composites

Apparues au début des années 1990, elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tels la zircone, l'alumine et le titane).[23]

I.3.3.2 Selon leur géométrie

Les membranes peuvent être classées en fonction de la forme sous laquelle elles sont fabriquées :

- Membranes planes.
- Membranes cylindriques.
- Tubulaires.
- Fibres creuses.

La forme des membranes conditionne la manière dont elles sont assemblées pour fabriquer des modules.[13]

I.3.3.3 Selon leur mécanisme de séparation

Les mécanismes de séparation dans les membranes sont complexes et encore partiellement compris. Les processus qui jouent un rôle dans la séparation membranaire sont : le tamisage, la friction sur les parois des pores des membranes, la diffusion dans le matériau membranaire ou dans les pores des membranes, les forces de surface répulsives ou attractives, notamment la répulsion électrostatique. La classification la plus répandue des membranes d'après le mécanisme de séparation est la suivante : [13]

Membranes poreuses La porosité d'une membrane est définie comme étant le rapport du volume des espaces vides sur le volume total de la matrice. La structure et la fonction d'une membrane poreuse est très similaire à celle d'un filtre classique (diamètre de pore supérieur au micron). Elle a une structure rigide avec un grand nombre de pores interconnectés distribués aléatoirement et de petite taille (0,01 à 1 micron). Les particules de taille plus grosses que les pores sont toutes retenues, celles de taille intermédiaire sont partiellement retenues et les particules de petites tailles passent quasi totalement. La séparation de soluté par les membranes poreuses se fait principalement en fonction de la taille des molécules et de la distribution de taille des pores ; et donc seulement les solutés qui diffèrent significativement en taille peuvent être séparés, [22] comme c'est le cas en microfiltration et en ultrafiltration. Il existe plusieurs variétés de membranes poreuses:

- membranes microporeuses : diamètre des pores inférieur à 2 nm.
- membranes mésoporeuses : diamètre des pores compris entre 2 et 50 nm.
- membranes macroporeuses : diamètre des pores supérieur à 50 nm. [24]

Le mécanisme de transfert de matière sous l'effet de la pression est exclusivement convectif pour le solvant, celui-ci n'entraîne avec lui que les espèces dont la taille est plus petite que celle des pores (effet tamis).[22]

Membranes denses

Pour les membranes non poreuses, les interactions entre les solutés et le matériau de la membrane dominent le taux de transport et la sélectivité; le mécanisme de transport peut être décrit par le modèle solution / diffusion pour le cas des membranes d'osmose inverse. [25]

Membrane échangeuse des ions (MEI)

Ou membrane perméable aux ions (MPI) utilisées en électrodialyse : ce sont des membranes organiques denses échangeuses des d'ions et composées de matériaux analogues à ceux des résines échangeuses d'ions : polymères organiques, conducteurs ioniques (membranes cationiques-membranes anioniques). [26]

Chapitre II

Osmose Inverse

II.1. Introduction

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 20 à 80 bar. 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. [27]

En résumé les applications de l'osmose inverse sont:

- L'adoucissement.
- La production d'eau potable.
- La production d'eau de process.
- La production d'eau ultra pure (industries électroniques).
- Concentration de solvants pour les industries alimentaires.[28]

II.2. Définition**II.2.1. L'osmose**

Phénomène caractérisé par le passage de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée, lorsque deux liquides de concentration différente sont séparés par une membrane semi-perméable, le liquide contenant la plus faible concentration de solides dissous va traverser la membrane pour aller dans le liquide contenant la plus forte concentration de solides dissous. [29]

II.2.2. L'osmose inverse

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Ce phénomène est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires. La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée Pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique. [29]



Figure 2.1: Filtration à membrane.[4]

II.3. Description du phénomène osmose inverse

II.3.1. Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte le flux d'eau va même s'annuler : cette pression est nommée la pression osmotique Π . Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique : c'est le phénomène de l'osmose inverse.

La pression osmotique des électrolytes est donnée par la relation suivante :

$$\Pi = i \cdot C \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

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

C : la concentration molaire du soluté ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$).

T : la température en kelvin(k).

R : la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Π : est exprimée en pascal (pression osmotique). [30]

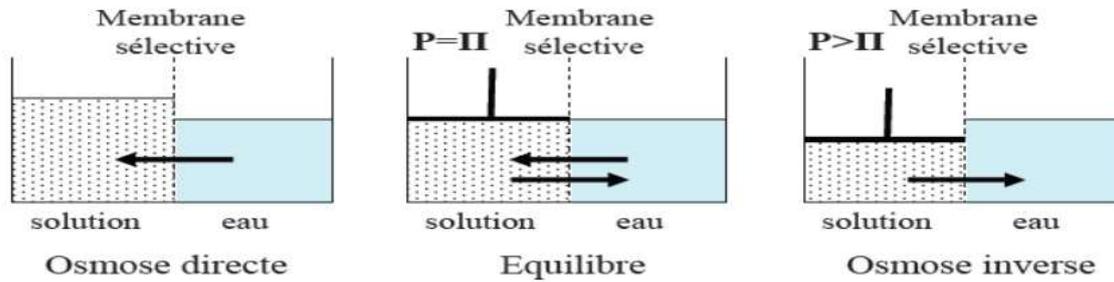


Figure 2.2: Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse. [31]

II.3.2. Force motrice

La force ionique, notée I (ou FI de manière à la distinguer de l'intensité), est un des principaux facteurs influençant l'activité des ions en solution aqueuse. Elle s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et est calculée de la manière suivante : [30]

$$I = \frac{1}{2} \sum_i C_i Z_i^2 \quad (2.2)$$

Où

C_i : représente la concentration de l'ion i .

Z_i : sa valence.

II.3.3. Mécanisme de transfert

Dans le cas de l'osmose inverse, les transferts de solvant et de soluté au travers d'une membrane semi-perméable se font par solubilisation-diffusion ; toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. [32]

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \Pi}{\mu R_m} \quad (2.3)$$

Avec :

J : Flux d'eau à travers la membrane ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

ΔP : Différence de pression de part et d'autre de la membrane (Pa).

$\Delta \Pi$: Différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane (Pa).

μ : Viscosité dynamique de l'eau (Pa.s).

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

II.3.3.1. polarisation de concentration

Un phénomène limitant intervient lors de l’osmose inverse, il s’agit de la polarisation de la concentration au voisinage de la membrane. Comme montré dans **la figure 2.3**, la polarisation de la concentration est caractérisée par une accumulation à la surface de la membrane des espèces retenues.

La concentration d’une espèce au voisinage de la membrane (C_m) va augmenter jusqu’à ce qu’un équilibre s’établisse entre: le flux transféré à travers la membrane sous l’action du gradient de pression ($J.C_0$) et le flux qui diffuse en sens inverse sous l’action du gradient de concentration de la couche limite vers la solution ($\frac{Ddx}{dc}$).

La polarisation de la concentration est un phénomène réversible qui disparaît si la force motrice de transfert est annulée.

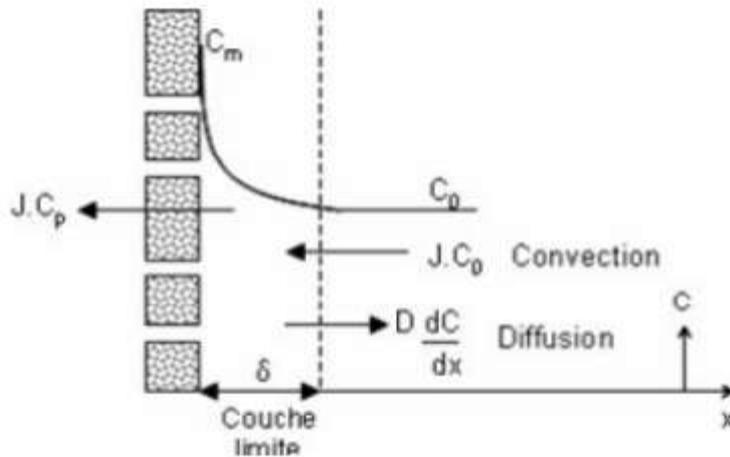


Figure 2.3:Phénomène de polarisation de la concentration sur membrane d'OI.[25]

Le phénomène de polarisation de la concentration est décrit selon la théorie du film en introduisant le coefficient de transfert de masse : [25]

$$CP = \frac{(C_m - C_p)}{(C_b - C_p)} \quad (2.4).$$

II.4. Paramètre de fonctionnement

II.4.1. Taux de conversion

Le taux de conversion (Y) est, par définition, la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane : [33]

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0} \quad (2.5)$$

Avec :

Y: Le taux de conversion.

Q_P : Débit de perméat en m³ /j.

Q₀ : Débit d'alimentation en m³ /j.

II.4.2. Sélectivité

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 censées retenir : [33]

$$T_R = [(C_0 - C_p) / C_0] = [1 - (C_p / C_0)] \quad (2.6)$$

Avec :

T_R : Taux de rétention.

C₀ : Concentration de l'espèce à retenir dans la solution.

C_p : Concentration de la même espèce dans le perméat.

II.4.3. Débit spécifique ou densité du flux volumique

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité de flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement.

Le débit spécifique s'exprime le plus souvent en litres. h⁻¹.m⁻². [33]

II.5. Limitations de l'osmose inverse

L'un des principaux facteurs qui limitent l'utilisation des membranes dans presque toutes les applications est le colmatage [22]. Le colmatage c'est l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. [34]

Dans le cas de l'osmose inverse, le phénomène de colmatage peut être classifié en 4 catégories suivantes:

1. la précipitation des composés inorganiques sur la membrane (l'entartrage).
2. la formation du dépôt par des particules ou des matières organiques sur la membrane.
3. la formation du biofilm et l'excrétion in situ d'exo polymères sur la membrane (le bio-colmatage).
4. l'adsorption dans la membrane. [32]

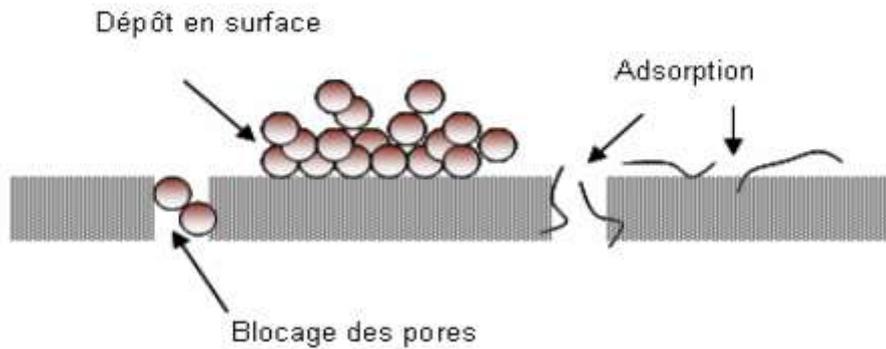


Figure 2.4: Schématisation des différents mécanismes de colmatage d'une membrane.[32]

II.5.1. Colmatage par entartrage

L'entartrage sur une membrane est principalement causé par :

- a) le dépassement de la limite de solubilité des composants inorganiques, c'est-à-dire qu'il y a une sursaturation.
- b) l'augmentation rapide de la vitesse de déposition.

Des sels sursaturés vont précipiter sur la surface de la membrane et construire une couche fine qui bloque le transfert de matière à travers la membrane. L'entartrage a toujours lieu à la surface de la membrane car la concentration des sels est augmentée près de la membrane par la polarisation de concentration. Les dépôts de tartre rencontrés le plus fréquemment dans le dessalement comportent du carbonate de calcium (CaCO_3), du sulfate de calcium ($\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$), de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et des dépôts de silice (SiO_2 , CaSiO_3 , MgSiO_3 , etc....).

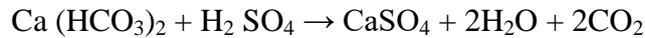
Ont montré que des complexes colloïdaux (Si-Al-Fe) constituent l'entartrage principal de la membrane d'osmose inverse. Les éléments prédominants sont le silicium et l'aluminium qui représentent 23,81 % et 17,67 % respectivement des éléments totaux. La précipitation du silicium est probablement expliquée par l'effet de la présence des ions trivalents, à savoir Al^{3+} et Fe^{3+} .

L'entartrage peut être éliminé par différents traitements chimiques :

- **Précipitation à la chaux** : ce procédé est employé lorsque la dureté carbonatée est due essentiellement aux ions Ca^{+2} . En revanche, l'addition de chaux entraîne la précipitation du CaCO_3 avant la membrane suite à la modification du pH.



- **Décarbonatation à l'acide** : l'addition d'un acide fort, H_2SO_4 ou HCl , déplace les carbonates sous forme de gaz carbonique.



- **Germination ou ensemencement** : ce système consiste à provoquer les dépôts sur des germes cristallins que l'on a introduits dans la solution à raison de 10 à 20 $g.L^{-1}$. Ces germes peuvent être du carbonate de calcium, du sulfate de calcium ou du sulfate de baryum. Les risques de « prise en masse » au cours des arrêts existent et peuvent expliquer le faible développement de ce procédé.

- **Adoucissement sur résines de l'eau de mer** : l'adoucissement de l'eau de mer consiste à remplacer les ions calcium par des ions sodium. Le procédé consiste à faire circuler l'eau de mer sur des résines cationiques acides fort saturées en ion sodium, où se produit un échange ionique.

- **Inhibiteurs d'entartrage** : c'est ce procédé qui est le plus souvent utilisé. Les produits chimiques nommés « tartriques » sont injectés à très faible dose (quelques ppm) dans l'eau d'alimentation. Ils ont la propriété d'éviter ou de minimiser les dépôts qui se font sur la membrane. [32]

II.5.2. Colmatage par dépôt

Le colmatage par dépôt peut être de deux natures différentes qui peuvent coexister:

- **le colmatage particulaire ou colloïdal** : des colloïdes peuvent être agglomérés et adhérer à la membrane. Les colloïdes les plus courants sont des argiles de silicate d'aluminium (0,3-1 μm) et des colloïdes de fer. Les microorganismes déposés font aussi partie de ce colmatage.

- **le colmatage par la matière organique** : la dégradation de la matière organique produit une matrice de macromolécules appelée acide humique. Les matières organiques dans les eaux salées sont principalement des substances humiques à des concentrations entre 0,5 à 20 $mg.L^{-1}$ pour l'eau saumâtre. [32]

II.5.3. Le bio-colmatage

Toutes les eaux de mer contiennent des microorganismes tels que des bactéries, des algues, des virus, etc. Ces microorganismes excrètent des substances polymériques extracellulaires qui adhèrent à la surface de la membrane et provoquent la formation d'un biofilm. La première étape de la formation du biofilm est probablement l'adsorption des molécules organiques sur la surface de la membrane. Cette couche organique conditionne la surface de la

membrane et améliore l'adhésion des microorganismes. L'étape suivante est donc l'adhésion des microorganismes sur la surface de la membrane conditionnée ; cette étape est suivie par l'adhésion microbienne, la croissance des cellules adhérentes et par la suite la production de polymère extracellulaire. Nous avons vu qu'une eau de mer contient tous les éléments nécessaires pour le développement de micro-organismes. En osmose inverse, le colmatage par biofilm est un phénomène majeur. [32]

II.5.4. Résistance de colmatage

Le colmatage dans ses différentes formes ajoute une résistance au transfert de matière à celle de la membrane et la performance globale diminue significativement. Pour récupérer les performances de la membrane, elle doit être périodiquement nettoyée. Le type de produit de nettoyage dépend largement du type de membrane et de la nature du colmatage. [32]

II.6. Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse

II.6.1. Les avantages

- Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%).
- Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m³).
- Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau.
- Un coût d'investissement relativement bas.
- Une durée de mise. en œuvre réduite.
- Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bioélectroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles.
- pH légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang généralement trop toxique).
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins. [35]

II.6.2. Les inconvénients

Malgré les avantages, il y a aussi des inconvénients comme:

- Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions.
- Nécessité d'un personnel qualifié.
- Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement.
- Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent.
- la perte de cinq litres d'eau pour un litre d'eau osmosé car la membrane doit être.

- continuellement nettoyée. Comme l'eau est déminéralisée.
- l'eau perd tous ses minéraux y compris les minéraux bénéfiques comme certains alcalins.
- notamment le calcium et le magnésium. Il est donc préférable. [35]

II.7. Mise en œuvre des membranes

Il existe deux types de mise en œuvre des membranes : l'écoulement frontal et l'écoulement tangentiel. [36]

II.7.1. Écoulement frontal

Ce mode de filtration consiste à amener la solution à filtrer perpendiculairement à la membrane. Les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux. [36]

II.7.2. Filtration Tangentielle

En filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module pour venir au contact de la membrane suivant un flux tangentiel. 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 passé à travers la membrane comme l'illustre la figure 2.5.[37]

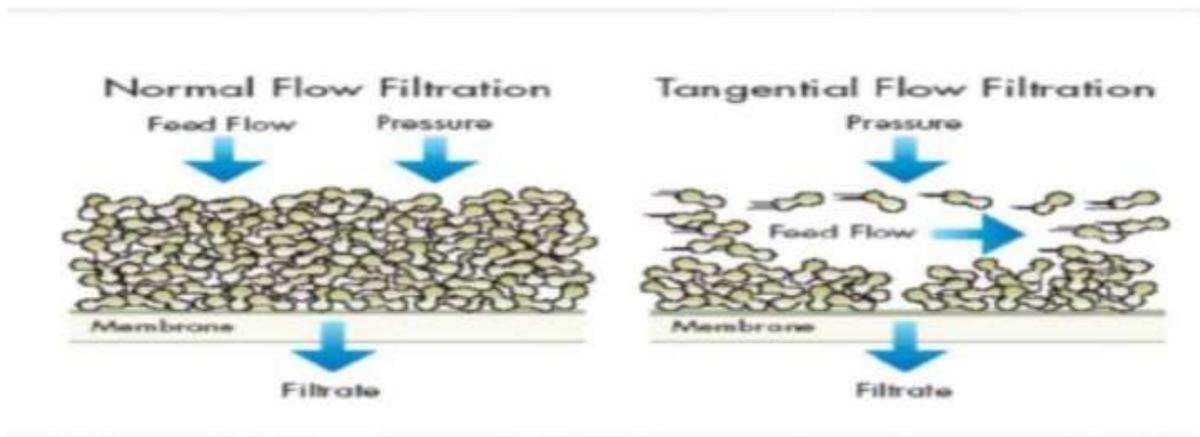


Figure 2.5:Filtration frontale et tangentielle à travers une membrane.[38]

II.8. Dispositif d'osmose inverse

Les membranes utilisés à l'échelle industrielle, doivent être compactés selon différentes configurations dans des modules selon le mode de séparation, certaines exigences doivent être

pris en considération comme les coûts de production de l'eau, a densité la plus faible et la consommation énergétique optimal font les normes de sélections. [39]

II.9. Types de modules

II.9.1. Les modules tubulaires

Les membranes sont placées ou formées à l'intérieur d'un tube support, poreux ou percé de trous de drainage, et de diamètre variant de 10 à 40 nm. Ces tubes sont ensuite placés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique pour constituer le module unitaire. L'hydrodynamique de l'écoulement est parfaitement définie et des vitesses de circulation pouvant atteindre $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sont possibles si un régime de forte turbulence est nécessaire. Ces modules ne nécessitent pas de pré filtration fine du liquide à traiter et sont faciles à nettoyer. Leur inconvénient majeur est leur faible compacité et un prix de revient élevé par m^2 installé. [40]

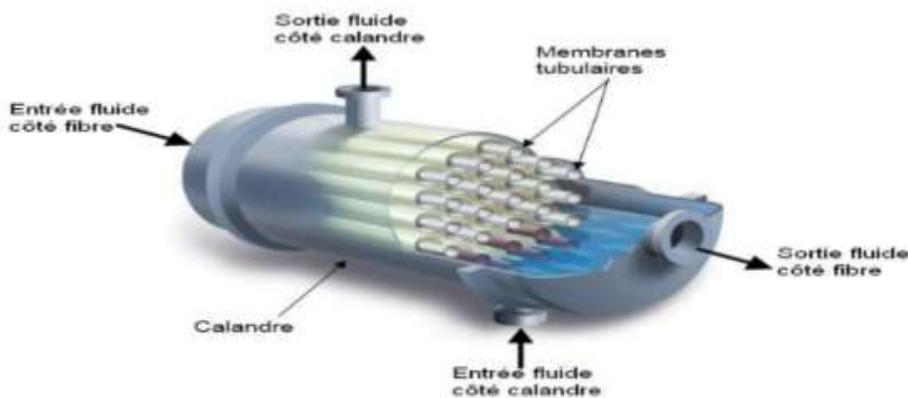


Figure 2.6: Modules tubulaires.[41]

II.9.2. Les Modules spiralé

Une feuille poreuse est placée entre deux membranes ; la membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui, recueille le filtrat le sandwich ainsi réalisée est scellée sur trois de ses bords ; le coté ouvert constituant un tube cylindrique collecteur. [42]

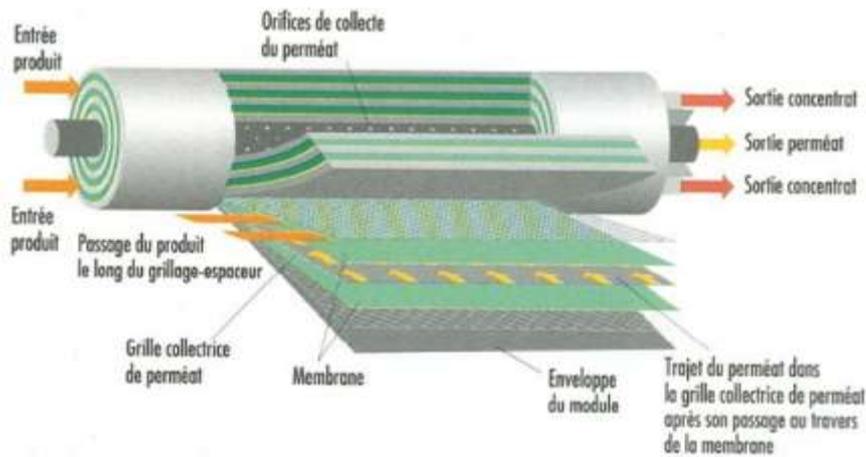


Figure 2.7: modules spiralés. [43]

II.9.3. Les Modules plans

Les modules plans de type filtre-pressé sont les plus anciens et les plus simples ; les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres, et sont séparées par des séparateurs –joints et des supports, qui font office de compartiments amont et aval. La structure cannelée ou grillagée des séparateurs-joints autorise un maximum de turbulence au plan de l'écoulement ; les supports, indispensable dans les procédés utilisant la pression ; sont généralement poreux et de surface unie, pour éviter le cisaillement de la membrane. [44]

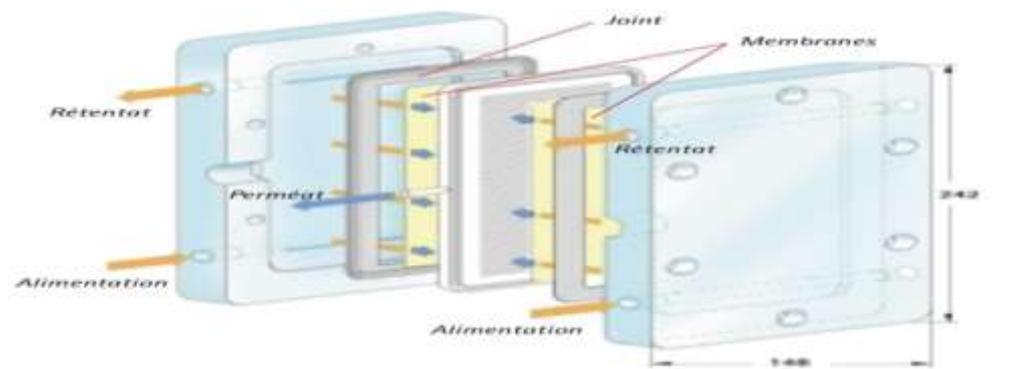


Figure 2.8: modules plans.[43]

II.9.4. Les Modules fibres creuses

Ce type de modules se présente comme un ensemble de fibres creuses regroupées dans une enveloppe. La peau est localisée à l'intérieur ou à l'extérieur de chaque fibre selon que le perméat est collecté à l'extérieur ou à l'intérieur des fibres. Ces systèmes sont très compacts, peu coûteux, particulièrement adaptés pour les fluides peu visqueux présentant de faibles risques de colmatage. Une pré-filtration est donc fortement recommandée. [45]



Figure 2.9: module à fibre creuse.[46]

II.10. Techniques de nettoyages des membranes

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. Les différentes techniques de nettoyage sont :

- a) Le nettoyage mécanique : partiel mais rapides, son principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques.
- b) Le nettoyage chimique : nécessite un arrêt de production périodique, génère des coûts en solution de lavages et en traitement des effluents. Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage.
- c) Le nettoyage enzymatique : constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans le cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé. [42]

Chapitre III

La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

III.1. Introduction

L'objectif de la Simulation Numérique Avancée est que le futur ingénieur acquière les compétences nécessaires (connaissances scientifiques et techniques, réflexion, recul) à l'élaboration de stratégies numériques pertinentes pour la résolution d'un problème donné et à l'analyse des résultats. Nous nous intéressons ici aux problèmes pouvant être décrits par une équation aux dérivées partielles (EDP). Nous entendons alors par stratégie numérique un ensemble de méthodes numériques permettant d'approcher la solution désirée de l'EDP, ces EDP sont généralement les équations qui décrivent en termes mathématiques les lois de la physique, mais on peut également penser à d'autres domaines d'application comme l'analyse d'images, les finances, la biologie, ...

Les méthodes numériques implantées dans les codes de calcul standards (commerciaux, open-sources, académiques) sont généralement fiables et robustes. Cependant, lors de l'utilisation de ces codes, l'ingénieur doit se poser certaines questions, prendre certaines précautions, faute de quoi les résultats obtenus fournissent peut-être de jolies images mais sans la moindre valeur scientifique. En premier lieu, un code de calcul résout ce que l'utilisateur lui demande de résoudre. Il faut donc que l'étape de modélisation physique ait été correctement faite, que l'EDP résolue décrive correctement le phénomène physique étudié, que les conditions initiales et aux bords soient pertinentes. Ensuite, la méthode de discrétisation à utiliser dépend des propriétés de l'EDP, et donc des propriétés de la solution à approcher (régularité, dépendance en temps, etc.). Ainsi, une méthode « stable » pour une équation à diffusion dominante peut être « instable » pour une équation à convection dominante et donc inadaptée à sa résolution. Enfin, les simulations numériques peuvent coupler aujourd'hui plusieurs physiques au sein d'un même calcul, mettant en jeu des phénomènes non linéaires, des interfaces mobiles, etc. Avant de traiter de telles situations complexes, il est préférable (et même obligatoire) de simuler des situations modèles pour lesquelles on a une idée de la solution (à défaut de la connaître), de s'en servir pour évaluer les performances des méthodes numériques, puis de progressivement complexifier le calcul jusqu'à arriver au résultat final. [47]

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

III.2. Les méthodes de simulation

Les méthodes de simulation génèrent des milliers de sentiers possibles d'évolution de l'actif sous-jacent à partir de la date courante jusqu'à la date d'expiration de l'option.

Dans la méthode de simulation Monte-Carlo couramment utilisée, la stratégie optimale d'investissement à la fin de chaque sentier est déterminée et le gain est calculé. La valeur courante de l'option est trouvée en calculant d'abord l'espérance mathématique des valeurs de l'option de la date terminale puis en calculant cette espérance mathématique à la date courante.

L'évolution du prix d'un produit donné peut, par exemple, être représentée par un processus brownien géométrique. [48]

III.3. Le choix de la méthode de résolution

Il existe trois méthodes générales :

1. l'approche de résolution de l'équation différentielle partielle.
2. l'approche de la programmation dynamique qui ; après avoir établi les conséquences futures possibles, cherche à déterminer la valeur de la stratégie optimale future.
3. l'approche de la simulation qui calcule la valeur moyenne de la stratégie optimale à la date de décision pour des milliers des conséquences possible. [48]

III.4. L'approche de la résolution de l'équation différentielle

Les équations différentielles partielles sont au cœur de l'évolution des options. Une équation différentielle partielle pour la valeur d'une option décrit les conditions que la valeur de l'actif sous-jacent et celle de l'option doivent satisfaire à travers le temps par rapport à chacune des variables indépendantes. L'évaluation d'une option exige une équation différentielle partielle et une série de conditions aux bornes reflétant la règle de décision et les valeurs extrêmes que l'option devrait prendre. Si l'équation différentielle partielle est assez simple, il est possible d'utiliser les méthodes mathématiques et d'obtenir une solution analytique. Pour certains processus stochastiques, par exemple le mouvement brownien, des solutions analytiques existent. Cependant, il n'est pas toujours possible de trouver des solutions analytiques pour des variables suivant d'autres processus stochastiques de diffusion. Dans certains cas, c'est une version modifiée de l'équation différentielle partielle qui est résolue pour obtenir une approximation analytique à la valeur de l'option. [48]

III.5. Méthodes de discrétisation d'EDP

Une équation aux dérivées partielles, notée EDP, (partial différentiel equation ou PDE en anglais) fait intervenir plusieurs variables indépendantes (souvent en temps et espace), ainsi que les dérivées partielles de la fonction recherchée. [49]

Naturellement, la résolution analytique (ou exacte) de tels problèmes est généralement impossible. c'est pourquoi, d'une manière générale, le problème de départ est approché par un problème discret formulé sur un espace de dimension finie, ce qui conduit à la résolution d'un système linéaire **figure. 3.1.**[50]

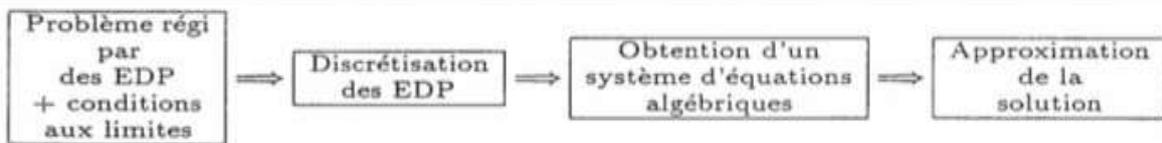


Figure 3.1: procédure de la résolution numérique. [50]

Pour passer d'un problème exact continu régi par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes :

- 1) Module éléments finis.
- 2) Module différences finis.
- 3) Module volumes finis « Volume of Fluid». [51]

III.5.1. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis standards a été utilisée pour la première fois pour résoudre le problème d'écoulement des eaux et le transport des solutés au début des années soixante-dix (1970). Parmi les auteurs qui ont adopté cette méthode on peut citer (Zienkiewicz&Parekh, 1970; Neuman, 1973; Milly, 1985 ; Pan et al, 1996; Šimůnek et al, 2004; Phoon et al, 2007). [52]

Cette méthode consiste à transformer les équations différentielles sous des formes Intégrales basées sur le concept de minimisation d'une quantité (comme l'énergie...), conduisant à la solution exacte. En d'autre terme elle s'agit de trouver une fonction globale représentant le modèle mathématique dans le domaine étudié.

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis consiste à :

- Définir une partition du domaine d'étude c'est-à-dire subdiviser le domaine d'étude en régions élémentaires (Eléments Finis).
- Représenter la fonction inconnue sur chacun de ces éléments par une approximation Polynomiale.
- Construire les formes intégrales.

- Minimiser l'intégrale.
- Une organisation matricielle des calculs.
- Une résolution du système algébrique.

La MEF est une méthode très puissante pour la résolution des équations aux dérivées Partielles surtout dans les géométries complexes. Sa mise en œuvre par contre, est assez compliquée et nécessite une place mémoire assez importante. [53]

III.5.1.1. Démarche éléments finis

Dans ce paragraphe, nous essayerons de présenter d'une manière simplifiée, les étapes d'application de la méthode des éléments finis et les outils nécessaires à sa mise en œuvre. La résolution d'un problème physique par éléments finis suit grosso modo les étapes suivantes **figure.3.2.**

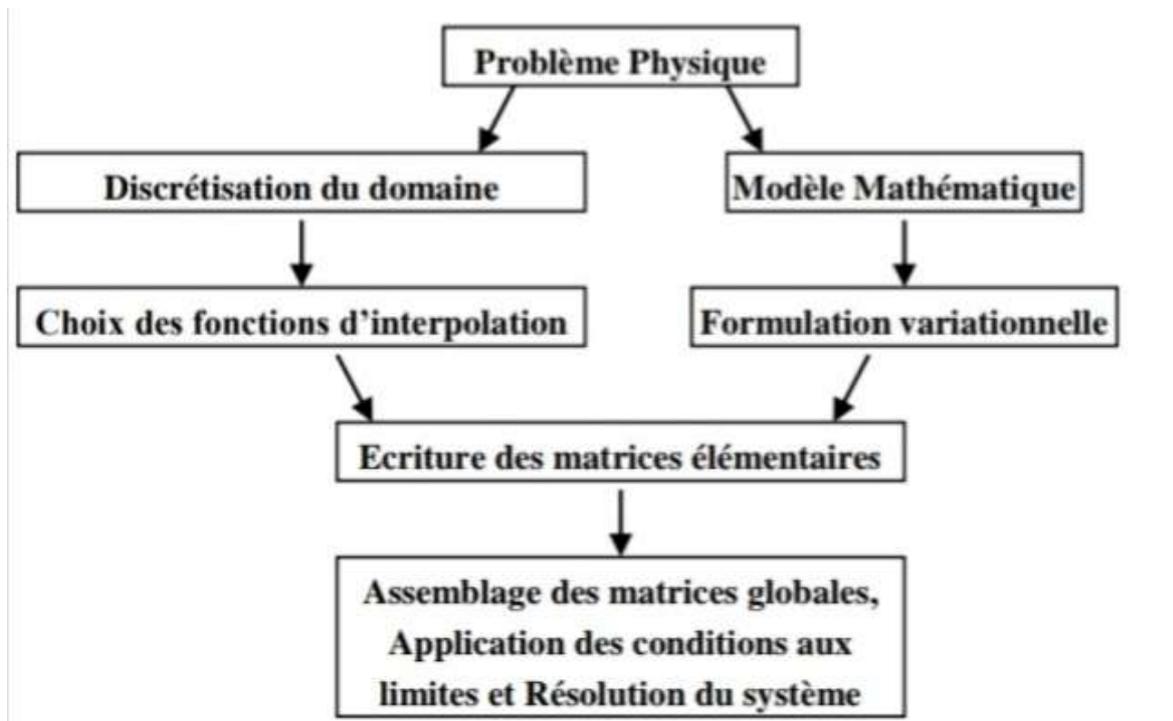


Figure 3.2: Etapes générales de la méthode des éléments finis.[54]

Etape 1 : Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites.

La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour. L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale. La formulation faible est souvent utilisée pour inclure les conditions aux limites.

Etape 2 : Division du domaine en sous domaines.

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

Cette étape consiste à discrétiser le domaine en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds. Elle constitue ainsi la phase de préparation des données géométriques.

Etape 3 : Approximation sur un élément.

Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, la température, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autre. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

Etape 4 : Assemblage et application des conditions aux limites.

Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité,...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

Etape 5 : Résolution du système global.

Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il définit soit un problème d'équilibre qui concerne un cas stationnaire ou statique ou un problème de valeurs critiques où il faut déterminer les valeurs et vecteurs propres du système qui correspondent généralement aux fréquences et modes propres d'un système physique.

Un problème de propagation qui concerne le cas transitoire (non stationnaire) dans lequel il faut déterminer les variations dans le temps des variables physiques et la propagation d'une valeur initiale. Les méthodes d'intégration pas à pas sont les plus fréquentes telles que, méthode des différences finies centrales, méthode de Newmark, méthode de Wilson. A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus célèbre est. la méthode de Newton Raphson. [54]

III.5.1.2. Avantages

La méthode a plusieurs avantages:

-la MEF peut être appliquée dans des conditions fort complexes, à savoir lors de tout problème physique ou mathématique (différentiel intégral, intégro-différentiel, variationnel), linéaire ou non linéaire, domaines et géométrie quelconques, propriétés physiques à valeurs constantes ou variables (rigidité, densité, conductivité, résistivité, etc.), sollicitations externes de toutes formes ainsi que lorsqu'il s'agit de problèmes de natures variées (problème aux limites, transitoire...).

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

-La MEF est désormais accessible par le biais de logiciels commerciaux performants. Ces logiciels, qui «exigent pas une connaissance approfondie de la MEF, ne prennent que quelques minutes pour effectuer la simulation. En outre, ils proposent des outils de visualisation graphique pour présenter les résultats. Ces deux points ont encouragé plusieurs chercheurs dans des domaines divers à l'adopter comme principale méthode de résolution;

-En ce qui est de la discrétisation de la géométrie Ω , il est possible d'utiliser plus d'un type d'élément dans le même maillage afin de s'approcher au mieux à la géométrie Ω . [55]

III.5.1.3. Inconvénients

Les principaux inconvénients de la méthode des éléments finis dans la résolution des problèmes:

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales (caractéristiques des matériaux, conditions aux limites)- En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs;

- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites, ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas. [55]

III.5.1.4. Les caractéristiques de la méthode

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple. Sur chacun de ces éléments il sera plus simple de définir une approximation nous permettant d'appliquer les méthodes. Il ne reste alors qu'à assembler les formes matricielles élémentaires pour obtenir les équations relatives à la structure à étudier. [56]

C'est sous cette forme pragmatique qu'elle est utilisée par les ingénieurs.

- Discrétisation des équations intégrées sur des éléments.
- Existence d'une solution faible.
- Robustesse et souplesse (maillage quelconque) de la méthode.
- Couteuse en temps de calcul (inversion de matrices). [57]

III.5.1.5. Approximation nodale

La méthode des éléments finis est basée sur la construction systématique d'une approximation u^* du champ des variables u par sous domaine.

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

Cette approximation est construite sur les valeurs approchées du champ aux nœuds de l'élément considéré, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale. [53]

III.5.1.6. Définition de l'approximation nodale

L'approximation par éléments finis est une **approximation nodale** par sous domaines ne faisant intervenir que les **variables nodales** du domaine élémentaire. [53]

III.5.1.7. Approximation nodale de quelques éléments de référence

Les fonctions d'interpolation sont construites sur des éléments de référence. Un élément de référence est un élément de forme géométrique simple (frontières rectilignes), pour lequel l'approximation nodale est construite en suivant la démarche analytique précédente.

Le passage de l'élément de référence à l'élément réel sera réalisé par une transformation géométrique. Nous entendons par élément réel un élément quelconque du domaine discrétisé.

Deux grandes familles d'éléments sont souvent présentées

- Les éléments de type Lagrange.
- Les éléments de type Hermite.

Pour les éléments de type Lagrange, on augmente le nombre de nœuds en conservant une seule variable nodale. Pour les éléments de type Hermite on augmente le nombre de variables nodales, en retenant par exemple les valeurs des dérivées du champ aux nœuds [53].

III.5.2. Méthode des différences finies

La méthode des différences finies a été initialement appliquée aux écoulements des liquides dans des réservoirs de pétrole. Elle n'a été appliquée aux problèmes d'écoulement d'eau souterraine et le transport des solutés qu'au milieu des années soixante. Parmi les auteurs qui ont utilisé cette méthode, on peut citer (Ashcroft et al., 1962; Cooley, 1971; Ross, 1990; Celia et al., 1990; Desbarats, 1995; Romano et al., 1998; van Dam et al., 2000; Brunone et al., 2003; Belfort et Lehmann, 2005; Travaš&Lanča, 2012). [52]

La méthode des nœuds (ou des différences finie) est l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour la résolution des problèmes aux valeurs limites.

La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations Aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. [58]

III.5.2.1. Les caractéristiques de la méthode

La méthode de différence finie ne permet pas la prise en compte des conditions de passage d'un milieu physique à un autre et des non-linéarités, cela nécessite un traitement spécifique. D'autre part, elle s'adapte mal aux objets de la géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage. [58]

- Discrétisation des équations sur grid structuré cartésien.
- Méthode simple et rapide.
- Facilité de calcul des dérivées.
- Pas de solution (faible).
- Pas de souplesse de maillage. [57]

III.5.2.2. Avantages

Grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul. [52]

III.5.2.3. Inconvénients

Limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

Application seulement sur des maillages réalisés avec des éléments rectangulaires (2D) ou cubique (3D). [52]

III.5.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus Pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e, w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e, w, s, n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e, w, s, n, t, b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel, (E, W, S, N) dans le cas bidimensionnel, et (E, W, S, N, T, B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire.

L'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales. [58]

III.5.3.1. Caractéristiques de la méthode

Les méthodes des Volumes Finis consiste donc à :

Chapitre III La simulation (les méthodes numériques de résolutions)

- Existence d'une solution faible.
- Maillage quelconque.
- Une méthode aux volumes finis peut facilement traiter les chocs dans les systèmes physiques sans engendrer d'oscillations parasites.
- Ces méthodes permettent la conservation de certaines quantités (masse, énergie), à la précision de la machine, ce qui les rend très utiles dans les systèmes à géométrie complexe.
- Méthode explicite, calculs moins coûteux qu'élément fini. [57]

III.5.3.2. Avantage

Permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, Détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann. [59]

III.5.3.3. Inconvénient

Peu de résultats théoriques de convergence. [59]

Chapitre IV

ComsolMultiphasique

IV.1. Introduction

La simulation informatique est devenue essentielle pour la science et l'ingénierie. Aujourd'hui, tout se fait à travers des langages de programmation qui offrent de multiples options de simulation avec des méthodes numériques avancées. [60]

Il est très important d'utiliser un outil de simulation pour l'analyse des paramètres. Il existe de nombreuses difficultés pour développer un bon programme de simulation, y compris les estimations requises lors de l'écriture de code 2D ou 3D. Surtout lorsque la structure du capteur est complexe, le calcul devient très lourd et il est nécessaire d'utiliser des méthodes simplifiées[61], Dans ces études, COMSOL Multiphasique (connu sous le nom de FEMLAB avant 2005) a été sélectionné comme progiciel. Analyse et contrainte de composants pour résoudre diverses applications en physique et en génie, y compris des phénomènes physiques doubles ou multiples. Comprend un environnement complet pour modéliser tout phénomène physique qui peut être décrit à l'aide de plain ou PDE. [62]

COMSOL Multiphasiques est également largement utilisé dans divers secteurs de recherche, car il facilite grandement les étapes de modélisation et de simulation. [63]

IV.2. Présentation du logiciel

COMSOL Multiphasiques est un programme développé par des étudiants de GermundDahlquist à l'Institut de technologie de Stockholm, en Suède en 1986, et sa première version a été publiée en 1998.



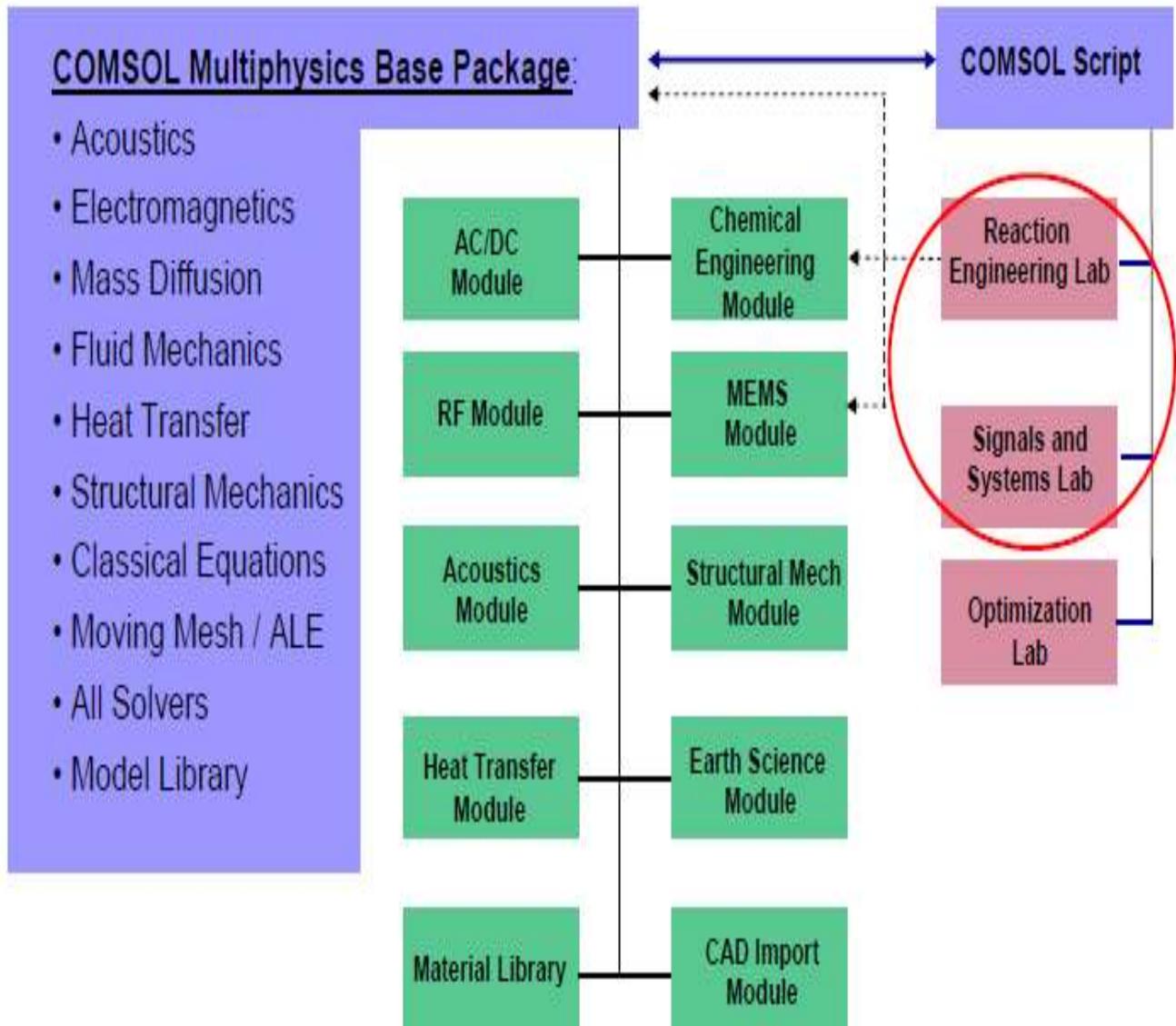
Figure 4.1: Logo de Logiciel COMSOL.[60]

Ce programme permet de simuler et de résoudre des problèmes très complexes, car il dépend de la méthode des éléments finis. COMSOL permet de combiner une physique "simple" ou d'étudier des phénomènes polyphoniques. Il comprend plus de 30 unités complémentaires fournissant des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, chimique et des fluides. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient les simulations implémentées dans ce programme à d'autres programmes mathématiques.[60]

Il contient également une plate-forme de simulation qui inclut toutes les phases du flux de travail de modification - à commencer par la définition des formes géométriques des

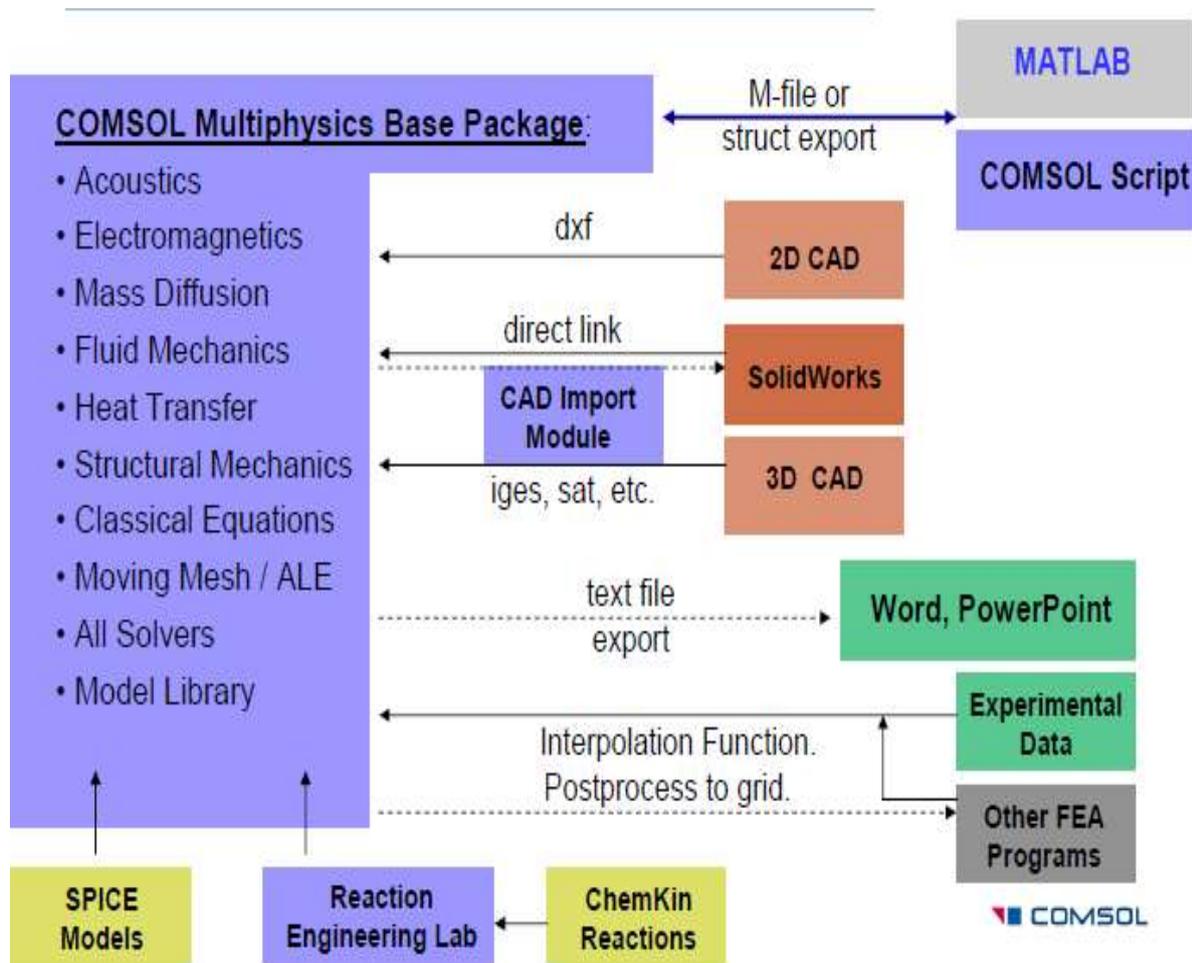
propriétés des matériaux et de la physique qui décrivent les phénomènes de précision et les modèles de post-traitement pour produire des résultats précis et fiables. [57]

IV.3. La Famille COMSOL au complet



- Cette schéma représente toute la famille de comsolet ses packages principaux. [64]

IV.4. COMSOL et autres programmes



- Cette schéma représente le COMSOL et Autres Programmes. [64]

IV.5. Avantages de conception avec COMSOL Multiphasiques

Le principal but de la création de COMSOL Multiphasiques est d' avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l' aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée" , par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques. Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles. Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [65]

IV.6. Principe de l'utilisation de Comsol

L'utilisateur de Comsol doit suivre les étapes suivantes pour l'élaboration d'un modèle :

- Choix de dimension : 3D; 2D; 2D axisymétrique; 1D; 1D axisymétrique; 0D.
- Choix du module physique : écoulement fluide ; transfert de chaleur ; transport d'espèces chimiques...
- Choix du type d'étude : stationnaire ; temporelle.
- Construction de la géométrie.
- Choix et paramétrage des matériaux.
- Choix et paramétrage du maillage.
- Calcul de l'étude.
- Visualisation des résultats. L'interface de Comsol est montrée dans la figure ci-après :

[60]

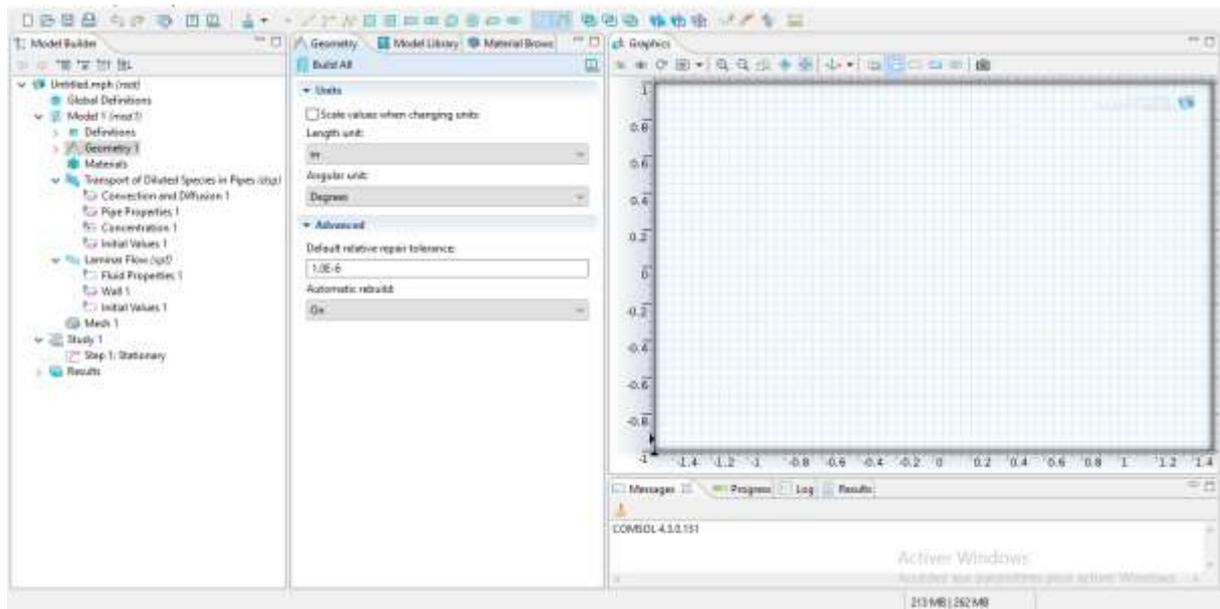


Figure 4.2: Interface principale du logiciel Comsol.

IV.7. Utilisation de comsol

Le logiciel COMSOL utilise principalement une méthode par éléments finis pour résoudre les problèmes liés à la présente étude. Notons que COMSOL « raisonne » principalement sur des entités géométriques (domaine, frontières, points) pour l'imposition des conditions aux limites et d'excitation plutôt que sur des entités de maillages (nœuds, éléments). La définition d'un modèle se fait par le biais du Constructeur de Modèle, sorte d'arborescence qui offre un aperçu complet du modèle et permet d'accéder à toutes les fonctionnalités (géométrie, maillage, paramètres physiques, conditions aux limites, études, solveurs, post-traitement et visualisations).

Les étapes générales de modélisation dans ce logiciel se résument aux points suivants : [66]

IV.7.1. Choix de la physique et du cas à l'étude

Le logiciel offre plusieurs types de physique comme l'interaction fluide-structure, la thermique, l'électromagnétique, la géotechnique, etc. Ces types de physique sont gouvernés par des équations différentielles bien particulières. Il faut signaler que COMSOL permet un accès aux expressions des équations qui sont implantées, ce qui offre une grande flexibilité pour définir des problèmes spécifiques non prévus. Le cas d'étude, c'est-à-dire le type d'analyse que l'on souhaite effectuer. [66]

IV.7.2. Définition de la géométrie du problème

Le logiciel dispose de fonctions de création (primitives comme des sphères, des cylindres, des blocs, etc.) et d'édition géométriques (opérations booléennes) assez complètes.

Les opérations effectuées sont organisées dans un arbre visible dans l'une des fenêtres du logiciel. Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées grâce à un module d'importation géométrique qui permet de travailler avec des géométries existantes conçues dans d'autres logiciels de conception. [66]

IV.7.3. Définition des matériaux solides et fluides

Le logiciel dispose d'une vaste bibliothèque de matériaux allant des métaux aux plastiques. Les paramètres des matériaux (masse volumique, propriétés élastiques et d'amortissement) peuvent être modifiés. En fonction du type de physique utilisée, des lois de comportement diverses sont disponibles. [66]

IV.7.4. Définition des interfaces physiques

En fonction de la physique choisie dans la première étape, des nœuds correspondant aux domaines physiques (appelés interfaces physiques dans COMSOL) sont créés dans l'arborescence du modèle. On rattache ensuite à ces domaines les géométries pertinentes définies précédemment. Pour chaque domaine, on a les étapes suivantes:

- **Affectation du matériau**

On attribue à chaque domaine un des matériaux définis précédemment.

- **Définition des conditions aux limites et des excitations**

Le logiciel permet de gérer l'ensemble des conditions aux limites de type cinématique ou de type naturel. Le logiciel gère également les conditions de symétrie et d'antisymétrie.

En général les contraintes aux limites sont imposées sur des surfaces de la structure.

- **définition du chargement extérieur**

En plus de la condition aux limites qui donnent directement la valeur des variables en certains endroits on peut appliquer un chargement externe qui devra être pris en compte pour résoudre les équations du système.

- **définition du régime temporelle**

Avant simuler notre problème il faut tout d'abord définir le temps, pour cela il faut préciser: le temps de début, le pas et le temps final. [66]

IV.7.5. Définition des interfaces de couplage

Les conditions de couplage sont dictées par la physique choisie au départ.

IV.7.6. Définition du Maillage

Le logiciel propose des outils de maillage automatique et semi-automatique 1D, 2D, et 3D dont les paramètres sont contrôlés par l'utilisateur. Il offre également des fonctions d'importation de maillages dans divers formats. Il dispose d'éléments finis de formes (tétraédriques, prismatiques ou hexaédriques) et d'ordres (linéaires, quadratiques, etc.) variés L'ensemble des domaines est maillé à cette étape. [66]

IV.7.7. Choix de l'algorithme de résolution

Le logiciel permet l'utilisation de plusieurs solveurs numériques directs et itératifs de matrice creuse, méthodes multi grilles algébriques et géométriques, et une grande variété de pré conditionneurs. Le calcul est exécuté sur la base d'un contrôle des erreurs, et le cas échéant avec un maillage adaptatif. Les solveurs utilisés dépendent des couplages physiques impliqués dans le problème considéré. [66]

IV.7.8. Post-traitement et export des résultats

Les fonctionnalités de visualisation comprennent différents types de graphiques dont les tracés de surface, en coupe, en iso surface, en flèche et en ligne de courant. Le logiciel propose également toute une gamme d'outils de post-traitement pour l'évaluation et l'intégration. Les résultats peuvent être exportés dans de multiples formats. [66]

Chapitre V

Résultats et discussions

V- Résultats et discussions

V.1. module de membrane d'osmose inverse

Dans ce travail on va faire la simulation de la géométrie de la membrane dans le processus d'osmose inverse. Le schéma ci- dessous représente notre cellule, ce schéma est constitué d'un réservoir d'alimentation avec une pompe qui assure certaine pression pour alimenter un module d'osmose inverse, ce dernier est constitué de deux sorties, la partie du fluide étant traversé la membrane s'appelle perméat et l'autre partie s'appelle concentrât.

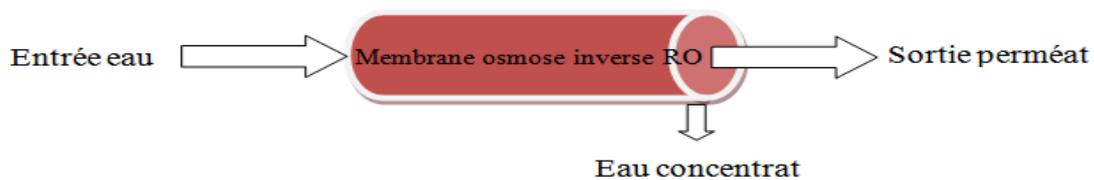


Figure 5.1 : Module osmose inverse.

V.2. La géométrie

La **figure 5.2** représente la configuration d'un module d'osmose inverse .ce schéma contient deux plaques en parallèles (en solides) a une longueur égale à 20mm. la paroi supérieure est imperméable et l'autre paroi est perméable (membrane). La distance entre ces dernières est de 2 mm. À la paroi perméable (membrane) de module nous avons des points sur toute la longueur. Il ya une distance entre chaque des deux points de 2mm, entre chaque 2mm il ya un espace imperméable et l'autre est perméable et ainsi de suite au cours de la longueur de la membrane.

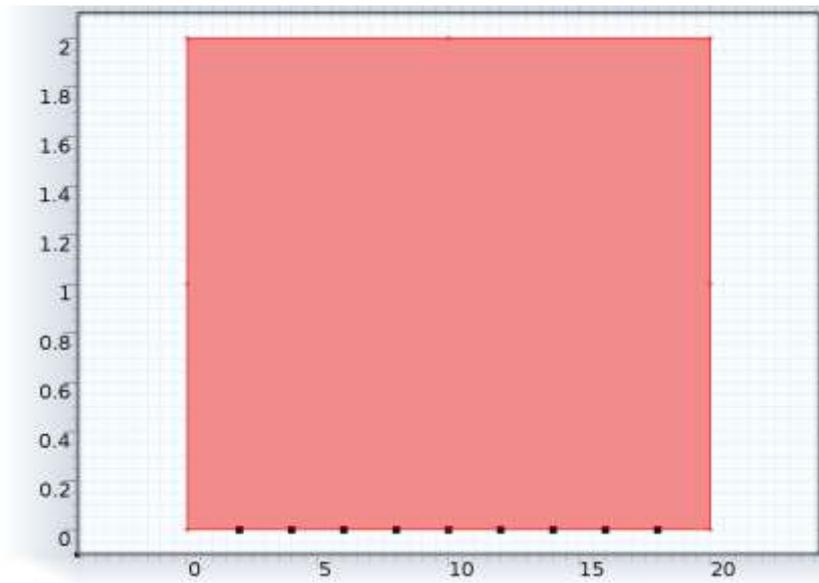


Figure 5.2 : La configuration de module d'osmose inverse à 20mm.

La **figure 5.3** le même schéma mais a une longueur égale 40mm et nous avons aussi des points sur toute la longueur.

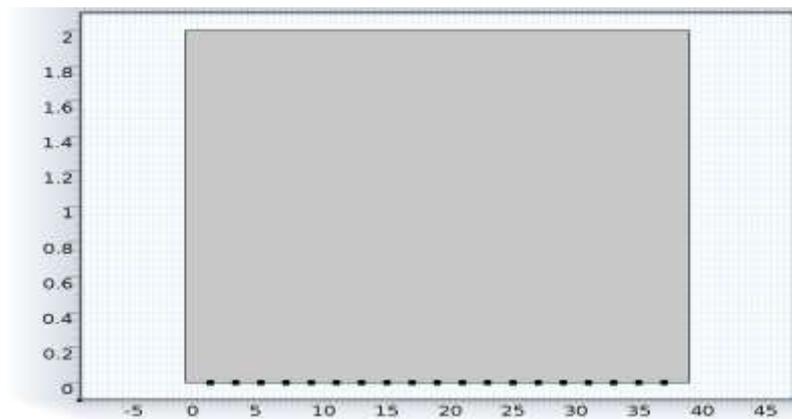


Figure 5.3 : configuration de module d'osmose inverse à 40 mm.

V.3. les physiques utilisés

Nous allons utiliser les deux physiques suivantes : écoulement laminaire et transport d'espèces diluées (transfert de matière).

V.3.1. Transfert de matière

S'il existe une différence de concentration dans l'espace, par exemple entre deux compartiments séparés par une membrane perméable (laissant passer le solvant comme le soluté) il va y avoir, au cours du temps, un déplacement de la matière du compartiment concentré vers le moins concentré. Ce transfert s'effectue jusqu'à ce que l'équilibre en concentration soit atteint. Ce phénomène spontané est appelé diffusion. La loi de Fick décrit ce phénomène :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (5.1)$$

La diffusion des particules est liée à la nature des particules et des espèces présentes en solution. La convection est quant à elle liée à la pression transmembranaire appliquée.

V.3.2. écoulement laminaire (Navier-Stokes)

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens (visqueux) dans l'approximation des milieux continus. Elles modélisent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides.[67]

Les conditions hydrodynamiques utilisées dans notre cas sont :

- L'écoulement est laminaire.
- Le régime stationnaire.
- Le fluide est incompressible.
- Pas de force externe affecte le fluide Dans ce modèle et ces coordonnées et condition,

consol résoudre les équations de Navier-Stokes suivantes :

Equation de conservation de la quantité de mouvement dans la direction de X :

$$\rho U \frac{\partial u}{\partial x} + \rho V \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (5.2)$$

Equation de conservation de la quantité de mouvement dans la direction de Y :

$$\rho U \frac{\partial v}{\partial x} + \rho V \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (5.3)$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (5.4)$$

V.4. maillage

La résolution numérique d'un système d'équations aux dérivées partielles par la méthode des volumes finis nécessite de discrétiser le domaine d'étude sous la forme d'un maillage triangulaire.[68]

Nous allons laisser Comsol faire le maillage .en effet, Comsol propose une option s'appelant « physics-controlled mesh ».en fonction des paramètres et des différentes physiques, comsol propose son maillage, et nous pouvons simplement choisir le niveau de raffinement on peut voir sur la figure ci-dessous que dans notre cas, comsol a décidé de raffiner plus sur les parois.

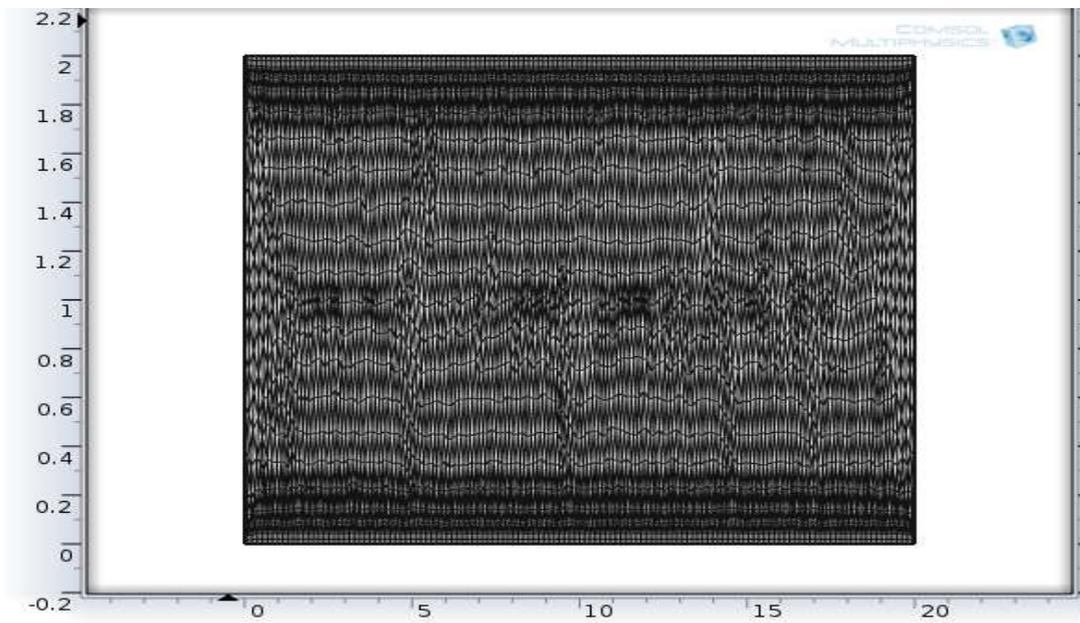


Figure 5.4 : maillage utilisé par comsol pour notre modèle de 20mm.

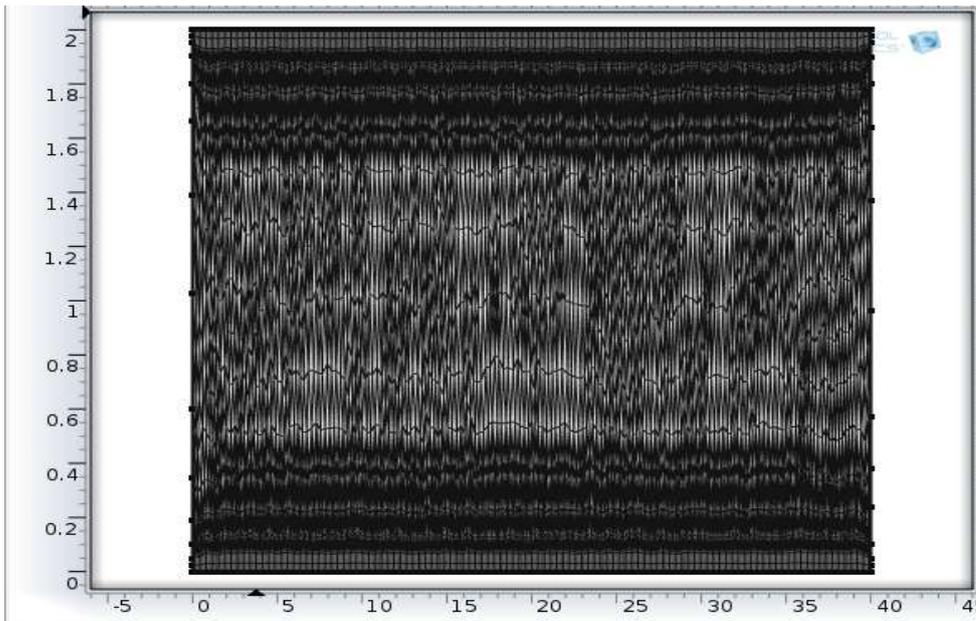


Figure 5.5: Maillage utilisé par comsol pour notre modèle de 40 mm.

Remarque : dans le cas où le maillage proposé par comsol fonctionne, nous prendrons simplement celui proposé. Cependant, lorsque le temps de calcul est trop élevé, ou si la solution ne converge pas, nous utiliserons d'autres maillages.

V.5. conditions aux limites

Condition aux limites à l'entrée :

Les vitesses et la concentration d'alimentation sont données :

Vitesse suivant l'axe X : $U=U_0=0.2$ m/s

Vitesse suivant l'axe Y : $V=V_0=0$ m/s

Concentration à l'entrée : $C = C_0$

Avec :

$C_0= 3\text{mol/m}^3$ et $A=10^{-5}$ m/pa.s

➤ Condition aux limites à la sortie :

A la sortie le régime hydrodynamique est établi donc les dérivées des vitesses le long de l'axe X sont nulles :

$$\frac{dU}{dx} = 0 \qquad \frac{dV}{dx} = 0$$

➤ Condition aux limites au niveau des parois imperméables

On a ici une paroi imperméable (non-glissement) donc les vitesses sont nulles, et la première dérivée de concentration au long de l'axe Y est nulle.

$$U=0 \qquad V=0 \qquad \frac{dc}{dy} = 0$$

➤ Condition aux limites au niveau de la paroi perméable (membrane).

Nous avons ici les conditions de glissement (Leaking Wall) donc la vitesse le long de l'axe Y est variée au cours de la longueur :

$$C = \frac{U + 10^{-6}(6 - 0.516 * C_0)}{0.516 * 10^{-6}} \quad (5.5)$$

V.6. simulation des différents paramètres

V.6.1. Profil de concentration

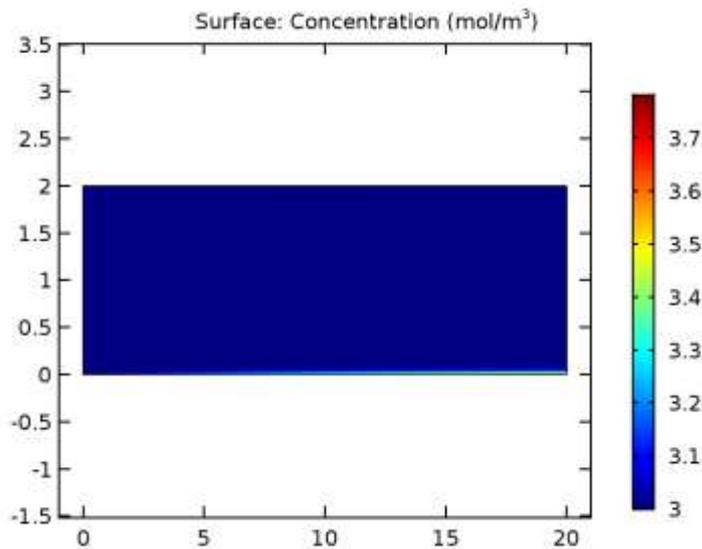


Figure 5.6 : Profile de concentration (à $L_m = 20\text{mm}$, concentration initiale $= 3\text{mol/m}^3$, vitesse initiale $= 0.2\text{ m/s}$).

La **figure 5.6** représente l'évolution de concentration a une longueur de $L_m = 20\text{mm}$ on observe mieux la formation couche de la polarisation au niveau de la paroi perméable .on peut remarquer dans ce résultat qu'il y a une augmentation claire de concentration au niveau de la membrane perméable qui représente bien le phénomène de polarisation de concentration au contraire il y a une diminution de concentration sur les segments imperméables.

La concentration qui entre la membrane d'osmose inverse atteinde à une valeur important de concentration à toute la surface membranaire perméable, donc la couche de la polarisation dans ce long est plus claire.

On remarque aussi que les segments imperméable faits leurs rôles de diminuer la couche de polarisation.

La couche de la polarisation dans cette longueur est remarquable.

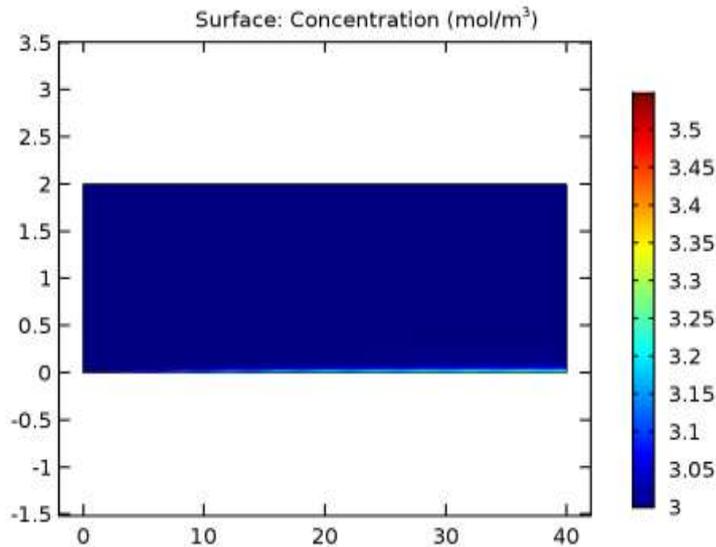


Figure 5.7 : profil de concentration (à $L_m = 40\text{mm}$, concentration initiale $= 3\text{mol/m}^3$, vitesse initiale $= 0.2\text{ m/s}$).

Lors du changement de la longueur de la membrane à 40 mm, Dans cette figure on observe diminution de la concentration de polarisation au niveau de la surface de la membrane perméable tandis que la concentration de polarisation est faible sur les segments imperméables.

Pour cette longueur, on observe mieux l'effet des segments imperméables sur la concentration de polarisation, et grâce à cette dernière la concentration de polarisation est diminue plus que dans la longueur de 20mm. On remarque ici qu'avec l'augmentation de la longueur de la membrane, les nombres des segments imperméables augmentent et la concentration de polarisation diminue encore.

V.6.2. Profil de la vitesse à la longueur de 20 mm et 40mm

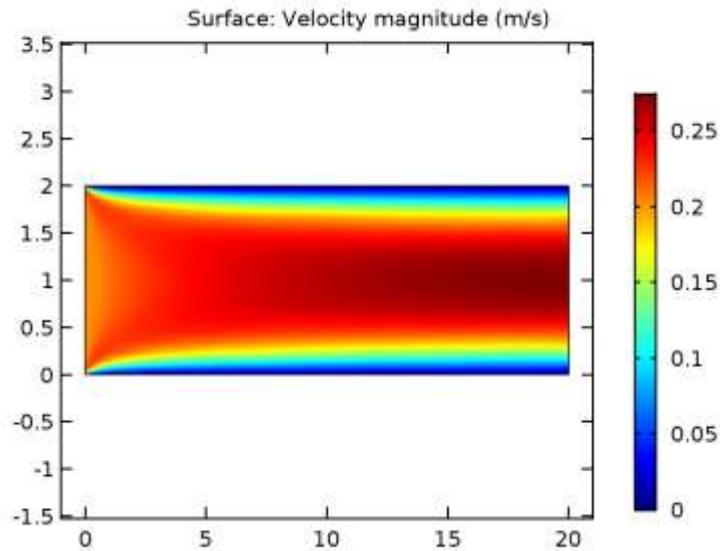


Figure 5.8 : Profil de vitesse suivant X à $L_m=20$ mm.

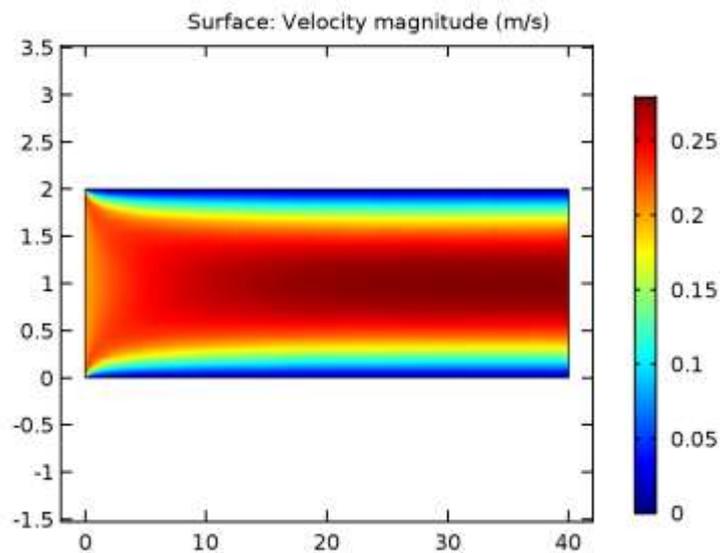


Figure 5.9 : Profil de vitesse suivant X à $L_m=40$ mm.

Les deux figures représentent la distribution de la vitesse d'écoulement suivant l'axe X, on observe bien que la vitesse à l'entrée du canal est constante 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 segments non perméable qui provoque une compression importante de la couche limite hydrodynamique, ce que résulte une diminution du phénomène de polarisation sur les segments non perméable.

Remarque : la vitesse suivant Y est très faible dans les deux longueurs par rapport à la vitesse tangentielle donc y'a pas une grand influence sur les autres paramètres, la distribution des vitesses est même que les vitesses tangentielles.

V.6.3. Profil de pression

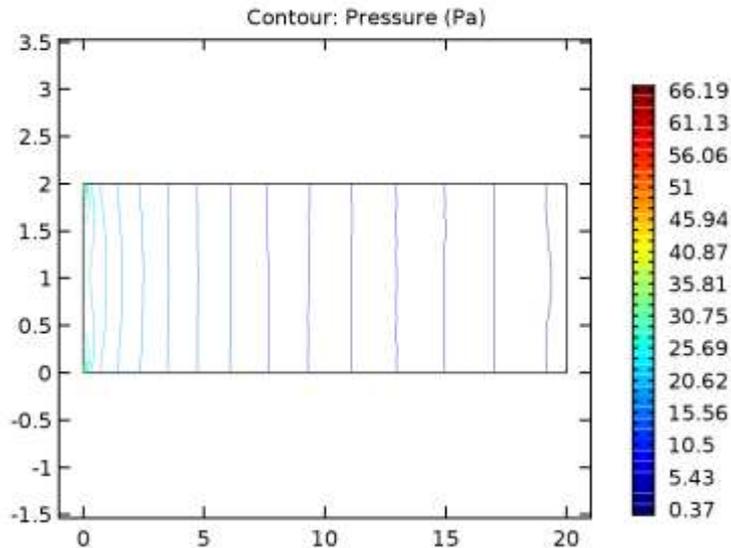


Figure 5.10 : profil de pression à $L_m=20\text{mm}$.

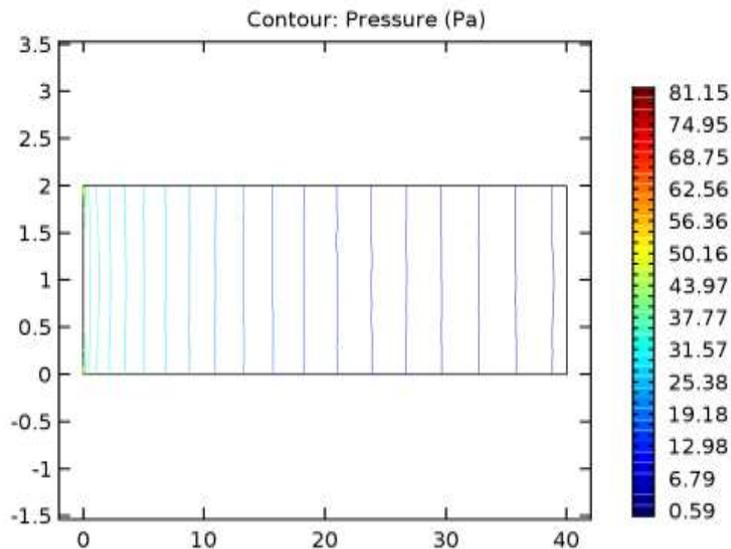


Figure 5.11 : Profil de pression à $L_m=40\text{mm}$.

Les deux figures ci-dessus montrent que la pression augmente avec l'augmentation de la longueur de la membrane et il y a une augmentation significative de la pression à la longueur de 40mm par rapport à la longueur de 20mm, contrairement à la concentration de polarisation décroissante.

Les deux figures montrent que les nombres des segments imperméables ont un mauvais effet sur la perte de charge. Donc une longueur de 40mm est meilleure que la longueur de 20mm, parce qu'on obtient une concentration plus faible, donc la pression augment et il y a donc consommation d'énergie.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'optimisation de la géométrie de la membrane dans le processus de l'osmose inverse en présence des segments imperméables 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 segments imperméables et les paramètres opératoires tel que la pression et la concentration sur la formation de la couche de la polarisation.

Les résultats obtenus simulant la géométrie de la membrane d'osmose inverse avec COMSOL montre que :

La couche de la polarisation diminue avec l'augmentation de nombres des segments de la membrane.

Comme on observe dans notre étude, la pression a un effet important sur la formation de la couche de la polarisation. Si la première est élevée, la deuxième est diminuée.

L'utilisation des segments imperméables permet de réduire le phénomène de polarisation et limite de colmatage de la membrane, mais aussi augmente la perte de charge.

A partir des simulations, nous concluons que pour améliorer les techniques de séparation membranaire il faut augmenter la longueur de la membrane et utiliser les segments imperméables.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] <http://condorchme.com>, L'osmose Inverse, Condorchme Envitech.
- [2] Moustafa Chikhi, ETUDE DE LA COMPLEXATION DES CATIONS METALLIQUE EN VUE DE LEUR SEPARATION PAR UN PROCEDE MEMBRANAIRE , 08.07.2008.
- [3] Jan GUNTHER, Caractérisation et optimisation des phénomènes de transfert dans un double bioréacteur à membranes, 08.12.2009.
- [4] DRIDI ABDELOUAHAB, Commende et supervision par API d'une unité d'osmose inverse , juin 2018.
- [5] www.futura-sciences.com, Eau potable: quelles sont les étapes du traitement de l'eau ? FUTURA PLANET.
- [6] Le comité régionale de l'environnement (CRE), LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE FILIERE CLASSIQUE DE TRAITEMENT D'EAU POTABLE, 2002.
- [7] Harez Amira et al, Etude d'une station de traitement et de production d'eau potable à partir d'un forage "Hopital El Hadjar".
- [8] <https://sites.google.com>, Traitement auant utiliation de l'eau..
- [9] Zohir Bakiri, traitement des eaux useés par des procédés biologiques classiques: expérimentation et modélisation , 03.03.2007.
- [10] <https://condorchem.com>, Déionisation de l'eau.
- [11] Aouadi Ibtihel, Elimination de la matière organique dans les eaux de surface cas de l'eau de barrage de tilestid (gégion de bouira), 13.06.2017.
- [12] Ahlem Romdhane, procédés de séparation mem branaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides: approche expérimentale et modélisation , 20 mai 2015.
- [13] Hamidi Amina, Etude bibliographique sur les techniques de la filtration membranaire, 02.10.2013.
- [14] GUEZLANE Widad et al, ETUDE ET SIMULATION PAR MODELE MATHEMATIQUE D' UNE UNITE D'OSMOSE INVERSE POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER , 2016/2017.
- [15] Manuel_Ultrafiltration , septembre 2015.
- [16] Mehdi Metaiche, technologie membranaire, juin 2014.

Bibliographie

- [17] Chay Lo, Etude comparative des membranes utilisées en production d'eau potable: microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse , Mars 2005.
- [18] Adjed Lydia et al , Etude de colmatage des membrane d'osmose inverse du complexede civital-Bejaia, 02.07.2018.
- [19] Khettaf Sami, Evaluation physico_chimique de l'eau d'un barrage et proposition d'un traitement adapté pour une eau de haut qualité, 11.01.2018.
- [20] hmf.enseiht.fr, Généralités sur les membranes., 2009-2010.
- [21] p. Aptel, Les procédés de séparation par membranes , 20 et 21 novembre 1985.
- [22] AHOULE Dompé et al, Performances comparatives des techeniques de nanofiltration et d'osmose inverse pour le traitement d'eau de consomation contaminée, 14.01.2016.
- [23] Jean-Mark BERLAND et al , Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Décembre 2002.
- [24] Ali Said, Synthèse de membrane ménirale de nanofiltration par formation de films minces de zéolithes sur un support tubulaire en alumine: étude de l'évolution des propriétés de surface et des caractéristiques de filtration en milieu aqueux. , 13.11.2015.
- [25] BOUCHARAB Abderrazek, Etude théorique et expérimentale de dessalement par osmose inverse de l'eau soumatre., 2019.
- [26] TAKABAÏT FATAH, Traitement de l'eau de forage par osmose inverse au niveau de complexe Agroalimentaire Cevital.
- [27] TAÏBI Sarah, LES FACTEURS INFLUENÇANT LE VIEILLISSEMENT DES MEMBRANES D'OSMOSE INVERSE. ETUDE D'UN CAS , 2016.
- [28] Marion Alliet et al, Nanofiltration Osmose Inverse, Janvier 2016.
- [29] FERHI zahra et al, L'influence de concentration de sel sur la qualité de l'eau traitée par les membranes d'osmose inverse., 29 /06 / 2019.
- [30] DAHMANI Fatima Zohra, Etude computationnelle de la déminéralisation des eaux par osmose inverse., 21/06/2017.
- [31] MEHDI AHCENE et al, Automatisation et supervision de l'unité de traitement des eaux par osmose inverse du complexe CEVITAL via le logiciel TIA Portal V13 de SIEMENS , 2015.
- [32] Chatkaew TANSAKUL, Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse, 13/11/2009.

Bibliographie

- [33] SAHBI NAWAL, Étude de dessalement des eaux de mer par l'Osmose inverse de la commune de Bou Haroun - Dimensionnement-, 2012.
- [34] MEHDI METAICHE, OPTIMISATION DES SYSTEMES DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE : CONCEPTION, PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT ET SIMULATION NUMERIQUE , Juin 2006.
- [35] Mokhtar OUKACI, OPTIMISATION DU PRETRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE (COAGULATION-FLOCCULATION) DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE, 2018.
- [36] AIT BOUDA Yasmina et al, traitement des eaux par osmose inverse au niveau du complexe agro-alimentaire cevital, 13/06/2013.
- [37] BENAÏSSA Fatima Zohra, Etude sur le procédé d'osmose inverse pour le dessalement des eaux faiblement saumâtres , 03/10/2013.
- [38] DAHOU NESRINE, Traitement membranaire des rejets industriels, 02-06-2016.
- [39] CHABANE Mustapha, ETUDE DE LA RESISTANCE AU COLMATAGE ET DE LA RETENTION DES COMPOSES TOXIQUES PAR MEMBRANES, 2015.
- [40] DEGAA Ali et al, Etude de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse dans le sud est Algérien_cas de la station d'EI Meghaier-, juin 2019.
- [41] Les modules tubulaires /<https://www.researchgate.net>.
- [42] SOMMAIRE
GENERAL/https://www.mass.gov/envir/STEP/documents/techassessments/Zero_Discharge_Tech_Assessment.pdf.136.X.TONGWEN,Y.
- [43] ABIDI Abdenabi, ETUDE DE MECANISMES DE TRANSFERT DES ORTHOPHOSPHATES A TRAVERS UNE MEMBRANE DE NANOFILTRATION EN MODE BATCH. EFFET DE LA MATRICE EXPERIMENTALE SUR LA SELECTIVITE ET MODELISATION PHENOMENOLOGIQUE, 08 Mai 2014.
- [44] MAZARI Lilia, Traitements physico-chimiques associés aux techniques membranaires d'une eau usée urbaine, 15/07/2019.
- [45] MELLAL Nour el houda, contribution à l'étude d'une station de dessalement par osmose inverse , 15/12/2011.
- [46] Clément Servel, Potentialités de la pervaporation dans les procédés hybrides de séparation, 29 mar 2018.

Bibliographie

- [47] J. Bruchon, Les EDP : introduction physique, analyse mathématique et discrétisation numérique Cours d'introduction de la Toolbox Simulation Numérique Avancée , septembre - octobre 2017.
- [48] Benoit A.Aubert et al, MESURE INTEGREE DU RISQUE DANS LES ORGANISATIONS, <http://books.google.dz>.
- [49] Francois Cuvelier, Méthodes numériques II Notes de cours Sup Galilée, Ingénieurs Energétique 1ère année , 24 mai 2016.
- [50] EN-NEFKHAOUI HAKIM, SIMULATION NUMERIQUE D'UN ECOULEMENT VISQUEUX INCOMPRESSIBLE DANS UNE GEOMETRIE COMPLEXE PAR LA METHODE DES MATRICES D'INTERPOLATION , 7 mars 1994.
- [51] MAHFOUDI Abderrahmen, CONTRIBUTION A L'ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE DANS UNE CONDUITE GRAVITAIRE EN CHARGE , mars 2015.
- [52] Salima BOUCHEMELLA, Contribution à la Simulation Numérique des Ecoulements Des Eaux Dans les Milieux Poreux Non Saturés, 12 Novembre 2015.
- [53] BR MOHAMED, Méthode des éléments finis, <dspace.univ-djelfa.dz>.
- [54] Abdelghani SEGHIR, Cours Methode des Eléments Finis, 2005-2014.
- [55] NISRINE MHAGUEN, DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DYNAMIQUES DE PRÉDICTION DE LA TENSION CRITIQUE DE CONTOURNERENT DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE BASÉS SUR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS, JANVIER 2011.
- [56] KACEL Sofiane, CORRELATION ENTRE ELEMENTS FINIS ET L'ANALYSE ISOGEOMETRIQUE , 2012.
- [57] TAMER Brahim et al, Modélisation de la polarisation de concentration dans une cellule d'ultrafiltration en batch , Juin 2017-2018.
- [58] Méthodes des volumes finis ,<thesis.univ-biskra.dz>.
- [59] Eric Goncalvés, RESOLUTION NUMERIQUE,DISCRETISATION DES EDP ET EDO, septembre 2015.
- [60] AMROUNI Taous et al, MODELISATION DE L'ECOULEMENTS ET DE L'EROSION INTERENE DANS LES BARRAGES EN TERRE (CAS DU BARRAGE SOUK TLETA), 29 /06 /2017.
- [61] D. F. SANTOS, Numerical Investigation of a Refractive Index SPR D-Type Optical

Bibliographie

- Fiber Sensor Using COMSOL Multiphysics, 2013.
- [62] Kazumasa Ito et al, COMSOL Multiphysics: A Novel Approach to Ground Water Modeling.
- [63] Nisrine Mhaguen, DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DYNAMIQUES DE PRÉDICTION DE LA TENSION CRITIQUE DE CONTOURNER DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE BASÉS SUR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS. , JANVIER 2011.
- [64] Stephan Savarese, Modélisation OD/1D avec COMSOL Multiphysics 3.4., 17/04/2008.
- [65] MARIEM BEN HAMOUDA, ÉTUDE, CONCEPTION ET MODÉLISATION DE LA DIFFUSION DE LA CHALEUR DANS LES TISSUS BIOLOGIQUES., mars 2015.
- [66] Celse Kafui Amédin et al, Performance d'outils de modélisation pour la résolution de deux problématiques de bruit et de vibrations de type impulsionnel.
- [67] vincent manet, vincent manet méthode des éléments finis.
- [68] julien DARDENNE et al, Génération de maillages triangulaires adaptatifs 2D avec des diagrammes de voronoi centroïdaux.

Annexe

L'interface utilisateur de COMSOL Multiphysique 4.3

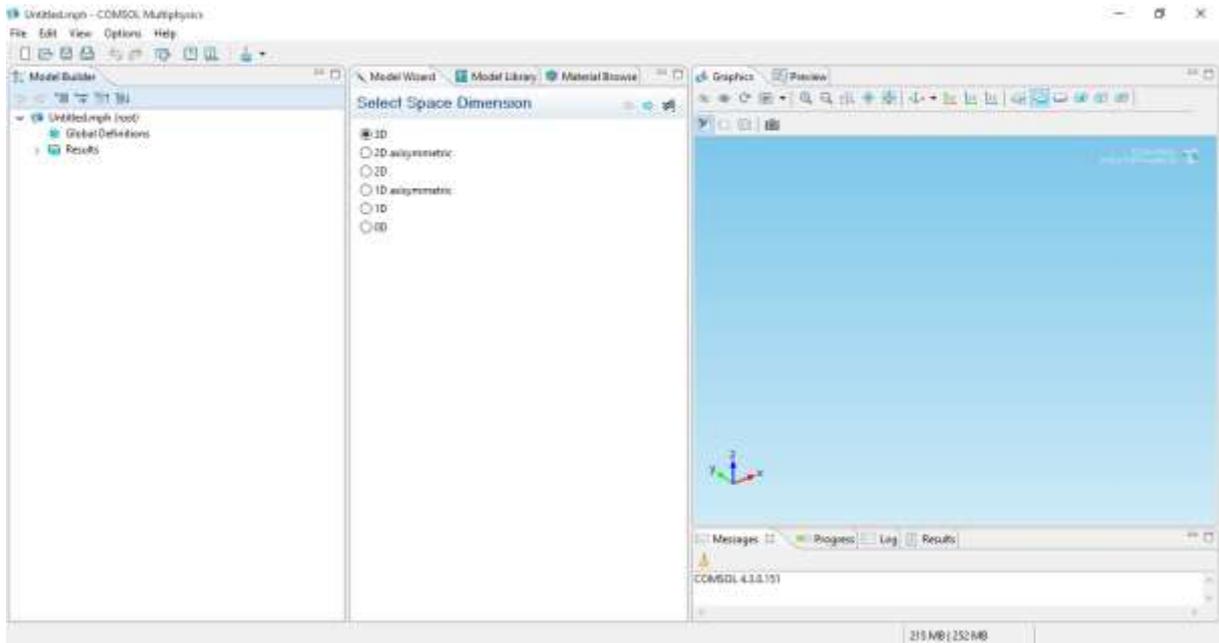


Figure 1 : Interface de COMSOL Multiphysique 4.3.

Les étapes de simulation

- Choix de la dimension
2D (bidimensionnel)

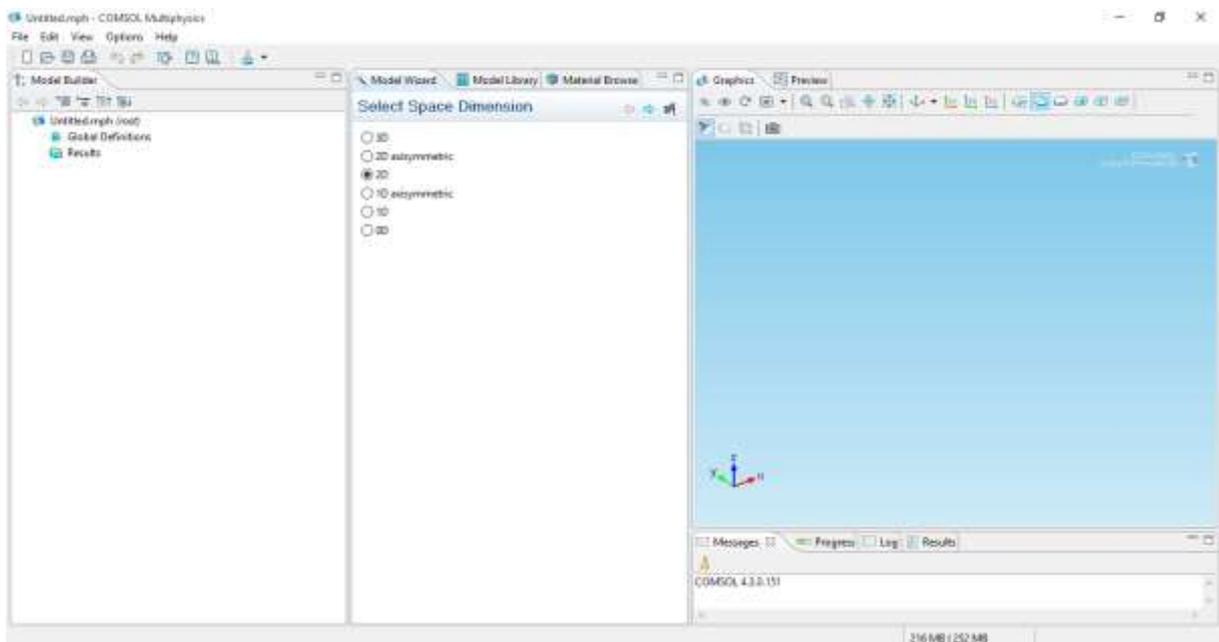


Figure 2 : choisir la dimension d'espace.

Les physiques utilisées

- Transfert de matière (transport of diluted space)
- Ecoulement laminaire (laminar flow)

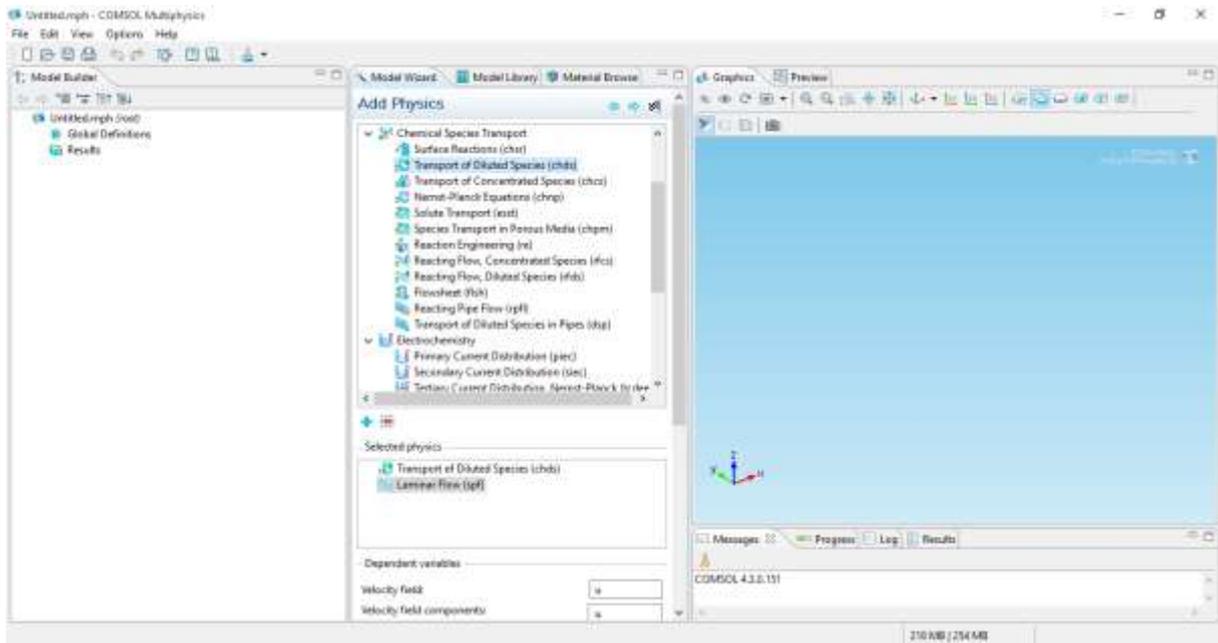


Figure 3 : choisir les physiques utilisées.

Choix le régime d'étude

- Régime stationnaire (stationary)

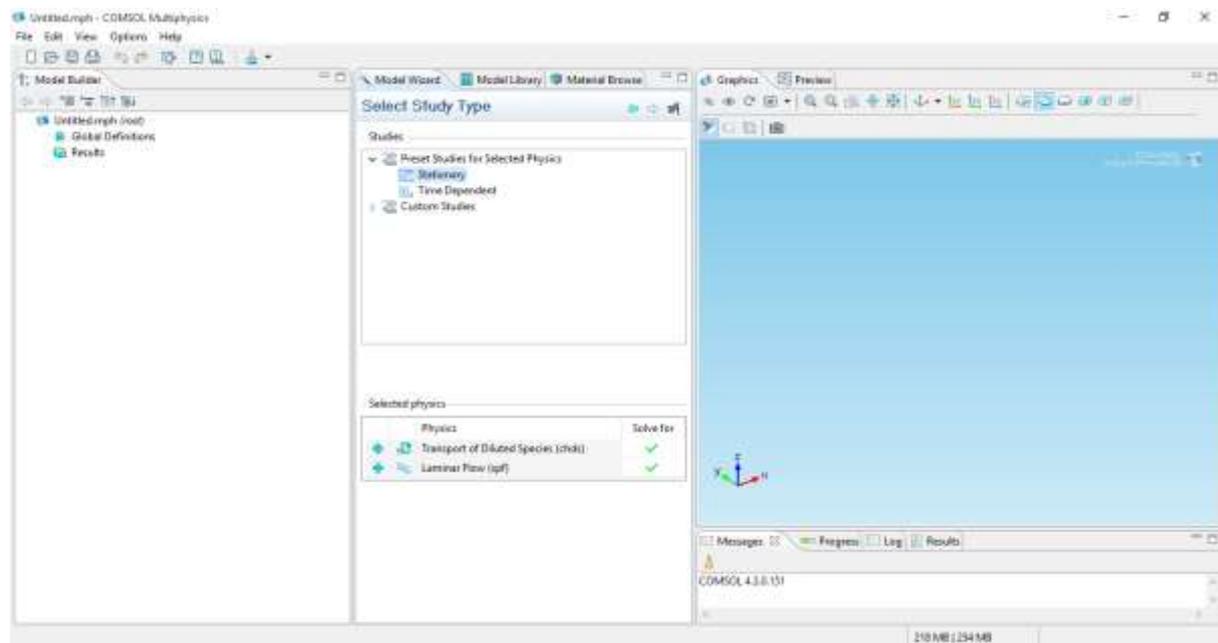


Figure 4 : sélectionner le régime d'étude.

Annexe

- Pour la longueur de **20mm**

La géométrie

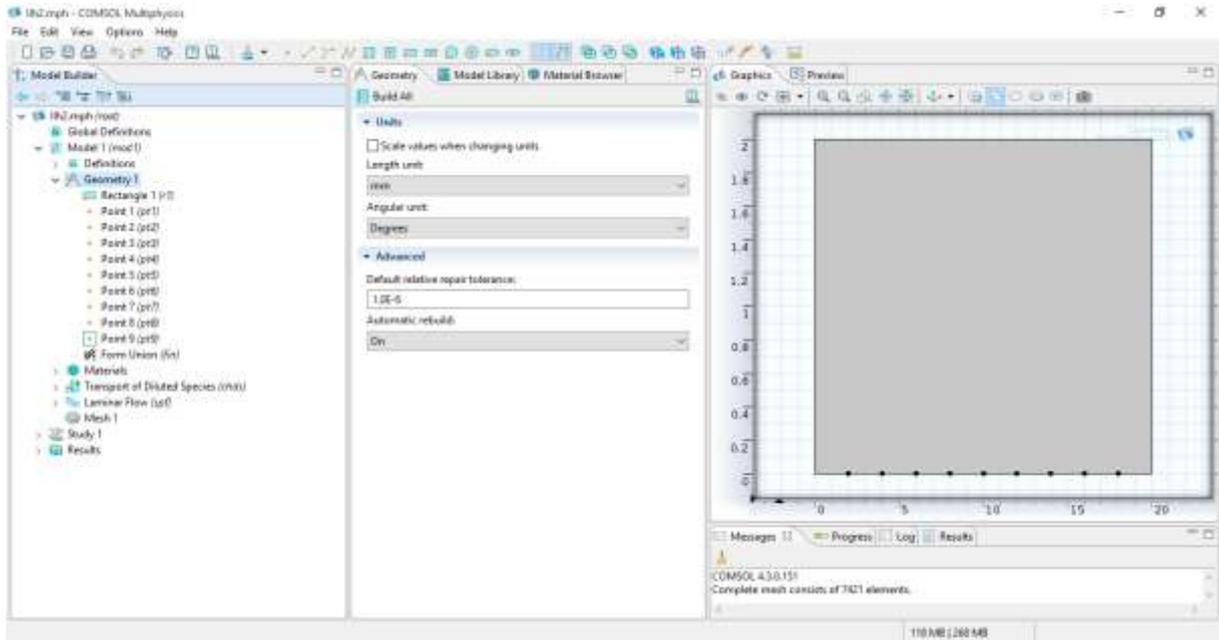


Figure 5 : construction de la géométrie.

Choix de matière

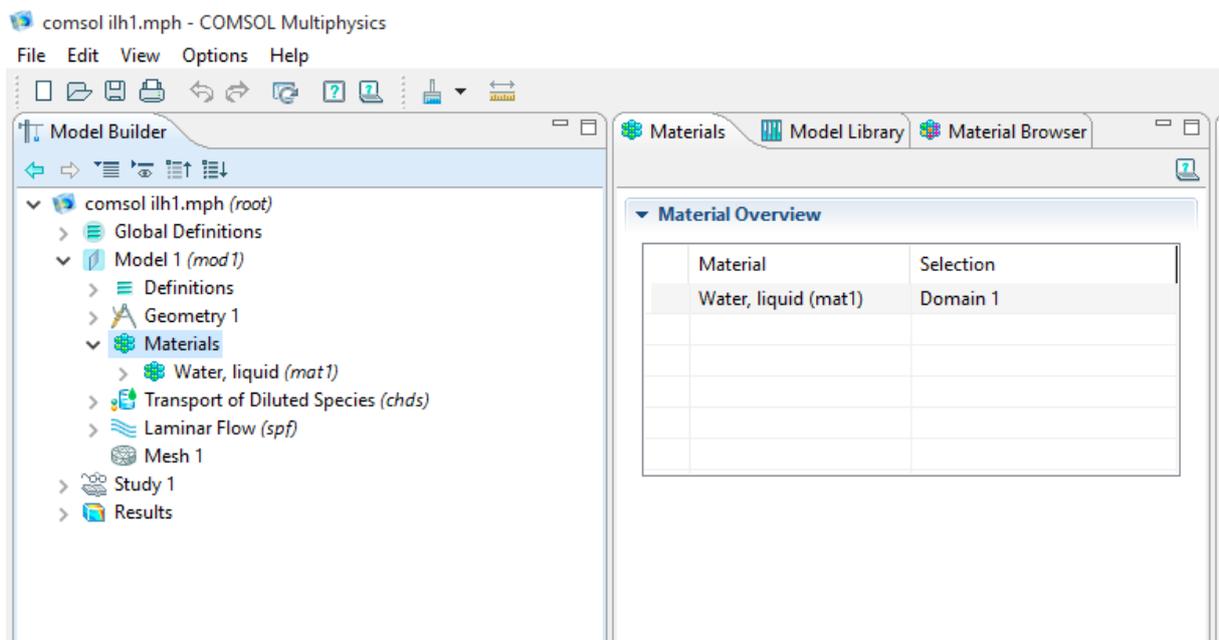


Figure 6 : choisir l'eau (water, liquide).

Paramétrage de modèle physique

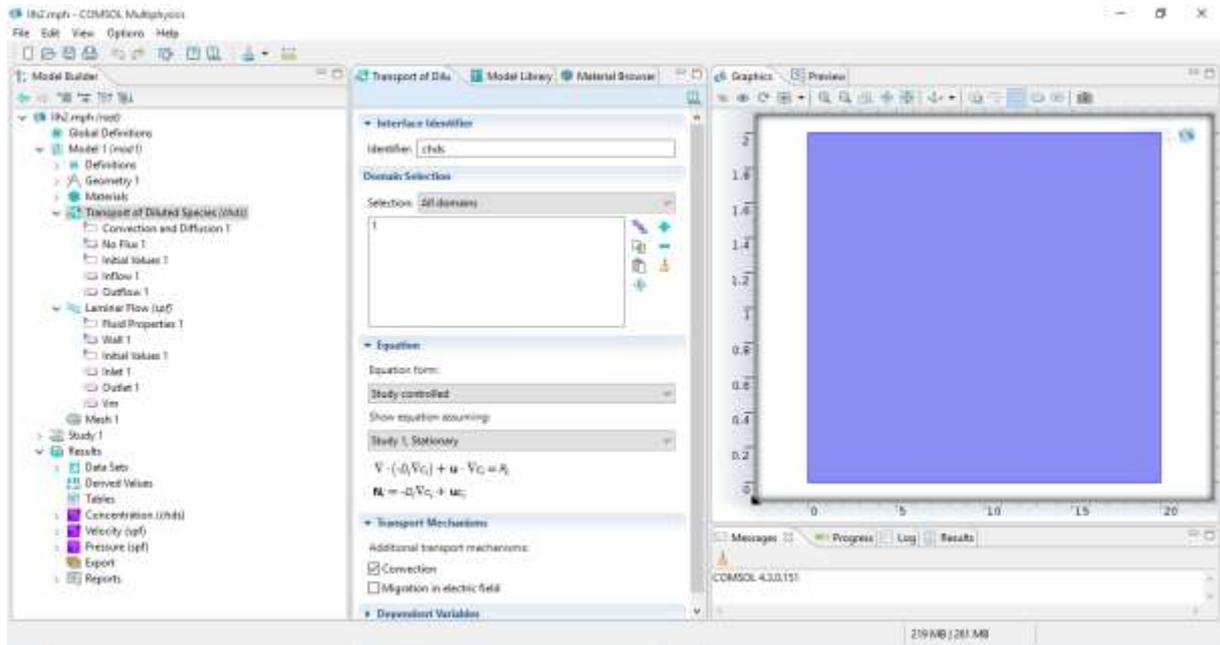


Figure 7 : paramètre de transfert de matière (transport of diluted space).

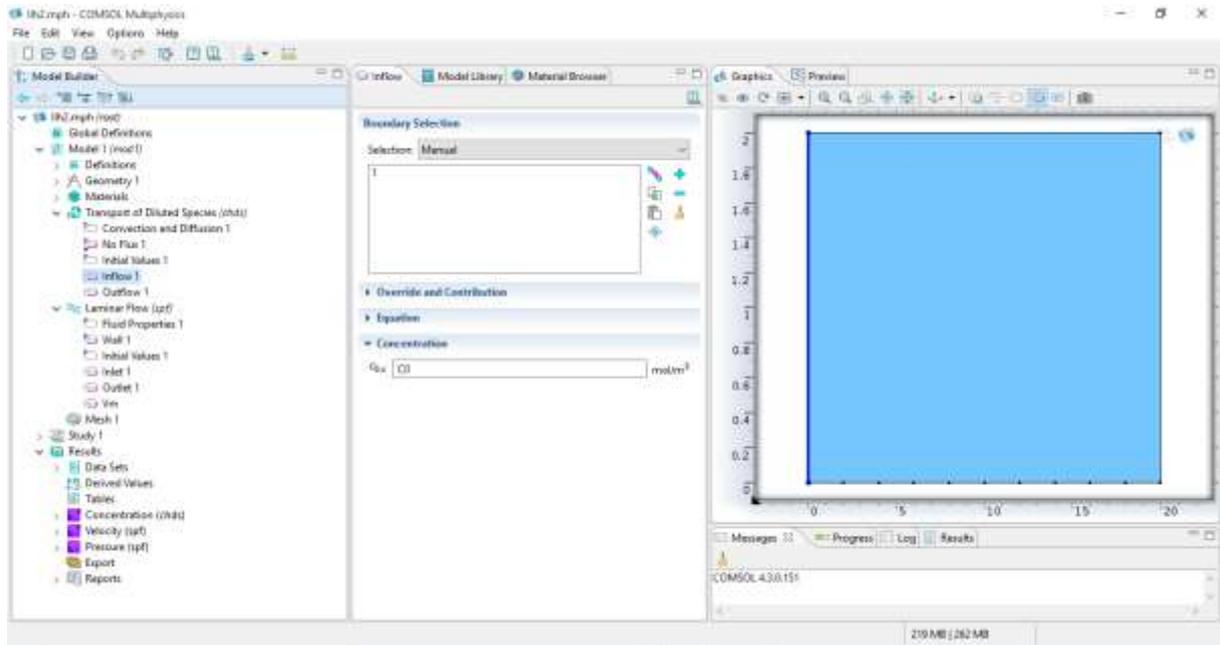


Figure 8 : Ajout des conditions frontière (transfert de masse).

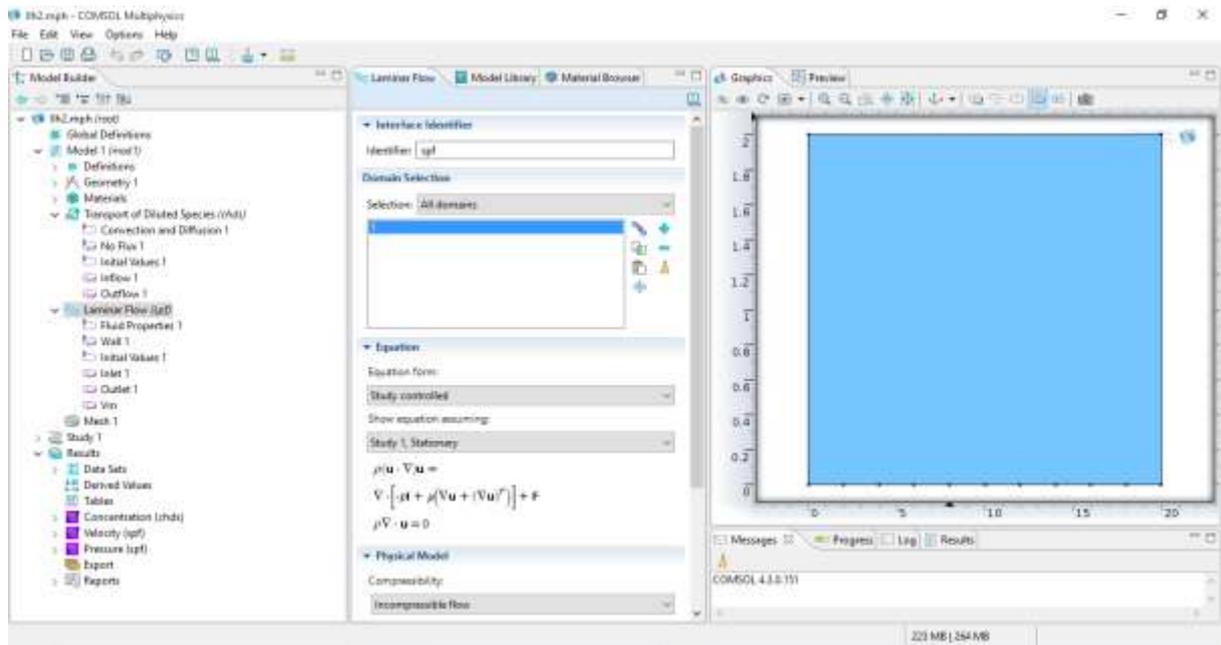


Figure 9 : paramètre de l'écoulement laminaire.

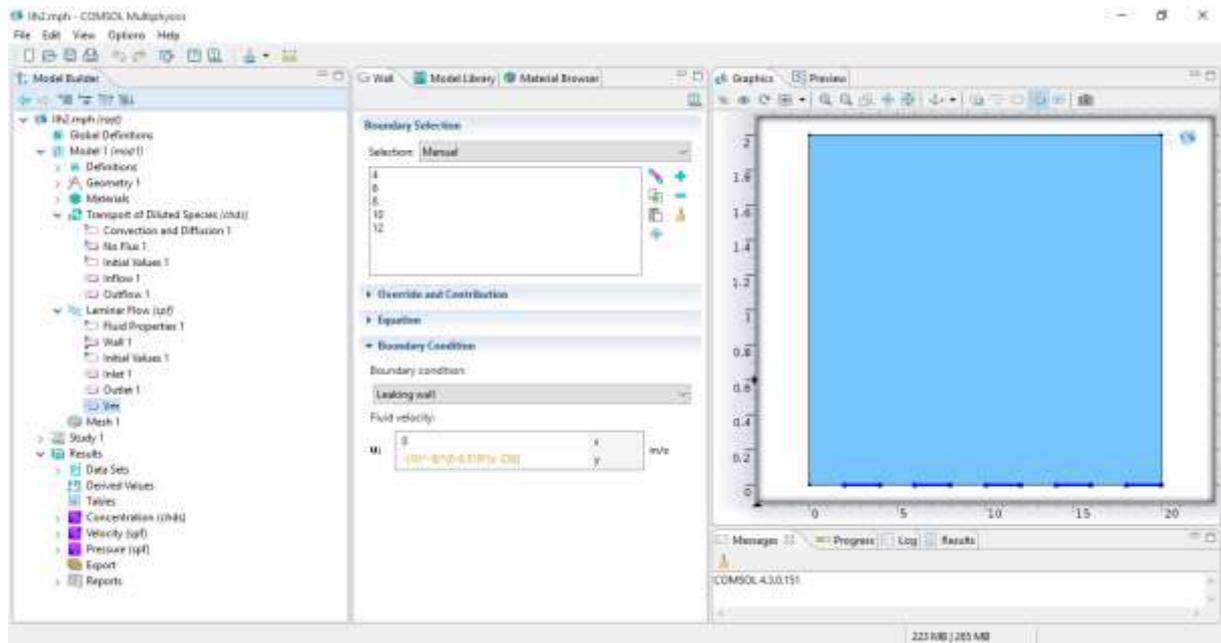


Figure 10 : Ajout des conditions aux limites (écoulement laminaire).

Définir les variables

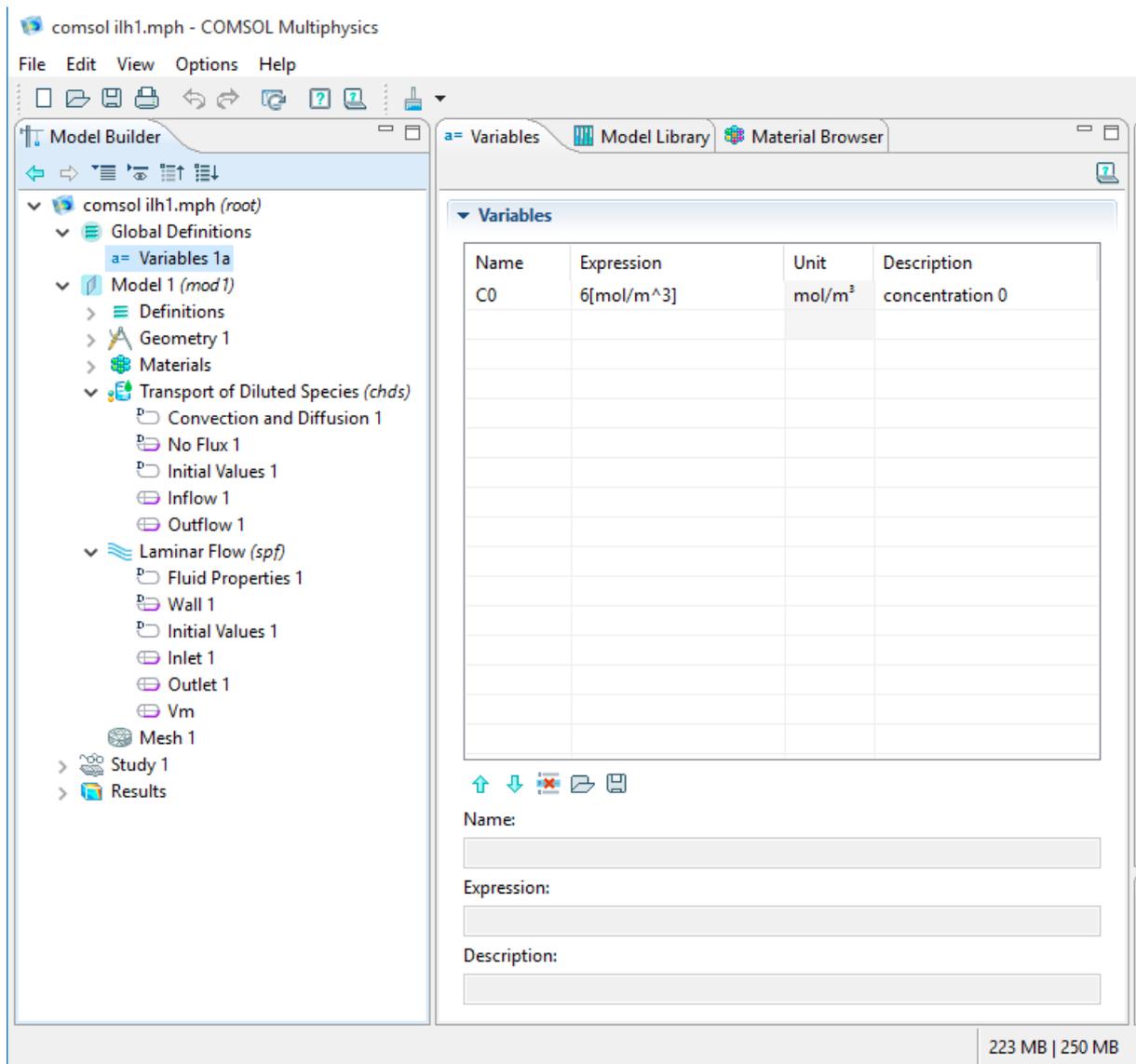


Figure 11 : définir le variable C0.

Choix de maillage

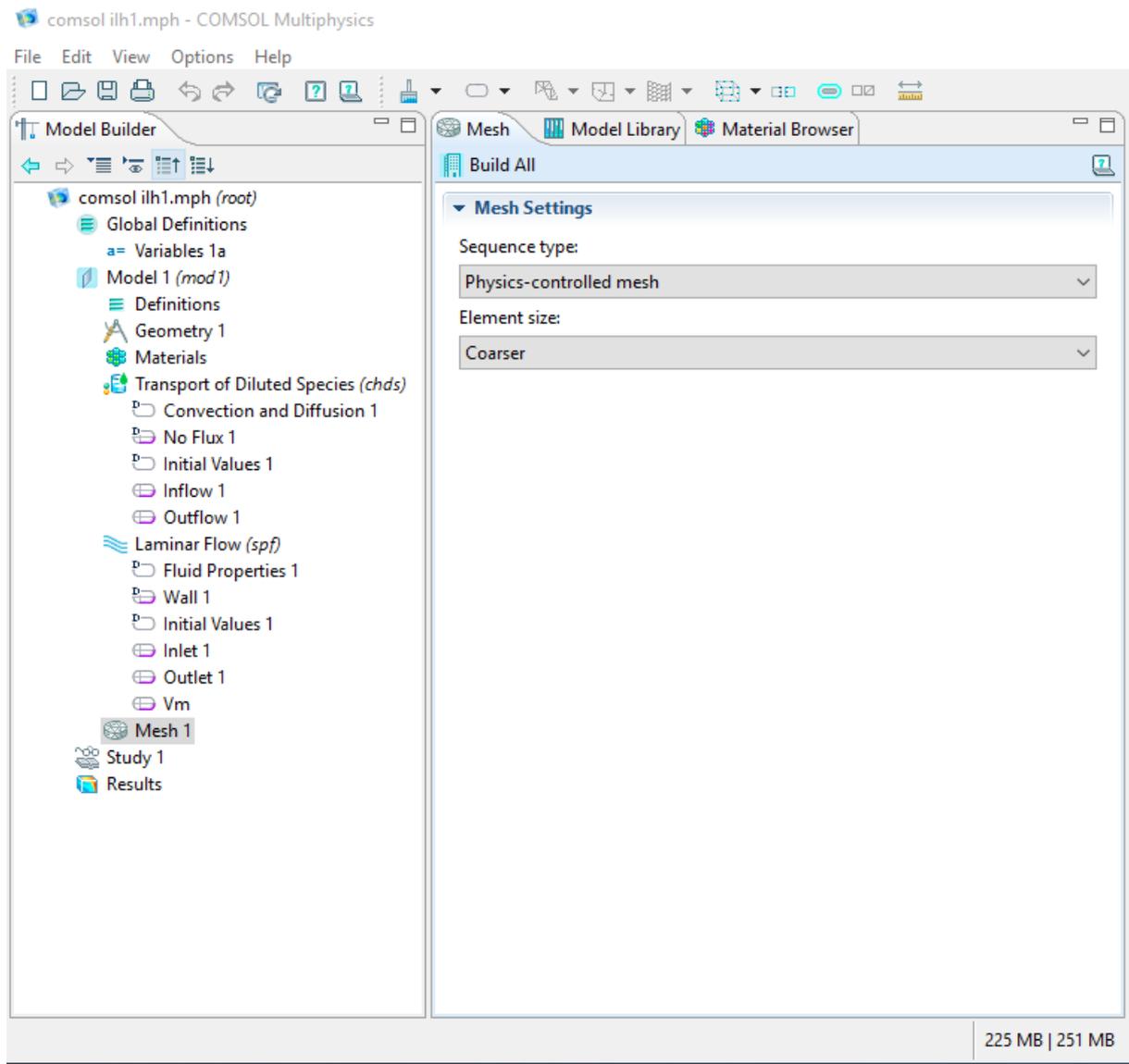


Figure 12 : choix type de maillage.

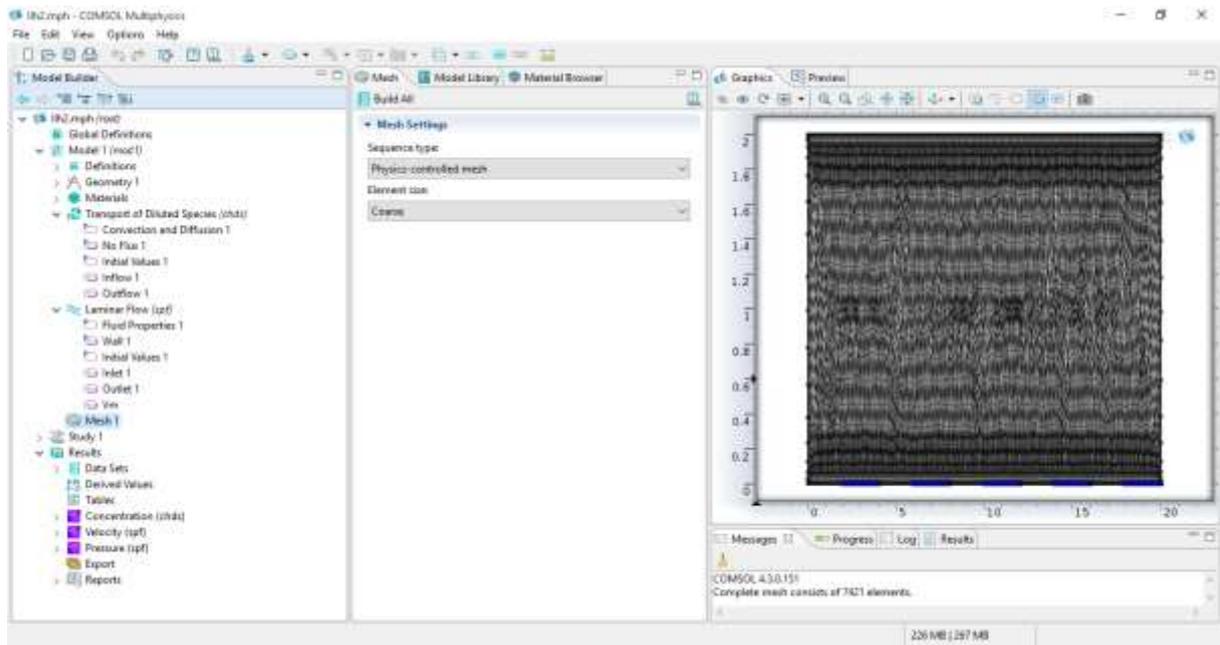


Figure 13 : le maillage après « Build All ».

Simulation et traitement des résultats

Après de définir tous les paramètres de notre modèle, cliquez sur study dans le modèle builder puis sur **compute**  **Compute** pour effectuer la simulation

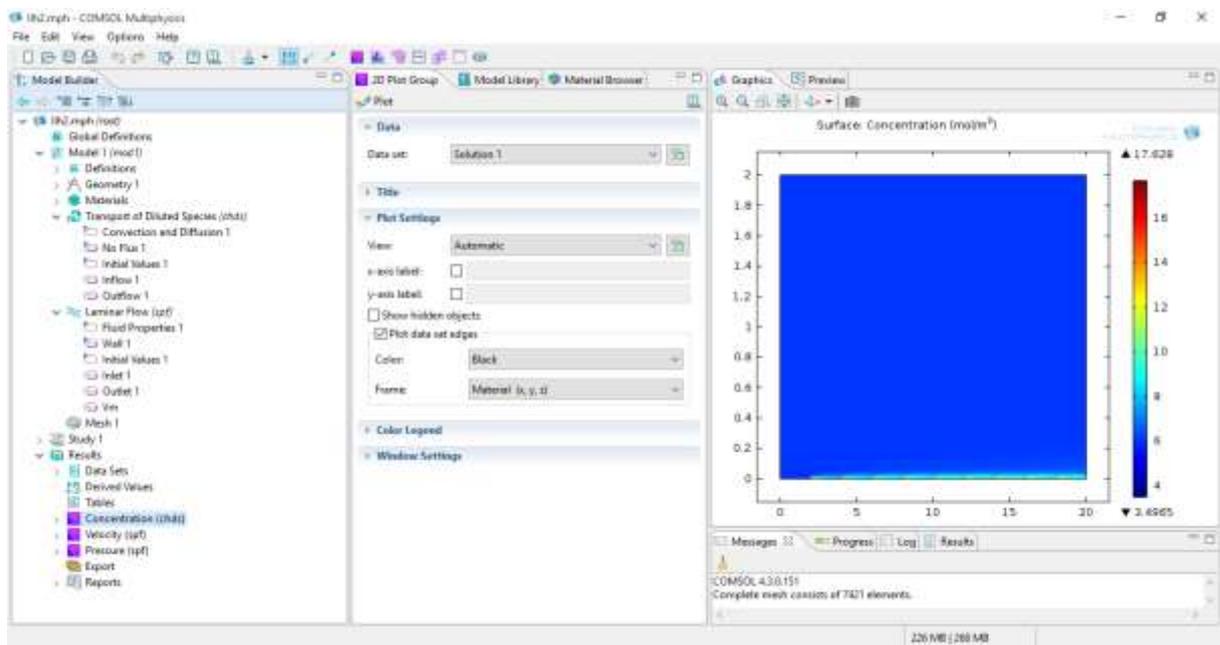


Figure 14 : concentration et direction du gradient de concentration dans la longueur de 20mm.

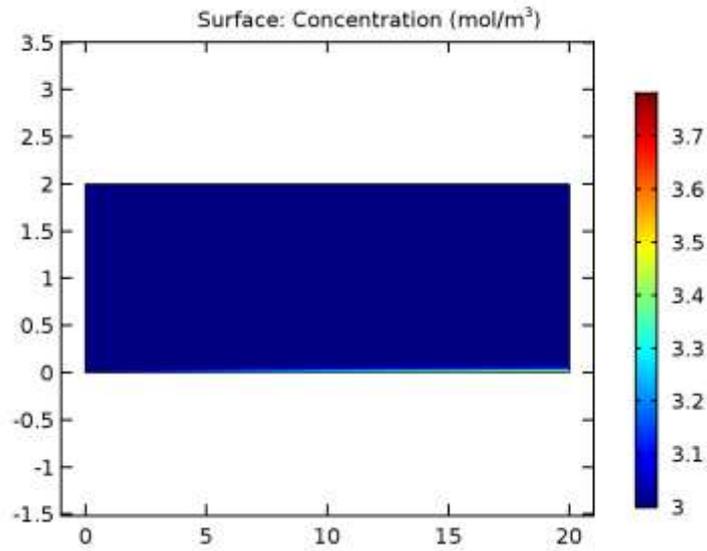


Figure 15 : concentration et direction du gradient de concentration.

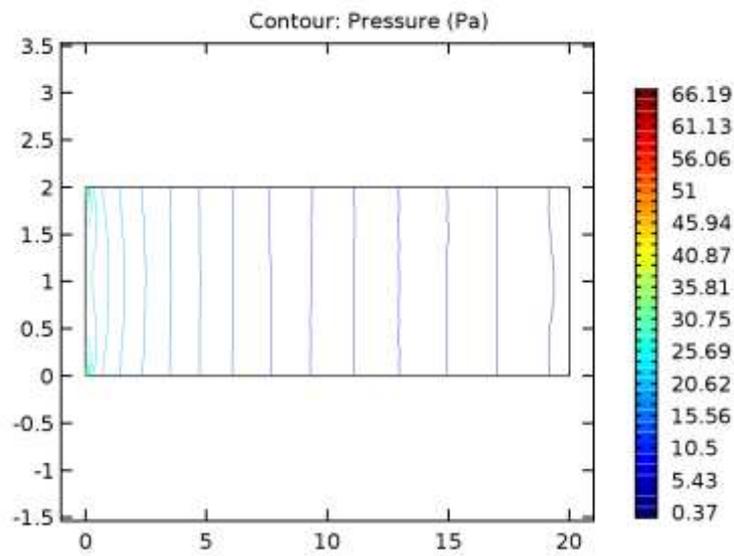


Figure 16 : pression et direction de gradient de pression.

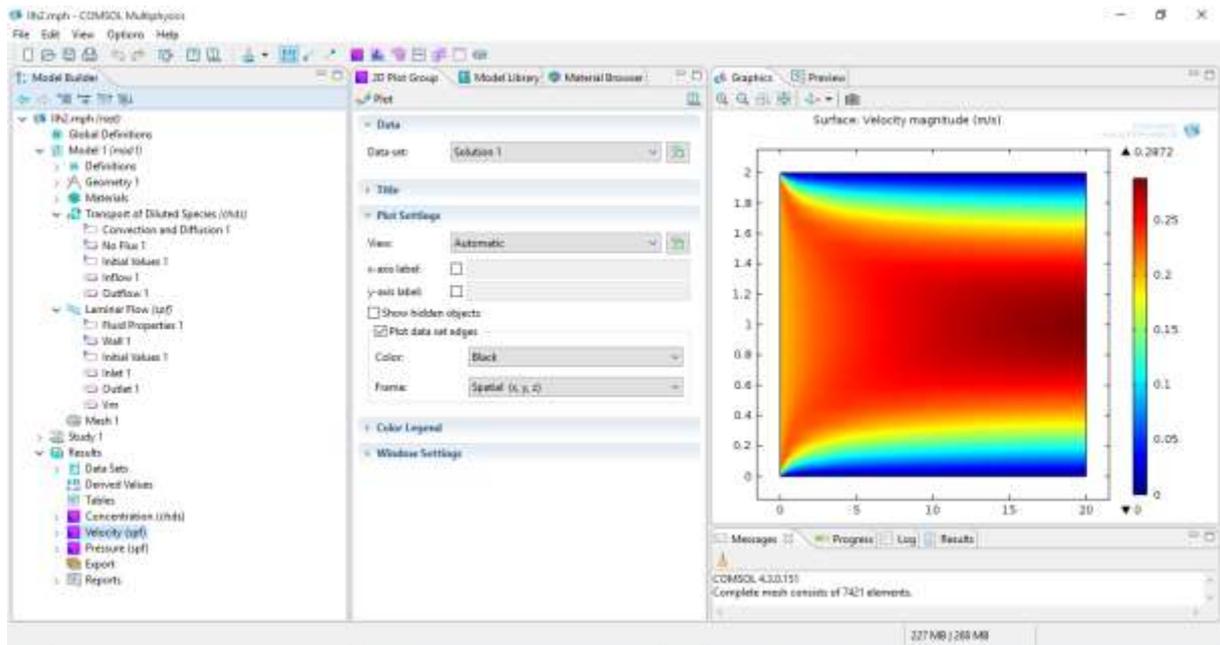


Figure 17 : vitesse magnitude et direction du gradient de vitesse.

- Puis en change la longueur à **40 mm** mais avec les mêmes conditions précédents

La géométrie

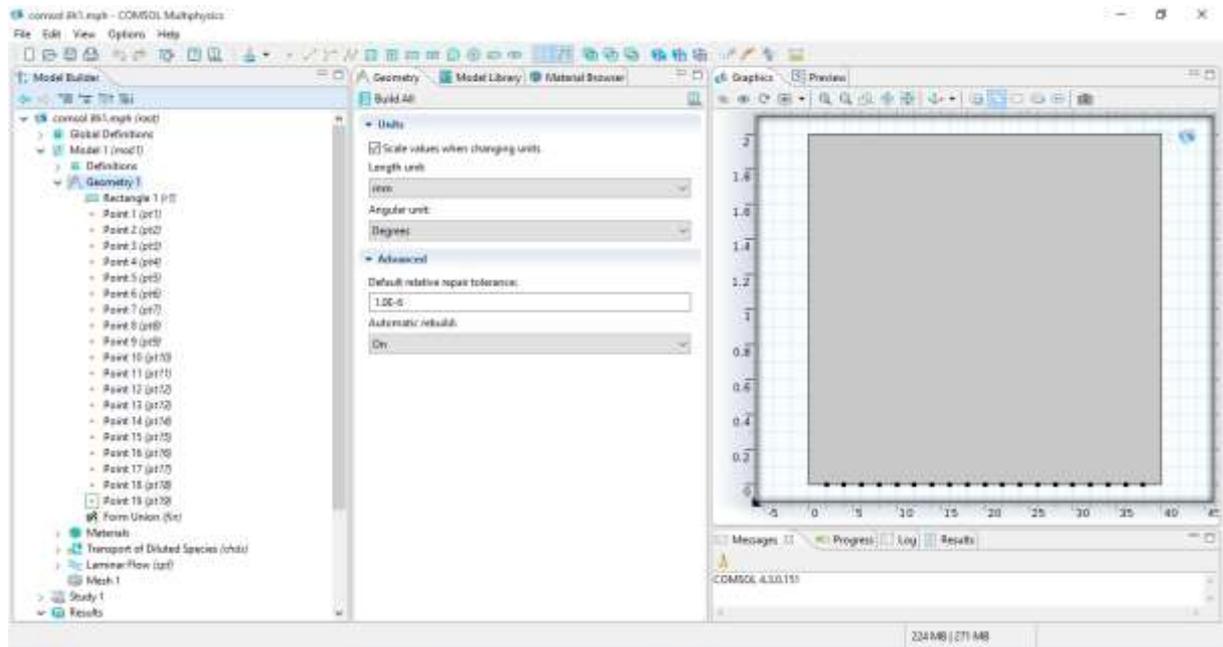


Figure 18 : construction de la géométrie.

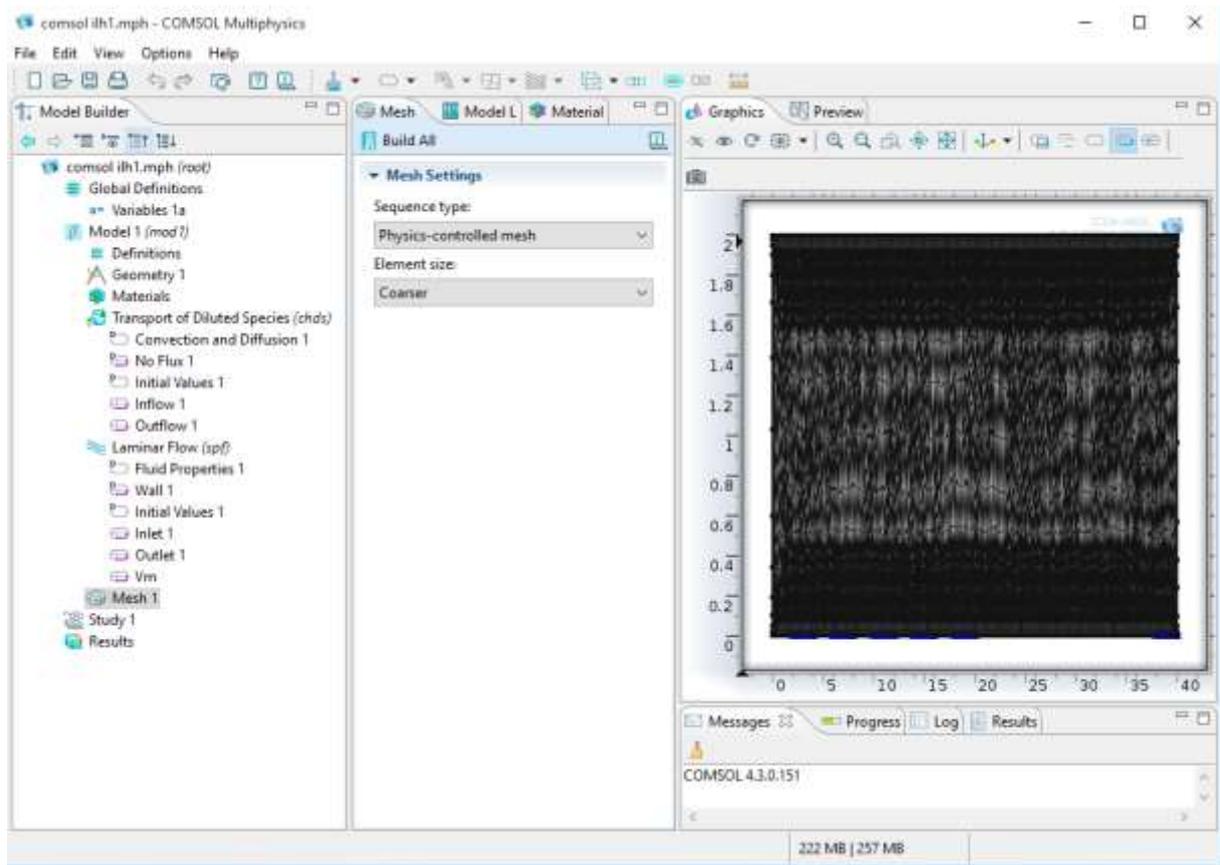


Figure 19 : le maillage après « Build All ».

Simulation et traitement des résultats

Après de définir tous les paramètres de notre modèle, cliquez sur study dans le modèle builder puis sur **compute**  pour effectuer la simulation

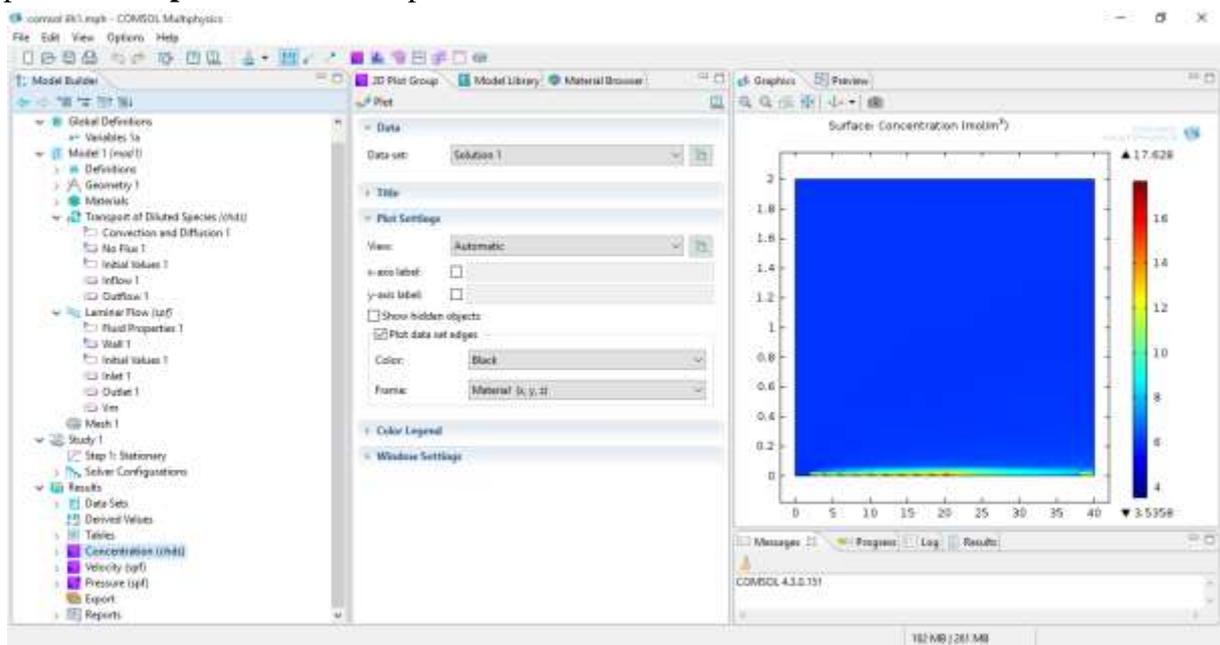


Figure 20: concentration et direction du gradient de concentration dans la longueur de 40mm.

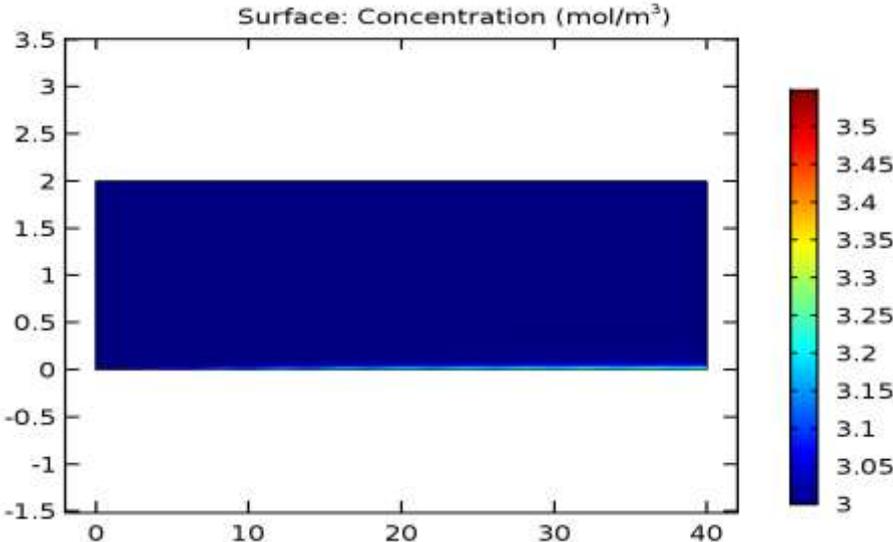


Figure 21 : concentration et direction du gradient de concentration.

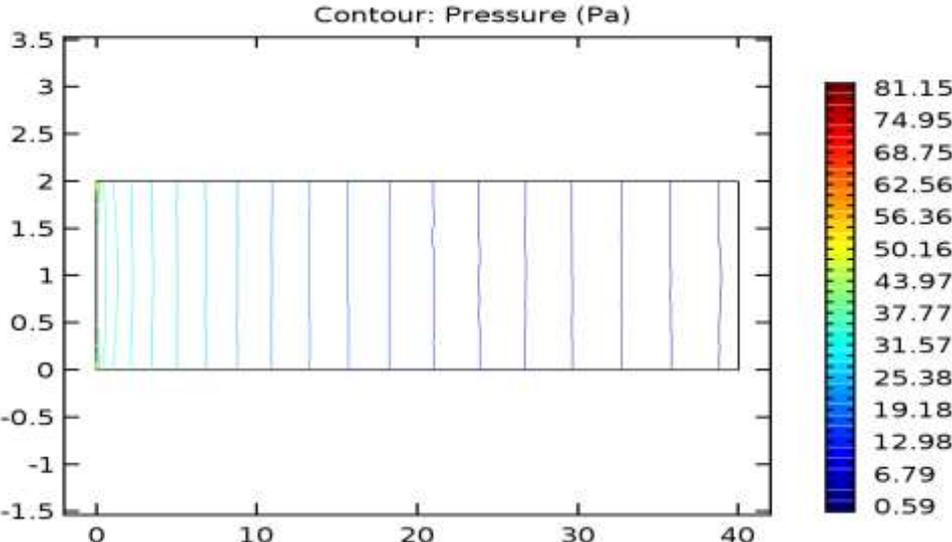


Figure 22 : pression et direction de gradient de pression.

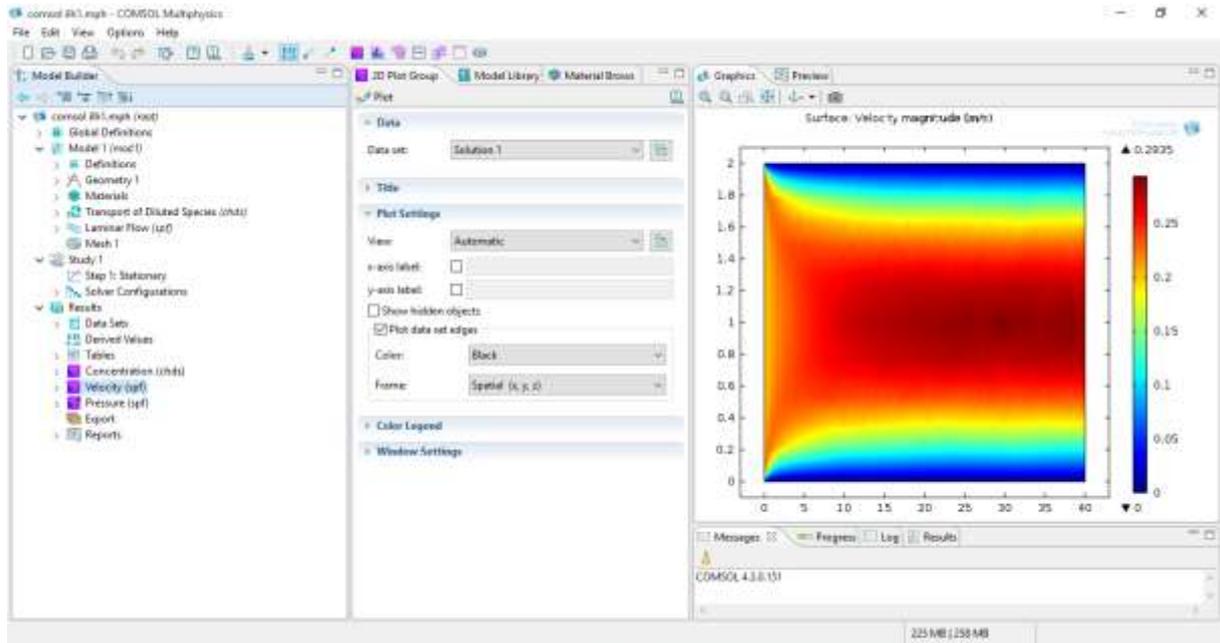


Figure 23 : vitesse magnitude et direction du gradient de vitesse.

الملخص

الهدف من هذا المشروع هو دراسة هندسة الغشاء في عملية التناضح العكسي. تعتبر التصفية عن طريق الغشاء عملية فصل فعالة، آمنة و سهلة القيادة لكن ليست بسيطة، سبب هذه الصعوبات هو انسداد أغشية التناضح العكسي الذي يعتبر صعب التجنب و الحد و معقد الوصف ، كما يمكن أن يؤثر على أداء النظام و يتسبب في شيخوخة الأغشية، في الصناعات الحساسة التي تستخدم المياه ، لا يزال الوصول إلى أعلى درجة نقاء للمياه يمثل مشكلة رئيسية ، ويتم استخدام التناضح العكسي كعملية فعالة للغاية. أكبر عقبة أمام هذه العملية هي ظاهرة الاستقطاب مما يؤدي إلى انسداد مسام الغشاء وبالتالي يقلل من كفاءة التناضح العكسي. في هذا العمل قمنا بدراسة تطور طبقة الاستقطاب بطولين مختلفين باستخدام برنامج المحاكاة الفيزيائية كومصول والذي يساعدها في تحديد تأثير بعض العوامل مثل التركيز والضغط و تأثير القطع غير المنفذة. أوضحت الدراسة أن طبقة الاستقطاب تزداد مع الطول وبسرعة كبيرة وأن زيادة التركيز ساهمت أيضا في زيادة هذه الظاهرة على عكس مستوى القطع غير المنفذة حيث نلاحظ انخفاضا كبيرا في الأخير

الكلمات المفتاحية:

التناضح العكسي، غشاء، استقطاب، كومصول

Résumé :

Le but de ce projet est d'étudier la géométrie de la membrane dans le processus de l'osmose inverse.

La filtration membranaire est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point. La cause de ses difficultés est le colmatage qui reste difficile à éviter ou limiter et complexe à décrire. Ils peuvent affecter les performances du système et provoquer le vieillissement de la Membrane d'osmose inverse.

Dans les industries sensibles qui utilise l'eau, l'accès à la plus grande pureté d'eau reste un problème majeur, l'osmose inverse est utilisée comme un procédé très efficace. Le plus grand obstacle à ce processus est le phénomène de polarisation, qui conduit à un blocage des pores de la membrane et réduit ainsi le rendement de l'osmose inverse. Dans ce travail, nous avons étudié l'évolution de la couche de polarisation en deux longueurs différentes en utilisant le programme de simulation physique COMSOL, qui à son tour nous aide à déterminer l'effet de certains facteurs tels que la concentration, la pression et l'effet des Segments non perméable.

L'étude a montré que la couche de polarisation augmente avec la longueur et très rapidement et que l'augmentation de la concentration a également contribué à l'augmentation de ce phénomène, contrairement au niveau des Segments non perméable où nous remarquons une Diminution considérable de cette dernière

Les mots clés :

Osme inverse, membrane, polarisation, COMSOL