



PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme de **Master** en **Génie Mécanique**

Spécialité : **Énergétique**

Thème :

*Etude numérique d'un écoulement rotatif à l'intérieur
d'une cellule de filtration membranaire*

Présenté par :

HAMOUDA Salah eddine

Devant le jury composé :

M^r. MESSI T

Président

Université Bouira

M^r. MOUSSAOUI M

Encadrant

Université Bouira

M^r. MAHFOUD M

Examineur

Université Bouira



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) حمودة صالح الدين الصفة: طالب، اسكاذ، باحث
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 10008121800580009 والصادرة بتاريخ 02/11/2023
المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم التطبيقية قسم الهندسة الميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude numérique d'un écoulement rotatif à l'intérieur d'une cellule de filtration membranaire
تحت إشراف الأستاذ(ة): حوساوي محمد
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/04/27

 توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% 23

النسبة:



الامضاء:

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu pour m'avoir donné la force, la persévérance et la santé nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Monsieur **Mohammed Moussaoui**, pour ses conseils avisés, sa patience et son soutien tout au long de ce mémoire. Je remercie chaleureusement les membres de mon jury pour leurs remarques constructives et leur disponibilité.*

Je souhaite aussi remercier l'ensemble de mes professeurs du département de Génie Mécanique pour leur encadrement et leur accompagnement tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, je remercie ma famille, mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin dans cette aventure académique.

Dédécace

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. Vous êtes ma plus grande source de force et d'inspiration.

À toute ma famille, en particulier les familles Hamouda et Chreif, pour leur affection, leur soutien et leurs prières qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours.

À mes amis, pour leur présence, leur écoute et leur soutien dans les moments de doute et de difficulté. Merci pour votre amitié précieuse.

Salah Eddine

Sommaire

I.1. Introduction	1
I.2. Travaux antérieurs	1
I.3. Généralités sur les membranes	8
I.3.1. Type de membranes	10
I.3.1.1. Membranes organiques	10
I.3.1.2. Membranes minérales	11
I.3.2. Caractéristique des membranes	11
I.3.2.1. Sélectivité	11
I.3.2.2. Perméabilité	13
I.3.2.3. Résistance d'une membrane	13
I.4. Filtration membranaire	14
I.4.1. Filtration frontale	15
I.4.2. Filtration tangentielle	16
I.5. Classification des membranes	16
I.5.1. Microfiltration	16
I.5.2. Ultrafiltration	17
I.5.3. Nano-filtration	17
I.5.4. Osmose inverse	18
I.6. Modélisation de la filtration membranaire	20
I.6.1. Modèle de polarisation de gel	20
I.6.2. Modèle de résistance	22
I.6.3. Modèle de croissance de gel	23
I.6.4. Modèle d'adsorption	24
I.7. Colmatage	25
I.7.1. Modélisation de colmatage	26
I.7.2. Les types de colmatages	27
I.7.2.1. Polarisation de concentration	27
I.7.2.2. Adsorption	28
I.7.2.3. Modèle de filtration sur gâteau	28
I.7.2.4. Blocage de pores	30
I.7.2.5. Colmatage réversible et irréversible	32
I.8. Techniques de contrôle du colmatage	33
I.8.1. Prétraitement	33

I.8.2. Nettoyage des membranes	33
I.8.2.1. Décolmatage physique	34
I.8.2.2. Nettoyage chimique.....	34
I.8.3. Contrôle du flux	34
I.8.4. Rétrolavage	34
I.9. Conclusion	35
II .1. Introduction	36
II .2. Avantages de l'utilisation des CFD	36
II .3. Qu'est-ce qu'un fluide?.....	37
II .4. Nature de l'écoulement	38
II .4.1. Écoulement laminaire	39
II .4.2. Écoulement turbulent	39
II .5. Les équations physiques utilisées dans la modélisation numérique	39
II .5.1. L'équation de conservation de la masse.....	39
II .5.2. L'équation de conservation de la quantité de mouvement.....	40
II .5.2.1. Équations de Navier-Stokes	42
II .5.3. L'équation de conservation de l'énergie	43
II .6. Méthode des volumes finis	44
II .7. Présentation de ANSYS	46
II .8. Généralité sur l'ANSYS (workbenchFluent).....	47
II.9. Présentation du code de calcul	49
II.9.1. Pré - processeur "GAMBIT"	50
II.9.2. Solveur "FLUENT"	51
II.9.3. Post-processeur "FLUENT"	51
II.10. Modélisation d'un écoulement avec ANSYS Fluent	51
II .11. Modèles d'écoulement	53
II .11.1. Modèle k- ϵ	53
II.11.2. Modèle k- ω	54
II.11.3. Modèle standard de turbulence k- ω SST	54
II.11.4. Modèle Spalart-Allmaras.....	54
II .12. Géométrie	55
II .13. Maillage.....	55
II .13.1. Composants du maillage	56
II .13.2. Types des maillages.....	56
II .13.2.1. Maillage structuré (quadra/hexa)	56

II .13.2.2. Maillage non structuré (tri/tétra)	57
II .13.2.3. Maillage hybride	58
II .14. Cellule de filtration	59
II .15. Conclusion	60
III.1. Géométrie	61
III.2. Maillage	62
III.3. Conditions limites	62
III.4. Résultats et discussions	63
III.4.1. Distribution de la pression	63
III.5. Conclusion	66

Liste de figures

Figure I.1. Comparaison entre les flux prédits et mesurés

Figure I.2. Schéma de principe de la filtration frontale

Figure I.3. Configuration d'un réacteur à cuve agitée équipé d'une turbine Rushton à 6 pales

Figure I.4. Représentation schématique de la séparation par membrane

Figure I.5. Principe de la filtration frontale

Figure I.6. Principe de la filtration tangentielle

Figure I.7. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

Figure I.8. Classification des procédés membranaires en fonction de la taille nominale des pores

Figure I.9. Représentation schématique de l'évolution du profil de concentration et de l'accumulation de matière le long d'une membrane

Figure I.10. Profil de concentration du composant à pénétration préférentielle dans des conditions d'état d'équilibre et d'état stable

Figure II.1. Schéma du volume de contrôle utilisé dans la méthode des volumes finis. (Bouebdelli 2020)

Figure II.2. Maillage structuré

Figure II.3. Maillage non-structuré

Figure II.4. Types des maillages

Figure II.5. Cellule de filtration membranaire rotative

Figure III.1. Géométrie de la cellule de filtration

Figure III.2. Géométrie de la cellule de filtration

Figure III.3. Maillage de la cellule de filtration

Figure III.4. Distribution de la pression sur la membrane à 50rpm.

Figure III.5. Distribution de la pression sur la membrane à 250rpm.

Figure III.6. Distribution de la contrainte de cisaillement sur la surface membranaire 500rpm.

Liste de tableaux

Tableau I.1: Lois de filtration frontale décrivant les différents mécanismes de colmatage.
(Collet 2013)

Tableau II.1. Différentes étapes de simulation. (Rajomalahy et al)

Tableau II.2. Symbole de signalisation.

Nomenclature

Notations latines

A	Perméabilité de la membrane	m/Pa.s
C	Concentration	% poids
C_0	Concentration d'alimentation	% poids
C_g	Concentration de gel	% poids
C_p	Concentration de perméat	% poids
D	Coefficient de diffusion	m ² /s
e_m	Épaisseur de la couche active de la membrane	m
k	Coefficient de transfert de masse	m/s
l	Épaisseur instantanée de la couche de gel	m
M	Quantité de matière déposée par volume de perméat	kg/m ³
m_p	Masse du gâteau	kg
n	Facteur de compressibilité	-
n_p	Nombre de pores par unité de surface	1/m ²
P	Pression transmembranaire	Pa
Q_p	Débit volumétrique de perméat	m ³ /s
Re	Nombre de Reynolds	-
R_g	Résistance de gel	Pa.s/m
\tilde{R}_g	Résistance spécifique du gel	Pa.s/m ²
R_c	Résistance accrue	Pa.s/m
R_m	Résistance de la membrane	Pa.s/m

r_0	Rayon des pores de la membrane nettoyée	m
r_p	Rayon des pores	m
S	Surface effective de la membrane	m ²
U	flux à travers la membrane	m/s
U_0	Flux de l'eau pure de la membrane colmatée	m/s
U_1	Flux de l'eau pure de la membrane nettoyée	m/s
U_p	Flux de perméat	m/s
t	Temps	s
TR	Taux de rétention	%
v	Vitesse	m/s

Notations grecques

ε_0	Fraction volumique en solide dans la solution d'alimentation	-
ε_g	Fraction volumique en solide dans la couche de gel	-
α	Résistance spécifique du dépôt	m/kg
α_0	Constante	-
ϑ	Viscosité cinématique	m ² /s
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
γ	Taux de cisaillement	1/s
ρ	Masse volumique	kg/m ³
ΔP_m	Différence de pression transmembranaire effective	Pa
Δr	Diminution de rayon de pore	m
	Epaisseur de la couche de gel en régime stationnaire	m
δ_p	Epaisseur de la couche polarisée	m

Abréviation

UF	Ultrafiltration
MF	Microfiltration
NF	Nanofiltration
OI	Osmose inverse

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les problèmes liés à l'environnement, notamment la pollution chimique et biologique de l'eau, sont devenus une préoccupation majeure pour la population et une priorité pour les autorités publiques. Il est essentiel de reconnaître que l'eau est indispensable à la vie sur Terre et que le développement industriel ou agricole dépend de sa disponibilité. Mieux produire et moins polluer sont des défis auxquels les industriels de tous secteurs sont confrontés, sous la pression des responsables politiques et de l'opinion publique. Les contraintes législatives et normatives deviennent de plus en plus strictes. Des industries diverses, telles que la chimie, la pétrochimie, l'agro-alimentaire, les tanneries, les producteurs de déchets métalliques et les papeteries, produisent des effluents variés nécessitant des investigations et des procédés spécifiques. Les procédés de séparation par membranes connaissent un essor notable, devenant des outils puissants pour l'épuration et le recyclage des effluents. Les membranes minérales semi-perméables offrent de grandes possibilités d'application, remplaçant graduellement les techniques traditionnelles de séparation et de purification dans l'industrie. Elles présentent des avantages comme la résistance mécanique, l'inertie chimique, la longue durée de vie et la stabilité thermique. Le développement des membranes inorganiques ou organique-inorganiques est actuellement au centre de nombreuses études pour le traitement des effluents liquides. Quatre techniques prometteuses sont développées : ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse et électrodialyse. Les modules tubulaires sont utilisés pour le traitement des gaz et des effluents liquides, ainsi que pour améliorer la qualité de l'eau potable. Cette technique a été appliquée dans la décontamination physique et biologique. (Sarah et al 2014)

Depuis son essor industriel il y a une dizaine d'années, la technologie membranaire s'est imposée comme une méthode de séparation performante, combinant efficacité et sobriété énergétique. Ses atouts majeurs résident dans l'absence de recours à des produits chimiques et une consommation énergétique réduite. Elle trouve des applications variées, allant du traitement des eaux (souterraines, de surface, usées) aux procédés agroalimentaires. Au cœur du procédé se trouve la membrane, une barrière perméable sélective agissant comme interface entre deux milieux. Cette barrière régule les transferts de matière de manière ciblée, selon sa configuration : homogène ou composite, dense ou poreuse, avec une épaisseur variant du nanomètre au millimètre. Les mécanismes de transport reposent sur des gradients (concentration, pression, température) ou des phénomènes diffusifs. Trois critères déterminent sa performance : sélectivité (capacité à isoler des composants spécifiques), perméabilité (débit de filtration) et durabilité. Cependant, son efficacité est souvent compromise par le colmatage,

un encrassement progressif bloquant l'écoulement des fluides. Pour atténuer ce phénomène, différentes configurations de filtration sont déployées, notamment la filtration tangentielle (flux parallèle à la membrane) et la filtration frontale (flux perpendiculaire). (Zaamouche et al 2010)

Cette étude vise à analyser la distribution des pressions au sein d'une cellule de filtration membranaire et à quantifier l'influence des paramètres opératoires (p. ex. vitesse de flux, porosité) sur ce phénomène, en s'appuyant sur des simulations numériques réalisées avec le logiciel ANSYS-Fluent. La démarche s'articule autour de trois axes :

- Revue bibliographique : Synthèse des connaissances actuelles sur les mécanismes de filtration membranaire, incluant des références scientifiques clés et des exemples de modèles théoriques ou appliqués.
- Modélisation mathématique : Développement d'un cadre théorique pour décrire les phénomènes de filtration et de colmatage, intégrant des équations gouvernant les transferts de matière et d'énergie.
- Analyse des résultats : Visualisation des données issues des simulations ANSYS, suivie d'une interprétation critique des tendances.

Une conclusion synthétique mettra en lumière les enseignements majeurs de l'étude, les limites identifiées et des pistes d'optimisation pour les systèmes membranaires.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Les techniques membranaires connaissent une croissance rapide, notamment grâce à leur adoption dans divers secteurs tels que l'automobile, le textile et l'agroalimentaire. Cette technologie présente plusieurs avantages, dont une consommation énergétique réduite et une opération à basse température. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont porté sur le développement de modèles de filtration membranaire basés sur la polarisation de concentration (Zaamouche et al., 2010).

La filtration membranaire est aujourd'hui largement reconnue comme une technologie essentielle pour assurer la pureté, la sécurité et l'efficacité dans le traitement de l'eau et des effluents. Le dessalement de l'eau représente l'une des applications les plus répandues de cette technologie à l'échelle mondiale. Des recherches ont été menées pour concevoir et améliorer les systèmes à membrane afin de renforcer la précision et les performances du processus. (Pak et al., 2008)

I.2. Travaux antérieurs

Dans cette section, nous présenterons plusieurs travaux de recherche portant sur la filtration membranaire et la modélisation et simulation numérique des cellules de filtration et des réacteurs par CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces travaux visent à étudier, comprendre et résoudre divers phénomènes physiques qui limitent l'efficacité du processus de filtration membranaire.

L'étude de Rahimi et al. (2005) démontre l'utilisation de simulations CFD tridimensionnelles pour prédire le débit de perméat dans un système de microfiltration membranaire. La méthodologie employée comprend trois phases clés :

1. Modélisation numérique :

- Cartographie des contraintes mécaniques à la surface de la membrane via un logiciel CFD dédié.
- Calcul du débit local de perméat en intégrant les pressions locales dans l'équation de Darcy (relation fondamentale reliant flux, pression et perméabilité).

- Détermination du flux total par intégration spatiale des flux locaux sur la surface membranaire.

2. Paramètres d'étude :

- Impact des pressions d'entrée et de sortie sur le flux de perméat.
- Comparaison de configurations de cellules :
 - Cellule avec trois barrières distinctes (influençant les profils d'écoulement).
 - Cellule sans barrière (configuration témoin).

3. Validation expérimentale :

- Tests en laboratoire sur une membrane de microfiltration pour confronter simulations et données réelles.
- Résultats : Les prédictions CFD présentent une précision supérieure aux modèles simplistes, validant leur utilité pour optimiser les performances membranaires (voir Figure I.1).

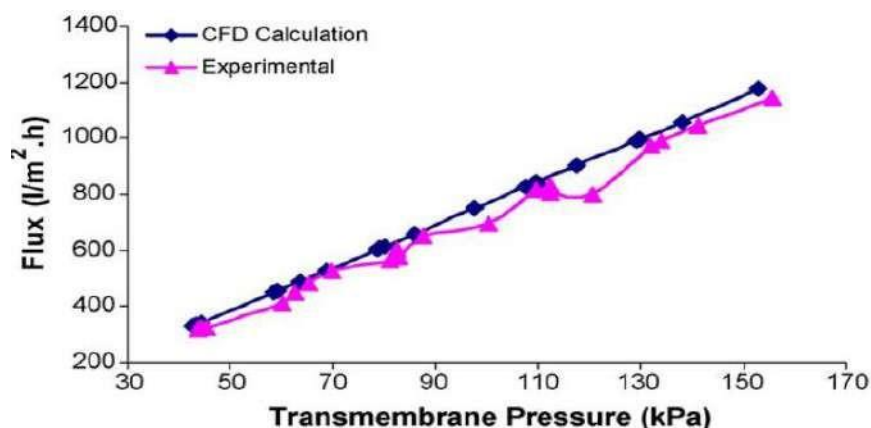


Figure I.1. Comparaison entre les flux prédits et mesurés. (Rahimi et al., 2005).

Pour optimiser la précision et les performances des procédés de filtration membranaire, une simulation numérique CFD de l'écoulement laminaire dans des tubes poreux (représentant une membrane tubulaire à flux croisés) a été développée, combinant les équations de Navier-Stokes, la loi de Darcy et les équations de transfert de masse via une méthode aux différences finies appliquée à un maillage en volumes de contrôle. Cette modélisation bidimensionnelle a permis d'étudier un cas concret de microfiltration, prédisant notamment le taux de croissance de la couche de polarisation de concentration le long des membranes, ainsi que l'influence de paramètres opératoires tels que la géométrie du système, la surface membranaire nécessaire, le nombre de Reynolds (caractérisant le régime d'écoulement) et l'encrassement sur les performances. Les résultats mettent en évidence des corrélations clés entre ces variables et l'efficacité de filtration, offrant des pistes pour concevoir des membranes plus adaptatives et durables. (Pak et al., 2008)

L'étude de Ding et al., (2010) a mobilisé des simulations CFD tridimensionnelles pour analyser l'écoulement gaz-liquide dans un réacteur à cuve agitée dédié à la production de biohydrogène. L'objectif était d'évaluer l'impact de l'hydrodynamique sur la conception du réacteur en comparant, via des simulations, une roue améliorée à une roue standard, testée sur une plage de vitesses spécifique. La validation des résultats numériques a reposé sur une analyse de la distribution des temps de séjour, confirmant la fiabilité du modèle. Les simulations, couplées à des expérimentations de fermentation d'éthanol, ont démontré que le type de turbine et sa vitesse de rotation influençaient significativement les modèles d'écoulement, impactant directement l'efficacité de production de biohydrogène. Les résultats soulignent qu'une vitesse optimale de 50 à 70 tr/min pour la roue modifiée permet un comportement hydrodynamique optimal, favorisant une production économiquement viable tout en réduisant les coûts énergétiques. (Ding et al., 2010)

Kasat et al., (2008) ont élaboré un modèle CFD complet pour étudier la suspension de solides et son influence sur le mélange en phase liquide dans un réacteur agité solide-liquide. L'écoulement turbulent a été simulé via un modèle à deux fluides couplés au modèle de turbulence standard, intégrant les propriétés du mélange. La rotation de la roue dans un réacteur équipé de déflecteurs a été modélisée en utilisant l'approche des cadres de référence multiples (MRF), avec le solveur commercial FLUENT 6.2 (Fluent Inc., États-Unis). Les prédictions de concentration des solides ont été comparées aux données expérimentales de Yamazaki et al. (1986), obtenues par méthode photoélectrique dans une cuve de mélange de lisier. Les résultats

ont validé l'utilité du modèle pour décrypter les mécanismes de mélange à divers stades de suspension solide, offrant des insights pour optimiser les procédés industriels. (Kasat et al., 2008)

L'étude de Zhu et al. (2015) explore l'ultrafiltration du jus de betterave sucrière, produit par pressage non thermique assisté par champ électrique pulsé (PEF), comme alternative écologique aux méthodes de purification conventionnelles (chaulage-carbonatation). Deux configurations expérimentales ont été comparées :

1. Module statique Amicon 8200 : Ce système, largement utilisé en laboratoire pour la concentration et la purification de solutions biologiques, a été testé avec des membranes en polyéthersulfone de seuils de coupure moléculaire (MWCO) variables (10, 50 et 150 kDa). Avec la membrane 10 kDa, la pureté du jus est passée de $93,6 \pm 0,5 \%$ à $96,4 \pm 0,8 \%$, mais le flux de perméat a chuté en raison d'un encrassement membranaire accru, typique des systèmes statiques.
2. Module à disque rotatif (RDM) : Cette configuration dynamique, conçue pour atténuer le colmatage, a permis d'étudier l'impact de la vitesse de rotation (500 à 2 000 tr/min) et du MWCO. Les résultats montrent une augmentation significative du flux de perméat avec la vitesse de rotation (surtout entre 500 et 1 000 tr/min) et la taille des pores, combinée à une pureté supérieure.

Principaux enseignements :

- Efficacité du RDM : Le module rotatif a généré un flux de perméat deux fois plus élevé que le système Amicon 8200, tout en maintenant une qualité de filtrat optimale.
- Optimisation des paramètres : À 2 000 tr/min, le flux atteint un plateau, suggérant un équilibre entre l'atténuation de l'encrassement et les contraintes hydrodynamiques.
- Avantages environnementaux : L'absence de traitements thermiques et chimiques réduit l'empreinte énergétique, alignant cette méthode avec les tendances d'économie circulaire et de procédés propres.

Implications industrielles :

Cette étude souligne le potentiel des systèmes dynamiques (comme le RDM) pour améliorer l'efficacité de l'ultrafiltration dans l'industrie sucrière, notamment en réduisant les coûts liés à l'entretien des membranes et en augmentant la productivité. Les résultats pourraient inspirer l'adoption de technologies similaires dans d'autres secteurs agroalimentaires confrontés à des défis de purification complexe. (Zhu et al., 2015)

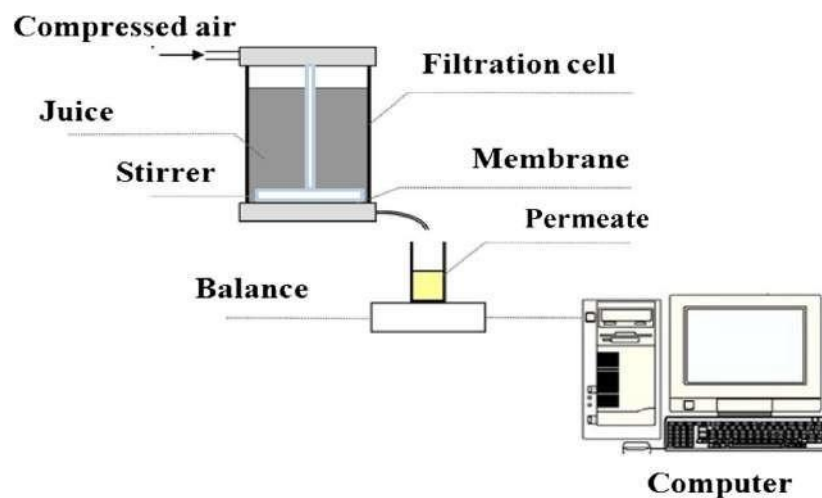


Figure I.2. Schéma de principe de la filtration frontale. (Zhu et al., 2015)

Santos-Moreau et al., (2012) ont analysé le champ d'écoulement liquide dans un réacteur agité équipé d'un panier fixe contenant des particules catalytiques, via des simulations CFD RANS (équations de Reynolds-Averaged Navier-Stokes) avec le modèle $k-\epsilon$ réalisable. Les simulations initiales sans panier ont validé le modèle en comparant la puissance de la turbine (N_p) et les profils de vitesse à des données littéraires. Le panier catalytique a été modélisé comme un milieu poreux (via le modèle Brinkman-Forchheimer), caractérisé par sa porosité et perméabilité. L'ajout du panier a révélé un écoulement recirculant avec des vitesses réduites : le liquide traverse radialement la zone centrale du panier vers l'extérieur, tandis que les zones supérieure et inférieure sont parcourues radialement vers l'intérieur à des vitesses plus faibles. En couplant les vitesses simulées dans le panier à la corrélation de Ranz-Marshall, les coefficients de transfert de masse liquide/solide (k_s) ont été estimés, révélant des variations spatiales liées à la non-uniformité des écoulements. Les résultats soulignent une hétérogénéité

des performances catalytiques due à cette recirculation et aux gradients de k_s , offrant des insights pour optimiser la conception des réacteurs agités à panier. (Santos-Moreau et al., 2012)

L'étude numérique d'Alsaedi et al., (2022) explore l'écoulement d'un nanofluide hybride (GO + Cu/huile de kérosène) confiné entre deux cylindres coaxiaux – un fixe (intérieur) et un rotatif (extérieur) – sous l'influence combinée d'un champ magnétique radial et d'un échauffement Joule. Cette configuration, modélisée par des équations différentielles ordinaires (ODE) non dimensionnelles, vise à analyser les transferts de chaleur et de quantité de mouvement dans un système soumis à des contraintes magnétohydrodynamiques (MHD). La résolution numérique via la méthode *bvp4c* (intégrant l'algorithme Runge-Kutta d'ordre 4) révèle des comportements clés :

1. Impact du champ magnétique :

- Une augmentation de l'intensité magnétique (M) réduit significativement la vitesse du nanofluide, aussi bien pour le nanofluide hybride (GO + Cu) que pour le nanofluide simple (Cu/huile de kérosène), en raison de la force de Lorentz qui freine l'écoulement.
- Parallèlement, la température s'élève avec M et le nombre de Brinkman (Br), traduisant une conversion accrue d'énergie magnétique en chaleur via l'effet Joule.

2. Rôle des nanoparticules :

- Une fraction volumique élevée de Cu entraîne une baisse de température, attribuée à l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide, favorisant une dissipation thermique plus efficace.
- Le nombre de Nusselt (Nu) augmente proportionnellement à la concentration des nanoparticules (GO et Cu), soulignant une optimisation du transfert de chaleur par renforcement des interactions entre phases solide-liquide.

3. Comparaison des performances :

- Le nanofluide hybride (GO + Cu) présente des performances thermiques supérieures à celles du nanofluide à base de Cu seul, grâce à la synergie entre les propriétés conductrices du graphène et du cuivre.
- La pression et le frottement cutané sont également modulés par les paramètres magnétiques, avec des implications pour la conception de systèmes de refroidissement ou de lubrification sous champ MHD.

Implications pratiques :

Ces résultats orientent vers l'utilisation de nanofluides hybrides dans des applications industrielles exigeant un contrôle actif des transferts thermiques, comme les échangeurs de chaleur magnétiques ou les systèmes de refroidissement de turbines. L'optimisation des fractions volumiques de nanoparticules et l'ajustement des paramètres magnétiques émergent comme des leviers clés pour adapter les performances aux besoins spécifiques. (Alsaedi et al., 2022)

L'emploi de `bvp4c` (méthode de tir avec RK-4) assure une précision numérique robuste, cohérente avec les études antérieures sur les écoulements MHD complexes. La comparaison avec des données expérimentales ou d'autres modèles (comme les approches HAM ou FEM) pourrait renforcer la validation dans de futurs travaux. (Alsaedi et al., 2022)

L'étude d'Hoseini et al., (2021) vise à optimiser la consommation énergétique et à réduire les contraintes mécaniques dans un réacteur à cuve agitée en comparant trois types de roues : une turbine Rushton à 6 pales, une roue en U et une roue en V. Les simulations CFD (dynamique des fluides computationnelle) ont permis d'analyser les modèles d'écoulement, les paramètres de turbulence (énergie cinétique turbulente k , taux de dissipation ϵ) et la puissance dissipée, tandis qu'une approche FSI bidirectionnelle (interaction fluide-structure) a évalué les contraintes mécaniques sur les roues. L'optimisation des paramètres géométriques (épaisseur de pale T_b , épaisseur du disque T_D , angle vertical θ) a été réalisée via un algorithme génétique multi-objectifs (MOGA) combiné à des méthodes d'optimisation directe (DO) et de surface de réponse (RSO). Les résultats révèlent une réduction du nombre de puissance (N_p) de 21 % pour

la roue en V et 48 % pour la roue en U par rapport à la turbine Rushton, avec une consommation énergétique validée expérimentalement à ± 5 % près. La roue en U génère une énergie cinétique turbulente maximale ($k = 0,065 \text{ m}^2/\text{s}^2$) et un taux de dissipation ($\varepsilon = 65,14 \text{ m}^2/\text{s}^3$) supérieurs à ceux de la roue en V ($k = 0,044 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\varepsilon = 25,16 \text{ m}^2/\text{s}^3$). L'analyse FSI montre cependant que la contrainte de von Mises est minimale pour la roue en V, indiquant une durabilité mécanique accrue, malgré ses performances énergétiques légèrement inférieures à la roue en U. Ces résultats orientent vers un compromis entre efficacité énergétique et résistance structurelle dans la conception de systèmes d'agitation industriels. (Hoseiniet et al., 2021)

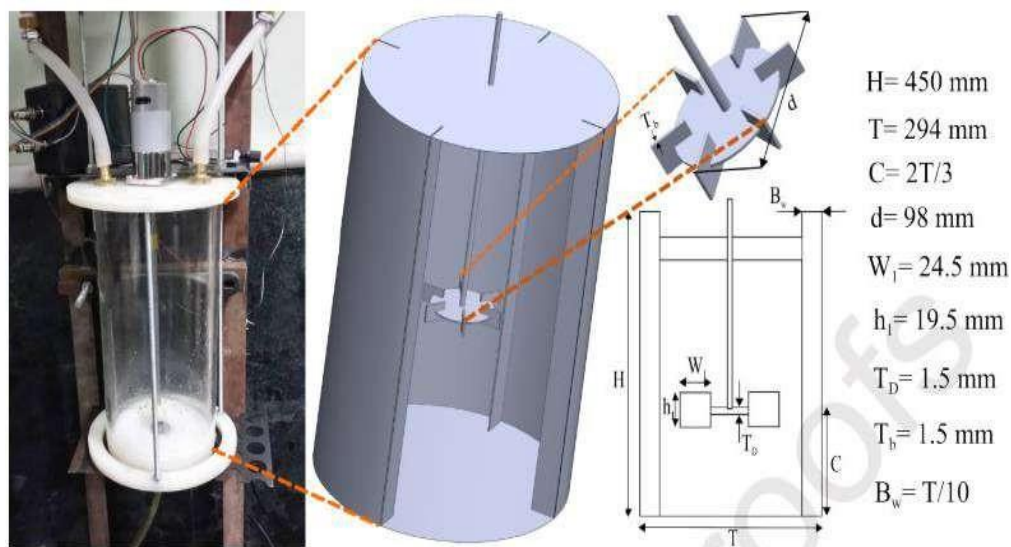


Figure I.3. Configuration d'un réacteur à cuve agitée équipé d'une turbine Rushton à 6 pales. (Hoseiniet et al., 2021)

I.3. Généralités sur les membranes

La filtration membranaire est un procédé de séparation mécanique en phase liquide ou gazeuse, s'appuyant sur une membrane sélective microporeuse pour transférer un fluide sous l'effet d'une force motrice externe. Cette force peut être :

- Un gradient de pression (méthodes baromembranaires).
- Un champ électrique (procédés d'électrodialyse).
- Un gradient de concentration (applications comme la dialyse ou la pervaporation).

Cette technologie exploite ainsi des principes physico-chimiques variés pour isoler des composants cibles, adaptée à des contextes industriels ou de purification spécifiques (Gaveau et al., 2016).

Les membranes filtrantes, conçues à partir de feuilles minces de matériaux poreux, sont utilisées dans des secteurs variés : traitement de l'eau, purification en biotechnologie ou clarification de boissons comme la bière. Des entreprises telles que W.L. Gore & Associates, Pall Corporation ou GE Healthcare Life Sciences produisent ces membranes tout en optimisant leurs performances et coûts. Ces performances dépendent de paramètres clés : épaisseur, structure des pores (connectivité, taille variable en profondeur), et matériau constitutif. L'accumulation de particules sur ou dans la membrane lors de la filtration rend cruciale la modélisation du flux et de l'encrassement. Les approches expérimentales, coûteuses et limitées en visualisation des dépôts profonds, sont complétées par des modèles mathématiques, permettant aux fabricants d'optimiser conception et conditions opératoires. (Sanaei et al., 2019)

Au cours de la filtration, le flux de perméat chute rapidement avant de se stabiliser. Cette réduction est principalement causée par la polarisation de concentration (accumulation de solutés près de la membrane) et l'encrassement, influencé par :

- Les propriétés du fluide (taille/concentration des particules, pH, force ionique).
 - Les caractéristiques membranaires (hydrophobicité, charge, taille des pores).
 - Les conditions hydrodynamiques (vitesse d'écoulement, pression transmembranaire).
- (Kyllonen et al., 2005)

L'encrassement, obstacle majeur à l'adoption des systèmes membranaires pour le traitement de l'eau, se manifeste par le blocage des pores (particules obstruant l'entrée ou se déposant sur les parois) ou la formation d'un gâteau en surface. Les particules plus petites que les pores réduisent leur section efficace (constriction), tandis que les plus grosses bloquent leur entrée, augmentant la résistance. Quatre mécanismes d'encrassement sont décrits :

1. Blocage complet (obstruction totale des pores).
2. Blocage standard (particules adhérant aux parois).

3. Blocage intermédiaire (combinaison de dépôts en surface et dans les pores).
4. Filtration en gâteau (accumulation en couche externe). (Iritani et al., 2013)

Initialement appliquées à la filtration classique, ces lois sont désormais étendues à la microfiltration et ultrafiltration de colloïdes. (Iritani et al., 2013)

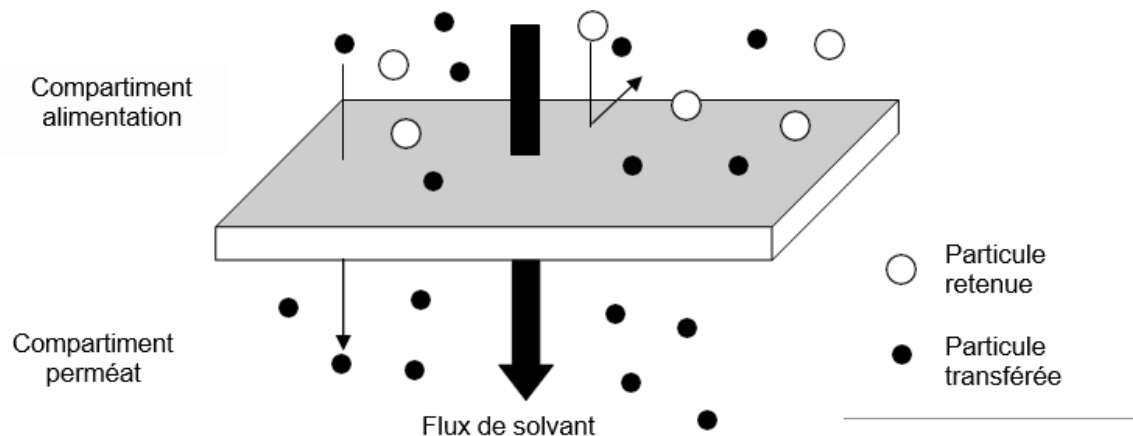


Figure I.4. Représentation schématique de la séparation par membrane. (Bessiere 2005)

I.3.1. Type de membranes

I.3.1.1. Membranes organiques

Les matériaux membranaires sont principalement composés de composés organiques, tels que l'acétate de cellulose ou des polymères de synthèse. Ces derniers incluent notamment des familles comme les polysulfones, les polyamides aromatiques, les polyimides, les polyéthersulfones, les polycarbonates, ainsi que des polymères fluorés, caractérisés par une architecture asymétrique. Cette structure intègre généralement un substrat macroporeux (ex. : polyester) assurant la rigidité mécanique, surmonté d'une couche sélective fonctionnelle en polymère spécifique. Malgré une résistance modérée aux températures élevées et aux agents chimiques corrosifs, les membranes organiques restent privilégiées dans de nombreux secteurs en raison de leur rentabilité économique comparativement aux membranes minérales (ex. : céramiques). Cette compétitivité financière a largement contribué à la démocratisation des technologies membranaires, stimulant leur intégration dans des procédés industriels variés, de la purification de l'eau à la séparation moléculaire en bioindustrie. (Ezzeroug et al., 2022)

I.3.1.2. Membranes minérales

Contrairement aux membranes organiques, les membranes minérales ont connu une adoption plus tardive dans le domaine de la séparation. Constituées de matériaux inorganiques (céramiques, métaux frittés, verre), elles se distinguent par leur capacité à fonctionner dans des conditions extrêmes (températures élevées, milieux chimiquement corrosifs), élargissant ainsi les possibilités d'application en ingénierie des séparations. Une variante innovante, les membranes dynamiques, sont fabriquées in situ par l'utilisateur à partir de tubes poreux (diamètre des pores : 0,5 à 5 μm). Leur structure est renforcée par l'incorporation d'une dispersion colloïdale de zirconium stabilisée par des copolymères, conférant une résistance mécanique et chimique exceptionnelle. Ces membranes supportent des pressions atteignant 40 bars, des températures jusqu'à 120 °C, et fonctionnent sur une large plage de pH (1-14), les rendant idéales pour des milieux réactifs ou non aqueux. Bien que majoritairement tubulaires et dotées d'une résistance chimique supérieure, leur faible compacité (surface filtrante limitée par unité de volume) reste un défi pour les applications nécessitant une grande efficacité spatiale (Ezzeroug et al., 2022).

I.3.2. Caractéristique des membranes

I.3.2.1. Sélectivité

La sélectivité membranaire pour une substance cible est déterminée par une combinaison de facteurs : la nature chimique et la morphologie de la membrane, les propriétés physico-chimiques du soluté, ainsi que les conditions environnementales (pH, force ionique, etc.). Cette sélectivité est quantifiée via deux indicateurs clés :

- Le **taux de rétention (TR)**, défini par la relation :

$$TR = 1 - \frac{C_P}{C_0} \quad (\text{I.1})$$

Où C_P et C_0 représentent respectivement les concentrations du soluté dans le perméat et le fluide d'alimentation. Un $TR = 0 \%$ indique une absence totale de rétention, tandis qu'un $TR = 100 \%$ correspond à une rétention complète.

- Le seuil de coupure (SC), correspondant à la masse molaire minimale (en daltons, Da) d'un composé modèle retenu à 90 % par la membrane. Un SC bas traduit une capacité à filtrer des molécules ou colloïdes de petite taille.

Cependant, le SC dépend non seulement de la taille des pores, mais aussi de paramètres tels que :

1. Les caractéristiques du soluté (forme, charge, degré d'hydratation).
2. Les propriétés de la solution (pH, force ionique).
3. Les conditions opératoires (pression, flux de perméat, élasticité membranaire).

Ces variables expliquent les écarts fréquents entre les SC annoncés par les fabricants (souvent mesurés dans des conditions standardisées non précisées) et les performances réelles. Bien que le SC puisse être qualifié de nominal, apparent, moyen ou absolu, sa valeur reste un outil pratique pour comparer empiriquement les membranes, malgré sa variabilité contextuelle (Zaamouche., 2010).

La rétention membranaire des particules biologiques dépend d'une combinaison de facteurs interconnectés. Si la taille nominale des pores joue un rôle central, le passage de microorganismes comme les bactéries peut également être modulé par des interactions physico-chimiques complexes. Parmi les paramètres clés figurent :

- Les propriétés de la membrane (charge de surface, hydrophobicité).
- Les caractéristiques du fluide (composition, viscosité).
- La morphologie des cellules microbiennes (forme, déformabilité).

Des défauts structuraux, issus de la fabrication ou d'une dégradation progressive (vieillessement, cycles répétés de nettoyage chimique/mécanique), peuvent également compromettre la sélectivité. Ces anomalies, comme l'apparition de macropores ou une hétérogénéité de la distribution des pores, altèrent la capacité de rétention et favorisent le passage indésirable de contaminants. Pour quantifier l'efficacité de séparation dans des systèmes complexes (ex. : suspensions colloïdales), des indicateurs spécifiques (taux de

rétenion ajusté, perméabilité résiduelle) sont employés (Gaveau., 2016).

I.3.2.2. Perméabilité

La perméabilité membranaire (A), propriété intrinsèque liée à la structure du matériau, représente la capacité de la membrane à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle est quantifiée par le rapport entre le flux de perméation (U_p) et la pression transmembranaire effective (ΔP_m) :

$$A = \frac{U_p}{\Delta P_m} \quad (I.2)$$

Le flux de perméation, exprimé en débit volumique unitaire (volume par unité de surface et de temps), se calcule comme suit :

$$U_p = \frac{Q_p}{S} \quad (I.3)$$

Où Q_p est le débit volumique du perméat et S la surface active de la membrane. En substituant U_p dans l'équation (I.2) on obtient :

$$A = \frac{Q_p}{S \Delta P_m} \quad (I.4)$$

Expérimentalement, A correspond à la pente de la courbe reliant U_p à ΔP_m . Cependant, des variabilités de perméabilité sont observées entre différents échantillons d'une même membrane en raison d'imperfections de fabrication (ex. : hétérogénéité des pores). Ainsi, c'est la perméabilité moyenne qui est retenue pour caractériser globalement le matériau, garantissant une évaluation fiable malgré ces disparités (Tamas., 2004).

I.3.2.3. Résistance d'une membrane

La résistance hydraulique (R_m) d'une membrane traduit son opposition au passage du fluide lors de la filtration. Elle correspond à l'inverse de sa perméabilité (A), selon la relation :

$$R_m = \frac{1}{A} = \frac{S\Delta P_m}{Q_P} \quad (I.5)$$

Où S est la surface membranaire, ΔP_m la pression transmembranaire, et Q_P le débit volumique du perméat. Cette équation permet de déterminer expérimentalement P_m à partir de mesures de flux et de pression.

En modélisant les pores membranaires comme des cylindres droits et alignés, la loi de Poiseuille offre une expression théorique de R_m :

$$R_m = \frac{8e_m}{n_p \pi r_p^4} \quad (I.6)$$

Dans cette formule, e_m représente l'épaisseur de la couche active, n_p le nombre de pores par unité de surface, et r_p le rayon des pores. Cette relation révèle que R_m :

- Augmente avec l'épaisseur de la membrane (friction accrue).
- Diminue avec la porosité (nombre élevé de pores) et le rayon des pores (section d'écoulement élargie). (Tamas., 2004).

Ces principes guident l'optimisation des membranes pour des applications nécessitant un équilibre entre perméabilité et résistance mécanique (Tamas., 2004).

I.4. Filtration membranaire

Les techniques de séparation membranaire sont classifiées selon la force motrice principale exploitée pour opérer la séparation. On distingue ainsi :

- Les procédés fondés sur un gradient électrique (ex : électrodialyse).
- Ceux mobilisant un gradient de concentration (ex : dialyse, pervaporation).
- Ceux utilisant un gradient de pression (ex : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse).

Cette catégorisation reflète la diversité des mécanismes physico-chimiques mis en jeu pour isoler des composés cibles, adaptés aux spécificités des fluides traités et des objectifs

industriels. (Bessiere et al., 2005)

Les procédés de filtration membranaire s'articulent autour de deux modalités opératoires majeures : la filtration frontale (dead-end), où le fluide traverse la membrane perpendiculairement, et la filtration tangentielle (cross-flow), où l'écoulement parallèle à la surface limite l'accumulation de dépôts. Ces deux approches, bien que complémentaires, reposent sur des mécanismes hydrodynamiques et des stratégies technologiques distinctes, adaptées aux contraintes spécifiques des applications industrielles ou de laboratoire (Zaamouche et al., 2010).

I.4.1. Filtration frontale

La filtration frontale (dead-end), caractérisée par un écoulement perpendiculaire au plan membranaire (voir Figure I-5), se distingue par sa simplicité opérationnelle et son coût réduit. Contrairement à la filtration tangentielle, elle ne stabilise pas de régime permanent, avec une accumulation progressive des particules en surface, limitant son usage aux fluides à faible pouvoir encrassant. Bien qu'elle nécessite un investissement initial modeste et une consommation énergétique faible, son efficacité chute drastiquement avec des solutions hautement colmatantes, réduisant le flux à des niveaux inopérants. Elle est privilégiée dans des applications comme la production d'eau potable ou la décontamination microbiologique en milieu médical, où sa compacité facilite la stérilisation sans recourir à des dispositifs multi-pompes complexes. Ces avantages en font une solution idéale pour des contextes exigeant simplicité et économie, malgré ses limites face aux fluides agressifs. (Espinasse et al., 2003)

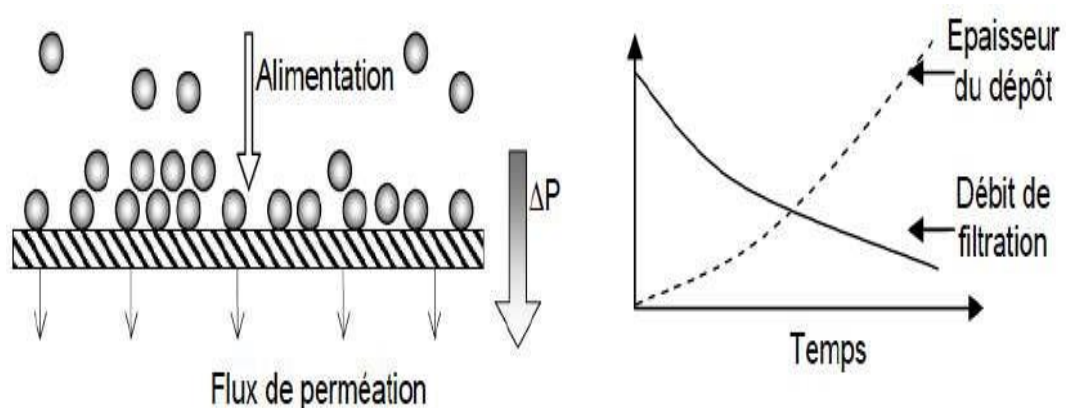


Figure I.5. Principe de la filtration frontale (Espinasse et al., 2003)

I.4.2. Filtration tangentielle

La filtration tangentielle (cross-flow), où le fluide circule parallèlement à la membrane à une vitesse contrôlée, génère une contrainte de cisaillement réduisant l'adhésion des dépôts à sa surface. Contrairement à la filtration frontale, cette méthode permet une stabilisation progressive : lors d'une variation de pression, les particules en suspension et les dépôts potentiels mettent un temps significatif à s'accumuler (Figure I-6). Pendant cette phase transitoire, le flux de perméat diminue avant d'atteindre un état stationnaire, où il se maintient à un niveau constant. Cette capacité à équilibrer les forces hydrodynamiques et à minimiser l'encrassement explique son adoption massive dans l'industrie, notamment pour des procédés exigeant un débit de perméat stable sur de longues durées (de quelques minutes à plusieurs heures selon la complexité du système). Sa robustesse en fait une solution privilégiée pour les fluides à fort potentiel colmatant, où la filtration frontale serait inefficace. (Espinasse et al., 2003)

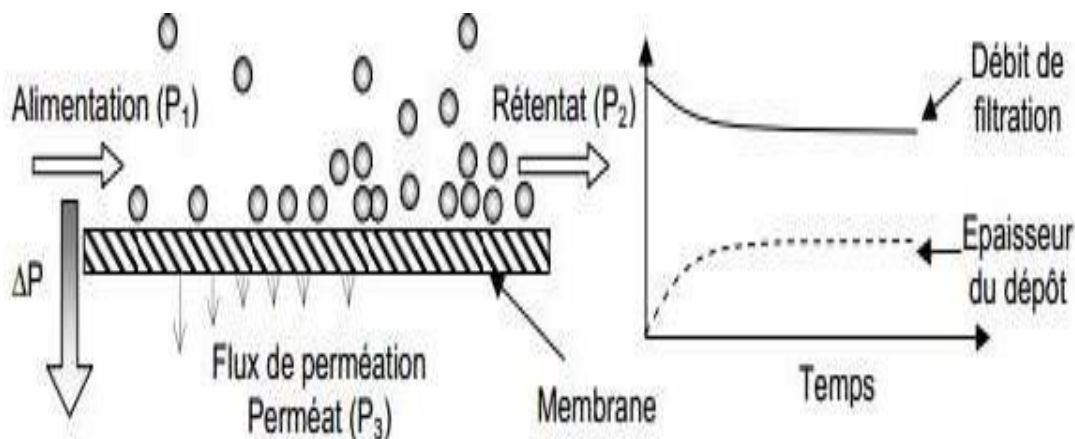


Figure I.6. Principe de la filtration tangentielle. (Espinasse et al., 2003)

I.5. Classification des membranes

I.5.1. Microfiltration

La microfiltration, procédé membranaire basé sur un mécanisme de tamisage physique (pores de 0,1 à 10 μm), est largement utilisée dans des secteurs variés : épuration des eaux résiduaires, clarification de boissons, séparation de biomolécules ou élimination de microorganismes. Deux matériaux dominent ce domaine : les membranes polymères (privilégiées pour leur compétitivité économique et leur compacité élevée) et les membranes

céramiques (réputées pour leur robustesse et longévité). Bien que les polymères soient plus répandus, leur sensibilité à l'encrassement et leur durabilité limitée les rendent peu adaptés aux environnements industriels exigeants. À l'inverse, les céramiques, stables dans des conditions extrêmes (températures élevées, pH agressifs), permettent l'emploi de méthodes de nettoyage intensives (backpulsing, agents chimiques) pour limiter le colmatage, tout en offrant une résistance mécanique supérieure. Cependant, leur coût initial élevé freine encore leur adoption massive, malgré leur efficacité démontrée dans des applications à grande échelle comme la filtration de suspensions complexes ou la stérilisation de fluides. (Singh et al., 2019)

I.5.2. Ultrafiltration

L'ultrafiltration, développée à partir des années 1960 comme procédé de séparation moléculaire, s'est progressivement imposée dans des applications diversifiées : valorisation de composés chimiques, épuration des eaux, gestion des effluents industriels, concentration de produits agroalimentaires (jus, lait), biotechnologies médicales ou culture cellulaire. Malgré cette polyvalence, son déploiement à grande échelle reste limité par l'encrassement membranaire, un phénomène entraînant une augmentation des dépenses opérationnelles (sure consommation d'énergie, recours à des agents nettoyants coûteux, maintenance fréquente) et une réduction de la longévité des membranes. Pour pérenniser cette technologie, des stratégies innovantes et rentables de contrôle du colmatage—combinant optimisation hydrodynamique, modifications de surface des membranes ou prétraitements des fluides—s'avèrent indispensables. (Shi et al., 2014)

Dans sa forme la plus élémentaire, l'ultrafiltration est un processus sous pression conçu pour séparer le solvant (généralement l'eau) et les petits solutés (tels que les sels et les sucres) des grosses macromolécules. Étant donné que le transport de masse est principalement dominé par la convection, le taux de transport de masse des produits et des petites impuretés est proportionnel au flux de filtrat ainsi qu'aux coefficients de tamisage des solutés correspondants (Mehta et al., 2005).

I.5.3. Nano-filtration

Développées à la fin des années 1980, les membranes de nanofiltration (NF) combinent les avantages de l'ultrafiltration (UF) et de l'osmose inverse (RO). Dotées de pores d'environ 1 nm et d'un seuil de coupure moléculaire compris entre 100 et 5 000 Da, elles se caractérisent par une charge de surface modérée, liée à la présence de groupes fonctionnels ionisables. Ces

membranes opèrent sans changement de phase (à température ambiante) et permettent une rétention efficace des sels inorganiques polyvalents (ex. : sulfates, carbonates) et des molécules organiques de petite taille, même sous des pressions modérées (inférieures à 20 bars). (Oatley et al., 2017)

Leur équilibre entre sélectivité et coût énergétique en fait une solution privilégiée pour des applications industrielles diversifiées :

- Dépollution hydrique (élimination de micropolluants, adoucissement).
- Production pharmaceutique (concentration de principes actifs).
- Biotechnologies (fractionnement de protéines).
- Agroalimentaire (deminéralisation de lactosérum).

Les recherches actuelles explorent l'optimisation de leurs performances via :

- Des traitements de surface pour améliorer leur hydrophilie ou résistance chimique.
- Des protocoles de prétraitement pour réduire l'encrassement.
- Une modélisation prédictive des mécanismes de séparation.
- Une analyse nanométrique par microscopie à force atomique (AFM) pour cartographier leur topographie et propriétés mécaniques.

Ces avancées renforcent leur rôle clé dans l'industrie durable, malgré des défis persistants comme la sensibilité au colmatage ou la variabilité des seuils de coupure. (Oatley et al., 2017)

I.5.4. Osmose inverse

Depuis quatre décennies, les membranes d'osmose inverse (RO) ont connu une évolution majeure, devenant un pilier du dessalement mondial avec 44 % de la capacité totale et 80 % des unités opérationnelles. Cet essor s'explique par des progrès technologiques dans les matériaux membranaires (polymères composites, couches actives nanostructurées) et une réduction des coûts opérationnels, rendant cette technologie accessible à grande échelle. Aujourd'hui, les membranes RO dominent le marché des nouvelles installations, grâce à leur flexibilité d'adaptation à des eaux saumâtres ou marines via des prétraitements personnalisés

(filtration, ajustement de pH) et des architectures modulaires optimisées. Leur capacité à répondre à des besoins variés (eau potable, irrigation, industrie) en fait une solution clé pour adresser les pénuries hydriques globales. (Greenlee et al., 2009)

L'osmose inverse (RO) s'est imposée comme la technologie dominante pour la désalinisation et la séparation ionique, équipant près de 50 % des 15 000 installations de dessalement opérationnelles dans le monde. Ce procédé exploite un phénomène naturel : l'osmose, où un solvant (généralement l'eau) traverse une membrane semi-perméable sous l'effet d'un gradient de concentration. Par exemple, dans un système à deux réservoirs séparés par une membrane (Figure I-8), l'eau migre du compartiment moins concentré vers le plus concentré. En appliquant une pression croissante sur le compartiment concentré, ce flux diminue jusqu'à s'annuler à la pression osmotique (équilibre des forces). Si la pression dépasse ce seuil, l'eau circule en sens inverse (RO), purifiant ainsi le fluide. Cette inversion contrôlée permet d'extraire les sels et contaminants, faisant de la RO un pilier de la gestion hydrique durable. (Tansakul., 2009)

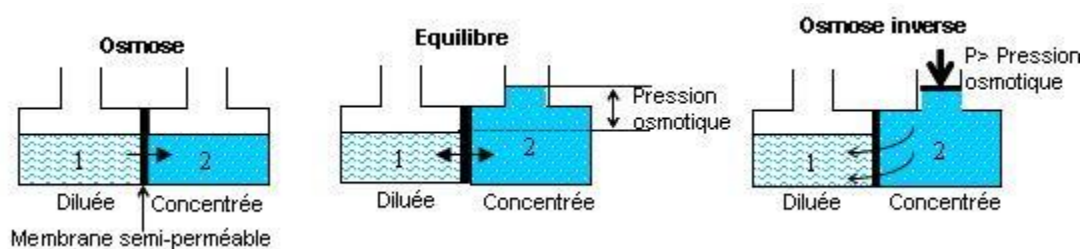


Figure I.7. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse. (Tansakul., 2009)

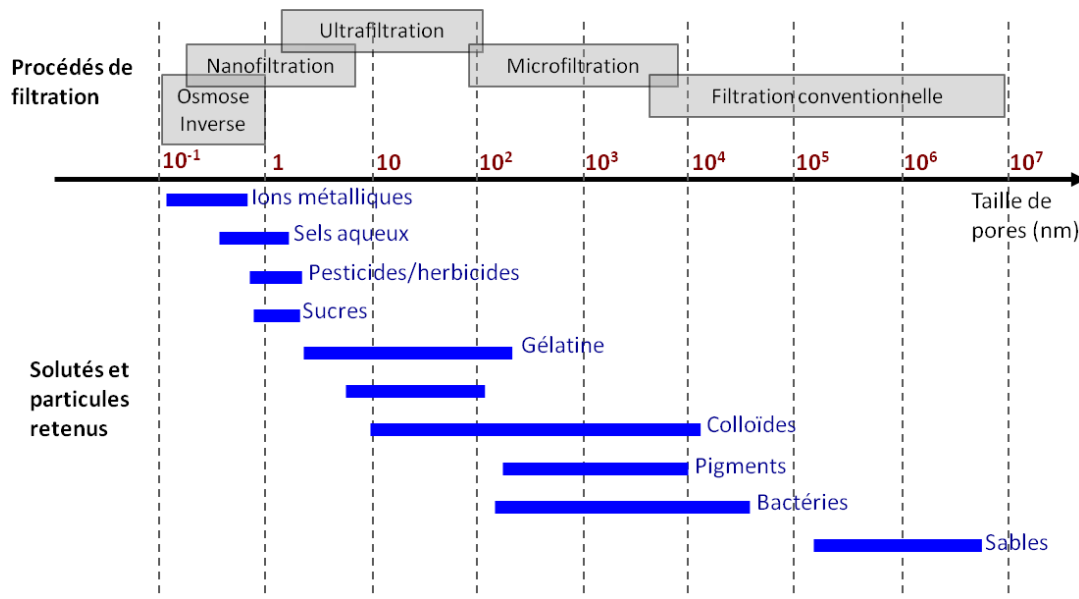


Figure I.8. Classification des procédés membranaires en fonction de la taille nominale des pores. (Gaveau., 2016)

I.6. Modélisation de la filtration membranaire

I.6.1. Modèle de polarisation de gel

Lors de l'ultrafiltration, les solutés (principalement des macromolécules ou des particules colloïdales) migrent vers la membrane sous l'effet du flux de perméat, formant une couche gélifiée à sa surface. Une fraction de ces solutés traverse la membrane, tandis que le reste est retenu et diffuse en retour vers le fluide d'alimentation. À l'équilibre stationnaire, le flux de solutés dirigés vers la membrane équivaut à la somme de ceux traversant la membrane et de ceux réintégrant le fluide. (Zaamouche et al., 2010)

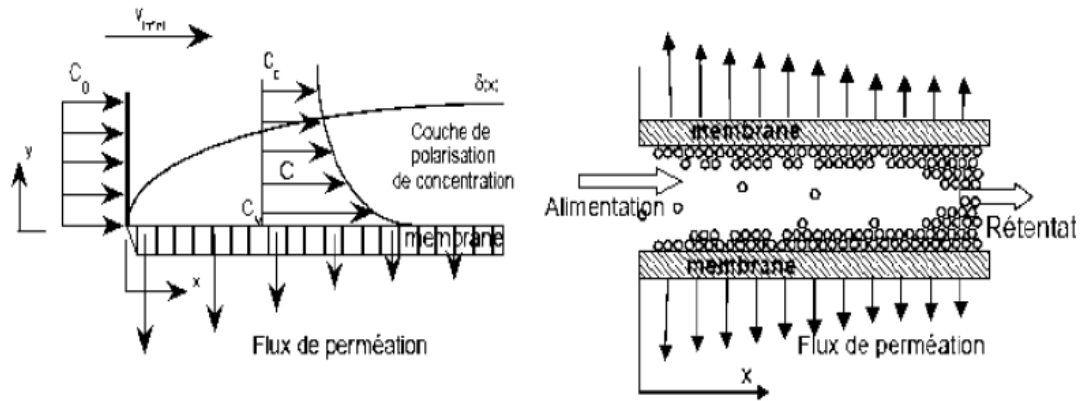


Figure I.9. Représentation schématique de l'évolution du profil de concentration et de l'accumulation de matière le long d'une membrane. (Zaamouche et al., 2010)

Ce bilan est décrit par :

$$U \cdot C_p = U \cdot C + D \frac{dC}{dy} \quad (I.7)$$

Le modèle classique de polarisation de gel postule une concentration constante (C_g) dans la couche gélifiée. Les conditions aux limites à l'équilibre s'écrivent alors :

$$\begin{cases} y = 0 \text{ (surface membranaire)} \rightarrow C = C_g \\ y = \delta \text{ (surface de la couche)} \rightarrow C = C_0 \end{cases}$$

En intégrant l'équation (I.5) sur l'épaisseur δ_p de la couche polarisée, on obtient :

$$U = k \ln \left(\frac{C_g - C_p}{C_0 - C_p} \right) \quad (I.8)$$

Où :

- U : Flux de perméat à travers la membrane [m/s].
- C_p, C_0, C_g : Concentration de perméat, alimentation et couche de gel [mol/m³].
- D : Coefficient de diffusion [m²/s].
- $k = \frac{D}{\delta_p}$: Coefficient de transfert de masse [m/s].
- δ_p : Épaisseur de la couche polarisée [m].

Si $C_p \rightarrow 0$ (perméat dilué), l'équation (I.8) se simplifie en :

$$U = k \ln \left(\frac{C_g}{C_0} \right) \quad (\text{I.9})$$

Cette relation montre que le flux de solvant (eau) dépend uniquement de D , C_g et δ_p , soulignant l'impact de la couche polarisée sur les performances. Cette équation est couramment utilisée pour modéliser les flux en ultrafiltration, notamment dans l'optimisation de procédés industriels (ex. : purification de protéines, traitement de lactosérum). (Zaamouche et al., 2010)

I.6.2. Modèle de résistance

Dans le cadre de la loi de Darcy, le colmatage membranaire et la couche de gâteau peuvent être modélisés comme deux résistances hydrauliques en série. Le flux de perméat (U) est alors déterminé par la pression transmembranaire effective (P) et la résistance totale (R_t), selon l'équation :

$$U = \frac{P}{\mu R_t} = \frac{P}{\mu(R_m + R_c)} \quad (\text{I.10})$$

Où :

- U : Débit volumique spécifique [$\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$].
- P : Pression appliquée [Pa].
- μ : Viscosité dynamique du filtrat [Pa.s].
- $R_t = R_m + R_c$: Résistance totale [m^{-1}], composée de :
 - R_m : Résistance intrinsèque de la membrane (incluant les effets de colmatage).
 - R_c : Résistance induite par le gâteau (accumulation de particules en surface).

Cette approche permet d'isoler les contributions respectives de la membrane et du gâteau à la perte de perméabilité, offrant un cadre théorique pour optimiser les cycles de nettoyage ou ajuster les paramètres opératoires (ex. : pression, viscosité) en fonction des spécificités du fluide traité. (Iritani., 2013)

I.6.3. Modèle de croissance de gel

La résistance du gel (R_g) peut être modélisée comme le produit de la résistance spécifique du dépôt (\tilde{R}_g) et de l'épaisseur de la couche gélifiée (l) :

$$R_g = \tilde{R}_g l \quad (\text{I.11})$$

Où :

- \tilde{R}_g : est la résistance spécifique du dépôt.
- l : est l'épaisseur de la couche gel.

La cinétique d'épaississement du gel en filtration frontale est décrite par :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_g - \varepsilon_0} U_P \quad (\text{I.12})$$

Avec :

- ε_0 : Fraction volumique en solide dans la solution d'alimentation
- ε_g : Fraction volumique en solide dans le gel formé
- U_P : Flux de perméat
- t : Temps

Ce modèle, dédié à l'ultrafiltration dynamique frontale, suppose que ε_0 et ε_g restent constants. L'équation (I.12) prédit une croissance progressive de l'épaisseur du gel, entraînant une réduction drastique du flux de perméat jusqu'à des valeurs quasi négligeables à l'état stationnaire. (Zaamouche el al., 2010)

En filtration tangentielle, le comportement diffère : des études ont démontré une augmentation du flux de perméat avec le cisaillement hydrodynamique, liée à une réduction de l'épaisseur du gel. Certains chercheurs attribuent ce phénomène à un équilibre dynamique entre le dépôt des particules et l'érosion induite par l'écoulement tangentiel. Pour intégrer l'effet de la vitesse d'alimentation, un terme γ (fraction de particules atteignant la membrane) est introduit dans (I.12) :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\varepsilon_0 U_P}{\varepsilon_g - \varepsilon_0} \gamma \quad (\text{I.13})$$

Où γ est la fraction des particules transportées vers la surface de la membrane. Le terme γ , qui décroît jusqu'à s'annuler à l'équilibre, a été caractérisé par Stamatakis et Chi via l'analyse des forces s'exerçant sur une particule sphérique à l'interface gel-solution. Leurs travaux, alignés avec les données expérimentales de Murkes et Carlson, ont permis de prédire les flux en régime tangentiel. Par ailleurs, Makley et Sherman ont quantifié γ en mesurant l'angle des trajectoires particulières près du gel, confirmant expérimentalement que des vitesses tangentielles élevées réduisent l'épaisseur du gel, optimisant ainsi les performances de filtration. (Zaamouche et al., 2010)

I.6.4. Modèle d'adsorption

Le modèle d'adsorption postule que la réduction du flux résulte d'une restriction des pores durant la filtration, exprimée par :

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{(r_0 - \Delta r)^4}{r_0^4} \quad (\text{I.14})$$

Où :

- U_1 : Flux de l'eau pure de la membrane colmatée
- U_0 : Flux de l'eau pure de la membrane propre
- r_0 : Rayon de pore de la membrane propre
- Δr : Diminution de rayon de pore

Cette équation, dérivée de la loi de Hagen-Poiseuille, lie directement la diminution du diamètre des pores à l'accumulation de solutés adsorbés.

Gekas et al ont proposé une approche alternative pour modéliser l'adsorption-polarisation en ultrafiltration frontale. Leur modèle intègre les effets de colmatage par adsorption dans l'équation générale de diffusion, en utilisant des membranes planes. Ce mécanisme, dépendant du temps, s'applique particulièrement à l'ultrafiltration de protéines.

Leurs travaux permettent de dissocier les contributions respectives de la polarisation de concentration et de l'adsorption sur la décroissance du flux, bien que l'impact de la vitesse tangentielle n'ait été exploré qu'indirectement via des ajustements du coefficient de transfert de masse. (Gekas et al.,1993)

Doshi a développé un modèle pour des systèmes statiques (sans agitation), visant à identifier les facteurs limitants du flux lors de l'ultrafiltration de macromolécules. Ses résultats soulignent l'importance de l'adsorption et de la polarisation dans des conditions hydrodynamiques minimales. (Zaamouche et al., 2010)

Enfin, Bentrchia et Drew ont analysé le profil de vitesse axiale le long d'un canal de filtration, révélant que pour des membranes hautement poreuses, la pression, la vitesse d'alimentation et l'épaisseur de la couche colmatante décroissent de manière exponentielle le long du canal. Cette observation fournit une explication hydrodynamique aux phénomènes couramment observés en microfiltration, comme la formation asymétrique de dépôts ou l'évolution temporelle des performances. (Bentrchia et al.,1990)

I.7. Colmatage

L'efficacité des procédés de filtration membranaire est fortement compromise par l'encrassement, un phénomène inévitable où les substances retenues s'accumulent progressivement sur ou dans la membrane, générant une résistance hydraulique accrue et une baisse du flux de perméat, ce qui dégrade la productivité du système (Bacchin., 2005). Ce phénomène se traduit par :

- La formation d'une couche obstructive en surface, altérant la sélectivité membranaire.
- Le blocage partiel ou total des pores, réduisant la perméabilité.
- L'adsorption de composés (sur les parois internes des pores pour les membranes à larges pores).

Les agents responsables de l'encrassement sont variés : macromolécules organiques (protéines, polysaccharides), substances dissoutes (sels, acides humiques), particules colloïdales (argiles, silices), suspensions solides (microplastiques) et microorganismes

(biofilms bactériens). (Ciobanu et al., 2006)

Pour préserver les performances, des stratégies de contrôle (nettoyages chimiques, hydrodynamique optimisée, prétraitements) sont essentielles, notamment dans des secteurs critiques comme le traitement de l'eau, la pharmaceutique ou les biotechnologies. L'encrassement reste ainsi un enjeu central pour l'industrialisation durable des technologies membranaires, nécessitant une approche intégrée allant de la conception des matériaux à l'optimisation des procédés. (Ciobanu et al., 2006)

I.7.1. Modélisation de colmatage

Le colmatage membranaire constitue une problématique centrale dans les procédés de filtration, résultant de l'accumulation de dépôts à la surface ou dans les pores de la membrane. Lorsqu'un système opère à pression transmembranaire constante, l'effet le plus critique est le déclin continu du flux de perméat, compromettant l'efficacité opérationnelle. Les autres impacts incluent :

- Réduction de la durabilité des membranes, nécessitant des remplacements prématurés.
- Nettoyages fréquents, augmentant la consommation de réactifs chimiques et l'empreinte environnementale.
- Surcoûts énergétiques pour compenser la perte de perméabilité.

Ces contraintes soulignent l'importance de stratégies préventives pour limiter l'encrassement, notamment dans des secteurs comme le traitement de l'eau ou la production pharmaceutique (Ciobanu et al., 2006).

En filtration frontale à pression constante, l'influence des mécanismes d'encrassement sur le flux est analysée via une relation temporelle proposée par Hermans et Bredée (1935) :

$$\frac{dt}{dv} = \frac{1}{U_p \cdot S} \quad (\text{I.15})$$

$$\frac{dt}{dv} = - \frac{1}{U_P \cdot S} \frac{dt}{dv} \quad (\text{I.16})$$

Où :

- U_P : Flux de perméat [$\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$].
- S : Surface active de la membrane [m^2].

Ces équations permettent de quantifier la cinétique d'encrassement et d'ajuster les paramètres opératoires pour optimiser les cycles de filtration. (Gaveau., 2016)

I.7.2. Les types de colmatages

I.7.2.1. Polarisation de concentration

La polarisation concentrationnelle est un phénomène critique affectant l'efficacité des procédés de séparation membranaire. Elle résulte de l'accumulation des espèces retenues et de l'appauvrissement des composés perméants au voisinage immédiat de la membrane, créant un gradient de concentration au sein d'une couche limite. Ce gradient réduit le potentiel de transfert des espèces perméables tout en l'amplifiant pour les moins perméables, dégradant ainsi la performance globale du système. Dans les procédés liquides, cette polarisation peut déclencher un encrassement accéléré via la précipitation ou la gélification des solutés en surface, limitant drastiquement flux et sélectivité. (Bhattacharya et al., 1997)

Les illustrations (I.10) et (I.11) décrivent respectivement les profils de concentration des composés perméants et retenus dans la couche limite. La polarisation s'aligne en opposition au flux global, suivant son propre gradient. Toutefois, dans des cas comme la pervaporation de composés organiques volatils (COV), où le soluté est enrichi dans le perméat, sa concentration membranaire peut être bien inférieure à celle du fluide d'alimentation, tandis que celle du solvant reste homogène, sans gradient marqué. (Bhattacharya et al., 1997)

Ce déséquilibre génère un flux de rétrodiffusion des solutés, antagoniste au flux convectif induit par la pression transmembranaire. À l'équilibre, ces flux opposés stabilisent un profil de concentration nommé couche de polarisation, réversible dès que la pression est interrompue. Cette réversibilité distingue la polarisation de l'encrassement irréversible, offrant une marge

de manœuvre pour optimiser les cycles de filtration. (Gaveau., 2016)

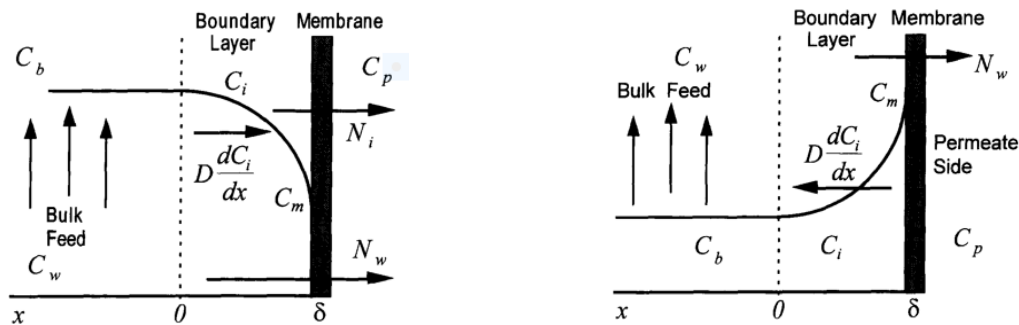


Figure I.10. Profil de concentration du composant à pénétration préférentielle dans des conditions d'état d'équilibre et d'état stable. (Bhattacharya et al., 1997)

I.7.2.2. Adsorption

L'adsorption de substances dissoutes sur les membranes résulte de forces intermoléculaires (ioniques, hydrophobes) entre les composés et le matériau. Dans les eaux naturelles, des matières organiques comme les acides humiques se fixent préférentiellement à la surface ou dans les pores membranaires. Pour ces composés, les interactions hydrophobes dominent, notamment lorsque la membrane est constituée de polymères hydrophobes (ex. : polyéthersulfone, polypropylène). L'hydrophobicité du matériau membranaire amplifie ce phénomène, favorisant l'adsorption même à faible concentration. Ce mécanisme impacte toutes les technologies membranaires, de la microfiltration à l'osmose inverse. (Collet., 2013)

Parallèlement, la polarisation de concentration dégrade systématiquement l'efficacité de l'ultrafiltration en réduisant le gradient de pression effectif, notamment en augmentant la pression osmotique de rétrodiffusion à l'interface membrane-fluide. Au-delà d'un seuil critique, une couche gélifiée peut se former en surface, réduisant drastiquement le flux et la sélectivité. Cette couche, résultant de l'aggrégation de solutés à haute concentration, agit comme une barrière dynamique nécessitant des stratégies de contrôle (ex. : cisaillement tangentiel, lavages chimiques) pour restaurer les performances. (Doshi et al., 1985)

I.7.2.3. Modèle de filtration sur gâteau

En raison de l'architecture asymétrique de la membrane, l'obstruction des pores se limite à sa couche sélective superficielle, minimisant ainsi son impact sur la résistance hydraulique globale. La résistance provient principalement du dépôt de nanoparticules en surface, formant

un gâteau de filtration qui réduit progressivement le flux de perméat. Ce phénomène est modélisé par l'équation :

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot (R_m + R_c)} \quad (I.18)$$

Où :

- μ : Viscosité dynamique du fluide [Pa·s].
- R_m : La résistance de la membrane [m^{-1}].
- R_c : La résistance accrue produite par la profondeur des nanoparticules sur la membrane [m^{-1}] sous vide la grille, exprimée comme : $R_c = \alpha \frac{m_p}{S}$

Avec :

- α : La résistance spécifique du gâteau [m/kg], dépendante de la taille et de la compressibilité des particules.
- m_p : La masse du gâteau de filtration déposé à la surface de la membrane [kg].
- S : La surface de la membrane [m^2].

Le gâteau, plus ou moins poreux selon la granulométrie, agit comme une membrane secondaire. Sa résistance est proportionnelle à la masse de dépôt, selon :

$$R_c = \alpha \times M \quad (I.19)$$

Où M représente la masse déposée par unité de volume de perméat [$kg \cdot m^{-3}$].

La résistance spécifique α dépend de la pression appliquée (ΔP) par un facteur de compressibilité (n) :

$$\alpha = \alpha_0 \times \Delta P^n \quad (I.20)$$

Avec :

- α_0 : constante.
- n : Coefficient de compressibilité (sans dimension).
- ΔP : pression [Pa].

Ces mécanismes (blocage de pores et filtration sur gâteau) concernent principalement les membranes poreuses utilisées en microfiltration et ultrafiltration, où la structuration du gâteau influence directement les performances. (Collet., 2013)

I.7.2.4. Blocage de pores

L'obstruction porale survient lorsque des substances de taille comparable aux pores membranaires s'infiltrant dans leur structure, réduisant drastiquement les flux locaux et provoquant un encrassement accru. Dans le contexte de la filtration frontale, les travaux de Hermans et Bredee (1936) ont défini plusieurs mécanismes d'obstruction, classés en quatre étapes successives :

- Blocage complet (obstruction totale des pores).
- Blocage standard (adhésion partielle en surface).
- Blocage intermédiaire (combinaison de dépôts superficiels et internes).
- Filtration sur gâteau (formation d'une couche externe).

Ces mécanismes, résumés dans le Tableau I.1 illustrent l'évolution de l'encrassement, depuis l'interaction initiale entre particules et pores jusqu'à la stabilisation d'un dépôt structuré. Cette modélisation reste une référence pour comprendre la dynamique des pertes de perméabilité dans les systèmes membranaires. (Collet., 2013)

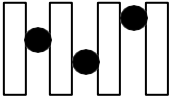
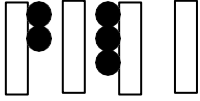
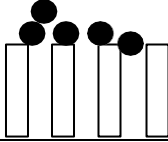
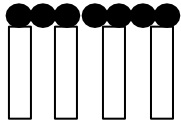
Modèle	Représentation	Phénomène	Equation
Blocage complet		La taille des particules est égale à la taille des pores	$V = J_0 \times (1 - \exp(-k \times t))$ k : constante de filtration du blocage complet
Blocage standard		La taille des particules est légèrement inférieure à celle des pores. Elles passent à travers les pores.	$\frac{t}{V} = \frac{k}{2} \times t + \frac{1}{J_0}$ k : constante de filtration du blocage standard
Blocage intermédiaire		Les particules bouchent les pores et s'accumulent sur d'autres particules. C'est le phénomène d'adsorption.	$k \times V = \ln(1 + (k \times t \times J_0))$ k : constante de filtration du blocage intermédiaire
Filtration sur gâteau		La taille des particules est supérieure à la taille des pores. Elles se déposent à la surface de la membrane.	$\frac{t}{V} = \frac{k}{2} \times V + \frac{1}{J_0}$ k : constante de filtration du gâteau

Tableau I.1. Lois de filtration frontale décrivant les différents mécanismes de colmatage.
(Collet., 2013)

Ces différents modèles proviennent d'une seule expression mathématique Hermia (1982)

$$\frac{dt}{dv} = k \left(\frac{dt}{dv} \right)^x \quad (I.17)$$

Où :

- x : L'indice de blocage de pore.
- k : Le coefficient de résistance (unité dépendant de l'indice x).

Selon la valeur de x , le colmatage est dirigé par un type de mécanisme.

- $x = 2$: blocage complet.
- $x = 1,5$: blocage standard.
- $x = 1$: blocage intermédiaire.
- $x = 0$: filtration sur gâteau.

Les lois de blocage complet et intermédiaire caractérisent l'obstruction porale par des particules atteignant l'entrée des pores, tandis que la loi de blocage standard décrit leur constriction progressive via l'accumulation de dépôts sur les parois. Ces quatre mécanismes d'encrassement peuvent être unifiés sous une équation différentielle générique, distincte par ses exposants caractéristiques. Bien que conceptualisées dès les années 1930, ces lois restent des outils privilégiés pour évaluer l'augmentation de la résistance hydraulique lors du traitement de suspensions, même diluées. Aujourd'hui, elles s'étendent à l'analyse des baisses de flux dans des procédés membranaires comme la microfiltration et l'ultrafiltration. (Iritani et al., 2016)

Application aux modèles d'encrassement

1. Blocage complet : Une particule obstrue totalement un pore.
2. Blocage standard : Rétrécissement progressif des pores par adhésion de dépôts.
3. Blocage intermédiaire : Combinaison d'obstruction totale et partielle.
4. Filtration sur gâteau : Formation d'une couche externe de particules.

Ces lois supposent une membrane idéalisée avec des pores parallèles, de diamètre et longueur constants. Pour les particules plus grosses que les pores, les lois de blocage complet et intermédiaire s'appliquent : chaque particule interceptée obstrue irréversiblement un pore. Cependant, le blocage standard intègre une probabilité constante de dépôt en surface, indépendamment des pores, conduisant à une proportionnalité directe entre le volume de perméat (ϑ) et le nombre de pores obstrués. Cette modélisation simplifiée permet de prédire l'évolution de la perméabilité dans des systèmes réels. (Iritani et al., 2016)

I.7.2.5. Colmatage réversible et irréversible

Le colmatage réversible se produit lorsque des matériaux encrassants se fixent de manière lâche sur les surfaces de la membrane et peuvent être éliminés par des méthodes de nettoyage physique, telles que la relaxation, une forte force de cisaillement ou le rétrolavage. Ce type d'encrassement est également qualifié d'"amovible" ou "temporaire". En général, l'accumulation de biosolides, qui entraîne la formation d'une couche de gâteau, est considérée comme le principal facteur à l'origine du colmatage réversible. Dans le cadre d'une exploitation

à long terme, la prévalence de l'encrassement réversible peut résulter d'une mauvaise filtrabilité des boues ou d'une faible efficacité des méthodes de nettoyage physique. Dans ces cas, il est nécessaire d'appliquer des techniques de nettoyage physique améliorées pour traiter l'encrassement réversible accumulé sur une longue période (Wang et al., 2014).

Le colmatage irréversible, quant à lui, résulte de la formation d'une matrice solide d'encrassement avec des solutés au cours d'une filtration continue, entraînant la transformation de l'encrassement réversible en une couche d'encrassement irréversible, comme dans le cas de la formation d'une couche de gel sous un fonctionnement prolongé à flux sous-critique. Le rétrécissement ou le blocage des pores est également moins réversible et est considéré comme un autre type d'encrassement irréversible. Selon la définition classique, l'encrassement irréversible ne peut pas être éliminé par des méthodes de nettoyage physique et est souvent désigné comme encrassement physiquement irréversible. Des méthodes de nettoyage biologique ont déjà été suggérées par la communauté de recherche universitaire. Ainsi, l'encrassement irréversible peut également être classé en deux catégories : l'encrassement physiquement irréversible et l'encrassement biologiquement irréversible (Wang et al., 2014).

I.8. Techniques de contrôle du colmatage

Pour limiter l'encrassement membranaire et maximiser leur durabilité, différentes stratégies de contrôle sont déployées. Ces méthodes visent à prévenir l'accumulation de dépôts en surface ou à éliminer les contaminants déjà fixés, via des approches telles que :

I.8.1. Prétraitement

Le prétraitement de l'alimentation est essentiel pour éliminer les particules et les contaminants susceptibles de provoquer le colmatage. Pour cela, des méthodes telles que la filtration, la coagulation et la floculation peuvent être mises en œuvre (Tansakul., 2009).

I.8.2. Nettoyage des membranes

L'entretien régulier des membranes est crucial pour assurer l'élimination des résidus accumulés en surface ou dans les pores. Ce processus mobilise des méthodes variées, incluant des agents chimiques et des techniques physiques, adaptées à la nature des dépôts et au type de membrane. Ces approches permettent de restaurer les performances initiales et de préserver la longévité opérationnelle du système.

I.8.2.1. Décolmatage physique

Le nettoyage physique consiste généralement à rincer à l'eau, en utilisant l'écoulement pour décoller les dépôts de particules par filtration. Cependant, cette méthode est peu efficace, notamment contre le colmatage irréversible. L'efficacité du décolmatage physique peut être augmentée lorsqu'il est possible d'y recourir. En effet, l'utilisation d'un écoulement diphasique, c'est-à-dire l'injection d'air dans l'eau à l'aide d'un compresseur, accroît considérablement les contraintes sur les parois, facilitant ainsi le décollement des dépôts accumulés. (Mission., 2024)

I.8.2.2. Nettoyage chimique

Le nettoyage chimique devient indispensable lorsque les autres méthodes s'avèrent inefficaces, notamment avec des fluides très colmatants comme ceux utilisés dans l'industrie alimentaire (protéines, lait, etc.). Ce nettoyage se fait généralement avec des solutions détergentes adaptées :

- Acides : pour éliminer les dépôts minéraux,
- Alcalins : efficaces contre les composés organiques tels que les graisses et les protéines,
- Enzymatiques : recommandés pour des membranes sensibles aux produits chimiques, comme celles en acétate de cellulose, ou lorsque le nettoyage chimique classique ne parvient pas à éliminer les dépôts, en particulier les protéines.

Ces détergents enzymatiques sont souvent utilisés en milieu industriel face aux cas de colmatage tenace. (Mission., 2024)

I.8.3. Contrôle du flux

La régulation du débit d'alimentation à travers la membrane constitue une stratégie clé pour limiter le colmatage. Une augmentation de la vitesse du fluide génère des forces de cisaillement accrues, réduisant ainsi l'adhérence des solutés à la surface membranaire et atténuant la formation d'une couche gélifiée. Cette approche hydrodynamique optimisée permet de maintenir un flux de perméat stable tout en prolongeant la durée de vie des membranes. (Mission., 2024)

I.8.4. Rétrolavage

Le rétro-lavage (backwash) consiste à inverser temporairement le sens de l'écoulement,

en réinjectant le perméat vers le compartiment de rétentat. Cette technique permet de déloger les dépôts accumulés en surface ou dans les pores, améliorant ainsi la perméabilité. Néanmoins, contrairement à un rinçage classique, elle implique une surconsommation énergétique et mobilise une partie du perméat produit, réduisant la rentabilité globale du procédé. De plus, la pression exercée pendant le rétro-lavage peut endommager la couche sélective des membranes fragiles, notamment les membranes composites en polymère, limitant son applicabilité à certains matériaux. (Mission.,2024)

I.9. Conclusion

La filtration membranaire constitue une méthode performante de séparation, alliant sécurité d'utilisation et simplicité opérationnelle. Cependant, sa conception et son optimisation requièrent une approche rigoureuse, notamment en raison du phénomène de colmatage, un défi majeur, difficile à prévenir, contrôler ou modéliser. Pour maximiser son potentiel industriel, une stratégie éprouvée repose sur une démarche itérative, associant expérimentations multi-échelles (laboratoire → pilote → industriel) et expertises pluridisciplinaires (mécanique des fluides, science des matériaux, chimie des surfaces). Cette synergie entre pratique et théorie permet de décrypter les mécanismes de transfert à l'œuvre et d'adapter les procédés aux contraintes réelles. (Bacchin., 2005)

Chapitre II

MODELES MATHEMATIQUES ET SIMULATION

II.1. Introduction

La dynamique numérique des fluides (CFD) est une discipline utilisant des ordinateurs puissants et des mathématiques appliquées pour modéliser les écoulements de fluides. Son succès est mesuré par sa capacité à reproduire les résultats d'expériences en laboratoire et à prédire des phénomènes complexes non isolables en laboratoire. Depuis les années 1960, la CFD a connu une croissance significative, devenant un élément clé dans la conception et l'analyse technique, permettant de prédire les performances de nouvelles conceptions ou processus avant leur réalisation physique. Elle est largement utilisée par les chercheurs, concepteurs et ingénieurs pour analyser divers équipements de procédé et résoudre des problèmes allant du transfert de chaleur à la réaction chimique, en passant par le mouvement mécanique et la déformation des structures solides. De plus, la CFD est également appliquée dans les domaines de l'environnement et de l'architecture. (Xia et al., 2002)

II.2. Avantages de l'utilisation des CFD

La CFD a considérablement évolué, passant d'une simple curiosité mathématique à un outil indispensable dans diverses branches de la dynamique des fluides. Il permet un examen approfondi de la mécanique des fluides et des effets localisés dans divers équipements. Les résultats des analyses CFD donnent souvent lieu à des performances améliorées, une fiabilité accrue, une confiance accrue dans les procédures de mise à l'échelle, une uniformité améliorée des produits et une productivité accrue de l'usine. En fait, certains ingénieurs concepteurs utilisent la CFD pour évaluer de nouveaux systèmes, déterminant ainsi la nécessité et l'étendue des tests de validation requis. Les avantages du CFD peuvent être décrits comme suit :

1. **Aperçu détaillé :** CFD offre des informations complètes sur la distribution des débits, les pertes de charge, le transfert de masse et de chaleur, la séparation des particules, etc., offrant ainsi aux responsables d'usine une compréhension plus approfondie des processus ou systèmes spécifiques.
2. **Efficacité en termes de coût et de temps :** il permet une évaluation rapide des modifications géométriques pour une fraction du temps et du coût impliqués dans les tests de laboratoire traditionnels.
3. **Analyse de scénarios :** CFD aborde rapidement de nombreux scénarios hypothétiques, facilitant ainsi la prise de décision agile.

4. Facilitation de la mise à l'échelle : en étant fondée sur la physique fondamentale et indépendante de l'échelle, la CFD minimise les défis de mise à l'échelle.
5. Simulation de conditions difficiles : Particulièrement utile pour simuler des environnements où des mesures détaillées ne sont pas pratiques, tels que des environnements à haute température ou des conditions dangereuses dans les fours.
6. Identification des causes profondes : en tant qu'outil d'analyse et de conception proactif, CFD identifie non seulement les effets, mais met également en lumière les causes profondes lors du dépannage des problèmes de l'usine.

De plus, dans le domaine de la transformation alimentaire, où des opérations telles que la réfrigération, le séchage, la cuisson, le mélange, la congélation, la cuisson, la pasteurisation et la stérilisation dépendent fortement du flux de fluide, l'intégration des méthodologies CFD a révolutionné l'industrie. Les ingénieurs agroalimentaires acquièrent désormais des informations inestimables pendant la phase de conception, renforçant ainsi la confiance dans la qualité et la sécurité des produits alimentaires. Les équipements tels que les fours, les échangeurs de chaleur, les vitrines réfrigérées et les séchoirs par pulvérisation ont subi des améliorations substantielles grâce à des analyses basées sur CFD, optimisant leur efficacité opérationnelle et leurs processus de conception. Ainsi, le CFD est devenu un allié puissant dans le développement, le dépannage et l'optimisation des opérations de transformation alimentaire. (Xia et al., 2002)

II.3. Qu'est-ce qu'un fluide?

Les solides se distinguent des fluides par leur capacité à résister aux contraintes de cisaillement sans déformation permanente, tandis que les fluides (liquides et gaz) se déforment continuellement sous l'effet de ces forces. Les liquides, caractérisés par des molécules liées par des forces de cohésion élevées, conservent un volume fixe. À l'inverse, les gaz, aux interactions moléculaires négligeables, n'ont pas de volume défini et se dilatent librement. Certains matériaux, comme le bitume ou le plomb, présentent un comportement hybride : apparemment solides au repos, ils se déforment progressivement sous contrainte, révélant une nature fluide. D'autres substances, telles que les colloïdes ou les boues, résistent à de faibles contraintes mais s'écoulent comme des fluides lorsque la force appliquée dépasse un seuil critique. La distinction entre liquide et gaz devient floue au-delà du point critique (température et pression élevées), où le fluide adopte une phase supercritique unique, semblable à un gaz dense. Dans

ce régime, les modèles classiques (ex. : loi des gaz parfaits) ne s'appliquent plus, nécessitant des approches thermodynamiques complexes (Ang et al., 2021).

II.4. Nature de l'écoulement

Lors de l'étude et de la caractérisation d'un écoulement, il est commun d'utiliser un nombre adimensionnel qui fait le rapport entre les forces visqueuses et les forces d'inertie agissant sur le fluide. Ce nombre est appelé le nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds a une importance fondamentale en mécanique des fluides puisqu'il permet de caractériser le régime de l'écoulement considéré. (Payette., 2008)

Le nombre de Reynolds caractérise la nature turbulente d'un écoulement. En particulier la nature du régime : laminaire, transitoire, turbulent. Il représente entre forces d'inertie et forces visqueuses, ou le rapport (qualitatif) du transfert par advection et du transfert par diffusion de la quantité de mouvement (Isambert., 2007) :

$$Re = \frac{VL_c}{\vartheta} \quad (\text{II.1})$$

Où :

- V : vitesse caractéristique du fluide [m.s^{-1}] (vitesse à distance de la paroi).
- L_c : dimension caractéristique de l'écoulement [m] (longueur de la plaque, diamètre intérieur du tube, diamètre extérieur du cylindre, etc.).
- $\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$: viscosité cinématique du fluide [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$].
- ρ : masse volumique du fluide [kg m^{-3}].
- μ : viscosité dynamique du fluide [Pa.s ou $\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$] ou poiseuille Pl, ou encore un dixième de poise Po.

II.4.1. Écoulement laminaire

Lorsque le nombre de Reynolds (Re) est faible, les forces inertielles deviennent négligeables face aux forces visqueuses, dominantes dans ce régime. Pour des valeurs extrêmement basses de Re , ces forces inertielles peuvent même être ignorées, conduisant à un écoulement laminaire caractérisé par sa stabilité et sa réversibilité (si $Re < 2000$). Dans ce cas, la structure de l'écoulement, dictée par la viscosité, reste inchangée même en inversant le sens du fluide. Cependant, pour un Re situé entre 2000 et 3000, bien que l'écoulement demeure laminaire, il perd sa réversibilité : un renversement du flux ne permet pas aux particules fluides de retrouver leurs positions initiales. Cette transition marque une sensibilité accrue aux perturbations, bien que les turbulences restent absentes. (Ryhming et al., 2004)

II.4.2. Écoulement turbulent

Lorsque les paramètres dépassent le seuil de 3000, le fluide adopte un régime turbulent. Ce phénomène physico-dynamique émerge de la prédominance des forces inertielles sur les forces visqueuses, induisant des altérations structurelles majeures et irréversibles au sein du milieu. Les substances à faible viscosité en mouvement rapide, telles que le flux aérien dans les conduits de ventilation ou la circulation hydraulique dans les installations de chauffage et de refroidissement, présentent typiquement ce comportement tourbillonnaire. (Ryhming et al., 2004)

II.5. Les équations physiques utilisées dans la modélisation numérique

II.5.1. L'équation de conservation de la masse

L'équation de la conservation de masse est l'une des équations primordiales dans la résolution numérique de tous les types de problèmes de la mécanique des fluides. (Bouebdelli.,2020)

Lorsqu'un élément matériel se déplace, sa masse reste constante mais son volume peut changer au cours du temps. La densité peut donc varier, et dépend du champ de mouvement. L'équation permettant de relier la variation de densité et le champ de mouvement est l'équation de continuité, ou ECM (Equation de conservation de la Masse). Considérons un volume géométrique fixe, traversé par le fluide en mouvement : en faisant le bilan des masses entrante

et sortante sur les faces opposées, on peut écrire la variation de masse par unité de volume (Isambert., 2007) :

$$-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} = -\nabla \cdot (\rho V) = -div(\rho V) \quad (II.2)$$

Avec :

- V : la vitesse du fluide.
- ρ : la masse volumique du fluide.

On en déduit l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho v) = 0 \quad (II.3)$$

En développant l'opérateur de divergence, l'équation (II.3) s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho div V + \nabla \rho \cdot V = 0 \quad (II.4)$$

Si le fluide est incompressible, la divergence du champ de vitesse est nulle et l'équation de continuité (II.3) s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \cdot V = 0 \quad (II.5)$$

Soit encore, en utilisant la formule de la dérivée particulaire en variables d'Euler :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (II.6)$$

II.5.2. L'équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement est l'expression de la seconde loi de Newton, appliquée à un élément de volume matériel : la somme des forces extérieures est égale au produit de la masse par l'accélération. Les principales forces sont les forces de pression

et la champ gravitationnel, qui est le gradient du potentiel gravitationnel Φ_v . La résultante de ces deux forces pour une unité de masse s'écrit (Isambert., 2007) :

$$-\frac{1}{\rho}\nabla\rho - \nabla\Phi_v \quad (\text{II.7})$$

La conservation de la quantité de mouvement est donc :

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla\rho - \nabla\Phi_v \quad (\text{II.8})$$

La vitesse est mesurée relativement à un repère fixe. En géophysique, la position x et la vitesse V sont mesurées relativement à un repère tournant car la Terre est en rotation. L'équation (II.8) s'écrit alors :

$$\frac{dV}{dt} + 2\Omega \times V = -\frac{1}{\rho}\nabla\rho - \nabla\Phi \quad (\text{II.9})$$

Ou Ω est la vitesse angulaire du repère tournant. Le géopotential Φ est défini comme la somme du potentiel gravitationnel et d'un potentiel centrifuge :

$$\Phi = \Phi_v - \frac{1}{\rho}\Omega^2(x^2 + y^2) \quad (\text{II.10})$$

En développant l'équation (II.9) pour chacune des composantes de V , on a :

$$\frac{du}{dt} + \nabla \cdot (\rho u V) + 2\Omega_y \rho w - 2\Omega_z \rho v = -\frac{dp}{dx} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{dv}{dt} + \nabla \cdot (\rho v V) + 2\Omega_z \rho u - 2\Omega_y \rho w = -\frac{dp}{dy} \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{dw}{dt} + \nabla \cdot (\rho w V) + 2\Omega_z \rho v - 2\Omega_y \rho u = -\frac{dp}{dz} - \rho g \quad (\text{II.13})$$

Le repère 3D est choisi tel que l'axe z pointe dans la direction verticale haute, c'est-à-dire dans la direction de $-g$. La force gravitationnelle $-g$ est définie par :

$$g = \nabla\Phi \quad (\text{II.14})$$

En ignorant les changements de viscosité et la compressibilité, l'accélération fait

intervenir le flux diffusif $\nu \Delta V$. Les équations (II.11), (II.12), (II.13) s'écrivent alors :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(\rho u V - \mu \nabla u) + 2\Omega_y \rho w - 2\Omega_z \rho v = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla(\rho v V - \mu \nabla v) + 2\Omega_z \rho u - 2\Omega_y \rho w = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla(\rho w V - \mu \nabla w) + 2\Omega_x \rho v - 2\Omega_z \rho u = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad (\text{II.17})$$

En considérant μ constante, l'équation de conservation de la quantité de mouvement devient :

$$\frac{dV}{dt} + 2\Omega \times V = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g + \nu \Delta V \quad (\text{II.18})$$

Où $\nu = \mu/\rho$ est la viscosité cinématique du fluide.

II.5.2.1. Équations de Navier-Stokes

Fondement théorique de la mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes représentent un système d'équations aux dérivées partielles non linéaires modélisant la dynamique des écoulements. Ces relations mathématiques, issues des travaux pionniers de Leonhard Euler (1707-1783) sur les fluides non visqueux, furent ultérieurement perfectionnées par Claude-Louis Navier (1785-1836) et George Stokes (1819-1903) grâce à l'introduction d'un terme traduisant les effets de viscosité. (Schneiderbauer et al., 2013)

Initialement, Euler conceptualisa le fluide comme un milieu continu, posant ainsi les bases des premières équations différentielles gouvernant les écoulements idéaux. Cette approche novatrice marqua l'émergence des équations d'Euler, considérées comme les prémices des modélisations par dérivées partielles non linéaires en physique des fluides. Les contributions ultérieures de Navier et Stokes intégrèrent un paramètre de diffusion visqueuse, généralisant ces équations aux fluides réels. (Schneiderbauer et al., 2013)

Bien que ces équations constituent un outil indispensable en ingénierie et en sciences appliquées – avec des applications allant de l'aérodynamique des véhicules à l'optimisation des systèmes de filtration, en passant par l'étude des courants marins ou la modélisation des

transferts de polluants – leur complexité analytique limite leur résolution à des méthodes numériques avancées. Notons que la démonstration rigoureuse de l'existence de solutions globales reste à ce jour un problème ouvert, classé parmi les défis du Prix du Millénaire. (Schneiderbauer et al., 2013)

Leur absence dans les programmes secondaires s'explique par leur caractère mathématiquement exigeant, combinant non-linéarités et dérivées d'ordre supérieur. Toutefois, une initiation progressive à la mécanique des fluides pourrait s'appuyer sur l'enseignement des lois de conservation (masse, énergie) et des principes newtoniens, permettant in fine de reconstruire pas à pas ces équations constitutives. Cette démarche pédagogique favoriserait une compréhension holistique des phénomènes d'écoulement tout en soulignant le lien entre physique fondamentale et modélisation mathématique. (Schneiderbauer et al., 2013)

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_r}{r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.23})$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.24})$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.25})$$

II.5.3. L'équation de conservation de l'énergie

L'équation de l'énergie interne a une forme simple, lorsque les éléments de fluide n'échangent pas de chaleur avec l'environnement et gardent une composition fixe. Dans ce cas, le mouvement du fluide est dit isentropique. L'équation de l'énergie interne est (Isambert.,2007) :

$$\rho \frac{dE}{dt} = \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E V) = -\rho \nabla \cdot V \quad (\text{II.19})$$

L'équation (II.19) s'interprète comme le fait que l'énergie interne dans un volume fixe varie soit sur les bords par advection, soit dans le volume par compression ou expansion.

Lorsque le fluide n'est pas isentropique, des termes additionnels sont à ajouter à l'équation (II.19). Ce sont :

- Les échanges radiatifs avec l'environnement. Pour cela, il est nécessaire de connaître la densité du fluide radiatif F^{rad} , qui peut être calculée si on connaît la distribution et l'état des agents émettant, réfléchissant ou absorbant.
- L'échange de chaleur par conduction moléculaire. Le flux de chaleur est alors proportionnel au gradient de température, et est donné par :

$$-k\nabla T \quad (II.20)$$

Où k est la conductivité thermique.

- La chaleur due à un changement de phase ou à une réaction chimique. L'effet de ces processus peut être représenté par un terme Q_H , qui donne le taux de chaleur par unité de volume.

La forme modifiée de (II.19) est alors :

$$\frac{\rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho EV + F^{rad} - k\nabla T) = Q_H - \rho \nabla \cdot V \quad (II.21)$$

En utilisant les relations entre variables d'état, on peut également exprimer cette équation en fonction de la température potentielle θ , température qu'aurait le fluide si on le ramenait au niveau de pression $1000hPa$ sans avoir échangé de chaleur avec le milieu extérieur. L'équation (II.21) devient alors :

$$\rho T c_p (p_r \theta) \theta^{-1} \frac{d\theta}{dt} = \nabla \cdot (k\nabla T - F^{rad}) + Q_H \quad (II.22)$$

II.6. Méthode des volumes finis

La méthode numérique mise en œuvre repose sur une formulation par volumes finis. Cette approche présente un double avantage : elle est facilement applicable à des maillages de forme arbitraire tout en assurant la conservation rigoureuse des propriétés physiques. Cependant, il n'est pas toujours possible de garantir une régularité suffisante des solutions. Les écoulements comportant des chocs constituent un exemple classique de cette difficulté, de même que les écoulements autour du bord de fuite d'une aile lorsque la production d'entropie

varie le long des lignes de courant situées de part et d'autre du profil (discontinuité tangentielle). Dans de tels cas, il devient essentiel de représenter précisément les lois de conservation sous leur forme intégrale. La solution la plus naturelle consiste alors à discrétiser directement cette formulation intégrale plutôt que de passer par sa forme différentielle. (Rajomalahy et al.,)

L'approche par volumes finis (MVF) est une méthode largement utilisée pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles (EDP), qui modélisent des principes fondamentaux tels que les lois de conservation ou d'équilibre dans divers domaines de l'ingénierie, notamment la mécanique des fluides, les transferts thermiques et massiques, ainsi que l'exploitation pétrolière. Contrairement aux méthodes des différences finies ou des éléments finis, la méthode des volumes finis se distingue par sa capacité à discrétiser directement l'espace physique sans nécessiter de transformations complexes des coordonnées. (Eymard et al., 2000)

Le principe de base de la méthode des volumes finis repose sur la subdivision du domaine d'étude en volumes de contrôle. Les équations gouvernantes sont intégrées sur ces volumes, et grâce au théorème de Gauss, les termes volumiques liés à la convection et à la diffusion sont transformés en intégrales surfaciques, puis discrétisés. Les flux traversant les interfaces des volumes de contrôle sont ensuite approximatés à l'aide de schémas numériques inspirés des différences finies. Cette approche permet de gérer efficacement les discontinuités des coefficients intervenant dans les équations. Sa popularité en dynamique des fluides numérique (CFD) s'explique par sa flexibilité et son aptitude à traiter des géométries complexes. Elle est particulièrement adaptée à la simulation des écoulements fluides et des phénomènes de transport associés, grâce à sa propriété de conservativité locale. (Moukalled et al., 2016)

En résumé, la méthode des volumes finis constitue une approche robuste et polyvalente pour résoudre numériquement les équations de conservation. Elle offre une solution pratique pour discrétiser les EDP dans divers domaines d'application, grâce à sa capacité à gérer efficacement des configurations géométriques complexes (qu'elles soient hyperboliques, elliptiques ou paraboliques) ainsi que des discontinuités dans les paramètres. (Eymard et al., 2000)

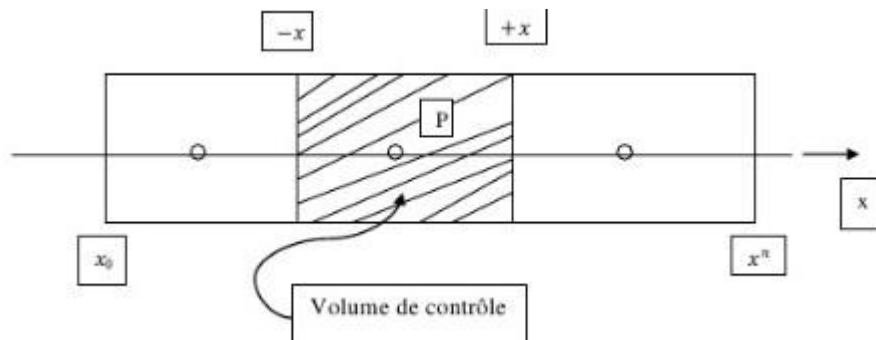


Figure II.1. Schéma du volume de contrôle utilisé dans la méthode des volumes finis.

(Bouebdelli.,2020)

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + Q \phi \quad (\text{II.26})$$

II.7. Présentation de ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique par éléments finis (FEM) qui se positionne comme un leader incontesté sur son marché, largement utilisé dans le développement de produits industriels. Il englobe l'ensemble des étapes clés d'une simulation : préparation géométrique, maillage, résolution, analyse des résultats et optimisation. Ce logiciel propose une plateforme de calcul multi-physique complète, intégrant des domaines variés tels que la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, les transferts thermiques, ainsi que la simulation de systèmes et de circuits électroniques. Les utilisateurs d'ANSYS proviennent de secteurs industriels diversifiés, incluant notamment la construction mécanique, l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique, ainsi que les biens de consommation. (Labed.,)

ANSYS est un programme informatique par éléments finis à usage général pour la résolution d'analyses techniques de structure et de transfert de chaleur. Les capacités de la solution ANSYS comprennent : l'analyse statique, l'élasticité, le plastique, les contraintes thermiques, les contraintes raidies, les grandes déflexions, les éléments bilinéaires ; analyse dynamique, modale (fréquences naturelles et formes modales), réponse harmonique, historique temporel linéaire, historique temporel non linéaire ; analyse des transferts thermiques,

conduction, convection, rayonnement, couplés à l'écoulement fluide, couplés à l'écoulement électrique ; sous-structures. Les analyses peuvent être effectuées en une, deux ou trois dimensions, y compris les options d'éléments axisymétriques et harmoniques. ANSYS contient également un package graphique complet et des capacités étendues de pré et post-traitement. (Kohnke et al.,)

II.8. Généralité sur l'ANSYS (workbenchFluent)

Fluent est un logiciel de simulation dédié à la mécanique des fluides, largement utilisé dans l'industrie ainsi que dans les domaines de la recherche et du développement à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence incontournable pour la modélisation des écoulements fluides. Bien qu'il ne gère pas directement le maillage (ce dernier doit être réalisé avec un outil dédié, tel que Gambit, également édité par ANSYS), Fluent se distingue par sa polyvalence et son interface graphique intuitive permettant un paramétrage précis des modèles. De plus, il propose une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. (Labeled.,)

L'un des principaux atouts de Fluent réside dans sa bibliothèque étendue de modèles capables de traiter divers aspects complexes de la mécanique des fluides. Parmi ces aspects figurent les écoulements diphasiques (miscibles, non miscibles, cavitation, solidification), la turbulence, la combustion (pré-mélangée ou non), le transport de particules, les écoulements en milieux poreux, ainsi que les maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction automatique du maillage. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être ajustés pour optimiser la convergence des simulations. En outre, Fluent est parallélisé, ce qui permet d'exploiter efficacement des systèmes multiprocesseurs, qu'il s'agisse d'une machine unique ou d'un réseau de calcul (clusters, dual-core, plateformes multi-CPU). (Labeled.,)

La gestion globale des simulations s'effectue via l'environnement Workbench d'ANSYS, accessible depuis sa fenêtre principale (Figure II.2). Cet espace centralisé permet de créer les fichiers nécessaires, de lancer les différents logiciels de la suite ANSYS et de coordonner leurs interactions, qu'il s'agisse de géométrie, de maillage, de simulation ou de post-traitement. Workbench offre également la possibilité d'automatiser les procédures et de comparer les résultats issus de plusieurs simulations. (Rajomalahy et al.,)

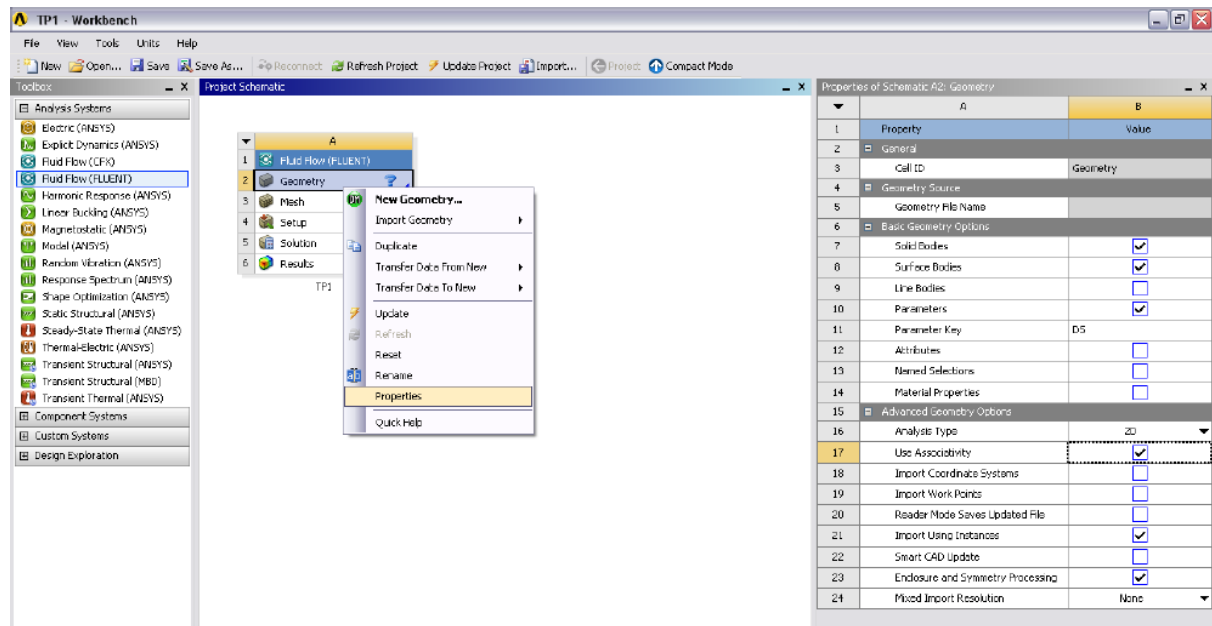


Figure II.2. Prise en main d'ANSYS. (Rajomalahy et al.,)








Le système repose sur une succession d'étapes organisées sous forme de cases distinctes (Tableau 01), chacune correspondant à une tâche spécifique réalisée avec un module particulier de la suite ANSYS. (Rajomalahy et al.,)

Tableau II.1. Différentes étapes de simulation. (Rajomalahy et al.,)

2	Geometry	CAO – Création de la géométrie	ANSYS DesignModeler
3	Mesh	Maillage	ANSYS Meshing
4	Setup	Mise en données et simulation	ANSYS Fluent
5	Solution	Résultats CFD	
6	Results	Post-traitement	CFDPost

Lors du « Workflow », ces étapes sont exécutées de manière séquentielle. Si une modification intervient à une étape donnée (par exemple, une modification de la géométrie ou du maillage), les étapes suivantes sont automatiquement mises à jour pour refléter ces changements (Tableau II.2).

Tableau II.2. Symbole de signalisation. (Rajomalahy et al.,)

Symbole	Terme anglais	Signification
	Unfulfilled	Les fichiers requis pour cette étape n'existent pas encore
	Refresh required	Nécessite de « rafraîchir » les étapes précédentes pour actualiser celle-ci
	Attention Required	Une action est nécessaire au niveau de cette étape
	Update Required	Les données ont été modifiées, une mise à jour du projet est nécessaire
	Up to date	La mise à jour de l'étape a été effectuée sans erreur
	Interrupted	Une mise à jour ou un calcul a été interrompu(e) en cours de route
	Input Changes Pending	L'étape correspondant à la cellule est à jour à l'heure actuelle, mais sera relancée au prochain update car des données ont été modifiées dans les étapes précédentes

II.9. Présentation du code de calcul

Il existe sur le marché plusieurs outils industriels performants dédiés à la simulation des écoulements fluides, tels que FLUENT, CFX, PHOENICS, STAR-CD, TRIO, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, N3S et CFDS-FLOW3D. Parmi ces solutions, FLUENT, développé et commercialisé par le groupe éponyme, se distingue comme l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la mécanique des fluides numérique (CFD). Ce logiciel propose une plateforme complète pour la modélisation d'écoulements fluides variés, qu'ils soient compressibles ou incompressibles, tout en intégrant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, les transferts thermiques, les réactions chimiques ou encore les interactions multiphasiques. Cette polyvalence répond aux besoins de nombreux secteurs industriels. (Abdelouahab.,2019)

Les produits et services proposés par FLUENT permettent aux ingénieurs de concevoir et d'optimiser leurs systèmes tout en minimisant les risques liés au développement. Le logiciel

est particulièrement apprécié dans des industries exigeantes telles que l'aéronautique et l'automobile, grâce à son interface utilisateur intuitive et sophistiquée qui facilite son adoption. FLUENT repose sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations gouvernant les écoulements fluides, quels que soient leur complexité ou leur configuration. Comme tout logiciel de CFD, il s'articule autour de trois composants principaux : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur, dont nous détaillerons les rôles ci-après. (Ziad et al., 2015)

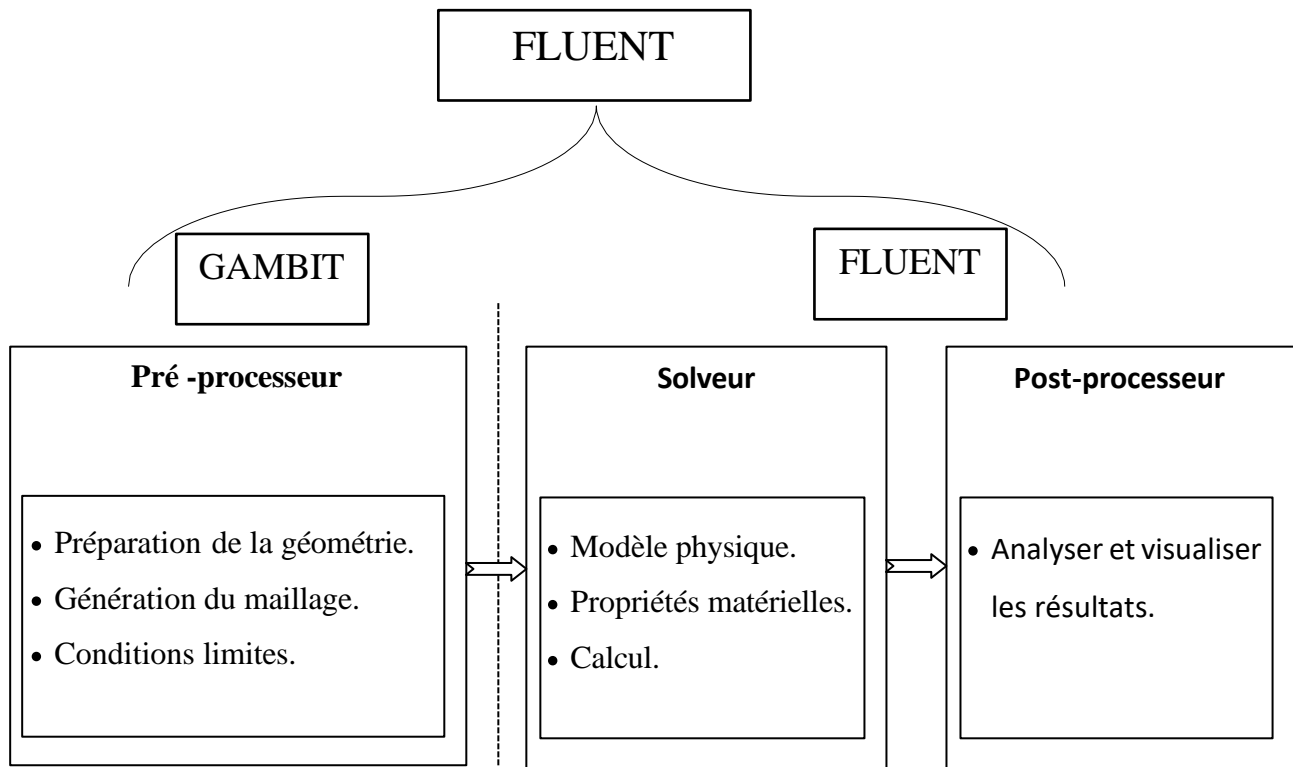


Figure II.3. Structure de base du code "FLUENT". (Ziad et al., 2015)

II.9.1. Pré - processeur "GAMBIT"

Il offre à l'utilisateur la possibilité de créer la géométrie du domaine de calcul et de la décomposer en petits volumes de contrôle, communément appelés cellules de calcul. L'ensemble de ces cellules constitue ce que l'on appelle le maillage. À cette étape, les conditions aux limites appropriées sont également définies pour les cellules situées sur ou à proximité des frontières du domaine de calcul. (Ziad et al., 2015)

II.9.2. Solveur "FLUENT"

Pour les fluides incompressibles, les calculs sont réalisés en termes de pression relative, en utilisant la méthode des volumes finis. Cette approche présente l'avantage d'être conservatrice, ce qui implique que tout flux sortant d'un volume de contrôle est intégralement transféré aux volumes adjacents. (Ziad et al., 2015)

Les étapes principales du processus de calcul dans le solveur sont les suivantes :

- Intégration des équations continues : Les équations gouvernantes sont intégrées sur chaque volume de contrôle. Le théorème d'Ostrogradski est appliqué pour transformer certaines intégrales volumiques en intégrales surfaciques.
- Discrétisation spatiale et temporelle (pour les écoulements transitoires) : Les dérivées partielles des équations sont approximées par des différences finies, permettant de convertir le système d'équations différentielles en un système d'équations algébriques.
- Résolution itérative : Le système d'équations algébriques est résolu à l'aide d'un processus itératif. Un algorithme de correction de la pression et des composantes de vitesse est utilisé pour assurer la conservation de la masse tout au long des calculs. (Ziad et al., 2015)

II.9.3. Post-processeur "FLUENT"

Le post-processeur offre la possibilité de visualiser à l'écran une variété de résultats, tels que les champs de vitesse, les champs de température, ainsi que les lignes de courant, entre autres. (Ziad et al., 2015)

II.10. Modélisation d'un écoulement avec ANSYS Fluent

Avant d'utiliser directement Ansys Fluent, nous avons commencé par l'interface Ansys Workbench. Cette plateforme s'avère particulièrement utile pour mener une ou plusieurs simulations, car elle guide l'utilisateur à travers les principales étapes nécessaires et indique les outils Ansys appropriés pour réaliser une modélisation complète, même en partant de zéro.

Pour modéliser un écoulement avec Ansys Fluent, il est recommandé de suivre ces cinq étapes clés :

- **Création de la géométrie** : Cette étape consiste à concevoir la géométrie 3D du problème étudié. Pour cela, on peut utiliser Ansys DesignModeler ou importer des géométries créées dans des logiciels de CAO tels que SolidWorks ou Catia.
- **Génération du maillage** : À partir de la géométrie, un maillage est généré. Il est crucial de trouver un équilibre entre précision et efficacité : un maillage fin produit des résultats plus précis mais augmente les temps de calcul, tandis qu'un maillage grossier offre des résultats plus rapides mais moins détaillés.
- **Configuration dans Ansys Fluent** : Cette phase implique de définir tous les paramètres nécessaires pour une simulation cohérente et représentative du comportement réel du fluide. Cela inclut les conditions aux limites, les échelles, les unités, le modèle d'écoulement, ainsi que les propriétés des matériaux. Une fois ces paramètres configurés, une initialisation est effectuée, et l'intervalle de simulation (nombre d'itérations) est défini.
- **Résolution numérique** : L'ordinateur exécute ensuite la simulation et fournit une solution. Cette étape permet également de détecter d'éventuelles erreurs afin de modifier la configuration si nécessaire et de relancer la simulation pour affiner les résultats.
- **Affichage et analyse des résultats** : Une fois la simulation validée, les résultats sont visualisés dans CFD-Post. Cette interface permet de générer des graphiques, des rendus 2D ou 3D, des champs colorés, ainsi que des valeurs spécifiques en certains points.

Dans le cadre d'études avancées, Ansys Workbench permet également de réaliser plusieurs simulations simultanément, facilitant la comparaison des résultats pour différents types d'écoulements ou de configurations. Pour nous familiariser avec ces outils, Ang et al nous a donné deux cas d'écoulements turbulents à modéliser :

- Le premier exemple concerne un écoulement interne turbulent dans un tube de forme coudée.
- Le second exemple traite d'un écoulement externe autour d'un profil aérodynamique en forme d'aile d'avion.

Pour chaque géométrie, il a appliqué des méthodes de résolution adaptées à chaque situation, modélisé les écoulements turbulents et analysé les résultats obtenus. Il a également procédé à des modifications mineures des géométries initiales pour observer leur impact sur les résultats et comparer les différentes approches utilisées. (Ang et al., 2021)

II.11. Modèles d'écoulement

II.11.1. Modèle k-ε

Ce modèle est spécifiquement conçu pour les écoulements turbulents. Il repose sur un système de deux équations de transport, permettant ainsi de fournir une description détaillée et complète des phénomènes liés à la turbulence.

La première variable est l'énergie cinétique turbulente notée k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{II.27})$$

La seconde variable est le taux de dissipation de l'énergie cinétique notée ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.28})$$

Ce modèle est particulièrement adapté pour les couches de cisaillement planes et les écoulements avec recirculation. Il est également très efficace pour simuler des fluides turbulents, car il ne nécessite que la connaissance des conditions aux limites. C'est pourquoi il est couramment employé dans des applications telles que les écoulements industriels ou environnementaux. Cependant, son utilisation n'est pas adaptée à tous les cas, notamment pour les écoulements non définis, les couches limites circulaires ou les flux rotatifs. Malgré ces

limitations, il reste utile pour obtenir une première représentation globale d'un écoulement. (Ang et al., 2021)

II.11.2. Modèle k- ω

Ce modèle vise à prédire la turbulence en s'appuyant sur deux équations associées à deux variables : l'énergie cinétique de turbulence k et la dissipation spécifique ω définie approximativement par $\omega \approx \frac{\varepsilon}{k}$:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \text{ avec } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (\text{II.29})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{II.30})$$

Ce modèle offre une meilleure précision pour la modélisation des écoulements près des parois par rapport au modèle k- ε . (Ang et al., 2021)

II.11.3. Modèle standard de turbulence k- ω SST

Ce modèle repose sur deux équations de viscosité et inclut la formulation SST (Shear Stress Transport), qui combine les modèles k- ε et k- ω . Près des parois, le modèle k- ω est privilégié pour sa précision, tandis que le modèle k- ε est utilisé dans les zones éloignées, au cœur de l'écoulement. (Ang et al., 2021)

II.11.4. Modèle Spalart-Allmaras

Il s'agit d'un modèle à une équation qui résout l'équation de transport pour une variable comparable à la viscosité, notée $\tilde{\nu}$. Ce modèle est bien adapté pour les écoulements proches des parois ainsi que pour les couches limites soumises à des gradients de pression défavorables. Il se distingue par son efficacité dans le traitement des écoulements à faibles nombres de Reynolds et est particulièrement recommandé pour les applications aérodynamiques, ce qui explique son utilisation courante dans le domaine aéronautique. (Ang et al., 2021)

II.12. Géométrie

Toute simulation CFD débute par la création de la géométrie en 2D ou 3D, réalisée soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD, soit à l'aide d'un outil de CAO externe. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'exporter la géométrie dans un format compatible avec le logiciel de maillage utilisé. (Barraza et al., 2021)

Cette étape peut être effectuée à l'aide du logiciel ANSYS DesignModeler. Ce dernier permet de dessiner des esquisses en 2D (Sketch), de générer des objets 3D à partir de ces esquisses (par extrusion, par exemple), ainsi que de manipuler les objets 3D pour préciser leurs dimensions, définir les zones et spécifier leur nature (fluide ou solide). (Rajomalahy et al.)

II.13. Maillage

Le maillage consiste en une représentation géométrique d'un domaine à l'aide d'éléments finis bien définis et proportionnés. Son objectif est de simplifier un système en créant un modèle qui représente ce système, ainsi que, le cas échéant, son environnement (le milieu), dans le but de réaliser des simulations numériques ou des représentations graphiques. Les caractéristiques du maillage incluent : sa dimension (généralement 2D ou 3D), son volume total (dimension globale couverte), la surface ou le volume moyen des cellules qui le composent, ainsi que la géométrie des cellules, qui peut prendre des formes variées telles que des triangles, des quadrilatères (parallélogrammes, rectangles, carrés), etc. (Labed.,)

Des options de maillage sont disponibles pour identifier et nommer différentes parties de la géométrie, permettant ainsi de définir les conditions aux limites du problème (entrées, sorties, etc.) et d'appliquer des paramètres spécifiques au maillage au niveau des différentes zones sélectionnées. (Rajomalahy et al.,)

La génération du maillage, qu'il soit 2D ou 3D, constitue une étape cruciale dans une analyse CFD, car elle influence directement la qualité de la solution obtenue. Un maillage de haute qualité est indispensable pour garantir des résultats précis, robustes et significatifs. La qualité du maillage affecte fortement la convergence, la précision des calculs, ainsi que le temps de simulation. Pour assurer un bon maillage, il est essentiel de minimiser les éléments présentant des distorsions ou un « skewness » élevé, tout en assurant une résolution adéquate dans les régions où les gradients sont importants (couches limites, ondes de choc, etc.). De

plus, un bon maillage doit être suffisamment « lisse ». Le domaine de calcul est défini par un maillage représentant à la fois le fluide et les surfaces solides impliquées. (Bala Aymen., 2023)

II.13.1. Composants du maillage

Le domaine de calcul est délimité par un maillage qui modélise à la fois le fluide et les surfaces solides impliquées. Voici les principaux éléments constitutifs du maillage :

- Cell : Volume de contrôle subdivisant la géométrie.
- Face : Frontière d'une cellule, sur laquelle sont spécifiées les conditions aux limites.
- Edge : Arête définissant la frontière d'une face.
- Node : Point du maillage servant de nœud de référence.
- Zone : Ensemble regroupant des nœuds, des faces et/ou des cellules. (Ezzeroug et al., 2022)

II.13.2. Types des maillages

II.13.2.1. Maillage structuré (quadra/hexa)

Un maillage structuré est un type de maillage qui peut être généré en répétant une maille élémentaire de manière systématique. Dans ce type de maillage, chaque nœud peut être identifié par un doublet (en 2D) ou un triplet (en 3D). Le maillage structuré tire parti d'une numérotation organisée, ce qui rend la topologie implicite et minimise ainsi les besoins de stockage. En deux dimensions, les éléments sont des quadrilatères, tandis qu'en trois dimensions, ils prennent la forme d'hexaèdres. Ce type de maillage présente plusieurs avantages (Bala Aymen., 2023) :

Avantages :

- Économie en nombre d'éléments : Il nécessite généralement moins de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Précision accrue dans certains cas : Lorsque l'écoulement moyen est aligné avec le maillage, un maillage structuré réduit les erreurs numériques.

Inconvénients :

- Complexité pour les géométries complexes : Il est difficile à générer pour des géométries comportant des formes irrégulières ou complexes.
- Qualité limitée pour certaines configurations : Obtenir une bonne qualité de maillage peut être délicat pour des géométries complexes.
- Adaptation aux géométries à blocs multiples : Il est plus facile à générer lorsqu'il est basé sur une géométrie divisée en blocs multiples.

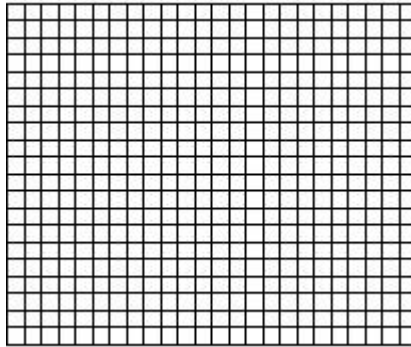


Figure II.3. Maillage structuré. (Bala aymen., 2023)

II.13.2.2. Maillage non structuré (tri/tétra)

Dans ce type de maillage, les éléments sont générés de manière arbitraire, sans contrainte particulière quant à leur disposition. (Bala aymen., 2023)

Ses avantages :

- Adaptabilité aux géométries complexes : Il peut être généré sur des géométries complexes tout en maintenant une bonne qualité des éléments.
- Automatisation élevée : Les algorithmes utilisés pour générer ce type de maillage (triangles/tétraèdres) sont fortement automatisés.

Ses inconvénients :

- Nombre élevé de mailles : Il nécessite généralement un nombre de mailles bien plus important par rapport à un maillage structuré.
- Coût de stockage élevé : La structure de données requise pour ce type de maillage est gourmande en termes de capacités de stockage.
- Erreurs numériques accrues : Ce type de maillage peut entraîner des erreurs numériques (comme la fausse diffusion) qui sont souvent plus importantes que celles observées avec un maillage structuré.

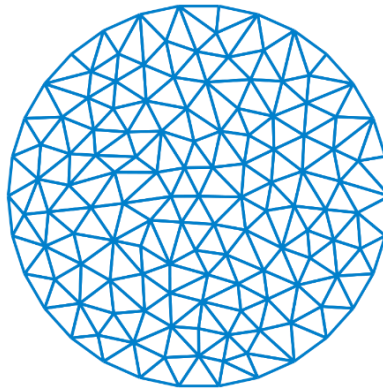


Figure II.4. Maillage non-structuré. (Bala aymen., 2023)

II.13.2.3. Maillage hybride

Ce type de maillage est généré en combinant des éléments de différentes natures : triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, et tétraédriques, prismatiques ou pyramidaux en 3D. Il allie ainsi les avantages des maillages structurés et non structurés. (Bala Aymen., 2023)

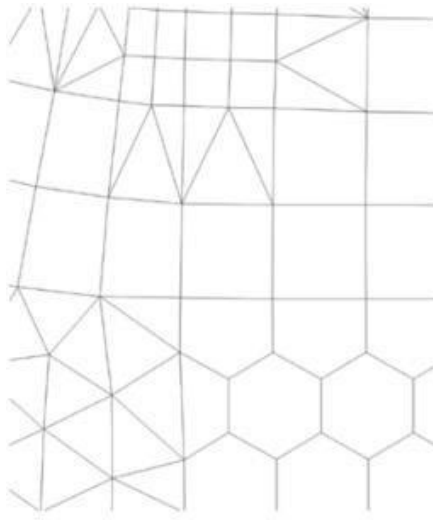


Figure II.5. Types des maillages. (Bala aymen., 2023).

II.14. Cellule de filtration

La cellule de filtration est de forme cylindrique et comporte une tige intégrée chargée d'assurer le mélange, comme illustré à la Figure II.4. L'un des principaux avantages de cette cellule réside dans la possibilité de contrôler plusieurs paramètres clés, tels que la géométrie de l'agitateur, les dimensions de la cellule, la vitesse de rotation ainsi que la pression d'entrée. Dans ce système de filtration, les membranes sont pré-scellées, et les disques à membrane peuvent être facilement remplacés pour répondre aux exigences de préparation des échantillons. (Ezzeroug et al., 2022)



Figure II.6. Cellule de filtration membranaire rotative. (Ezzeroug et al., 2022)

II.15. Conclusion

En conclusion, on peut dire que la mécanique des fluides numérique (CFD, pour Computational Fluid Dynamics) repose sur l'utilisation de diverses méthodes numériques et algorithmes informatisés dans le but de résoudre et d'analyser les problèmes liés à l'écoulement des fluides. Les calculs complexes nécessaires pour simuler l'interaction des fluides avec des surfaces définies par les conditions aux limites et les conditions initiales sont réalisés à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. (Xia et al., 2002)

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. Géométrie

Pour créer la géométrie, j'ai utilisé la fenêtre Design Modeler. La Figure III.1 illustre la géométrie de la cellule étudiée, qui consiste en un cylindre principal d'une hauteur de 115 mm et d'un diamètre de 40 mm. À l'intérieur de ce cylindre, on trouve deux autres cylindres, comme le montre la Figure III.2 : l'un est disposé horizontalement et l'autre verticalement. Le cylindre horizontal a une hauteur de 105 mm et un diamètre de 3 mm, tandis que le cylindre vertical mesure 60 mm de hauteur et 5 mm de diamètre.

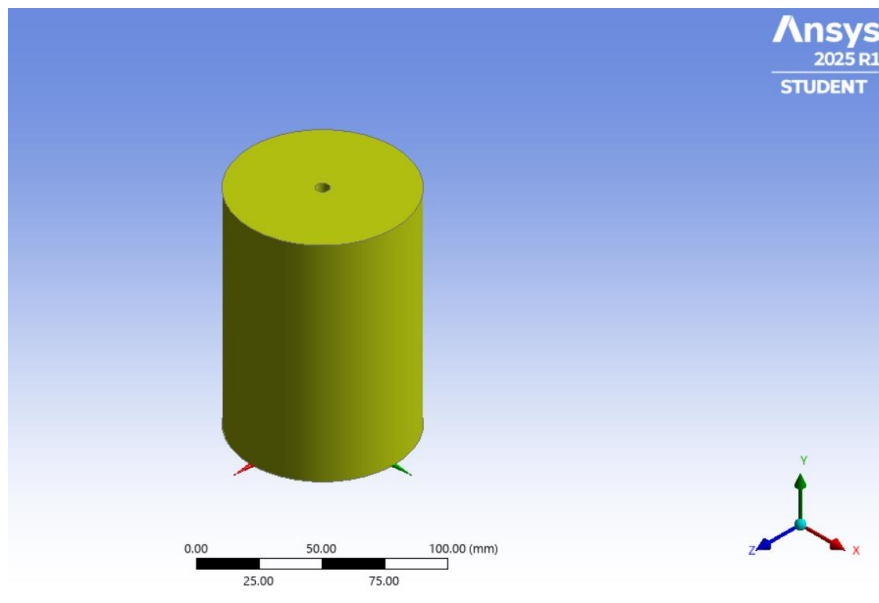


Figure III.1. Géométrie de la cellule de filtration

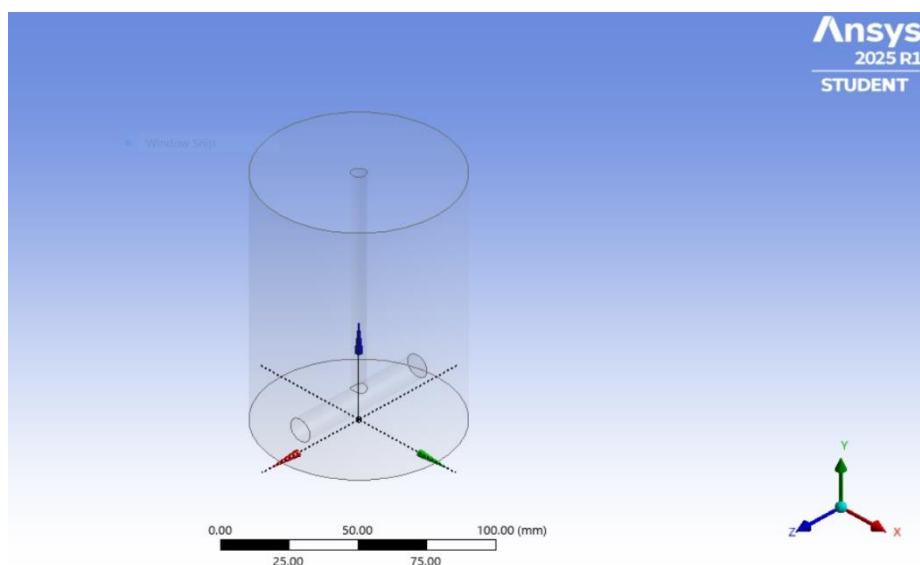


Figure III.2. Géométrie de la cellule de filtration

III.2. Maillage

Le maillage est représenté dans la Figure III.3. Il a été généré à l'aide de l'interface de maillage Workbench, en veillant à ce que chaque surface soit correctement identifiée et nommée pour faciliter l'application des conditions aux limites. Les surfaces ont été désignées comme suit : la surface supérieure du cylindre principal a été nommée "Inlet", tandis que la surface inférieure a été étiquetée "Surface de Membrane". Les parois latérales du cylindre principal portent le nom de "Wall", et les deux cylindres internes (horizontal et vertical) comme "Impeller". Ces noms permettent de simplifier la configuration des simulations dans Ansys Fluent. La géométrie montre un maillage structuré et uniforme, avec une densité adaptée pour capturer les détails critiques des écoulements fluides. Cette approche garantit une précision optimale lors des calculs numériques tout en facilitant l'interprétation des résultats.

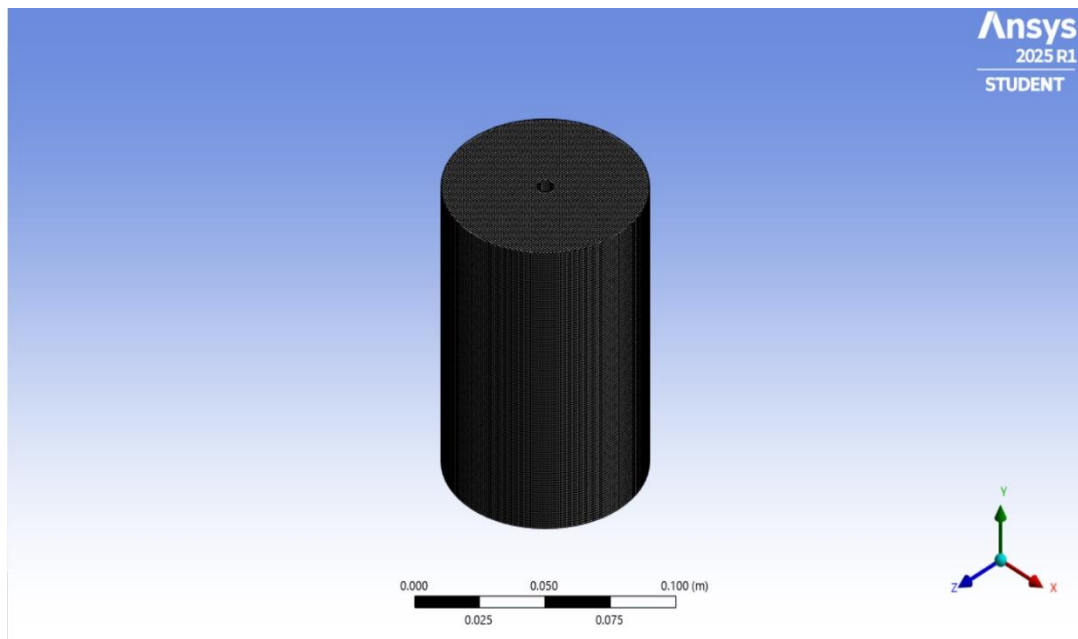


Figure III.3. Maillage de la cellule de filtration

III.3. Conditions limites

Dans cette partie, un fluide visqueux laminaire avec des propriétés physiques spécifiques a été sélectionné pour simuler l'écoulement dans une cellule de filtration membranaire. Les caractéristiques du fluide sont les suivantes :

- Densité : 998 kg/m^3
- Viscosité : $1.72 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$

Les conditions aux limites ont été définies comme suit :

- Les deux cylindres intérieurs tournent à une vitesse constante, générant ainsi une force centrifuge qui met le fluide en mouvement. La vitesse angulaire correspondante est calculée comme suit : $\omega = \frac{2\pi N}{60}$
- Le cylindre extérieur est fixe, avec une condition de non-glissement (No-Slip Condition) appliquée à sa surface.

III.4. Résultats et discussions

III.4.1. Distribution de la pression

La Figure III.4 illustre la distribution de la pression sur la surface de la membrane pour une vitesse de rotation de 50rpm.

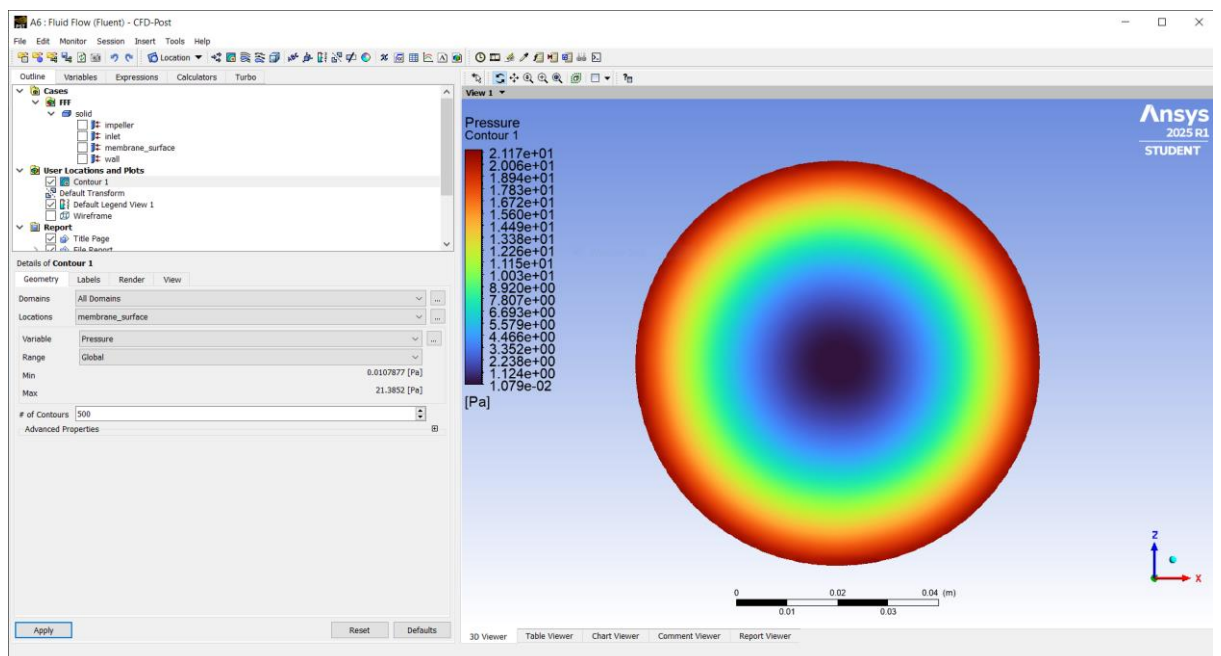


Figure III.4. Distribution de la pression sur la membrane à 50 rpm.

En général, la pression appliquée à la surface de la membrane est relativement faible. La valeur minimale de la pression ($P_{min} \approx 0.01 P_a$) est observée au centre de la membrane, représentée en bleu, tandis que la pression augmente progressivement à mesure que l'on se rapproche des bords, atteignant sa valeur maximale ($P_{max} \approx 21.38 P_a$) aux bords de la surface, représentés en rouge. Cette faible variation de pression peut être attribuée à la faible vitesse de rotation (50rpm), qui n'engendre pas des forces centrifuges suffisantes pour générer des valeurs de pression significatives. Étant donné que la pression est proportionnelle au flux perméable, une faible pression à la surface de la membrane entraîne un flux de perméabilité réduit.

En revanche, la Figure III.5 montre la distribution de la pression pour une vitesse de rotation plus élevée (250rpm). Dans ce cas, les valeurs de pression minimale ($P_{min} \approx 0.14 P_a$) et maximale ($P_{max} = 519.24 P_a$) augmentent de manière significative par rapport au cas précédent. Notamment, l'augmentation des valeurs de pression dépasse le pourcentage d'augmentation de la vitesse de rotation, ce qui suggère une relation non linéaire entre la vitesse de rotation et la pression générée. Cette augmentation peut être expliquée par l'intensification des forces centrifuges et des effets hydrodynamiques à des vitesses plus élevées.

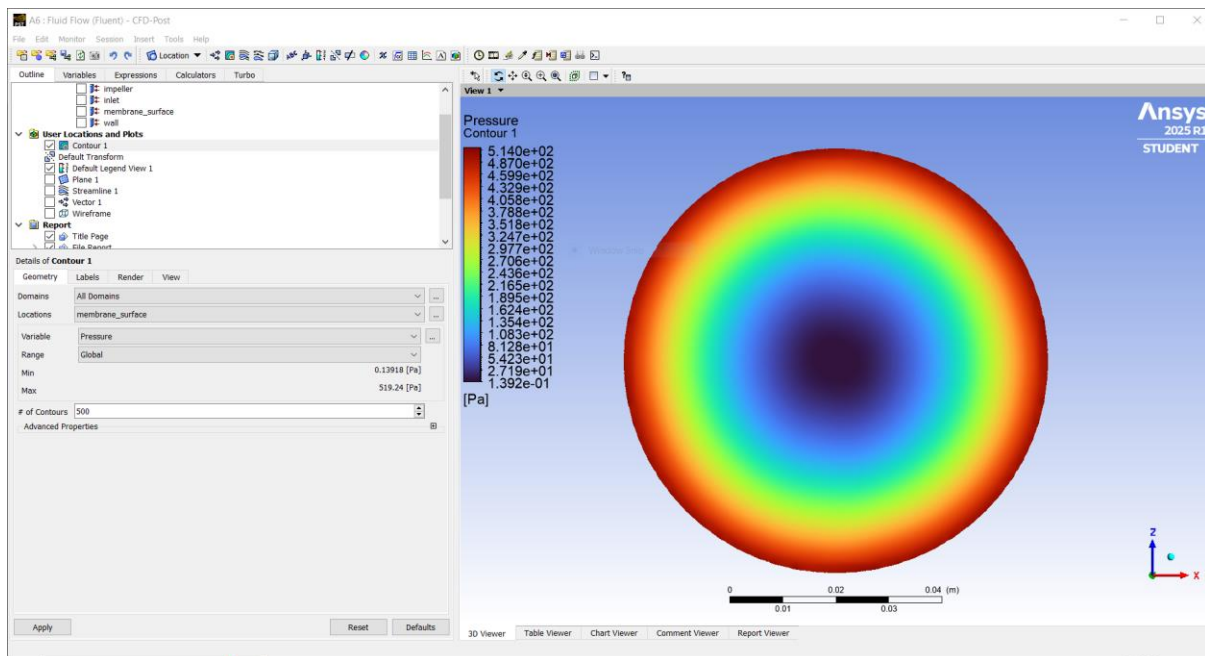


Figure III.5. Distribution de la pression sur la membrane à 250 rpm.

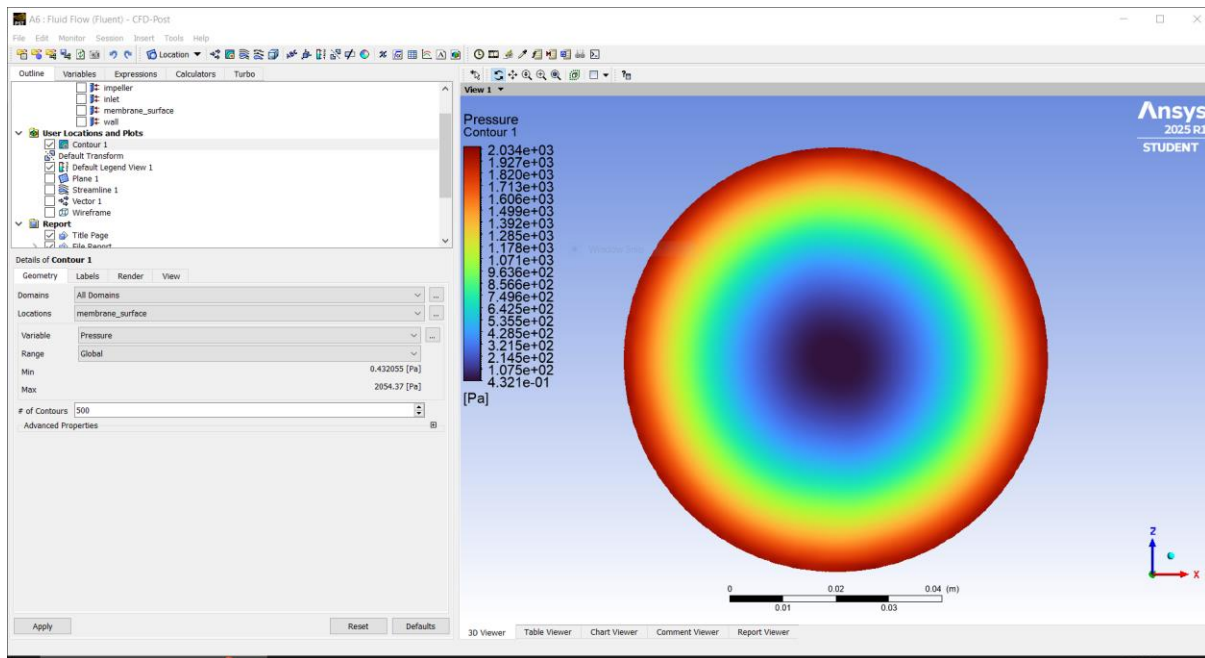


Figure III.6. Distribution de la pression sur la membrane à 500 rpm.

La Figure III.6 illustre la distribution de pression sur la surface de la membrane pour une vitesse de rotation de 500tr/min. Bien que la répartition générale de la pression sur la surface de la membrane reste similaire à celle observée aux vitesses précédentes (50rpm et 250rpm), les valeurs extrêmes de pression ont augmenté notablement. La valeur minimale de pression est toujours localisée au centre de la membrane, tandis que la valeur maximale se concentre aux bords. Cependant, ces valeurs sont plus élevées par rapport aux cas précédents, ce qui indique une augmentation progressive des forces centrifuges avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

En analysant ces résultats, nous constatons que le flux perméable à travers la membrane augmente proportionnellement à la vitesse de rotation. Cette relation linéaire entre la vitesse de rotation et le flux perméable suggère que les forces générées par le mouvement des cylindres internes jouent un rôle clé dans la génération de pression et le débit de filtration. En d'autres termes, une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une augmentation directe du flux perméable, ce qui est cohérent avec les lois fondamentales de la mécanique des fluides.

III.5. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent globalement une bonne concordance avec certains travaux de la littérature, confirmant ainsi la validité de l'approche utilisée. Cependant, des écarts ont été observés, principalement dus à deux facteurs majeurs : la durée des calculs et la qualité du maillage. Ces écarts soulignent l'importance d'optimiser les paramètres numériques pour améliorer la précision des simulations. Cette étude a permis de mieux comprendre l'influence de la vitesse de rotation sur la distribution de pression et le flux perméable à travers la membrane. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation des systèmes de filtration membranaire, notamment en termes de contrôle des conditions opératoires et de conception géométrique. Des travaux futurs pourraient se concentrer sur l'amélioration de la qualité du maillage, l'utilisation de modèles plus avancés, ainsi que l'étude de l'impact des propriétés physiques du fluide sur les performances de filtration.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était d'analyser numériquement le comportement d'un écoulement rotatif au sein d'une cellule de filtration membranaire, en mettant l'accent sur la détermination de la distribution de pression. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel ANSYS Fluent, basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes couplées à la méthode des volumes finis. Cette approche permet de traiter des phénomènes hydrodynamiques complexes, difficilement accessibles par des solutions analytiques. Les simulations, réalisées pour des vitesses de rotation de 50, 250 et 500 tr/min, révèlent une distribution de pression asymétrique sur la surface membranaire :

- La pression est minimale au centre de la membrane, en raison des effets inertiels dominants dans cette zone.
- Elle augmente progressivement vers les bords de la membrane, atteignant un maximum en périphérie. Cette tendance s'explique par les forces centrifuges induites par la rotation, qui génèrent un gradient de pression radial.

Par ailleurs, une corrélation directe entre la vitesse de rotation et le flux de perméat a été observée : le flux augmente linéairement avec la vitesse de rotation. Ce résultat suggère que l'élévation de la pression périphérique, associée à la rotation, améliore l'efficacité de filtration en augmentant la force motrice transmembranaire.

Le modèle numérique a été validé en exploitant les capacités de maillage adaptatif d'ANSYS Fluent et en vérifiant la convergence des résidus. Les conditions aux limites incluaient une paroi rotative pour la membrane et des conditions de pression statique aux entrées/sorties.

Référence bibliographique

ABDELOUAHAB, GHADBANE. Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur. *Université de M'sila*, 2019.

ALSAEDI, A., MUHAMMAD, K., et HAYAT, T. Numerical study of MHD hybrid nanofluid flow between two coaxial cylinders. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, vol. 61, no 11, p. 8355-8362.

ANG, Cécile, COSTE, Lucien, KERRIEN, Antoine, *et al.* MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS TURBULENTS 2021.

BACCHIN, Patrice. Principes de base des Technologies à Membranes. In : *2ème Ecole d'Eté Franco-Maghrébine «Sciences et Technologies à Membranes»*. 2005.

BARRAZA-JIMÉNEZ, Diana, TORRES-HERRERA, Sandra Iliana, PEÑA, Patricia Ponce, *et al.* A CFD Porous Materials Model to Test Soil Enriched with Nanostructured Zeolite Using ANSYS-Fluent (™). In : *Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*. IntechOpen, 2021.

BENTRACIA, Mohamed et DREW, Donald A. Fouling layer growth and distribution at the interface of pressure-driven membranes. *Chemical engineering science*, 1990, vol. 45, no 5, p. 1223-1235.

BESSIERE, Yolaine. *Filtration frontale sur membrane: mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage*. 2005. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.

BHATTACHARYA, Sudipta et HWANG, Sun-Tak. Concentration polarization, separation factor, and Peclet number in membrane processes. *Journal of membrane science*, 1997, vol. 132, no 1, p. 73-90.

BOUEBDELLI, Tarek. *Contribution à l'étude de dispersion des principaux polluants atmosphériques à Tunis*. 2020. Thèse de doctorat. Université de Tunis el Manar.

CIOBANU, Gabriela, CARJA, Gabriela, ISTRATI, Lacramioara, *et al.* Etude DU COLMATAGE DES MEMBRANES♦. In : *Quatrième Colloque Franco-Roumain de Chimie Appliquée* 2006.

COLLET, Gaëlle. *Étude et modélisation du colmatage de membrane d'ultrafiltration par des suspensions de matières organiques et de particules minérales*. 2013. Thèse de doctorat. Poitiers.

DE MASTER, Pour Obtenir le Diplôme et MOUBAREK, Bala Aymen. MEMOIRE DE FIN D'ETUDES.

DING, Jie, WANG, Xu, ZHOU, Xue-Fei, *et al.* CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production. *Bioresource technology*, 2010, vol. 101, no 18, p. 7005-7013.

DOSHI, MAHENDRA R. Limiting flux in the ultrafiltration of macromolecular solutions. In : *ACS symposium series*. 1985. p. 209-223.

ESPINASSE, Benjamin. *Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes: flux critique et colmatage*. 2003. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.

EYMARD, Robert, GALLOUËT, Thierry, et HERBIN, Raphaële. Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, 2000, vol. 7, p. 713-1018.

EZZEROUG EZZRAIMI, Houda, SABRI, Marwa, et MOULAI-MOSTEFA, Nadji. Etude numérique d'un écoulement rotatif à l'intérieur d'une cellule de filtration membranaire. 2022.

GAVEAU, Arthur. *Etude des mécanismes de transfert de bactéries déformables en microfiltration frontale*. 2016. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.

GEKAS, Vassilis, AIMAR, Pierre, LAFAILLE, Jean-Pierre, *et al.* A simulation study of the adsorption—concentration polarisation interplay in protein ultrafiltration. *Chemical engineering science*, 1993, vol. 48, no 15, p. 2753-2765.

GREENLEE, Lauren F., LAWLER, Desmond F., FREEMAN, Benny D., *et al.* Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water research*, 2009, vol. 43, no 9, p. 2317-2348.

Hermia, J., 1982. Constant pressure blocking filtration laws. Application to power-law non-newtonian fluids, *Trans. Ind. Chem. Eng.*, 60, 183–187.

HOSEINI, S. S., NAJAFI, G., GHOBADIAN, B., *et al.* Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 413, p. 127497.

IRITANI, Eiji. A review on modeling of pore-blocking behaviors of membranes during pressurized membrane filtration. *Drying technology*, 2013, vol. 31, no 2, p. 146-162.

IRITANI, Eiji et KATAGIRI, Nobuyuki. Developments of blocking filtration model in membrane filtration. *KONA Powder and Particle Journal*, 2016, vol. 33, p. 179-202.

ISAMBERT, Till. *Estimation du mouvement apparent par des fonctions splines vectorielles: application à l'océanographie et à la météorologie*. 2007. Thèse de doctorat. Université Paris Descartes.

KADHOM, Mohammed et DENG, Baolin. Metal-organic frameworks (MOFs) in water filtration membranes for desalination and other applications. *Applied Materials Today*, 2018,

vol. 11, p. 219-230.

KASAT, Gopal R., KHOPKAR, Avinash R., RANADE, V. V., *et al.* CFD simulation of liquid-phase mixing in solid–liquid stirred reactor. *Chemical Engineering Science*, 2008, vol. 63, no 15, p. 3877-3885.

KOHNKE, P. C. Ansys. In : *Finite Element Systems: A Handbook*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1982. p. 19-25.

KYLLÖNEN, H. M., PIRKONEN, Pentti, et NYSTRÖM, Marianne. Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review. *Desalination*, 2005, vol. 181, no 1-3, p. 319-335.

LABED, Mohamed Abdallah. Etude des échanges thermiques d'un jet impactant une surface verticale.

MACKLEY, M. R. et SHERMAN, N. E. Cross-flow cake filtration mechanisms and kinetics. *Chemical engineering science*, 1992, vol. 47, no 12, p. 3067-3084.

MEHTA, Amit et ZYDNEY, Andrew L. Permeability and selectivity analysis for ultrafiltration membranes. *Journal of membrane science*, 2005, vol. 249, no 1-2, p. 245-249.

MISSION, Sophie Kavugho. *Formulation et étude de nouveaux détergents enzymatiques pour le nettoyage des membranes d'ultrafiltration de l'industrie laitière: développement et validation de méthodologies associées*. 2024. Thèse de doctorat. Université de Rennes.

MOUKALLED, Fadl, MANGANI, Luca, DARWISH, Marwan, *et al.* *The finite volume method*. Springer International Publishing, 2016.

MURKES, Jakob et CARLSSON, Claes-Göran. Crossflow filtration: Theory and practice. (*No Title*), 1988.

OATLEY-RADCLIFFE, Darren L., WALTERS, Matthew, AINSCOUGH, Thomas J., *et al.* Nanofiltration membranes and processes: A review of research trends over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, vol. 19, p. 164-171.

PAYETTE, Félix-Antoine. *Simulation de l'écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques: Impact des paramètres de modélisation*. 2008. Thèse de doctorat. Université Laval.

RAHIMI, M., MADAENI, S. S., et ABBASI, K. CFD modeling of permeate flux in cross-flow microfiltration membrane. *Journal of membrane science*, 2005, vol. 255, no 1-2, p. 23-31.

RAJOMALAHY, Julien et ANDRIANAIVO, Lala. UN TREMLIN POUR L'INNOVATION: MODELISATION NUMERIQUE DES SYSTEMES MULTIPHYSIQUES SUR ANSYSWORKBENCH.

RYHMING, Inge Lennart et RYHMING, Inge L. *Dynamique des fluides: un cours de base du deuxième cycle universitaire*. PPUR presses polytechniques, 2004.

PAK, Afshin, MOHAMMADI, Toraj, HOSSEINALIPOUR, Seyed Mostafa, *et al.* CFD modeling of porous membranes. *Desalination*, 2008, vol. 222, no 1-3, p. 482-488.

PORTER, Mark C. Concentration polarization with membrane ultrafiltration. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 1972, vol. 11, no 3, p. 234-248.

SANAEI, Pejman et CUMMINGS, Linda J. Membrane filtration with multiple fouling mechanisms. *Physical Review Fluids*, 2019, vol. 4, no 12, p. 124301.

SANTOS-MOREAU, Vania, BRUNET-ERRARD, Lena, et ROLLAND, Matthieu. Numerical CFD simulation of a batch stirred tank reactor with stationary catalytic basket. *Chemical engineering journal*, 2012, vol. 207, p. 596-606.

SARAH, MAKHELOUF. *Elimination des colorants par les membranes à base d'oxydes*. 2014. Thèse de doctorat. UNIVERSITE Abdelhamid Ibn Badis MOSTAGANEM.

SCHNEIDERBAUER, Simon et KRIEGER, Michael. What do the Navier–Stokes equations mean?. *European Journal of Physics*, 2013, vol. 35, no 1, p. 015020.

SHI, Xiafu, TAL, Galit, HANKINS, Nicholas P., *et al.* Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2014, vol. 1, p. 121-138.

SINGH, Randeep et PURKAIT, Mihir Kumar. Microfiltration membranes. In: *Membrane separation principles and applications*. Elsevier, 2019. p. 111-146.

STAMATAKIS, K. et TIEN, Chi. A simple model of cross-flow filtration based on particle adhesion. *AIChE journal*, 1993, vol. 39, no 8, p. 1292-1302.

TANSAKUL, Chatkaew. *Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse*. 2009. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

TAMAS, Adrian Paul. *Étude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface*. 2004. Thèse de doctorat. Université Laval.

WANG, Zhiwei, MA, Jinxing, TANG, Chuyang Y., *et al.* Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of membrane science*, 2014, vol. 468, p. 276-307.

XIA, Bin et SUN, Da-Wen. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 2002, vol. 34, no 1-3, p. 5-24.

YAMAZAKI, H., TOJO, K., et MIYANAMI, K. Concentration profiles of solids suspended in a stirred tank. *Powder technology*, 1986, vol. 48, no 3, p. 205-216.

ZAAMOUCHE, Radia. *Modélisation basée sur le concept hydrodynamique de la couche formée sur la surface d'une membrane d'ultrafiltration*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

ZHU, Zhenzhou, MHEMDI, Houcine, DING, Luhui, *et al.* Dead-end dynamic ultrafiltration of

juice expressed from electroporated sugar beets. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, vol. 8, p. 615-622.

ZIAD, ADNAN et DAGARI, ALI. *Simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité carré Avec la présence d'un élément chauffant*. 2015. Thèse de doctorat. université Ibn Khaldoun.