



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Centre Universitaire El-wancharissi de Tissemsilt



Institut de Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique en

Filière : Industries pétrochimiques

Spécialité : Génie du Raffinage

Présenté par : M<sup>elle</sup>. CHAANANE Nawal

M<sup>elle</sup>. ZERROUK Fatiha

### *Thème*

---

## MODELISATION NEURONALE (RNA) DE FLUX DE PERMEAT D'UN DISQUE ROTATIF A MEMBRANE (RDM)

---

Soutenu le, 15/11/2020

### Devant le Jury :

Dr. HAID Slimane	Président	M.C.B.	CU-Tissemsilt
Dr. CHELLALI Rachid	Examineur	M.C.B.	CU-Tissemsilt
M. AISSAT Miloud	Examineur	M.A.A.	CU-Tissemsilt
Dr. LADEG Soufyane	Encadreur	M.C.B.	CU-Tissemsilt

Année universitaire : 2019-2020

## TABLE DES MATIERES

Résumé	
Dédicace	
Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

### CHAPITRE I : PROCÉDÉS DE FILTRATION MEMBRANAIRE

I.1. INTRODUCTION .....	3
I.2. DEFINITION DE FILTRATION MEMBRANAIRE .....	3
I.3. LES MEMBRANES .....	3
I.4. PRESENTATION DES PROCÉDES MEMBRANAIRES.....	4
I.4.1. LES TECHNIQUES MEMBRANAIRES A GRADIENT DE PRESSION.....	4
I.4.1.1. MICROFILTRATION (MF) .....	4
I.4.1.2. L'ULTRAFILTRATION (UF).....	5
I.4.1.3. NANOFILTRATION .....	5
I.4.1.4. OSMOSE INVERSE .....	6
I.4.2. TECHNIQUES MEMBRANAIRES A GRADIENT DE POTENTIEL ELECTRIQUE.....	6
I.5. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE FILTRATION MEMBRANAIRE .....	7
I.5.1. PRESSION TRANSMEMBRANAIRE (PTM) .....	7
I.5.2. LE FLUX DE PERMEAT.....	8
I.5.3. LE TAUX DE RETENTION .....	8
I.5.4. RESISTANCE HYDRAULIQUE DE LA MEMBRANE ( $R_M$ ) .....	9
I.6. MODULE MEMBRANAIRE .....	10
I.6.2. TYPES DE MODULES .....	10
I.6.2.1. LES MODULES TUBULAIRES .....	10
I.6.2.2. LES MODULES PLANS .....	11
I.6.2.3. MODULES A FIBRES CREUSES .....	11

## TABLE DES MATIERES

---

I.6.2.4. LES MODULES SPIRALES .....	13
I.7. MODES DE FONCTIONNEMENT .....	14
I.7.1. LA FILTRATION FRONTALE .....	14
I.7.2. LA FILTRATION TANGENTIELLE .....	14
I.8. LE COLMATAGE.....	15
I.8.1. LES TYPE DE COLMATAGES .....	16
I.8.2.1. LE BLOCAGE DES PORES .....	16
I.8.2.2. LE COLMATAGE PAR DEPOT DE PARTICULES EN SURFACE.....	16
I.9. APPLICATION DES PROCEDES MEMBRANAIRES DANS L'INDUSTRIE .....	18
I.10. SYSTEMES DE FILTRATION DYNAMIQUE.....	20
I.10.1. SYSTEMES SPIN TEK (HIGH SHEAR ROTARY FILTRE) .....	20
I.10.2. SYSTEME DE MULTI SHAFT DISK (MSD) .....	21
I.4.3 SYSTEME DE HITACHI (ROTARY MULTI-DISK MEMBRANE).....	22
I.10.4. SYSTEME OPTIFILTER™ CR .....	22
I.11.SYSTEME A DISQUE ROTATIF (PETIT MODULE) .....	23
I.11.1. MODULE DE FILTRATION .....	23
I.11.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	24
I.12 CONCLUSION .....	25

## CHAPITRE II : RÉSEAU DE NEURONES ARTIFICIEL

II.1 INTRODUCTION .....	26
II.2 LE NEURONE BIOLOGIQUE.....	26
II.2.2 ANATOMIE DE NEURONE.....	27
A. LES DENDRITES .....	27
B. LE CORPS CELLULAIRE.....	27
C. L'AXONE .....	27
II.2.3 DOMAINE D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES (RNA) .....	28
II.2.3.1 L'APPLICATION AU TRAITEMENT DU SIGNAL .....	28
II.2.3.2 L'APPLICATION À LA PLANIFICATION .....	28
II.2.3.3 L'APPLICATION AU CONTRÔLE .....	28
II.2.3.4 L'APPLICATION AU DIAGNOSTIC .....	28
II.4 LE NEURONE FORMEL .....	29
II.4.1 MODÉLISATION GÉNÉRALE .....	30

## TABLE DES MATIERES

---

II.5 CLASSIFICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES .....	32
II.5.1 DESCRIPTION ARCHITECTURALE.....	32
II.6 RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS .....	33
II.6.2 LES RESEAUX NON BOUCLES .....	33
II.6.3 LES RESEAUX BOUCLES .....	34
II.6.4 RESEAUX ARCHITECTURE AUTO-ORGANISEE.....	34
II.7 STRUCTURE D'INTER CONNEXION .....	34
II.8 APPRENTISSAGE .....	36
II.8.1 APPRENTISSAGE SUPERVISE .....	36
II.8.2 APPRENTISSAGES NON SUPERVISE.....	37
II.9 PROCEDURE D'APPRENTISSAGE .....	38
II.10 VARIANTES DE L'ALGORIHTME DE RETRO PROPAGATION .....	38
II.11 CONCLUSION .....	38

### **CHAPITRE III : MODELISATION PAR RÉSEAU DE NEURONES ARTIFICIEL**

III.1. INTRODUCTION.....	39
III.2. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL .....	39
III.2.1. PILOTE EXPÉRIMENTALE .....	39
III.3. RESEAU NEURONAL ARTIFICIEL.....	40
III.4. RÉSULTATS DE MODÉLISATION PAR ANN.....	41
III.5. DISCUSSION.....	42
III.6. CONCLUSION.....	44
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	46
ANNEXE	

# Introduction générale

---

Dans les dernières décennies les bases de données collectées par les chercheurs à partir des travaux expérimentaux sont largement utilisées pour la modélisation, ceci à cause des difficultés et obstacles matériels qui inhibent souvent la recherche empirique et cela en particulier dans les pays moins développés. Le réseau de neurones artificiels est parmi les outils utilisés pour modéliser un phénomène en utilisant une base de données extraite et collecté auparavant pendant des travaux expérimentaux. Le Réseau de Neurones Artificiels (RNA) est une technique d'apprentissage automatique qui modélise et analyse la relation entre les variables d'entrée et de sortie. RNA peut prédire avec précision les systèmes non linéaires complexes rencontrés dans les processus de séparation membranaire.

Récemment le réseau de neurones est devenu un outil puissant malgré sa complexité. Il est utilisé dans l'apprentissage des machines (Robots) sur le titre de l'apprentissage approfondi. Malgré les peurs de l'intelligence artificielle et l'apprentissage approfondi qui conduit peut-être à l'indépendance de la machine. De plus, L'évolution technologique durant les dernières années a permis aux scientifiques d'élaborer et de perfectionner des méthodes pour différents domaines. L'évolution des ordinateurs en particulier leur capacité d'intégration des composants puisant atteintes à nos jours, ont permis une grande vitesse du calcul et une grande capacité mémorielle, ce qui donne au chercheur l'occasion de manipuler d'énormes opérations de calcul et qui sont parfois très compliqués et difficiles à résoudre par une ancienne modeste technique.

La séparation des molécules ou particules du fluide par la filtration membranaire présente un défi permanent car le fluide filtré amène en continu ces solutés (particules) à la surface de membrane et forme une couche de solutés appelle gâteau ou dépôt, ce qui augmente la résistance de la filtration. La prédiction que nous allons réaliser dans ce travail, concerne la filtration membranaire, cette dernière est gouvernée par des phénomènes physico-chimiques, par lesquels plusieurs travaux expérimentaux ont été réalisés pour modéliser les phénomènes physiques. Malgré tous ces travaux expérimentaux. Les modèles et suppositions proposés reste insuffisant pour calculer avec précision le flux de perméat. À partir de ce contexte on a essayé dans ce travail à mettre la lumière sur ces travaux expérimentaux et faire une modélisation de prédiction des résultats d'un tel système de filtration, à savoir, la filtration dynamique en utilisant un disque rotatif à membrane. Ce dernier et concevoir et fabriquer par un laboratoire de recherche scientifique situé en France. En premier lieu une base de données a été collecté à partir des résultats expérimentaux trouvez dans la littérature. Le flux de filtration membranaire est gouverné par plusieurs phénomènes, à savoir ; le colmatage, la pression transmembranaire, la taille des pores, la concentration la viscosité ; la densité de

# Introduction générale

---

filtrat, la vitesse de rotation de disque membranaire ; et le type de disque tournant avec ailette ou sans ailette.

Intitulé " *Modélisation neuronale (RNA) de flux de perméat d'un disque rotatif à membrane (RDM)*" : Étude théorique et numérique, ce mémoire tend ainsi à démontrer que cette étude a permis de comprendre et optimiser les paramètres qui gouvernent le phénomène de séparation par membranes. Elle a permis de bien déceler les paramètres les plus importants qui contrôlent le procédé et permettent l'amélioration du rendement de filtration.

Après une **première partie** consacrée à l'étude bibliographique, relative aux procédés dynamiques de filtration membranaire ainsi l'établissement des modèles théoriques des flux de perméation et les facteurs limitant le flux de perméat de la microfiltration et l'ultrafiltration. **Dans le second chapitre**, on a mis la lumière sur le réseau de neurones artificiels et leur inspiration du réseau neuronal biologique. On a entamé aussi les différents types et architecture de l'RNA, et leur mode de fonctionnement.

Le **troisième chapitre** présente nos résultats et discussions.

## I.1. INTRODUCTION

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines notamment dans le cycle de l'eau (potabilisation de l'eau, traitement des effluents, réutilisation de l'eau, adoucissement, dessalement ...). La filtration membranaire est basée sur l'application d'une différence de pression qui permet le transfert du solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés. Ces opérations, classées selon une taille des pores décroissantes, sont : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nano filtration et l'osmose inverse. Ce sont des procédés matures technologiquement (une bonne part du développement technologique est déjà réalisé) mais encore en plein développement industriel [1].

À titre d'exemple, dans le domaine de la potabilisation de l'eau, la capacité de production des plus grosses usines est multipliée par dix tous les 5 ans. [1].

Ces technologies membranaires sont, en général, appréciées pour leur faible consommation énergétique et leur bonne sélectivité. Elle donc des technologies propres contribuent à la réduction des gaz à effet de serre, donc des outils pour aider au développement durable. [2].

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur la filtration membranaire et le procédé membranaire (nanofiltration (**NF**), ultrafiltration (**UT**), microfiltration (**MF**)), puis nous décrivons quelques modules de ce procédé, après la filtration membranaire à disque rotatif et les utilisations de ce procédé dans l'industrie.

## I.2. DEFINITION DE FILTRATION MEMBRANAIRE

La filtration membranaire est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point. La cause de ses difficultés est le colmatage qui reste difficile à éviter ou limiter et complexe à décrire. Ils peuvent affecter les performances du système et provoquer le vieillissement de la Membrane d'osmose inverse [3].

## I.3. LES MEMBRANES

Une membrane peut être décrite comme une barrière permselective de très mince couche de matière qui va permettre ou interdire le passage ou la rétention de certains espèces ou composants à l'échelle microscopique entre deux milieux qu'elle sépare sous l'action d'une force agissante peut être une différence de pression, de potentiel électrique ou de concentration de part et d'autre de la membrane. La phase retenue constitue alors le retentât (ou concentrât) alors que la phase ayant traversé la membrane s'appelle le perméat (ou filtrat).

Les membranes utilisées dans le traitement des eaux sont poreuses ou denses et doivent permettre d'enlever les contaminants principalement par effet stérique, sous une pression transmembranaire ou un flux de perméat constant. [4].

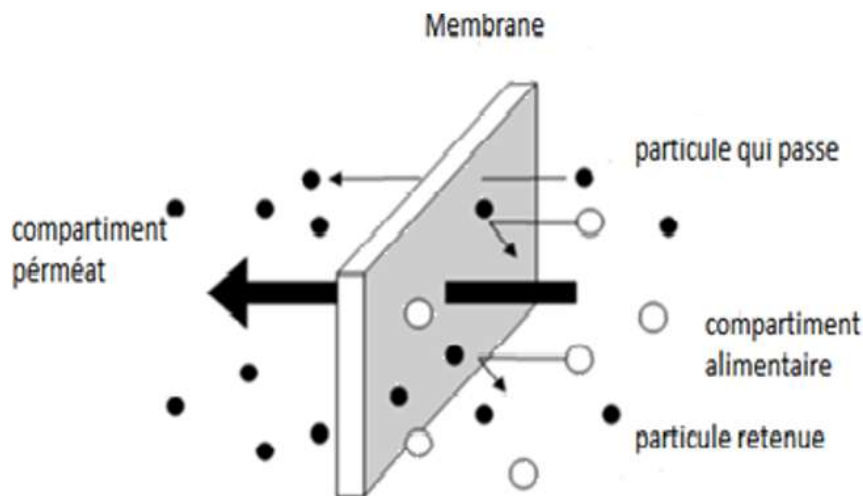


Figure I.1 Membrane sélective [5].

#### I.4. PRESENTATION DES PROCÉDES MEMBRANAIRES

La technologie membranaire est devenue une véritable technologie de séparation lors de la dernière décennie. La force principale de la technologie membranaire est le fait que cela fonctionne sans ajout de produits chimiques, avec une conduction de procès facile et bien arrangée. Les différentes techniques membranaires peuvent être classées selon la nature de la force motrice mise en jeu. [6].

Tableau I.1 : Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux [7]

Force motrice	Domaine d'application
Déférence de pression	Microfiltration, ultrafiltration, nano filtration ; osmose inverse
Déférence de concentration	Dialyse
Déférence de potentiel électrique	Électrodialyse

##### I.4.1. LES TECHNIQUES MEMBRANAIRES A GRADIENT DE PRESSION

Ces techniques, appelées également techniques Baro-membranaires, reposent sur une différence de pression totale de part et d'autre de la membrane, en ordre décroissant de taille de pores de membrane on distingue [6] :

###### I.4.1.1. MICROFILTRATION (MF)

La microfiltration tangentielle peut être définie comme un procédé de séparation solide liquide qui met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ . Ce procédé permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries,



indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des particules plus grosses obtenues par complication, précipitation ou floculation. [8].

Une pression de filtration comprise entre 0,5 et 3 bars, un flux de l'ordre de 200 à 450 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup> et une vitesse de l'eau d'environ 3 m.s<sup>-1</sup> sont les paramètres moyens de fonctionnement. Les particules d'un diamètre supérieur à celui des pores sont arrêtées par criblage. Un colmatage progressif se développe. Le décolmatage est très difficile. En général, une préfiltration à un seuil d'environ 500 µm, est nécessaire pour éviter toute détérioration prématurée des membranes. La microfiltration est adaptée pour le traitement des eaux souterraines à forte turbidité occasionnelle telles que les eaux karstiques [9].

La microfiltration se substitue efficacement à l'étape de clarification. La réduction de turbidité, la microfiltration minérale et des germes sont remarquables. Par contre l'élimination des virus, des pesticides et des sous-produits d'oxydation n'est pas du domaine de la microfiltration.

#### I.4.1.2. L'ULTRAFILTRATION (UF)

est une méthode de séparation membranaire, qui ne se distingue de la microfiltration ou de la nanofiltration que par la taille des particules en suspension ou en solution qui peuvent passer à travers. Pour l'ultrafiltration cette taille est entre 1 et 100 nanomètre (nm) ; cette taille est trop petite pour les bactéries, levures et la plupart des virus. En pratique, l'ultrafiltration est majoritairement utilisée pour séparer des matières dissoutes alors que la microfiltration est majoritairement utilisée pour séparer des particules en suspension. [10].

L'ultrafiltration est un procédé Baro-membranaire : le transfert a lieu sous l'effet de la pression. Cette pression transmembranaire (PTM) est entre 1 et 10 bar . [11].

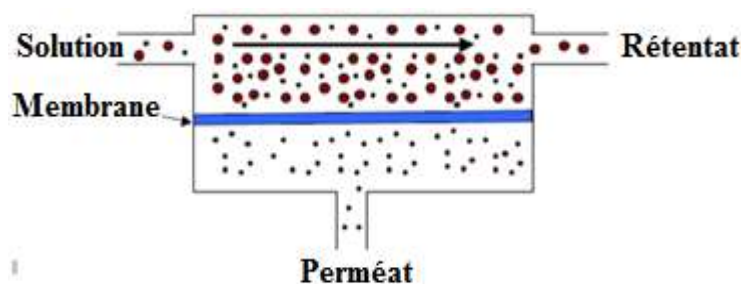


Figure I.2 : Principe de l'ultrafiltration [12].

#### I.4.1.3. NANOFILTRATION

La nanofiltration se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, la membrane est de type poreux. Les mesures prises au microscope à force atomique indiquent que la plupart des pores de la membrane de nanofiltration (NF) sont distribués entre 0,3 et 2 nm de diamètre.

[13,14,15].la membrane de nanofiltration permet la séparation de composant ayants une taille en solution voisine de celle du nanomètre. [16].

Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane.

Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus. [17].

Ce procédé est surtout utilisé en potabilisation ou dans les chaînes de traitement des eaux résiduaires. Il est à ce jour peu utilisé pour la production d'eau ultrapure. [18].

#### I.4.1.4. OSMOSE INVERSE

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. [18].

Typiquement utilisée pour le dessalement de l'eau de mer ou la déminéralisation des eaux saumâtres, l'osmose inverse est la plus ancienne des techniques de séparation par membrane. Elle utilise des membranes denses pour retenir la majorité des solutés et ne laisser passer que le solvant (l'eau, en général). Le principe repose sur l'application, côté alimentation, d'une pression supérieure à la différence de pression osmotique du retentât et du perméat pour forcer le solvant à passer à travers la membrane. Les pressions appliquées sont comprises entre 30 et 80 bar. [19]

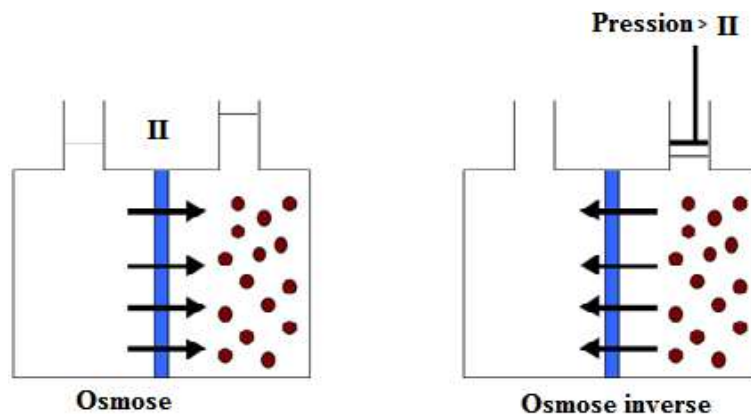
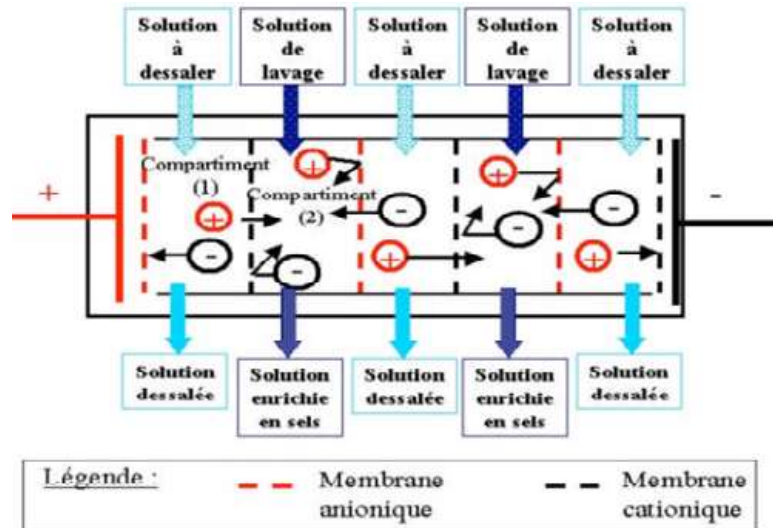


Figure I.3 : Principe de l'osmose inverse [20].

#### I.4.2. TECHNIQUES MEMBRANAIRES A GRADIENT DE POTENTIEL ELECTRIQUE

L'électrodialyse est une technique électro-membranaire qui désigne le transfert d'ions à travers une membrane, sous l'effet d'un champ électrique. Un électro dialyseur est constitué de succession de cellules à compartiments à membranes alternativement anioniques et cationiques. Lors de l'action du champ électrique, la membrane anionique autorise le passage

des anions et la membrane cationique laisse passer les cations. Les cations sortent du premier compartiment en franchissant la membrane cationique et sont bloqués dans le deuxième compartiment par la membrane anionique. Les anions sortent aussi du premier compartiment en migrant la membrane anionique et sont bloqués par la membrane cationique [7,21].



**Figure I.4 :** Schéma représentatif de l'électrodialyse pour la potabilisation de l'eau. [7].

Dans le premier compartiment, la concentration en sel dissout diminue. C'est donc un compartiment de dilution. Le deuxième compartiment voit augmenter la concentration en sels dissout. C'est alors un compartiment de concentration. Un compartiment sur deux est un compartiment de dilution, un sur deux est un compartiment de concentration. Une électrode à chaque extrémité de l'appareil assure le passage du courant. La principale application de l'électrodialyse est le dessalement des eaux saumâtres. [22].

## I.5. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE FILTRATION MEMBRANAIRE

### I.5.1. PRESSION TRANSMEMBRANAIRE (PTM)

La PTM est une force motrice qui permet le transfert à travers une membrane. Elle peut être définie par la différence de pression (pression de rétentat et pression de perméat) selon l'Equation (I-1) [3].

$$PTM = P_{\text{rétentat}} - P_{\text{perméat}} \quad \text{I.1}$$

D'où :

$$PTP = (P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}})_{\text{Rétentat}} - (P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}})_{\text{perméat}} \quad \text{I.2}$$

P : pression absolue [Pa]

$P_{\text{relative}}$  : est lue au manomètre A l'exception de la microfiltration, dans la plupart des cas, le compartiment perméat est ouvert à l'air et donc à la pression atmosphérique

( $P_{relative}^{perméat} = 0$ ), l'équation (I.2) se réduit à l'Équation (I.3).

$$PTM = P_{relative}^{retentat} \quad I.3$$

En raison des pertes de charges dans les modules, la pression dans le retentant ( $P_{retenta}$ ) chute entre l'entrée et la sortie de la membrane. Il est donc nécessaire d'avoir des capteurs de pression en entrée et en sortie des modules et la pression moyenne du retentât  $P_{rét\ moye}$  est généralement utilisée équation (I.4). [3].

$$(P_{rét})_{moye} = PTM = (P_{entrée} + P_{sortie}) / 2 \quad I.4$$

### I.5.2. LE FLUX DE PERMEAT

C'est le débit à travers la membrane par unité de surface géométrique. Dans le cas d'une membrane poreuse, il peut être défini par la relation de Poiseuille (Équation I.5) en considérant que la membrane est un réseau de capillaires cylindriques de rayon constant et que l'écoulement y est laminaire [23].

$$J_V = \frac{Q}{S} = \frac{n_p \cdot \pi \cdot r_p^4}{8 \cdot l \cdot \mu} \cdot \frac{PTM}{\pi \cdot r_p^2} = \frac{n_p \cdot r_p^2}{8 \cdot l \cdot \mu} \cdot PTM \quad I.5$$

$J_V$  : flux (m/s unité usuelle :  $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

$Q$  : débit ( $m^3/s$ ).

$S$  : surface géométrique de la membrane ( $m^2$ ).

$n_p$  : nombre de pores par unité de surface.

$r_p$  : rayon des pores (cylindrique) (m).

$l$  : épaisseur de la membrane (m).

$\mu$  : viscosité dynamique du solvant (Pa. s).

$PTM$  : pression transmembranaire (Pa) (unité usuelle = bar).

### I.5.3. LE TAUX DE RETENTION

Également appelé taux de rejet, il s'agit d'une mesure quantitative des propriétés de tamisage moléculaire de la membrane. C'est une grandeur adimensionnelle qui représente le pourcentage d'une molécule considérée, retenue par la membrane. Le taux de rétention d'une espèce chimique, déterminé expérimentalement ( $R_{obs}$ ), est calculé à partir des concentrations du soluté dans le retentat ( $C_R$ ) et le perméat ( $C_P$ ) [24] :

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_P}{C_R} \quad I.6$$

$R_{obs}$  : est une grandeur fonction des conditions hydrodynamiques de la filtration (vitesse de circulation, mode d'écoulement, géométrie de la membrane). Cependant il ne tient pas compte de l'accumulation possible de molécules au niveau de la surface membranaire. Ce

phénomène, nommé polarisation de concentration, influence significativement le transfert des espèces filtrées au voisinage de la membrane. Il fera l'objet d'une description détaillée par suite. Un taux de rétention intrinsèque ( $R_{int}$ ) permet alors une description au plus près des conditions réelles de filtration. Il est décrit tel que [24] :

$$R_{int} = 1 - \frac{C_p}{C_m} \quad \text{I.7}$$

Avec,  $C_m$  : la concentration de soluté aux abords de la membrane.

Toutefois, son calcul nécessite une connaissance exhaustive des conditions hydrodynamiques de filtration. Une membrane donnée va retenir des solutés selon sa structure, mais également selon les propriétés des solutés. Taille (encombrement stérique), charge (interactions électrostatiques avec des membranes pouvant être chargées) et couche de solvation (influence fonction de la taille des solutés et de la nature du solvant) sont les principaux facteurs influents. Dans le cas de membranes poreuses et d'une séparation exclusivement stérique (tamisage moléculaire), le taux de rétention peut être décrit par la loi de Ferry où  $\lambda$  est le rapport du rayon du soluté sur le rayon d'un pore de la membrane ( $\lambda = r_s / r_p$ ). [25].

$$R_{int} = (1 - \lambda)^2 \quad \text{I-8}$$

Notons que cette relation ne tient pas compte des éventuels défauts ni de la distribution de la Taille des pores des membranes lorsqu'elles sont de structure poreuse [26,27].

#### I.5.4. RESISTANCE HYDRAULIQUE DE LA MEMBRANE ( $R_m$ )

La résistance hydraulique ( $R_m$ ) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité [6] :

$$R_m = \frac{1}{A} = \frac{S \Delta P_m}{Q_p} \quad \text{I.9}$$

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

En supposant que les pores d'une membrane soient cylindriques et rectilignes, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la résistance d'une membrane comme [6] :

$$R_m = \frac{8 \delta}{n_p \pi r_p^4} \quad \text{I.10}$$

$\delta$  : est l'épaisseur de la couche active de la membrane.

$n_p$  : est le nombre de pores par unité de surface.

$r_p$  : est le rayon des pores.

Cette équation montre que la résistance de la membrane augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la membrane et diminue avec sa porosité [28].

### I.6. MODULE MEMBRANAIRE

Un module est la plus petite unité qui peut être changée dans un système industriel. Il s'agit d'un assemblage de membranes avec une entrée d'alimentation commune et des sorties communes de perméat et de concentré. Le module comporte des cadres séparateurs ou des drains intercalaires, et généralement des joints de colle pour assembler les membranes et assurer l'étanchéité entre l'alimentation et le perméat. Un module ne comporte pas d'accessoires et d'équipement tels que des dispositifs de mesure, de mise sous pression, de contrôle. [28].



**Figure I.5 :** Détail d'un tube à pression. [6].

### I.6.2. TYPES DE MODULES

Parmi les modules supportant les membranes, il existe quatre grands types qui sont commercialisés :

#### I.6.2.1. LES MODULES TUBULAIRES

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes. [29]. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent.

A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations [30].

Dans les techniques tubulaires, la membrane est enroulée sur elle-même et déposée ou directement formée à l'intérieur d'un tube support poreux d'un diamètre de 7 à 40 mm.

C'est la configuration la moins compacte mais qui permet une grande vitesse de circulation et un nettoyage facile. Les modules céramiques sont rétro lavables [31].

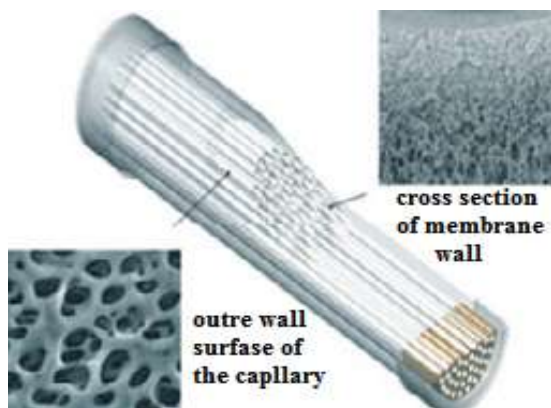


Figure I.6 : Membrane tubulaire [6].

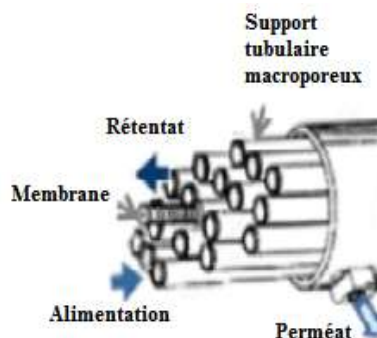


Figure I.7 : module tubulaire [6].

### I.6 .2.2. LES MODULES PLANS

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides. [32]. Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les surfaces de filtration vont de 100 à 400 m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup> occupé par le module [32].

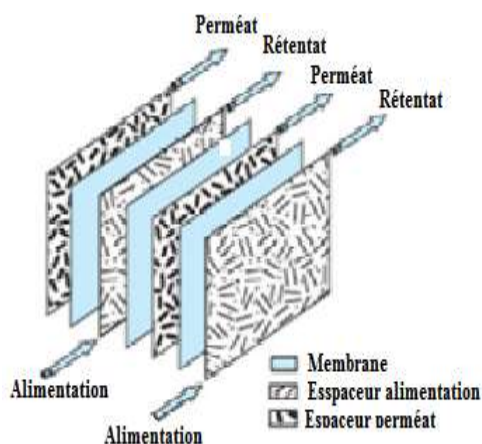


Figure I.8: Module plan [6].

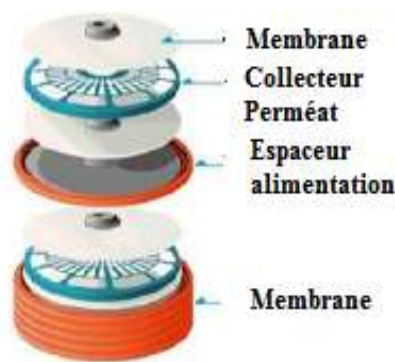


Figure I.9: Module plan.

### I.6.2.3. MODULES A FIBRES CREUSES

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne - externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse [33].

Les membranes sont composées de différentes couches : un support et une sous-couche poreuse qui assurent la résistance mécanique de la membrane, et à la surface une peau active

qui détermine les propriétés de la membrane (flux, sélectivité). La composition de la sous-couche et la composition de la peau active peuvent être différentes (Figure I-10).

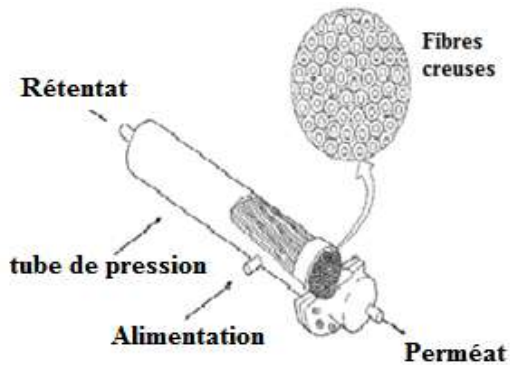


Figure I.10: Module fibres creuses [6].



Figure I.11: Fibre creuse [6].

Il est à noter que les modules les plus utilisés dans le domaine du traitement de l'eau au sens large sont les modules à fibres creuses (ultra et microfiltration) ainsi que les modules spirales (nano filtration et osmose inverse) [32].

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration Interne- Externe (Schéma a) : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres ;
- Configuration Externe (Schéma c et b) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre [34].

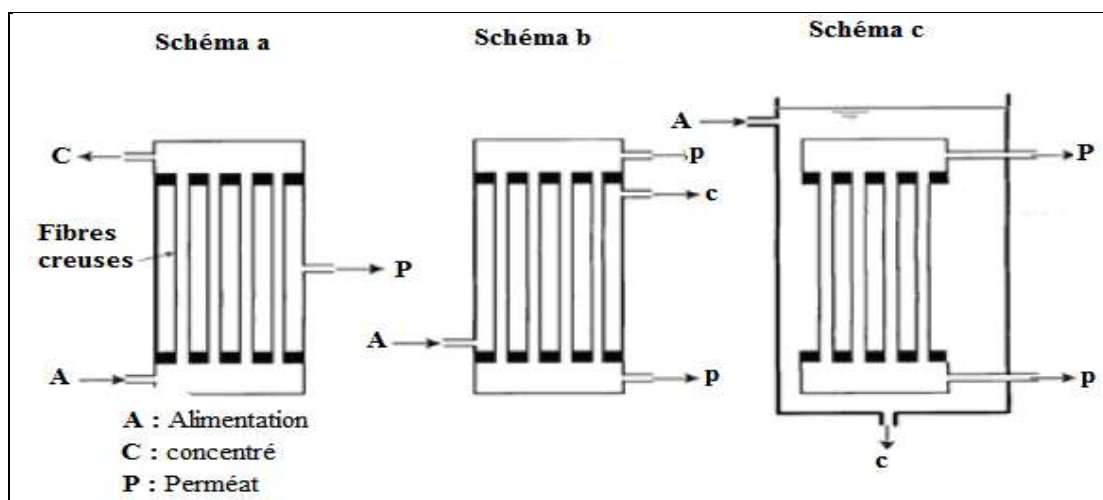


Figure I.12 : Modules à fibres creuses. [29].



#### I.6.2.4. LES MODULES SPIRALES

Ceux-ci constituent l'essentiel du marché de membranes actuelles. Il s'agit de plusieurs couches de membranes enroulées autour d'un axe tubulaire macroporeux. Dans le cylindre multicouche ainsi formé, l'écoulement du filtrat adopte un chemin spiralé jusqu'au tube central tandis que la solution d'alimentation circule de façon axiale. [35].

Les membranes utilisées sont uniquement des membranes organiques qui sont suffisamment flexibles pour pouvoir être enroulées. L'alimentation se fait sur le côté du module au niveau de l'espaceur d'alimentation. Le perméat est collecté dans l'espaceurs perméat et, en suivant une spirale, ressort par le tube de collecte central. Le retentât traverse le module par les espaceurs d'alimentation et ressort de l'autre côté du module [36].

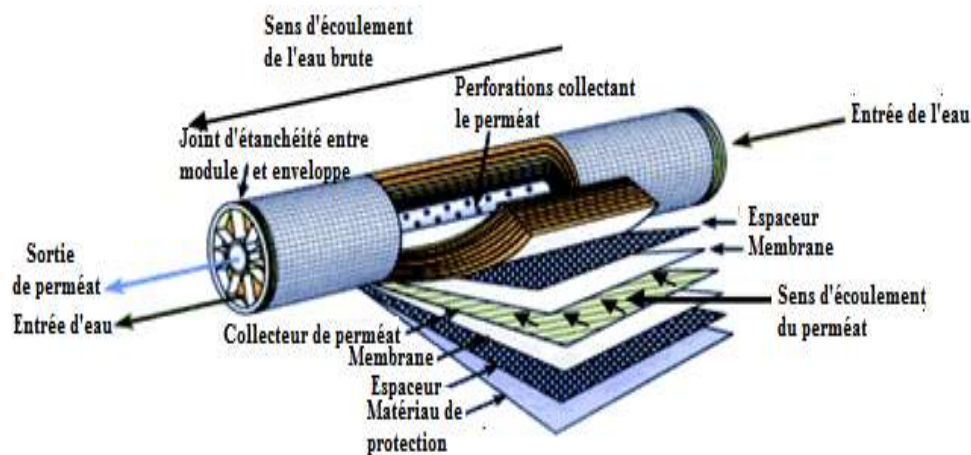


Figure I.13 : Structure interne d'une membrane à spirale [37].

Les principaux avantages et inconvénients des modules adaptés aux quatre géométries de membranes énoncées ci-dessus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des différents modules membranaires [33]

Module	Avantage	Inconvénients
Plane	Possibilité de récupérer le perméat Produit par chaque élément membranaire	Nettoyage in situ assez Difficile
Spirale	Compacité Faible coût d'investissement	Prétraitement nécessaire Nettoyage in situ très Difficile
Tubulaire	Très peu d'exigences de prétraitement Nettoyage in situ facilité	Consommation énergétique Élevée Compacité limitée
Fibre creuse	Compacité élevée Faible consommation énergétique Faible coût d'investissement	Prétraitement nécessaire en Mode interne/externe

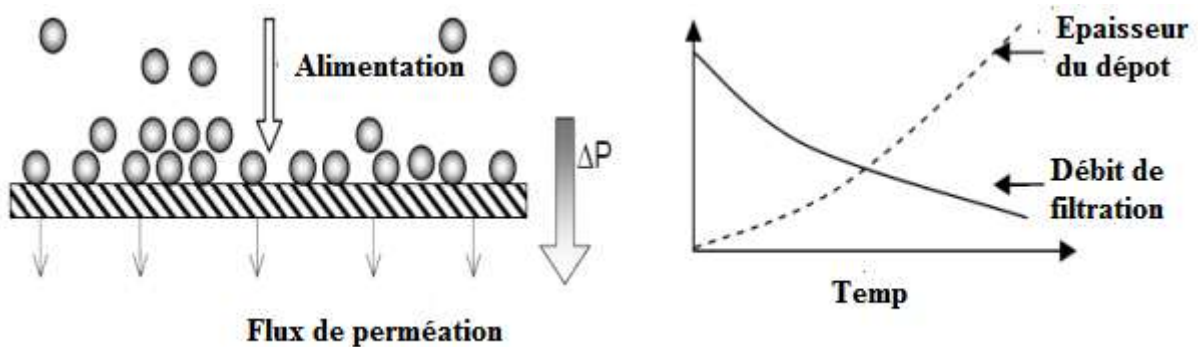
## I.7. MODES DE FONCTIONNEMENT

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux :

- La filtration frontale.
- La filtration tangentielle.

### I.7.1. LA FILTRATION FRONTALE

La filtration frontale sur support est l'un des principaux modes adoptés en filtration membranaire à côté de la filtration tangentielle et est caractérisée par le passage perpendiculaire du mélange à séparer par convection sous l'action de la différence de pression transmembranaire comme décrit dans la Figure I.14 [38].



**Figure I.14 :** Présentation du fonctionnement de la filtration frontale [39].

Ce mode de filtration consiste à amener la solution à filtrer perpendiculairement à la membrane (Figure I-14). Les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux. La filtration frontale est néanmoins utilisée dans des procédés de type filtres-presses (principalement utilisés dans l'industrie pour éliminer les métaux lourds par précipitations des cations métalliques sous forme de boues d'hydroxydes) ainsi que dans les bioréacteurs à membranes immergées.

Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toute trace de virus ou de bactérie d'une eau qui est faiblement colmatant. Dans ce dernier domaine la filtration frontale est aussi appréciée du fait que cette technologie est compacte et donc plus facilement stérilisable qu'un circuit qui fait intervenir plusieurs pompes [40].

### I.7.2. LA FILTRATION TANGENTIELLE

Est un procédé de filtration destiné à séparer les particules d'un liquide par leur taille. Elle est appelée cross-flow filtration en anglais [41].

Dans ce mode le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane (Figure I-15) avec une vitesse moyenne  $V$ , imposant ainsi un gradient de cisaillement à la surface de la

membrane qui limite ainsi l'accumulation de matière. En filtration tangentielle lors d'un changement de pression, les espèces arrivant près de la membrane ainsi que le dépôt (dans le cas où il y en a un) mettent un certain temps à se construire, durant cette phase, le flux décroît. Ensuite, un équilibre peut être atteint et le flux peut se stabiliser dans un état stationnaire. La filtration tangentielle est souvent utilisée en industrie car elle permet de travailler, une fois que le régime est établi (entre quelques minutes et quelques heures), avec un flux de perméation à peu près constant. La filtration tangentielle est par contre utilisée quasi systématiquement lorsque les fluides ont des taux de MES élevés [40].

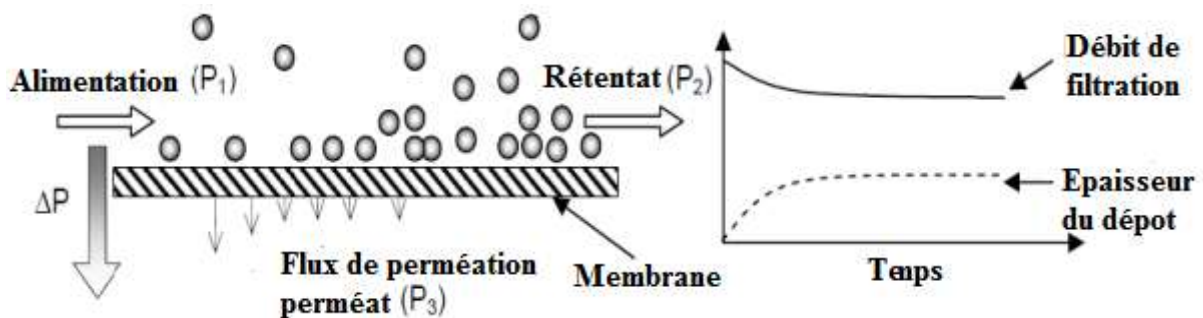


Figure I.15 : Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle [39].

### I.8. LE COLMATAGE

Le colmatage peut être défini comme la conséquence des phénomènes résultant du passage de la matière d'une phase liquide (solution à filtrer) à une phase solide (la membrane), formant ainsi un dépôt sur/ou dans la membrane. On distingue le colmatage externe sur la surface de la membrane, du colmatage interne situé dans les pores de la membrane. [38].

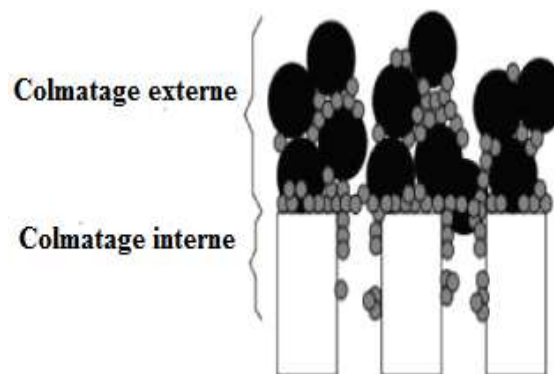


Figure I.16 : Le colmatage externe et interne d'une membrane [38].

Les causes du colmatage sont attribuées à de nombreux facteurs qui souvent interagissent entre eux. L'on dénote notamment quatre principales catégories que sont les colmatages organique, inorganique, particulaire et biologique. Afin de s'affranchir des pertes de performances liées au colmatage, différentes stratégies peuvent être mises en œuvre en fonction de la nature de l'agent responsable (tableau I.3). [24].

**Tableau I .3** : récapitulatif des facteurs et mesures à prendre compte pour éviter le colmatage Membranaire [24].

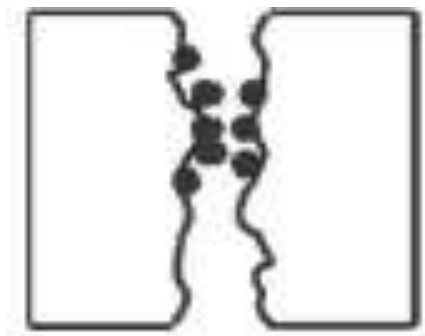
Nature de l'argent colmatant	Facteur de contrôle pour une Occurrence minimal
Tous types	Hydrodynamique, cisaillement, intensité du Flux, nettoyage chimique.
Inorganique	Limite de solubilité, PH, additifs (anticalcaires), précautions oxydation.
Organique	Prétraitement biologique (enzymes). Au charbon actif, sur résines échangeuses d'ions, avec inducteurs de coagulation.
Colloïdale	Coagulation, micro-et /ou ultrafiltration préalables
Solide biologique	Désinfectants (chlore), coagulation, micro-et/ou ultrafiltration préalables.

### I.8.1. LES TYPE DE COLMATAGES

En effet, en fractionnant le colmatage suivant trois échelles d'observation :

#### I.8.2.1. LE BLOCAGE DES PORES

Il s'agit de la pénétration et du blocage, partiel ou total, des pores de la membrane par des particules sur lesquelles des composés peuvent être adsorbés. L'importance de ce phénomène dépend de la forme et de la taille relative des pores et des particules ainsi que des conditions hydrodynamiques. [3].



**Figure I .17** : Le blocage des pores [3].

#### I.8.2.2. LE COLMATAGE PAR DEPOT DE PARTICULES EN SURFACE

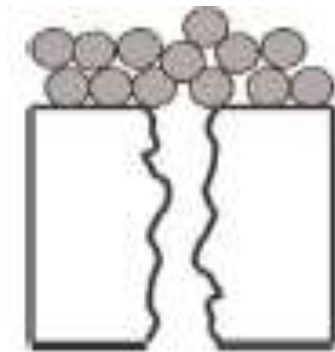
Contrairement aux solutés, les matières en suspension dans l'eau (particules, bactéries, protozoaires, virus) peuvent être, selon leur taille, caractérisées par un pouvoir diffusif faible

voire nul. Il en résulte que l'accumulation de matière, sous l'effet convectif de la perméation, n'est pas compensée par un flux diffusif de retour. Lorsque les forces de convection deviennent supérieures aux forces de répulsion, une déstabilisation des particules se produit et le colmatage apparaît. Il y a donc une transition de phase entre une phase dispersée et une phase condensée [42].

Ainsi, les particules ayant une taille supérieure à celle des pores de la membrane forment à la surface de celle-ci un dépôt communément appelé gâteau de filtration. Ce dernier constitue une couche poreuse et agit comme une épaisseur supplémentaire de membrane s'opposant ainsi au transfert de matière. La résistance hydraulique du dépôt,  $R_d$ , est proportionnelle à la masse particulaire déposée par unité de surface membranaire,  $m_d$ , par l'intermédiaire de la résistance spécifique du dépôt,  $\alpha$  :

$$R_d = m_d \cdot \alpha \quad \text{I. 11}$$

La résistance spécifique est une propriété intrinsèque du dépôt qui dépend de sa structure [3].



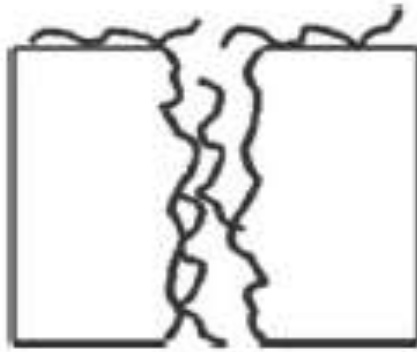
**Figure I.18** : Le colmatage par dépôt de particules en surface [3].

### I.8.2.3. L'ADSORPTION

L'adsorption est un phénomène physicochimique qui se produit sous l'effet d'interactions entre certains constituants du fluide et toute surface solide, donc avec la membrane [43].

Elle peut avoir lieu en mettant le fluide au contact de la membrane, avant même que la filtration n'ait commencé et provient majoritairement d'interactions fortes conduisant à des couches irréversibles stables. L'adsorption peut intervenir aussi bien à la surface de la membrane qu'à l'intérieur des pores et contribue ainsi à la fois au colmatage externe et colmatage interne [38].

Les conséquences de ce phénomène sont une réduction du nombre ou de la taille des pores efficaces (augmentation de la résistance hydraulique) et une modification de la charge de surface de la membrane [3].



**Figure I-19** : Colmatage par l'adsorption [3].

### **I.9. APPLICATION DES PROCÉDES MEMBRANAIRES DANS L'INDUSTRIE**

Historiquement, les procédés membranaires à gradient de pression ont commencé à apparaître dans l'industrie laitière.

Les grands marchés sont actuellement l'industrie agro-alimentaire (stabilisation, clarification, extraction ou concentration de produits), la pharmacie, les biotechnologies et le traitement de l'eau (potable, de procédé ou ultra pure). La chimie et les industries de traitement de surface sont également utilisateurs de ces techniques. [6].

Les procédés membranaires peuvent permettre de développer des procédés industriels sobres et propres en les utilisant à quatre grandes places clés :

- Au cœur même du procédé, en remplacement d'une ou de plusieurs opérations unitaires de séparation, ou en couplage avec une ou plusieurs opérations unitaires ;
- Tri à la source, au plus proche du procédé, pour recycler/réutiliser des matières Premières (eau, produits chimiques, biomasse...).
- Fourniture de fluides de procédés (eau ultra pure...).
- Traitement en bout de chaîne d'effluents, par exemple pour limiter leur volume dans le cas d'effluents toxiques. [6].

**Tableau I.4:** Tableau représente les applications industrielles des procédés membranaires.

Secteur	Produit	But de la séparation	Procédés			
			MF	U F	NF	OI
Irrigation	Eau	Production			X	
Lait et dérivés	Lactosérum	Extraction		X	X	
		Extraction		X		
		Concentration				X
	Lait	Extraction		X		
		Stabilisation	X			
		Concentration				X
Saumure	Recyclage	X				
Sucrierie	Impuretés	Extraction			X	
Vinaigre		Clarification	X			
Sucrierie	Impuretés	Extraction			X	
Boissons	Sans alcool	Production				X
	Eau	Recyclage		X		
	Jus de fruits	Clarification	X			
		Concentration				X
Boisson alcoolisée	Moût de raisin	Production				X
	Eau de vie	Production				X
	Bière	Clarification	X			
	Vin	Clarification	X			
		Stabilisation	X			
Produits spéciaux	Amidon	Clarification		X		
	Gélifiant	Extraction		X		
Pharmacie						
	Antibiotique	Extraction		X		
	Enzyme	Extraction		X		
	Eau de procédé	Production		X		X
	Eau ultra pure	Production	X			X
	Extrait végétal	Concentration			X	
Papeterie						
	Eaux de désencrage	Concentration	X			X
	Eaux de désencrage	Recyclage		X		
Mines						
	Effluents	Dépollution			X	
		Recyclage			X	
Tertiaire						
	Hôtel	Production			X	
	Piscine	Recyclage		X		
Textile						
Effluent	Laine	Recyclage		X		
		Dépollution			X	
Produits d'encollage	Colorants	Recyclage		X		

<b>Chimie</b>						
	Catalyseur	Extraction	X	X		
	Colorant	Extraction		X		
	Effluents	Dépollution			X	
	Solvant	Recyclage			X	X
Agglomérés	Résine	Recyclage				X
<b>Cosmétique</b>						
	Extrait végétal	Concentration				X
<b>Eaux usées</b>						
	Bioréacteur à Membrane	Dépollution	X	X		
<b>Energie</b>						
Chaufferie	Silice	Extraction		X		
	Fer	Extraction			X	
<b>Raffinerie</b>						
Effluent	Eau-Huile	Dépollution		X		
<b>Traitement de Surface</b>						
Effluent	Métaux lourds	Dépollution			X	

**Clarification** : Il s'agit de rendre limpide le produit.

**Concentration** : Il s'agit de concentrer un ou plusieurs produits dans une des phases.

**Extraction** : Il s'agit d'une opération d'enlèvement d'une ou plusieurs molécules du liquide d'alimentation ; cela peut être une purification, une extraction, un fractionnement.

**Production** : Le procédé membranaire est utilisé comme outil de fabrication, et rentre dans la ligne de production d'un produit.

**Recyclage** : Le procédé membranaire traite un rejet pour recycler soit le filtrat, soit le retentât soit les deux.

**Stabilisation** : Il s'agit d'une opération similaire à la stérilisation à chaud ou la, prévention d'apparition de précipités.

**Dépollution** : Il s'agit de concentrer la pollution dans le retentât tout en produisant un filtrat de qualité suffisante, en vue d'un rejet.[6].

## I.10. SYSTEMES DE FILTRATION DYNAMIQUE

### I.10.1. SYSTEMES SPIN TEK (HIGH SHEAR ROTARY FILTRE)

Conçu par la société SPINTEK (Huntington, Californie, États Unis), ce module comporte plusieurs étages. Les membranes sont solidaires de l'arbre de rotation et donc mobiles. Les surfaces membranaires disponibles sont de 0,05 m<sup>2</sup> pour le module de laboratoire, 2,3 m<sup>2</sup> pour le pilote industriel et 13,9 m<sup>2</sup> pour le module industriel (Figure I.20). La membrane peut être

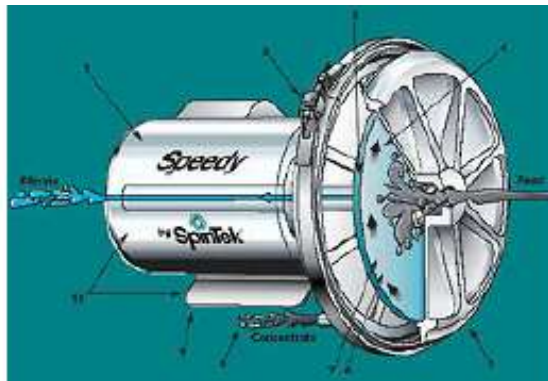


en polymère, céramique ou métallique. Les seuils de coupure disponibles pour les membranes varient entre 200 Da et 3  $\mu\text{m}$ . L'arbre de rotation peut aller à des vitesses tangentielles supérieures à 20  $\text{m s}^{-1}$ . La pression admissible dans le module est d'environ 10 bar. Ce dispositif est utilisé actuellement dans le traitement d'émulsions et d'effluents contenant des huiles. [44,45].



**Figure I.20** : Système Spin Tek ST-II (Centrifugat Membrane Filtration System) [46].

Un deuxième système dynamique de Spin Tek, appelé Speedy™ (Figure I.21), est plus adapté à la filtration à haute température, aux fluides fortement alcalins, et aux fluides contenant des métaux lourds (disponible avec 1, 10 ou 15 disques de 28 cm de diamètre). Le « *High-Shear rotating céramie ultrafiltre* » a démontré de très bonnes performances dans le traitement de déchets visqueux, pour lesquels la filtration est réputée auparavant très difficile. La membrane céramique peut être facilement retirée pour être nettoyée. [47].



**Figure I.21** : Système Speedy™ Spin Tek (Rotating Céramique Ultrafilter) [47].

### I.10.2. SYSTEME DE MULTI SHAFT DISK (MSD)

Récemment, un nouveau système de la filtration dynamique, nommé séparateur à « Multi Shaft Disk (MSD) » [48]. A été commercialisé par Westfalia Separator (ex - Aafloflow systems), Aalen, Allemagne. Il consiste en des disques céramiques membranaires, de 31 cm de diamètre, montés sur 8 arbres parallèles, enfermés dans un carter cylindrique en acier inoxydable. La surface totale de filtration va jusqu'à 80  $\text{m}^2$  (Figure I.22). Les disques

membranaires d'un arbre chevauchent partiellement ceux de l'arbre voisin. Tous les arbres tournent à la même vitesse et dans la même direction. Le taux de cisaillement sur la membrane est instable et très élevé dans la région où les disques se chevauchent. [47].



**Figure I.22** : Module MSD industriel avec huit arbres parallèles et les disques membranaires de 31 cm de diamètre (Westfalia Separator) [47]

#### 1.4.3 SYSTEME DE HITACHI (ROTARY MULTI-DISK MEMBRANE)

Un système similaire au MSD utilisant les disques membranaires tournants est le « Hitachi Rotary Multi-Disk Membrane System » [49], de brevet européen [50]. Ce système industriel (Figure I.23) où les membranes sont solidaires du rotor était destiné au retraitement des eaux usées pour l'alimentation en eau d'un bioréacteur. Il est compact et économe en énergie. Les surfaces membranaires disponibles vont jusqu'à 200 m<sup>2</sup> (taille du module 1,5 m × 1,3 m × 1,0 m). [47].



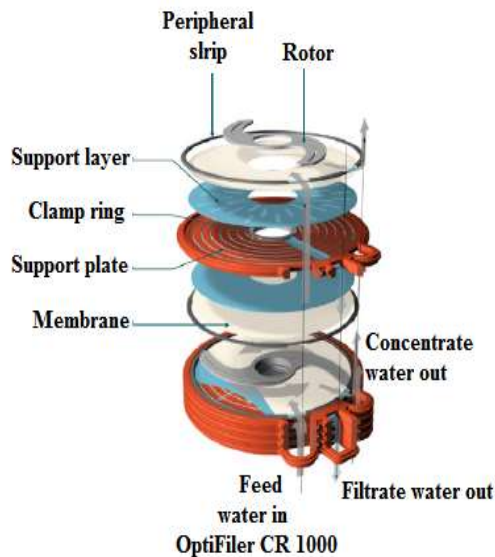
**Figure I.23** : Module de Hitachi Rotary Multi-Disk Membrane Separator [47].

Un autre système Rotostream®, commercialisé par la société BUSS-SMS-CANZLER GmbH (Düren, Allemagne), suit le même principe que le MSD [51]. Il présente une surface filtrante de 150 m<sup>2</sup> mais existe également à l'échelle pilote avec des surfaces comprises entre 0,1 et 1 m<sup>2</sup>.

#### 1.10.4. SYSTEME OPTIFILTER™ CR

Ce système est conçu par la société METSO PAPER (ex-RAISIO FLOOTEK) (Raisio, Finlande). Le module rotatif à écoulement tangentiel (cross rotational plate and frame) est

constitué de lames tournantes au-dessus de membrane fixes (Figure I.24), qui créent une turbulence atténuant le colmatage. La surface totale de membranes peut atteindre 140 m<sup>2</sup> (membrane de 100 cm de diamètre) selon le modèle. L'OptiFilter™ CR, utilisé en ultrafiltration, nanofiltration ou osmose inverse, remporte un certain succès dans l'industrie des pâtes et papiers pour réduire la consommation d'eau. Ce système a été étudié pour le traitement d'effluents d'industries de peinture [52], ou le traitement d'effluents de papeteries [53,54].



**Figure I.24 :** Système OptiFilter™ CR 1000 dans une unité industrielle de récupération de pigments de peinture [55].

## I.11.SYSTEME A DISQUE ROTATIF (PETIT MODULE)

### I.11.1. MODULE DE FILTRATION

Le module de filtration à disque rotatif est représenté sur la (Figure I.25). Il est composé principalement d'un carter usiné en inox. Le diamètre interne du carter est de 155 mm Le volume intérieur du module est de 708 cm<sup>3</sup> lorsque le couvercle est installé, qui est le volume mort lors de la filtration. L'alimentation du module se fait par une entrée située derrière le disque. Ce type d'alimentation évite la perturbation d'écoulement entre le disque et la membrane. Le rétentat était auparavant évacué par l'arbre de rotation qui était creux [56].

Extraction et concentration d'exo polysaccharides produits par fermentation par un système de filtration dynamique à disque rotatif, thèse en Université de Technologie de Compiègne.

Dorénavant, la sortie du rétentat s'effectue par la face avant du module. Ces modifications ont été réalisées afin de permettre d'atteindre des pressions de fonctionnement plus importantes. Ainsi, cette nouvelle configuration permet de monter à des pressions de l'ordre de 4000 kPa au lieu des 2000 kPa obtenus avec la configuration précédente. Par contre, le filtrat est

recueilli par un orifice qui se trouve sur la partie avant du module. Une membrane organique est fixée face au disque, donnant une surface effective de 176 cm<sup>2</sup>. [47].

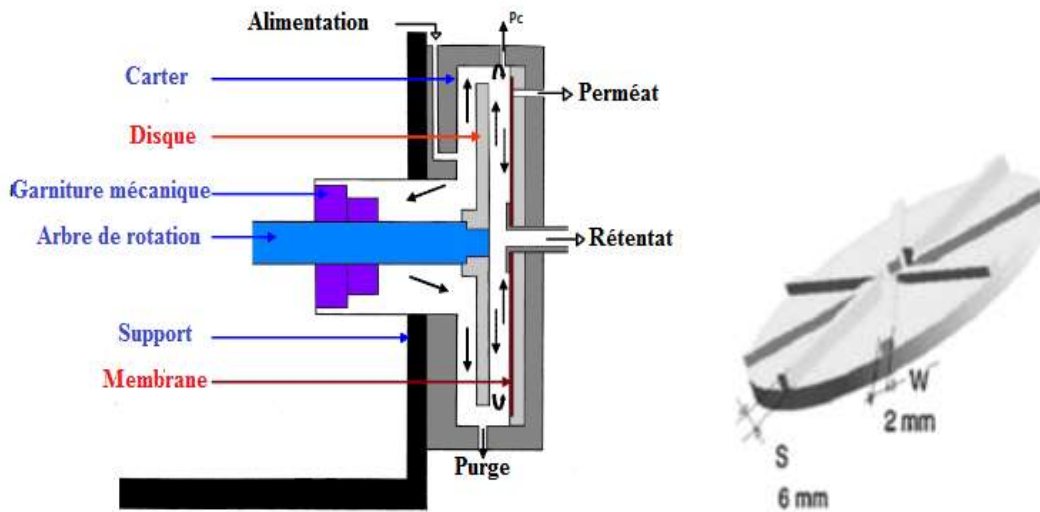


Figure I.25 : Schéma du module de filtration à disque rotatif [47].

Les disques rotatifs utilisés sont en aluminium usiné, ayant tous un diamètre de 145 mm. Nous disposons de disques lisses et de disques avec ailettes d'épaisseur de 6 mm et de largeur de 2 mm. L'entrefer dans le cas de disques avec ailettes est 7 mm, et il devient 13 mm en cas de disque lisse. Le disque avec ailettes est montré sur la Figure I.26.

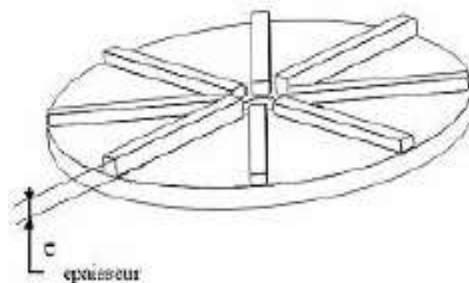


Figure I.26 : Disque à ailettes [47].

### I.11.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le disque rotatif est une plaque orientée horizontalement qui peut être chauffée ou refroidie et tournée par un moteur pneumatique jusqu'à 5000 tours par minute. Des courants d'alimentation liquides, alimentés à travers le centre de la plaque, se déplacent rapidement à travers la surface et forment un film mince d'épaisseur  $\delta$ . Le liquide quitte le disque sur son bord, après il peut être recueilli. Le SDR est capable de soumettre ce film à une contrainte de cisaillement très élevée,  $\tau$ , favorisant des vitesses de transfert thermique très élevées entre le film et le disque et des taux de transfert de masse élevés entre les flux liquides ou entre le film et le gaz dans l'atmosphère environnante [57].

**I.12 CONCLUSION**

Dans cette étude bibliographique, nous avons cherché à jeter les bases théoriques de notre travail de manière précise. Les principes de base de la filtration sur membrane sont identifiés dans ce chapitre. Différentes propriétés des membranes. Nous avons cherché à décrire le principe des différentes techniques de séparation membranaire à gradient de pression et à définir leur domaine de fonctionnement. Les quatre séparations ont été introduites, à savoir la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Nous avons ensuite décrit quelques unités de ce procédé, puis les conditions de fonctionnement de la filtration membranaire, puis décrit les applications de ce procédé et enfin quelques systèmes de filtration dynamique et le système de disque rotatif et le principe de son fonctionnement.

## II.1 INTRODUCTION

L'évolution technologique durant les dernières années a permis aux scientifiques d'élaborer et de perfectionner des méthodes pour différents domaines. Les réseaux de neurones artificiels sont des outils puissants capables d'être utilisés dans la plupart des domaines scientifiques et technologiques (Médecine, Biologie, Physique, Intelligence Artificielle), et on peut citer : le traitement du signal, vision, parole, prévision, modélisation, aide à la décision, robotique, évaluation des écosystèmes, identification des bactéries, commande des processus, modélisation des systèmes physiques reconnaissance des formes, mesure, instrumentation [58].

## II.2 LE NEURONE BIOLOGIQUE

La connaissance de la structure interne du cerveau biologique et la compréhension de son fonctionnement a été d'une extrême importance pour l'émergence des réseaux de neurones artificiels [59]. Nous présentons dans ce qui suit un bref aperçu sur le neurone biologique. Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma (corps cellulaire). L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angströms ( $10^{-9}$  m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse (Figure. II.1). [60]

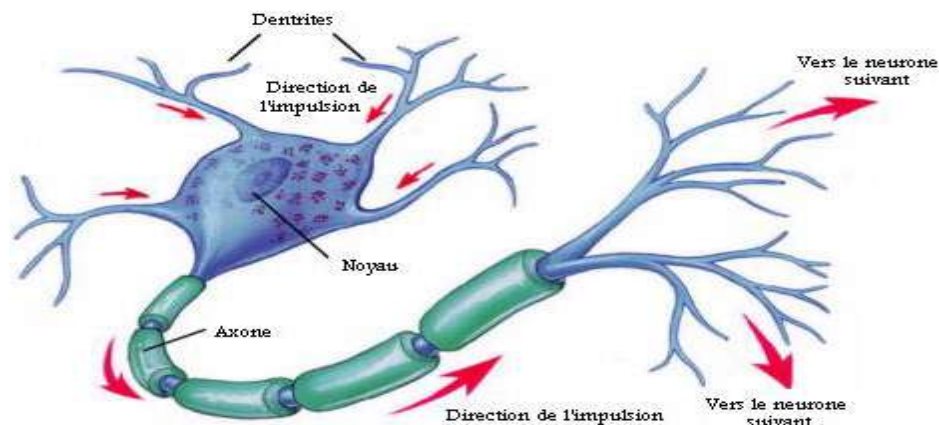


Figure II.1. Neurone biologique [61]

## II.2.2 ANATOMIE DE NEURONE

Le neurone est une cellule constituée principalement de trois parties : Dendrites, le corps Cellulaire et l'Axone

### a. LES DENDRITES

Elles sont des fines extensions tubulaires. Elles sont ramifiées, ce qui les amènes à faire une espèce d'arborescence autour du corps cellulaire. Cette partie collecte des signaux venant d'autres cellule ou de l'extérieur. La réception des signaux en provenance des autres neurones se fait par des points de contacts appelés synapses. Ces informations, qui ne sont rien d'autre que des impulsions électriques, sont par la suite acheminées vers le corps cellulaire, [62, 63].

### b. LE CORPS CELLULAIRE

Il contient le noyau de neurone, recueille les informations reçues et en fait une sommation dite "spatio-temporelles", si le potentiel somatique dépasse un certain seuil, il émission d'un potentiel d'action appelé "spike" qui correspond à une oscillation électrique très brève, [62, 63].

### c. L'AXONE

Il sert comme moyen de transport pour les signaux émis par le neurone (l'information traitée) vers l'extérieur, et répartie sur les synapses de neurones cibles grâce à arborescence terminale que possède l'axone. Il se distingue des dendrites par sa forme et par les propriétés de sa membrane externe. En effet il est généralement plus long que les dendrites et se ramifie à son extrémité, là où il communique avec d'autres neurones, [59, 64, 65].

## II.2.3 DOMAINE D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES (RNA)

Les (RNA) aujourd'hui ont des applications dans des domaines variés parmi lesquelles  
On cite :

### II.2.3.1 L'APPLICATION AU TRAITEMENT DU SIGNAL

Dans ce domaine les applications réalisées traitent essentiellement de la reconnaissance de signatures radar ou sonner.

La société NESTOR a développé un réseau de neurones qui identifie une cible à coup sûr (100% de réussite) et reconnaît du bruit avec un taux de réussite de 95%.

Cette application a été construire à partir de signaux sonars et des traits caractéristiques de ces signaux déterminés par les experts comme utiles pour identifier une cible en environnement bruité. Le réseau agit dans ces comme un filtre pour éliminer le bruit [66].

### II.2.3.2 L'APPLICATION À LA PLANIFICATION

L'optimisation est souvent sollicitée pour la planification des actions ou des tâches. À cet effet, l'utilisation du modèle de Hop Field et du modèle de Kohonen paraît très utile pour la résolution des problèmes d'optimisation [66].

### II.2.3.3 L'APPLICATION AU CONTRÔLE

Grâce à leur propriétés (parallélisme de traitement, capacité d'adaptation, et de généralisation, etc...). Les réseaux de neurones sont appliqués au contrôle intelligent. Par exemple plusieurs tentatives ont été faites pour appliquer les réseaux de neurones ; Ces applications peuvent être classifiés en plusieurs méthode, Telles que : le contrôle supervisé. Le contrôle inverse et le contrôle neuronal adaptatif [66].

### II.2.3.4 L'APPLICATION AU DIAGNOSTIC

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. Dans ce contexte on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques.

Exemples d'applications de chaque modèle : [66]

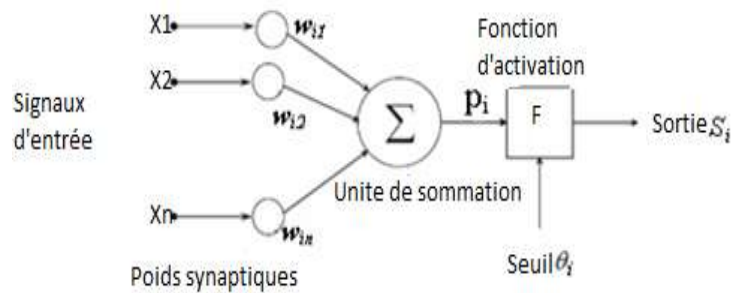
**Tableau II.1.** Correspondance RNA - domaines d'application

Caractéristiques fonctionnelles	Type de RNA
Reconnaissance de formes	MLP, Hopfield, Kohonen, PNN
Mémoires associatives	Hopfield, MLP récurrents, Kohonen
Optimisation	Hopfield, ART, CNN
Approximation de fonctions	MLP, RBF
Modélisation et control	MLP, MLP récurrent, FLN
Traitement d'images	CNN, Hopfield
Classification et clustering	MLP, Kohonen, RBF, ART, PNN

## II.4 LE NEURONE FORMEL

Un processeur très simple imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique, la première version du neural formel est celle de McCulloch et Pitts qui est largement utilisée [67]. Un neurone formel est un opérateur effectuant la somme pondérée de ses entrées externes puis elle s'active suivant la valeur de cette sommation pondérée puis modulée par une fonction d'activation (Figure II.2) [68].





**Figure.II.2.** Neurone formel

Un neurone formel peut être défini par les trois éléments suivants, [65] :

**1. Entrées "Xi"** : Typiquement, les valeurs d'entrées sont des stimuli externes en provenance de l'environnement ou des sorties d'autres neurones artificiels. Elles peuvent être discrétisées grâce à un ensemble tel que  $\{0, 1\}$  ou bien être des valeurs réelles.

**2. Poids synaptiques "Wi"** : La première chose que fait un neurone formel est de calculer la somme pondérée de ses entrées :

$$P = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{II.1})$$

Les poids sont des valeurs réelles qui déterminent la contribution de chaque entrée. Un algorithme d'apprentissage permet de déterminer le meilleur ensemble de poids pour le problème considéré. Trouver l'ensemble optimale est souvent un compromis entre temps de calcul, minimisation de l'erreur et conservation de la capacité de généralisation pour le réseau.

**3. Seuil "θ"** : Le seuil est un nombre réel qui est soustrait de la somme pondérée des valeurs d'entrée. Pour des raisons de simplicité, le seuil peut être vu comme une entrée supplémentaire associée à un poids ou  $W_0 = \theta$  et  $X_0 = -1$ . La fonction seuil interne à chaque neurone formel assure que la valeur de sommation des potentiels prés synaptiques ne dépassera pas certaines limites raisonnables (en général l'intervalle 0-1). Elle interdit les évolutions catastrophiques (effets de boucle où les valeurs deviennent de plus en plus grandes). Le Perceptron originel, inventé par Frank Rosenblatt en 1958, possédait une telle fonction de seuil (sorties toujours ramenées à 0 ou 1).

#### II.4.1 MODÉLISATION GÉNÉRALE

On peut modéliser un réseau de neurone par des élémentaires qu'il s'agit de : [69]

- **La nature de ses entrées** : qu'ils peuvent être binaire (0 ou 1), (-1,1) ou réelles appartenant souvent à intervalle bornée  $[a, b]$ .
- **Fonction des entrées** : que sa signifie qu'elle peut définir le pré traitement effectuée sur les entrées.
- **Fonction de sortie** : Cette fonction calcule la sortie du neurone en fonction de son état

D'activation.

- **Fonction d'activation ou de seuillage** : Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction d'activation. Les plus courantes sont présentées sur la (figure II. 3) la plupart des fonctions d'activations sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle  $[0, +1]$  (ou  $[-1, +1]$ ).

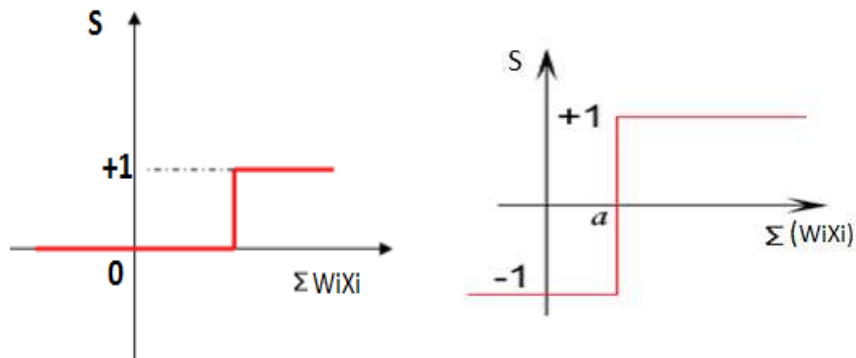


Figure II.3. Fonction binaire à seuil [70]

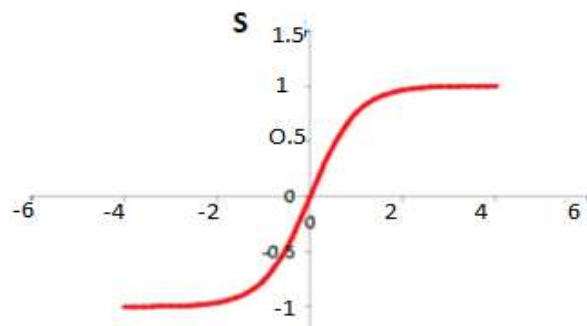
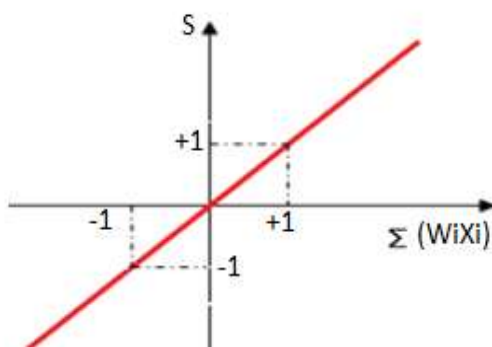


Figure II.4. Fonction linéaire à seuil, [70]. Figure II.5. Fonction sigmoïde tangentielle, [70].

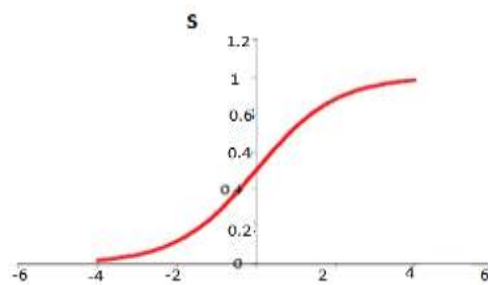
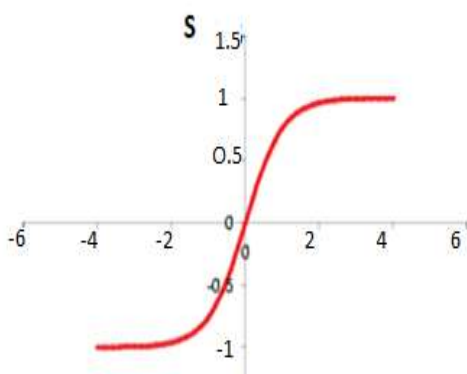


Figure II.6. Fonction sigmoïde tangentielle [70].

Figure II.7. Fonction sigmoïde exponentielle, [70].

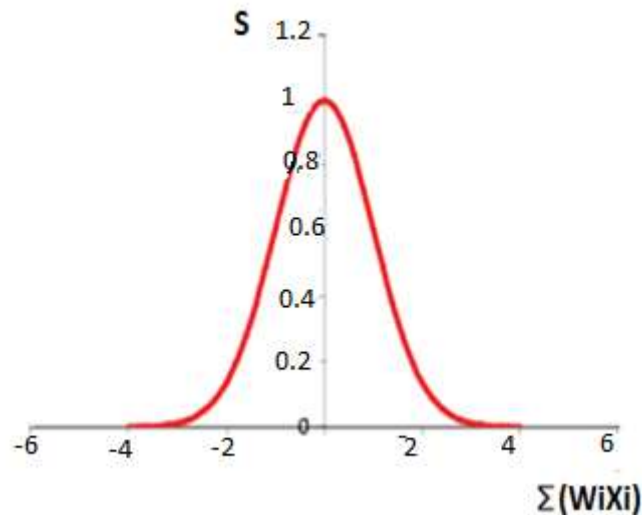


Figure II.8. Fonction gaussienne, [70].

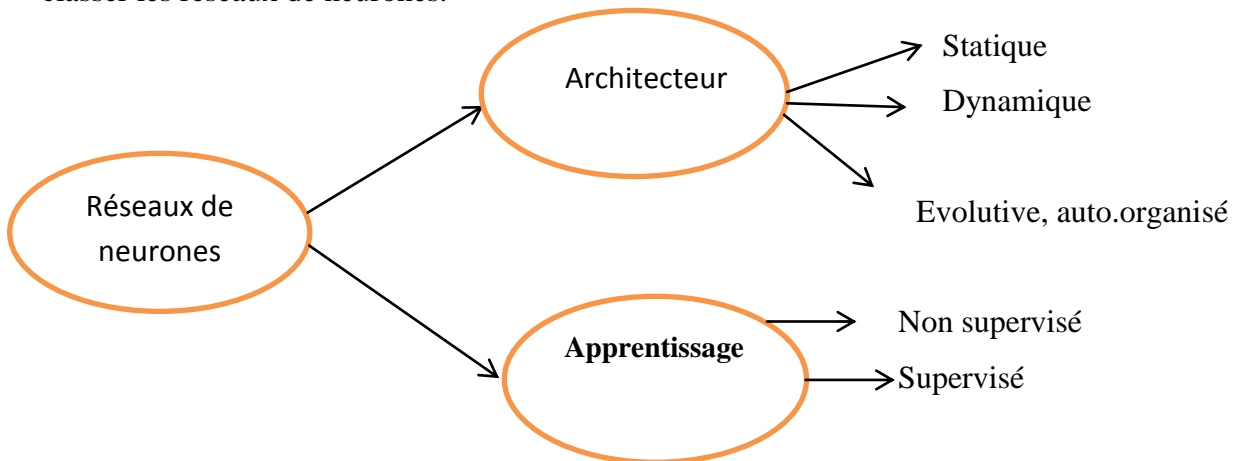
Tableau II.2 différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.

Non de la fonction	Relation entrée/sortie	Nom sur MATLAB
Seuil	$y = 0$ si $x < 0$ $y = 1$ si $x \geq 0$	Hardlim
Seuil symétrique	$y = -1$ si $x < 0$ $y = 1$ si $x \geq 0$	Hardlims
Linéaire	$y = x$	Purelin
Linéaire saturée	$y = 0$ si $x \leq 0$ $y = x$ si $0 < x \leq 1$ $y = 1$ si $x \geq 1$	Satlin
Linéaire saturée symétrique	$y = -1$ si $x < -1$ $y = x$ si $-1 < x \leq 1$ $y = 1$ si $x \geq 1$	Satlins
Linéaire positive	$y = 0$ si $x \leq 0$ $y = x$ si $x \geq 0$	Poslin
Sigmoïde	$y = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$	Logsig
Tangente hyperbolique	$y = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}$	Tansing
Compétitive	$y = 1$ si $x$ maximum $y = 0$ autrement	Compet

Toutes les fonctions d'activation utilisées doivent être différentiables, car l'architecture des réseaux de neurones l'impose pour que l'apprentissage soit possible.

## II.5 CLASSIFICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES

La (Figure. II.9) résume les trois différentes possibilités suivantes lesquelles on peut classer les réseaux de neurones.

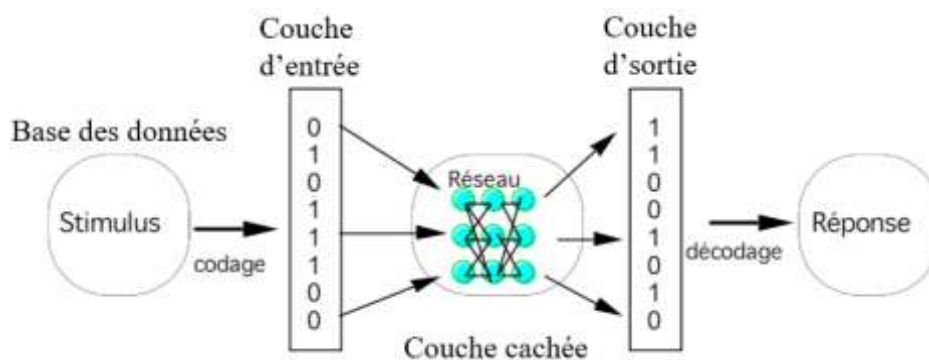


**Figure II.9.** Les différentes possibilités de classification des réseaux de neurones, [71].

### II.5.1 DESCRIPTION ARCHITECTURALE

La plupart des réseaux de neurones ont une topologie définie sous forme de couches. Il existe quelques exceptions lorsque le réseau n'est pas explicitement défini sur plusieurs couches (comme par exemple certaines mémoires associatives), mais elles peuvent alors être considérées comme n'ayant qu'une seule couche. L'architecture du réseau peut alors être décrite par le nombre de couches et le nombre de neurones dans chaque couche, [71]. Une terminologie similaire à celle présentée pour définir les différents types de neurones est utilisée pour définir les couches d'un réseau multicouche (figure. II.10), [71].

- Couche d'entrée pour une couche constituée de cellules perceptives.
- Couche cachée pour une couche constituée de neurones cachés.
- Couche de sortie pour une couche constituée de neurones de sorties.



**Figure II.10.** Réseau de neurones multicouche [71].

Dans un réseau multicouche, les différentes couches sont généralement ordonnées et indexées dans le sens croissant de la couche d'entrée vers la couche de sortie. L'architecture définit le fonctionnement du réseau, il existe trois types de réseaux à architectures différentes.

## II.6 RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS

Un réseau de neurones (RN) est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, ces (RN) sont une métaphore des structures cérébrales et de traitement parallèle et distribué d'information et comportent plusieurs éléments de traitement appelé neurone.

Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble est un système parallèle fortement interconnecté. L'information détenue par le réseau de neurone est distribuée à travers l'ensemble des constituants et non localisée dans une partie de mémoire sous la forme d'un symbole. Le réseau de neurone ne se programme jamais pour réaliser une ou telle tâche, il est entraîné sur des données acquises, grâce à mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau afin de réaliser au mieux la tâche souhaitée [68]. On peut comparer la correspondance entre les propriétés respectives de neurones biologiques et neurones artificiels [72].

### II.6.2 LES RESEAUX NON BOUCLES

Dans lesquels l'information circule des entrées vers les sorties, sans bouclage (figure .II.11) ; ce sont des systèmes statiques, utilisés principalement pour effectuer des tâches de classification, ou de modélisation statique de processus ; l'opérateur réalisé par un Réseau de neurones non bouclé (relation entrées-sorties) est une fonction algébrique, [73]

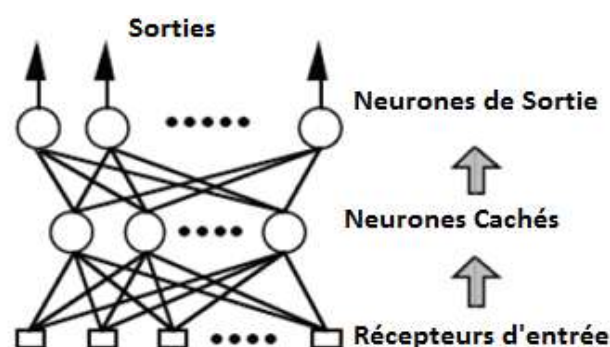
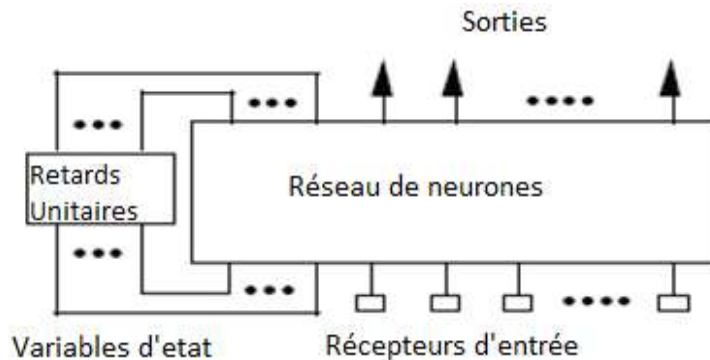


Figure II.11. Exemple de réseau de neurones non bouclé, [73].

### II.6.3 LES RESEAUX BOUCLES

Dont le graphe des connexions contient des cycles (figure .II.12) ; ce sont des systèmes dynamiques, utilisés comme filtres non linéaires, ainsi que pour la modélisation et la

commande de processus ; l'opérateur réalisé par un réseau bouclé est un ensemble d'équations aux différences couplées [73].



**Figure II.12.** Exemple de réseau de neurones bouclé, [73].

#### II.6.4 RESEAUX ARCHITECTURE AUTO-ORGANISEE

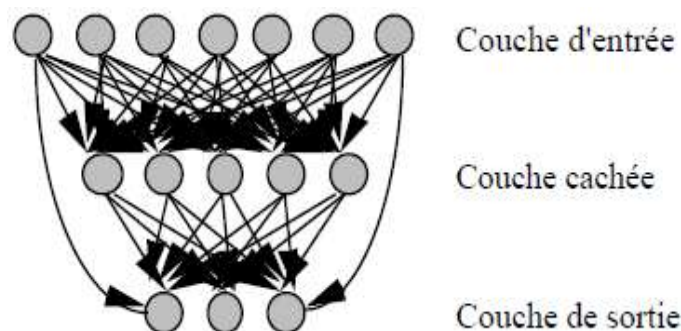
Les réseaux auto organisés sont des réseaux de neurones qui changent leur structure interne pendant l'utilisation. Ainsi les neurones se regroupent topologiquement suivant la représentation des exemples issus de l'espace d'entrée, [73].

#### II.7 STRUCTURE D'INTER CONNEXION

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité, [74].

##### a. Réseau multicouche (au singulier)

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. [75].



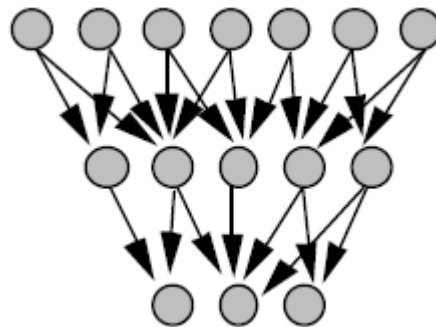
**Figure II.13.** Définition des couches d'un réseau multicouche.

**b. Réseaux de neurones monocouches**

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids.

**c. Réseau à connexions locales**

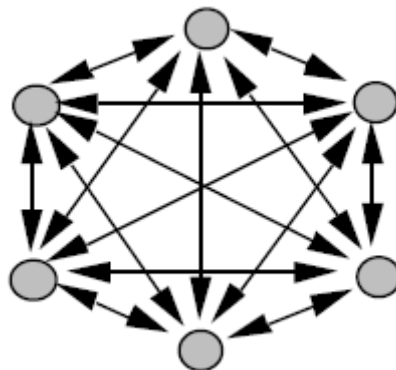
Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.



**Figure II.14.** Réseau à connexions locales [75]

**d- Réseau à connexion complète :**

C'est la structure d'interconnexion la plus générale. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même).



**Figure II.15.** Réseau à connexions complète.

**e. Réseau à connexions récurrentes :**

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales

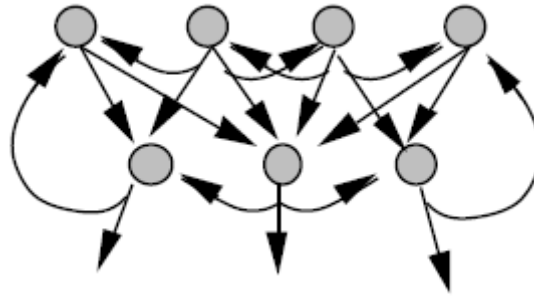


Figure II.16. Réseau à connexions récurrentes.

## II.8 APPRENTISSAGE

La conception de modèles de réseaux capables d'apprentissage a pour origines les travaux de D. Hebb [65]. L'apprentissage est une phase de développement d'un réseau de neurone durant laquelle on calcule les poids de neurones de telle manière que les sorties du réseau soient aussi proches que possibles de sorties désirés. L'apprentissage fait appel à des exemples de comportement du processus à modéliser [76]. On distingue trois types d'apprentissage :

- L'apprentissage supervisé,
- Apprentissage forcé ou imposé.
- L'apprentissage non supervisé.

### II.8.1 APPRENTISSAGE SUPERVISE

L'apprentissage supervisé suppose l'existence d'un expert (ou éducateurs) qui possède une connaissance innée de l'environnement. Le rôle d l'expert est de fournir les informations relatives à l'environnement nécessaires à l'apprentissage de réseau, sous forme d'un ensemble D'exemples composés de stimuli auxquels sont associées des réponses désirées (ou comportement souhaités), [63]. Dans ce mode d'apprentissage, les réponses désirées fournies par l'expert décrivent la fonction de réseau. Au cours de l'apprentissage, on présente une entrée et on compare la sortie obtenue à la sortie désirée fournie par l'expert. La différence entre la réponse désirée et la réponse du réseau est alors utilisée pour adapter les paramètres du réseau de façon à corriger son comportement ce processus est ainsi répété jusqu'à émulation de l'expert par le réseau de neurones artificiels, [63].



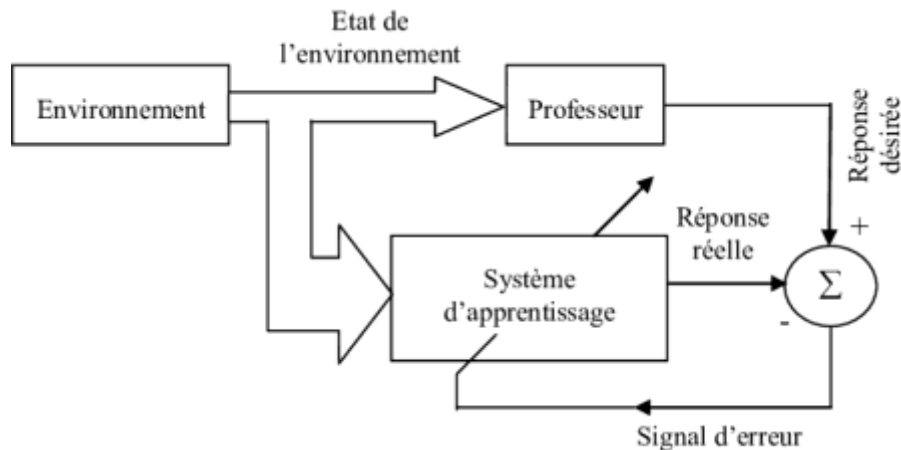


Figure II.17. Illustration de l'apprentissage supervisé, [63].

### III.8.2 APPRENTISSAGE FORCE OU IMPOSE

Dans cet apprentissage on indique seulement au réseau si la sortie est bonne ou mauvaise en induisant ainsi une variation sélective des poids de connexions.

### II.8.3 APPRENTISSAGES NON SUPERVISE

Contrairement à l'apprentissage supervisé effectué sous contrôle d'un expert, l'apprentissage non supervisé est autodidacte. L'ensemble des exemples d'apprentissages ne comprend que des stimuli. Aucune réponse désirée n'est associée, [63]. Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularités provoquent la même sortie. Ce type d'apprentissages est représenté schématiquement en (figure. II.18).

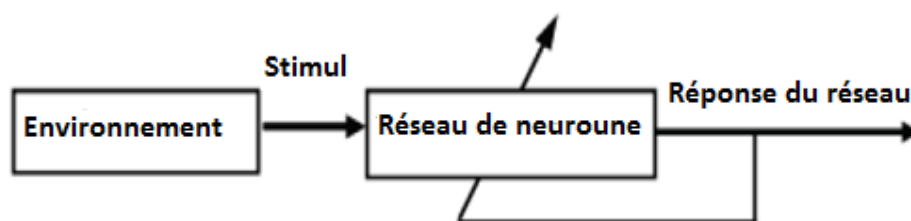


Figure II.18. Illustration de l'apprentissage non supervisé, [63].

## II.9 PROCEDURE D'APPRENTISSAGE

L'apprentissage d'un réseau se fait généralement dans le contexte d'une tâche ou d'un comportement à apprendre, il comprend quatre étapes de calculs, [63] :

- Initiation des poids synaptiques du réseau. En général, les poids synaptiques trouvés par le réseau à la fin de l'apprentissage dépendent en partie de l'ensemble

des poids déconnexions dont il disposait au départ. La pratique courante est d'initialiser les poids de réseau à des petites valeurs aléatoires ;

- Présentation des entrées et propagation de l'activation ;
- Calcul de l'erreur pour chaque neurone du réseau. Une valeur d'erreur est calculée à partir de son activation et de celle de neurones qui sont reliés ;
- Calcul de vecteur de correction à partir des valeurs d'erreur, on détermine alors la Correction à apporter aux poids synaptiques et aux seuils des neurones.

## II.10 VARIANTES DE L'ALGORIHTME DE RETRO PROPAGATION

Depuis son introduction, l'algorithme de rétropropagation a été largement étudié et plusieurs modifications y ont été apportées. L'algorithme de base décrit ci-dessous converge très lentement pour les réseaux multicouches. Pour certaines tâches complexes, la méthode ne permet pas d'aboutir à une solution. Les variations apportées à l'algorithme rétropropagation ont pour objectifs l'accélération de la convergence du processus d'apprentissage et l'amélioration de la capacité de généralisation, [70]. De nombreuses techniques existent, plus ou moins rapide, performant et gourmand en mémoire vive. Il apparaît que la technique de Levenberg-Marquardt est un algorithme très rapide.

## II.11 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'avoir un aperçu général sur les réseaux de neurones. Notre étude s'est intéressée principalement aux réseaux de neurones de type multicouches (MLP). En effet après la définition de l'architecture du réseau multicouche (MLP) et le rappel des propriétés d'approximation universelle de cette catégorie de réseaux de neurones à apprentissage supervisé, vraisemblance la plus utilisée, nous avons présenté un algorithme d'apprentissage très utilisé dans la communauté connexionniste : l'algorithme de rétropropagation du gradient. Plusieurs travaux lui ont été consacrés et un certain nombre de modification ont été proposées pour accélérer le temps d'apprentissage et améliorer la capacité de généralisation ainsi que les performances du réseau obtenu. Nous en avons rappelé dans ce chapitre les principales variantes.

### III.1. INTRODUCTION

Le modèle non linéaire utilisé dans notre travail est ANN (Artificiel neural network). ANN est une technique d'apprentissage automatique qui modélise et analyse la relation entre les variables d'entrée et de sortie. Ceci est réalisé grâce à un mécanisme d'apprentissage mis en œuvre sur un ensemble de données au lieu d'utiliser des équations mathématiques. ANN peut prédire avec précision les systèmes non linéaires complexes rencontrés dans les processus de séparation membranaire. L'ANN a été appliquée avec succès dans des processus membranaires tels que l'osmose inverse (OI), la nanofiltration (NF), l'ultrafiltration (UF) et la microfiltration (MF).

### III.2. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Dans cette étude, différentes données expérimentales ont été collectées à partir de la littérature relative à filtration de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  à travers une variété de gammes membranaires de différentes tailles de pore. Les données collectées se composent de 7 paramètres d'entrée et d'un seul paramètre de sortie qui est le flux de perméat. Les données collectées ont ensuite été divisées en trois catégories : apprentissage, validation et prédiction. 70% des données collectées ont été utilisées pour construire le modèle ANN. 15% des données collectées ont été utilisées pour valider le modèle ANN et les 15% restants ont été utilisés pour le test.

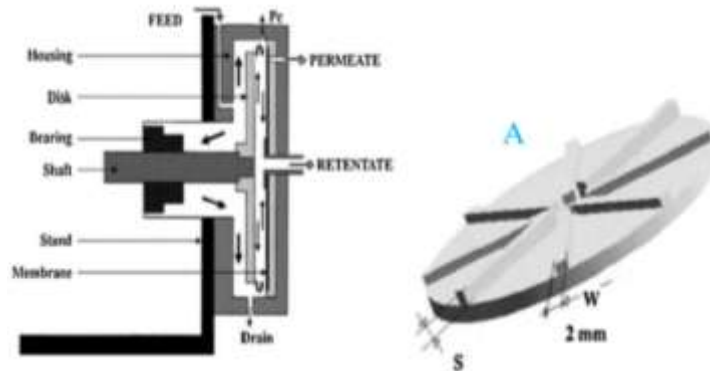
**Tableau III.1** Max, min, et écart-type de 328 valeurs de la base de données collectée de littérature

	Flux (L/m <sup>2</sup> .h)	Temps (min)	Concentration (g/l)	TPM (kPa)	Vitesse de rotation (rpm)	Diamètre de pore Membranaire ( $\mu\text{m}$ )
Max	1126.11	359.187	120	73.714	1500	0.2
Min	16.571	1.214	3	25.624	750	0.002
Moy	318.07	171.115	15.581	37.908	1423.846	0.086
Écart-type Standard	300.762	104.993	20.275	11.459	226.879	0.098

#### III.2.1. PILOTE EXPÉRIMENTALE

Le système pilote de RDM (membrane à disque rotatif) consiste en une membrane plate posée sur un disque plat statique poreux, parallèlement à elle sous un entrefer axial un disque plat en aluminium rotatif, les deux derniers étant situés à l'intérieur d'un boîtier cylindrique usiné en acier inoxydable [76]. Dans la filtration tangentielle, la TMP est assurée par pompe volumétrique en injectant une alimentation fluide à l'intérieur du système de filtration. En

raison de plusieurs études expérimentales qui ont manipulé sur un disque lisse, nous n'avons collecté que les données de toutes les expériences de filtration où le disque lisse est utilisé, en outre, le paramètre de catégorie de disque dans cette étude n'a pas été utilisé comme paramètre d'entrée.



**Figure III. 1.** Système expérimental de filtration membranaire dynamique, A) disque à aubes, B) disque lisse [77,78].

### III.3. Réseau neuronal artificiel

Un réseau neuronal multicouche à feed-forward avec algorithme de rétropropagation a été implémenté dans cette étude en utilisant Neural Network Toolbox de MATLAB. La (figure III. 2) montre l'architecture de réseau construite en utilisant sept entrées et une sortie.

Le réseau ANN est composé de trois types de couches, à savoir la couche d'entrée, cachée et de sortie. Chaque couche est constituée de neurones ou de nœuds. Dans la couche d'entrée et de sortie, le nombre de neurones est égal au nombre d'entrées et de sorties ou de variables ciblées. Le nombre optimal de couches cachées et de neurones a été déterminé par essais et erreurs. L'ANN a été mise en œuvre en trois étapes, à savoir l'apprentissage, la validation et l'étape de prédiction (test). L'ensemble des données collectées a d'abord été randomisé puis divisé en trois parties : 70% (227 points de données) pour l'apprentissage, 15% (48 points de données) pour la validation, et le 15% restants (48 points de données) pour la phase de prédiction. Les données ont été normalisées par la fonction «mapminmax» de MATLAB qui transforme les données d'entrée et de cible dans la plage de (-1,1).

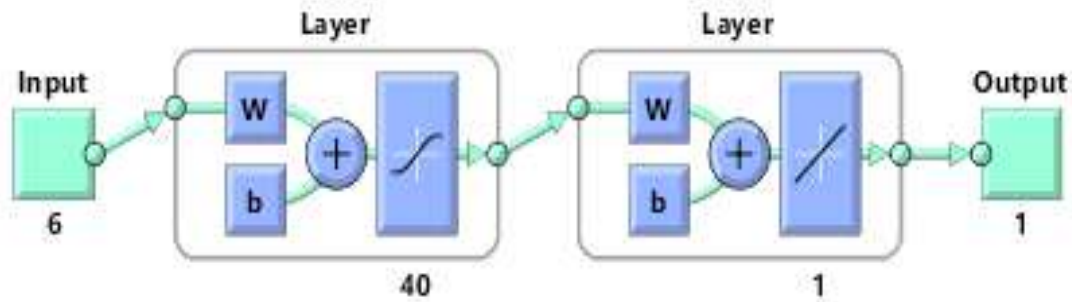


Figure III. 2. ANN Architecture.

III.4. RÉSULTATS DE MODÉLISATION PAR ANN

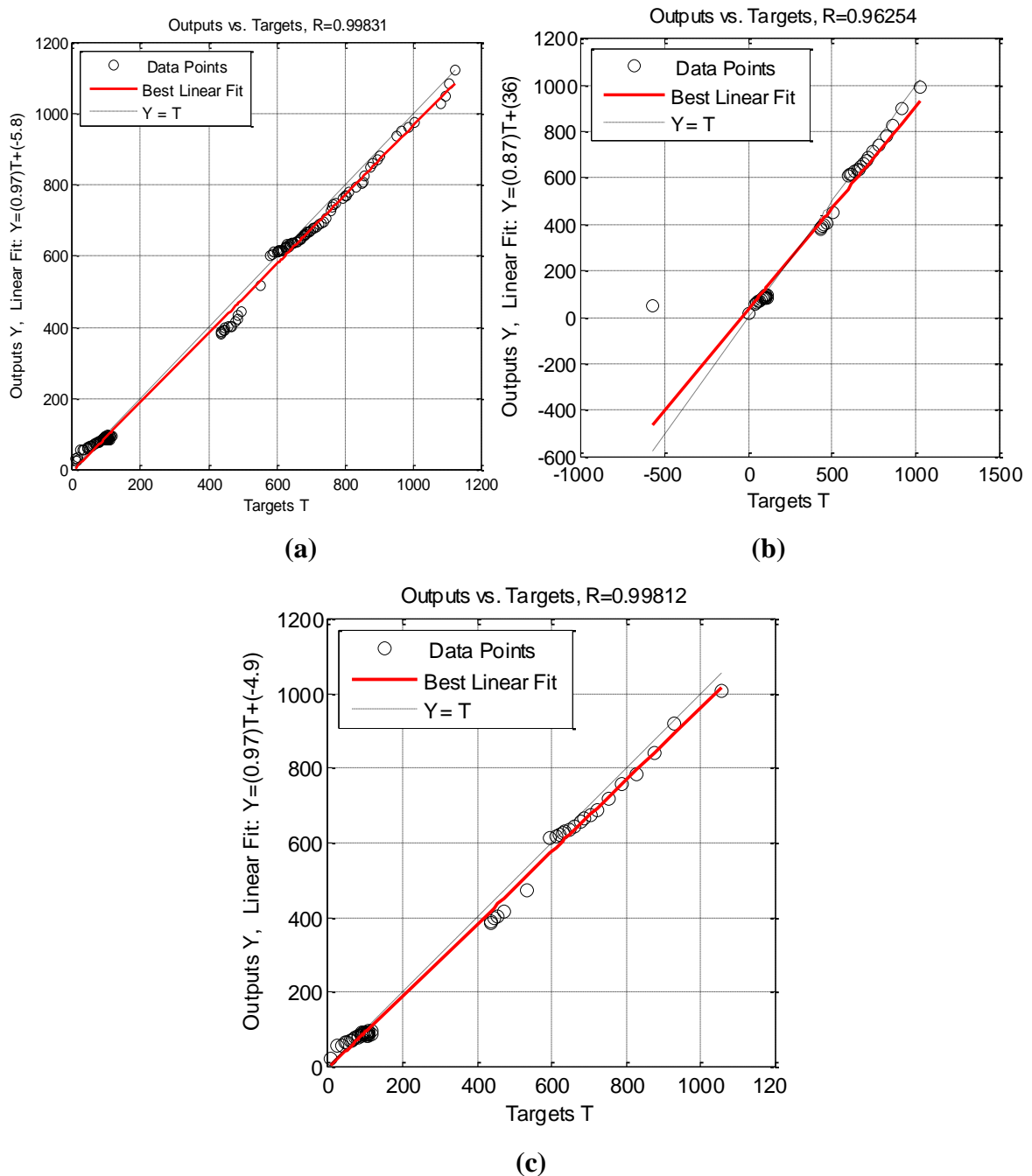


Figure III. 3. Analyse de régression du flux de perméation prévu et expérimental à partir du modèle ANN de chaque étape. (a) Apprentissage ; (b) Validation ; (c) Test.

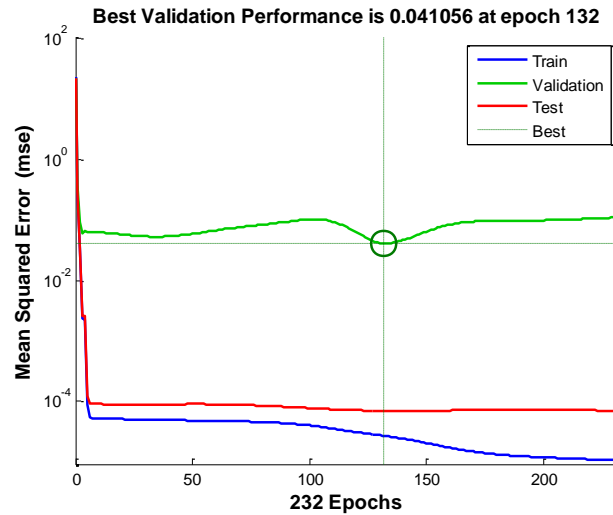


Figure III. 4. Erreur quadratique moyenne.

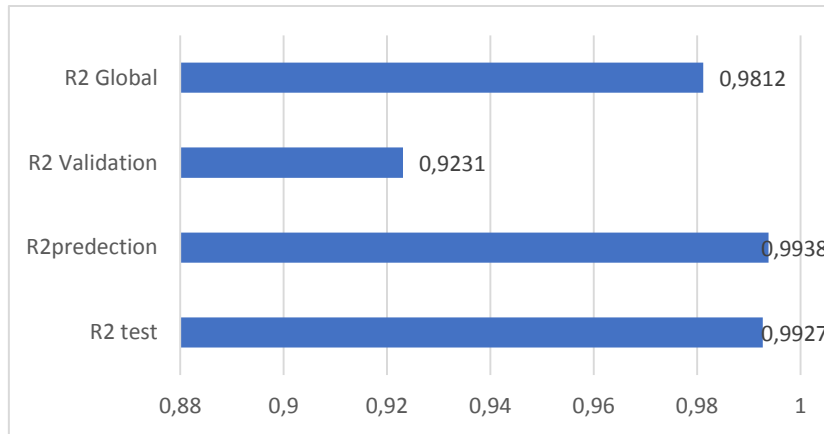


Figure III. 5. Coefficient de régression pour apprentissage test et validation.

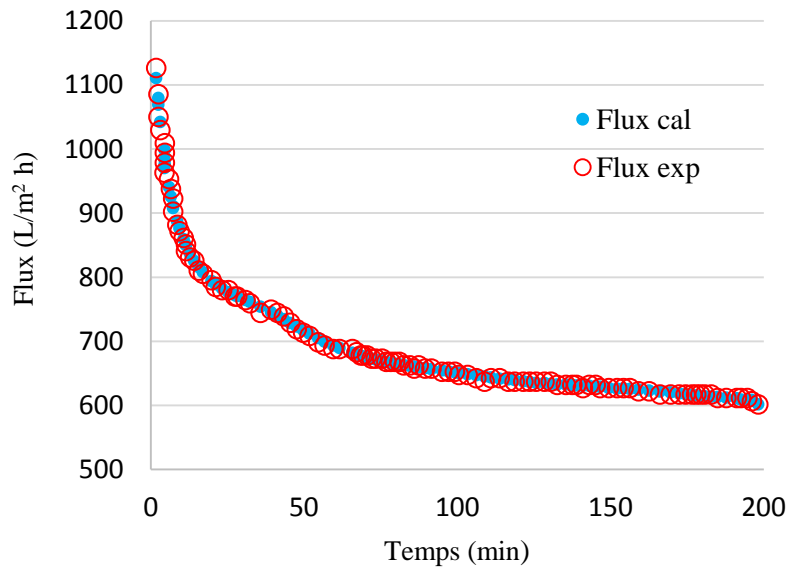


Figure III. 6. Comparaison entre le flux de perméat calculée par le modèle ANN et Flux expérimentale.

### III.5. DISCUSSION

La Figure III.3 montre l'analyse de régression entre la cible et la prédiction de sortie de l'ANN formé pour chaque phase (Apprentissage, teste et validation) . Le  $R^2$  montre l'efficacité du modèle pour prédire la sortie ciblée dans chaque phase. Les performances de la phase d'apprentissage sont présentées sur la (figure III. 3) (a)), cette figure montre une régression la plus élevée de 0,99831. Le processus de validation n'est appelé qu'une fois après chaque itération pour vérifier les performances d'un réseau entraîné sur des données non utilisé dans l'apprentissage. La figure 3 (b) montre l'ensemble de données de validation prédit en utilisant le réseau formé avec un  $R^2 = 0,9625$ . L'ensemble de données de prédiction (test) est une donnée vraiment invisible, qu'est non utilisé dans l'apprentissage du réseau. La ((figure III.3) (c)) montre la capacité de généralisation du réseau formé avec une performance montré par  $R^2$  de 0,899812. A partir des résultats de l'apprentissage on constate que le modèle RNA qui prévoit le flux de perméat est meilleur dans le cas de l'algorithme levenberg-marquardt (Algorithme d'apprentissage). Le nombre optimal de neurones cachés (N) a été trouvé meilleur pour N = 40 neurones.

Les performances du modèle ANN sont présentées dans la (Figure III.4) pour les trois types de données (apprentissage, validation et prédiction). On peut voir à partir de la (figure III. 4) qu'entre 10 à 20 itérations, le SSE (Sum Squared Error) d'apprentissage et de test diminue considérablement ; cependant, l'erreur de validation commence à augmenter après 232 itérations. Ceci est une indication de sur ajustement du réseau. Par conséquent, la formation a été arrêtée à 232 itérations pour le meilleur coefficient de récurrence  $R^2$ .

Dans la figure 5 on a représenté le coefficient de détermination ( $R^2$ ). C'est un paramètre qui est calculé, et fourni en sortie, par tous les logiciels de statistiques, lorsqu'une régression linéaire est réalisée.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{exp}} - y_i^{\text{cal}})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{exp}} - \hat{y}^{\text{exp}})^2} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Ou} \quad \hat{y}^{\text{cal}} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i^{\text{cal}}}{N} \quad \hat{y}^{\text{exp}} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i^{\text{exp}}}{N} \quad (\text{III.2})$$

Lors que  $R^2$  est proche de 1 la régression entre les résultats expérimentaux et celui de modèle RNA sera parfaite, c'est à dire que le modèle RNA décrit très bien le modèle expérimental.

Dans notre cas on a trouvé que  $R^2_{\text{globale}} = 0.9812$ , ce qui rendre le modèle RNA utilisé dans cette étude fiable.

L'écart relatif absolu moyen (ERAM) est la moyenne de la valeur absolue des écarts à la moyenne. Autrement dit, c'est la distance moyenne à la moyenne. On peut calculer de la même manière l'**écart absolu médian** qui est la moyenne des écarts à la médiane. Il est donné comme :

$$ERAM (\%) = \frac{100}{N} \sum_n \frac{|y^{cal} - y^{exp}|}{y^{exp}} \quad (III.3)$$

On peut utiliser ERAM dans le cas de la figure 6, pour connaître le pourcentage de déviation des points calculés par le modèle RNA. La valeur d'ERAM dans ce cas est 3,76 %.

### III.6. CONCLUSION

Une base de données a été collecté de littérature à partir des travaux expérimentaux réalisés sur la filtration de  $Fe(OH)_3$ . La filtration est réalisée à travers des membranes de différentes tailles de pore et pour un disque rotatif (RDM). Nous avons utilisé cette base pour faire la modélisation non linéaire de flux de perméat en fonction du temps. Pour cela, nous avons choisi sept paramètres comme entrées et un paramètre comme sortie (flux de perméat).

Les résultats trouvés par le modèle RNA montre un meilleur ajustement envers les résultats expérimentaux avec un faible pourcentage de déviation (ERAM).



### CONCLUSION GENERALE

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) en tant que robuste technique pour résoudre des problèmes non linéaires dans les processus de séparation membranaire ont été utilisés dans une large gamme d'applications de génie chimique. ANN Peut être utilisé dans la modélisation de différents processus plus facilement que d'autres méthodes de modélisation.

Le domaine de la séparation membranaire nécessite un modèle alternatif qui peut fonctionner seul (ANN) ou en parallèle avec des types théoriques ou numériques, ce qui peut être plus rapide et, bien souvent, beaucoup plus fiable.

Dans cette étude, le développement du modèle ANN basé sur une base de données extraits à partir de des études empiriques publiées pour prédire le flux de perméat dans la filtration membranaire pour un disque rotatif a été visualisé. On a utilisé sept paramètres comme d'entrée, à savoir ; TPM, vitesse de rotation, la concentration, viscosité dynamique, et un seul paramètre comme sortie, le flux de perméat.

L'effet de nombre des neurones et des couches cachées a révélé qu'un nombre élevé des neurones et un faible nombre de couches cachées favorisent la précision du modèle. Le réseau optimal est trouvé par essais et erreurs, qui fournit un réseau formé avec une précision de  $R^2 = 98,12\%$ . L'étude montre qu'un nombre suffisant de paramètres d'entrée peut définir le système pour les prédictions généralisées. Dans la phase de test on a utilisé différentes données d'études collectés de la littérature pour valider les résultats du modèle ANN, le coefficient de récurrence trouvé pour cette phase est  $R^2 = 92,31\%$ . Le réseau développé peut être utilisé pour prédire toutes les expériences de la filtration membranaire pour un disque rotatif à l'échelle du laboratoire et ceci dans la gamme de données utilisées pour former le réseau.

RNA est une boîte noire, il se constate donc capable d'être utilisé pour le développement des relations fonctionnelles dans les processus de filtration membranaire.



### الملخص

في هذه الدراسة قمنا بعمل نمذجة عصبية لتدفق النفاذية كدالة للوقت. في هذا السياق، تم إدخال العديد من المعلمات لتوصيل فائدتها وكفاءتها على أداء نموذجنا العصبي الاصطناعي، ولهذا السبب تم اختيار شبكة MLP (طبقة متعددة بيرسبترون) التي تحتوي بنيتها العصبية على طبقة المدخلات اعتمادًا على عدد المعلمات المختارة، وطبقة مخفية وطبقة المخرجات. سمحت لنا النتائج التي تم العثور عليها بحساب الخطأ بين البيانات التجريبية والبيانات المتوقعة، من هذا الخطأ تمكنا من الحكم على أداء الشبكة العصبية الاصطناعية. بالإضافة إلى ذلك، وجدنا قيمة معامل الانحدار الخطي ( $R^2 = 0.998$ ) ممتازة، وهذا ما يعزز دقة تعلم الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** ANN، الترشيح، الغشاء، القرص الدوار، النفاذية.

### Abstract

In this study we have made neuronal modeling of permeate flow as a function of time. In this context, several parameters were introduced to now their usefulness and efficiency on the performance of our artificial neural model, for this reason a network of MLP (Multy Layer Perceptron) was chosen whose neural architecture contains an input layer (input ) depending on the number of parameters chosen, a hidden layer and one output layer. The results found allowed us to calculate the error between the experimental data and the predicted data, from this error we were able to judge the performance of our RNA. In addition, the linear regression coefficient ( $R^2$ ) was found to be better ( $R^2 = 0.998$ ). And that justifies the performance of the network architecture found.

**Keywords:** ANN, Filtration, Membrane, Rotating disc, Permeate.

### Résumé

Dans cette étude nous avons fait la modélisation neuronale de flux de perméat en fonction du temps. Dans ce contexte plusieurs paramètres ont été introduits pour connaitre leur utilité et efficacité sur la performance de notre modèle neuronal artificiel, pour cette raison un réseau de MLP (Perceptron Multicouche) a été choisi dont leur architecture neuronale contient une couche d'entrée (input) selon le nombre de paramètres choisis, une couche cachée et une couche de sortie (output). Les résultats trouvés nous ont permis de calculer l'erreur entre les données expérimentales et les données prédites, à partir de cette erreur on a pu juger la performance de notre RNA. De plus, le coefficient de régression linéaire ( $R^2$ ) a été trouvé meilleur ( $R^2 = 0,998$ ). Et cela justifier la performance de l'architecture de réseau trouvé.

**Mots clés :** ANN, Filtration, Membrane, Disque rotatif, Perméat.

# Liste des abréviations

---

## Liste des abréviations

**ANN** : Artificial neural network

**ERAM** : L'écart relatif absolu moyen

**MES** : Matière En Suspension

**MF** : Microfiltration

**MSD** : Système de Multi Shaft Disk

**NF** : Nano filtration

**OI** : Osmose inverse

**RAN** : Les réseaux de neurones artificiels

**RDM** : Membrane à disque rotatif

**SDR** : Système à disque rotatif

**SSE** : Sum Squared Error

**UF** : Ultrafiltration

**C<sub>m</sub>** : concentration de soluté aux abords de la membrane (kg/m<sup>3</sup>)

**C<sub>P</sub>** : concentrations du soluté dans le perméat (kg/m<sup>3</sup>)

**C<sub>R</sub>** : concentrations du soluté dans le rétentat (kg/m<sup>3</sup>)

**l** : épaisseur de la membrane (m) .

**J<sub>v</sub>** : flux (m/s unité usuelle : L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>).

**N** : Le nombre optimal de neurones cachés

**ΔP<sub>m</sub>** : pression transmembranaire (Pa).

**ΔP** : différence de pression (Pa).

**Q** : débit (m<sup>3</sup>/s).

**R<sup>2</sup>** : coefficient de détermination

**R<sub>d</sub>** : La résistance hydraulique du dépôt (m<sup>-1</sup>).

**R<sub>int</sub>** : rétention intrinsèque

**R<sub>m</sub>** : résistance hydraulique de la membrane (m<sup>-1</sup>).

**R<sub>obs</sub>** : le taux de rétention.

**S** : surface géométrique de la membrane (m<sup>2</sup>).

**W<sub>i</sub>** : Poids synaptiques.

**m<sub>d</sub>** : masse particulaire déposée par unité de surface membranaire (kg/m<sup>2</sup>).

**n<sub>p</sub>** : nombre de pores par unité de surface.

**r<sub>p</sub>** : est le rayon des pores (m).

**α** : résistance spécifique du dépôt (m/kg).

## Liste des abréviations

---

$\delta$  : est l'épaisseur de la couche active de la membrane (m).

$\lambda$  : facteur de taille de la loi de Ferry

$\Theta$  : Seuil

$\mu$  : viscosité dynamique du solvant (Pa. s).

### Listes des Figures

<b>Figure I.1</b>	Membrane sélective	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b>	Principe de l'ultrafiltration	<b>5</b>
<b>Figure I.3</b>	Principe de l'osmose inverse	<b>6</b>
<b>Figure I.4</b>	Schéma représentatif de l'électrodialyse pour la potabilisation de l'eau	<b>7</b>
<b>Figure I.5</b>	Détail d'un tube a pression	<b>10</b>
<b>Figure I.6</b>	Membrane tubulaire	<b>11</b>
<b>Figure I.7</b>	Module tubulaire	<b>11</b>
<b>Figure I.8</b>	Module plan	<b>11</b>
<b>Figure I.9</b>	Module plan	<b>11</b>
<b>Figure I.10</b>	Module fibres creuses	<b>12</b>
<b>Figure I.11</b>	Fibres creuses	<b>12</b>
<b>Figure I.12</b>	Modules à fibres creuses	<b>12</b>
<b>Figure I.13</b>	Structure interne d'une membrane à spirale	<b>13</b>
<b>Figure I.14</b>	Présentation du fonctionnement de la filtration frontale	<b>14</b>
<b>Figure I.15</b>	Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle	<b>15</b>
<b>Figure I.16</b>	Le colmatage externe et interne d'une membrane	<b>15</b>
<b>Figure I.17</b>	Le blocage des pores	<b>16</b>
<b>Figure I.18</b>	Le colmatage par dépôt de particules en surface	<b>17</b>
<b>Figure I.29</b>	Colmatage par l'adsorption	<b>18</b>
<b>Figure I.20</b>	Système) Spin Tek ST-II (Centrifugal Membrane Filtration System	<b>21</b>
<b>Figure I.21</b>	Système Speedy™ Spin Tek (Rotating Céramique Ultrafilter)	<b>21</b>
<b>Figure I.22</b>	Module MSD industriel avec huit arbres parallèles et les disques membranaires Système	<b>22</b>
<b>Figure I.23</b>	Module de Hitachi Rotary Multi-Disk Membrane Separator	<b>22</b>
<b>Figure I.24</b>	Système OptiFilter™ CR 1000 dans une unité industrielle de récupération de pigments de peinture	<b>23</b>
<b>Figure I.25</b>	Schéma du module de filtration à disque rotatif	<b>24</b>
<b>Figure I.26</b>	Disque à ailettes	<b>24</b>
<b>Figure II.1</b>	Neurone biologique	<b>26</b>
<b>Figure II.2</b>	Neurone formel	<b>30</b>

## Listes des Figures

---

<b>Figure II.3</b>	Fonction binaire à seuil	<b>31</b>
<b>Figure II.4</b>	Fonction binaire à seuil	<b>31</b>
<b>Figure II.5</b>	Fonction sigmoïde tangentielle	<b>31</b>
<b>Figure II.6</b>	Fonction sigmoïde tangentielle	<b>31</b>
<b>Figure II.7</b>	Fonction sigmoïde tangentielle	<b>31</b>
<b>Figure II.8</b>	Fonction sigmoïde exponentielle	<b>31</b>
<b>Figure II.19</b>	Fonction gaussienne	<b>32</b>
<b>Figure II.10</b>	Les différentes possibilités de classification des réseaux de neurones	<b>32</b>
<b>Figure II.11</b>	Réseau de neurones à couches	<b>33</b>
<b>Figure II.12</b>	Exemple de réseau de neurones non bouclé	<b>34</b>
<b>Figure II.13</b>	Définition des couches d'un réseau multicouche	<b>34</b>
<b>Figure II.14</b>	Réseau à connexions locales	<b>35</b>
<b>Figure II.15</b>	Réseau à connexions complète	<b>35</b>
<b>Figure II.16</b>	Réseau à connexions récurrentes	<b>36</b>
<b>Figure II.17</b>	Illustration de l'apprentissage supervisé	<b>37</b>
<b>Figure II.18</b>	Illustration de l'apprentissage non supervisé	<b>37</b>
<b>Figure III. 1.</b>	Système expérimental de filtration membranaire dynamique, A) Disque à aubes, B) disque lisse	<b>40</b>
<b>Figure III. 2.</b>	ANN Architecture.	<b>41</b>
<b>Figure III. 3.</b>	Analyse de régression du flux de perméation prévu et expérimental à partir du modèle ANN de chaque étape. (a) Apprentissage ; (b) Validation ; (c) Test.	<b>41</b>
<b>Figure III. 4.</b>	Erreur quadratique moyenne.	<b>41</b>
<b>Figure III. 5.</b>	Coefficient de régression pour apprentissage test et validation.	<b>41</b>
<b>Figure III. 6.</b>	Comparaison entre le flux de perméat calculée par le modèle ANN et flux expérimentale.	<b>41</b>

# Liste des Tableaux

---

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Techniques membranaires utilisées dans le domaine de la filtration des eaux	<b>2</b>
<b>Tableau I.2</b>	Avantages et inconvénients des différents modules membranaires	<b>13</b>
<b>Tableau I.3</b>	Récapitulatif des facteurs et mesures à prendre compte pour éviter le colmatage membranaire	<b>16</b>
<b>Tableau I.4</b>	Les applications industrielles des procédés membranaires	<b>19_21</b>
<b>Tableau II.1</b>	Correspondance RNA - domaines d'application	<b>29</b>
<b>Tableau II.2</b>	différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.	<b>31</b>
<b>Tableau III.1</b>	Max, min, et écart-type de 328 valeurs de la base de données Collectée de littérature	<b>39</b>



## Références bibliographiques

---

- [1] PATRICE. BACCHIN, Principes de base des Technologies à Membranes, 2<sup>ème</sup> Ecole D'Eté Franco-Maghrébine, Sciences et Technologies à Membranes, Monastir, Tunisia, (Sep 2005). (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00201760>) Submitted on 2 Jan 2008.
- [2] DJOUDER. HAMIDA, Efficacité d'un procédé membranaire pour traitement des eaux Usées, 2011.
- [3] MELLE. TAIBI. SARAH, les facteurs influençant le vieillissement des membranes D'osmose inverse, Étude d'un cas, 2016.
- [4] REMISE. P, étude des rétro lavages assistés par l'air et contrôle du colmatage résiduel: application à la production d'eau potable en filtration frontale, Mémoire de doctorat, Université de Toulouse, 2006, (<http://eprint.insa-toulouse.fr>. Consulté le : 23/03/201).
- [5] MALLEVIALLE. J, ODENDAAL. P.E, WIESNER M.R, The emergence of Membranes in water and waste water treatment, In: Water Treatment Membrane Process, Chapitre 1, McGraw- Hill, 1996 10 p.
- [6] HAMIDI AMINA, Étude bibliographique sur les techniques de la filtration membranaire. pp .5-6. (Consultée le : 02 Octobre 2013).
- [7] NAJAH. W, dénitrification de l'eau potable en réacteur catalytique membranaire et Photo catalytique, Mémoire de doctorat, université Claude Bernard Lyon 1, 2008. <http://hal.archives-ouvertes.fr>. (Consulté le : 28/03/2013).
- [8] DESCLAUX SANDRINE, Techniques séparatives à membranes, DIAZ Juan Pablo, 2001, Application des membranes au traitement des eaux usées. Synthèse technique, 2003.
- [9] CARDOT CLAUDE, 2002, Techniques membranaires. IN : Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques, Cours et problèmes résolus, Paris, Ellipse Edition. Chapitre V, p. 71 à 87.
- [10] MICHEL RUMEAU, membranes, transferts, Encyclopédie Universelle. [http :// www .universalis.fr/encyclopedie/membranes-transferts/](http://www.universalis.fr/encyclopedie/membranes-transferts/) (consulté le 29 novembre 2015).
- [11] GÉRALD POURCELLY, Membranes polymères en milieu aqueux, Procédés membranaires : état de l'art et perspective, Actualités G.F.P, Bulletin N°99, (Octobre 2004).
- [12] [http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf\\_et\\_oi.htm](http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf_et_oi.htm) (consulté en octobre 2002)
- [13] BANDINI ET BRUNI, transport phenomena in nanofiltration Membranes, In : fondamentales of cross flow microfiltration (ed. by Drioli E .Giorno L). Elsevier Italy. pp. 67-88. 2010.

## Références bibliographiques

---

- [14] DJOUDER. H, Étude morphologie de blue d'extra et polyphénylène oxyde sulfonique', (Spö). Canada. Pp .27, 2007.
- [15] HILAL ET JOHNSON, The use of Atomic Force Microscopy in Membrane characterization. In: Membrane Bioreactor in water treatment. (Ed. by Drioli E. Giorno L) Elsevier, Italy. Pp.338-352, 2010.
- [16] PEEV.A. LG.SAIRAM. M. LIVINGSTON. AG, Nanofiltration operation in Nanoqueous system. In: Membrane Bioreactor in water treatment. 2010.
- [17] MAUREL. Alain, Techniques séparatives à membranes : osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration tangentielle Considérations théoriques, in Techniques de l'Ingénieur, p.p. 1-24,1993.
- [18] CHAY Lo. Etude comparative des membranes utilisées en production d'eau potable : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. P.P. Mars 2005.
- [19] AHLEM. ROMDHANE, Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nano cristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01153860>.
- [20] [http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf\\_et\\_oi.htm](http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf_et_oi.htm) (consulté en octobre 2002).
- [21] GUNTHER. J, caractéristique et optimisation des phénomènes de transfert dans un double bioréacteur à membranes, Thèse de doctorat, Toulouse, 2009. <http://ethesis.inptoulouse.fr>. (Consulté le : 22/05/2013).
- [22] MAUREL. A, technique séparative a membranes : considérations théoriques.
- [23] ETTORI. AXEL, Vieillissement chimique de membranes d'osmose inverse, 2011.
- [24] LOÏC. LEITNER, Étude d'un procédé de filtration membranaire à sélectivité variable et contrôlée utilisant des membranes de polydiméthylsiloxane en milieu organique : application à la séparation de peptides, pp15, 2013.
- [25] FERRY. J. D, J. CELL.BIOL, Statistical evaluation of sieve constants in ultrafiltration, 95-104. (1936), 2011.
- [26] BASILE. A, ET NUNES. S. P, Advanced membrane science and technology for sustainable energy and environmental applications, Woodhead publishing series in energy, ISBN 978-1- 84569-969-7, 25 (2011).
- [27] MULDER. M, Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic publishers, ISBN 978-079234-248-9, 1996.
- [28] AIMAR. P, Filtration membranaire (OI, NF, UF) : Mise en œuvre et performances, <http://www.techniques-ingenieur.fr>. (Consulté le : 16/12/2012)

## Références bibliographiques

---

- [29] BOUCHARD. C. KOUADIO. P. ELLIS. D. RAHNI. M. LEBRUN, R.E. Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable, Vecteur Environnement, 33 :4 :28-38, 2000.
- [30] BERLND. J, CATHERINE. J, les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique, France, décembre 2002. ([Http://www.fndae.fr](http://www.fndae.fr))
- [31] CARDOT. C, génie de l'environnement : les traitements de l'eau procédés Physicochimiques et biologiques cours et problèmes résolus, Edition 2005 :
- [32] dégrèvement, mémento technique de l'eau (Tome 1) ». Dixième édition. Edition 2005.
- [33] CHABANE MUSTAPHA, Etude de la résistance au colmatage et de la rétention des composés toxiques par membranes, Pp35-36, 2015.
- [34] BUISSON. H, LEBEAU. T, LELIEVRE. C, HERREMANS L, Les membranes : point sur les évolutions d'un outil incontournable en production d'eau potable, L'eau, l'industrie, les nuisances, p 42-47. Exas, USA. 1998.
- [35] MALLEVILLE. J, ODENDAAL P. E, ET WIESNER M. R, Water treatment membrane processes; McGraw (1996) ISBN 0-07-00155-9-7.
- [36] EMIGY. J, filtration membranaire (OI, NF, UF) présentation des membranes et modules, Référence W4090 : <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- [37] <http://www.sofrance.com/findex.html>, (consulté en octobre 1992).
- [38] AMINE CHARFI, Thèse de docteur : Etude d'un procédé membranaire de traitement des eaux usées : effet des paramètres biotiques et abiotiques sur le colmatage de la membrane, pp 22-23, 2014.
- [39] BENJAMIN. ESPINASSE, Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage. Thèse doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse III. France 21pages, 2003.
- [40] BENJAMIN. E, Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage, Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2003. <http://wiesner.cee.duke.edu>.
- [41] [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtration\\_tangentielle&oldid=145779766](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtration_tangentielle&oldid=145779766).
- [42] H. F. SHAALAN, Development of fouling control strategies pertinent to Nano filtration membranes, 2002.
- [43] CARIC. M. D, MILANOVIC. S. D, KRSTIC. D. M, TEKIC. M. N, Fouling of inorganic membranes by adsorption of whey proteins. Journal of membrane science 165, 83-88. 2000,

## Références bibliographiques

---

- [44] REED, W. LIN, R. VIADERO, J. YOUNG. Treatment of concentrated oily wastes Using Centrifugal membrane separation (CMS), *Journal of Environmental Engineering*, 123(12), 1234, 1997.
- [45] REED, W. LIN, R. VIADERO, J. YOUNG. 2000. Two-phase limiting flux in High-Shear rotary ultrafiltration of oil-in-water émulsions, *Journal of Membrane Science*, 175(1).
- [46] [www.spintek.com](http://www.spintek.com).
- [47] Z. Tu. Filtration dynamique de suspensions de CaCO<sub>3</sub> ET de solutions de surfactants. Génie des procédés. Université de Technologie de Compiègne, 2009. Français. tel-00413890[archive].
- [48] FEUERPEIL, D. BLASE & H. OLAPINSKI. 2003, Aaflo systems GmbH, Germa Patent de 102 39 247 C1
- [49] [www.hitachi-pt.com](http://www.hitachi-pt.com)
- [50] MORI 1995, Hitachi Ltd, European Patent no. 07075722.
- [51] [www.canzler-pt.de](http://www.canzler-pt.de).
- [52] HUUHILO, P. VÄISÄNEN, J. NUORTILA-JOKINEN & M, Influence of Shear on flux in membrane filtration of integrated.
- [53] NUORTILA-JOKINEN & NYSTROM 1996, Comparaison of membrane séparation processus in the internal purification of paper mill water, *Journal of Membrane Science*, 119(1), 1996, 99-115.
- [54] MÄNTTÄRI, K. VIITIKKO & M. NYSTRÖM. Nanofiltration of biologically treated effluents from the pulpe and paper industry, *Journal of Membrane Science*, 272(1-2), 2006, 152-160. pulpe and paper mill circulation water, *Désaliénation*, 141(3), 245-258.
- [55] [www.mestopaper.com](http://www.mestopaper.com).
- [56] BROU, 2002, Extraction et concentration d'exopolysaccharides produits par fermentation par un système de filtration dynamique à disque rotatif, thèse en Université de Technologie de Compiègne.
- [57] PR. NOUREDDINE GHERRAF: Principes de l'intensification des procédés.
- [58] C. TOUZET « *les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme* » cours, exercice et travaux pratiques, paris, juillet 1992.
- [59] D.Hassani, " Méthode des Réseaux Neurones pour le Calcul de la Dispersion Axiale dans les Llits Fixes", Mémoire de magister, Université de Médéa, Algérie, (2002).
- [60] <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01338010> Submitted on 27 Jun 2016

## Références bibliographiques

---

- [61] G. A. Harrison, J. M. Tanner. « Human biology: An Introduction to human evolution» Oxford science publication, 1998.
- [62] M.R.J. Fombellida, M.J.M. Minsoul et J, L.O. Destine "Perceptrons Multi-Couches et fonctions d'activation non-monotones", In. Proc. Neuronimes'90, EC2 et Cie, Nîmes, (1990).
- [63] J. Hertz, A. Krogh et R.G. Palmer «Introduction to the theory of neural, Computation and neural systems series», Addison-Wesley, New-York, (1991).
- [64] E. Davalo, P. Nairn, "Des Réseaux de Neurones", Eyrolles, 2ème édition, Mars. (1993).
- [65] D. Hebb, "The Organization of Behavior", Wiley, New York, (1949).
- [66] F. MEDJILI « Modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et commande Prédictive non linéaire d'une station de production d'eau froide » mémoire de magister en automatique, université de annaba 2010.
- [67] D.Gérard « *Reducing the complexity of neural nets for industrial applications and biological models* » Neuronal Information Processing - From Biological Data to Modelling and Applications (World Scientific, 1998).
- [68] G. Bernard « *Application de réseaux de neurones artificiels a la reconnaissance au de caractères manuscrits*» Thèse de Doctorat, Faculté polytechnique de Mons ,1996
- [69] S.Jagannathan « *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems* » Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [70] F.Pieraut "Optimisation des réseaux de neurones de grande capacité", IEEE Transation on Neural Networks, (2002).
- [71] Y.M. Yeddou, " Etude de synthèse sur les réseaux de neurones et leurs application", Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, (1998).
- [72] B. Guillaume « *Contrôle sensori-moteur par réseaux neuromimetiques modulaires - Approche pour le pilotage réactif en atelier flexible-*» Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon ,1995.
- [73] I. Rivals, L.personnaz, G.Deryfus, "commande par réseaux de neurones : principes fondamentaux, conception, et illustrations industrielles", Lavoisier Technique et Documentation, Paris, (1995).
- [74] L. Mokhnache, "Application de RN dans le Diagnostic et la Prédiction des Isolations HT", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier (2004).
- [75] M. AMMAR, « *mise en oeuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu* » thèse de doctorat,

- paris, juillet 2007.
- [76] G. Dreyfus et al, " Réseau de Neurones Méthodologie et Application", Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI) Laboratoire d'Electronique" MESURES, 699, novembre (1997).
- [77] L.H. Ding, O. Akoum, A. Abraham, M.Y. Jaffrin, High shear skim milk ultrafiltration using rotating disk filtration systems, *AIChE J.* 49 (2003) 2433–2441. <https://doi.org/10.1002/aic.690490918>.
- [78] A. Brou, M.Y. Jaffrin, L.H. Ding, J. Courtois, Microfiltration and ultrafiltration of polysaccharides produced by fermentation using a rotating disk dynamic filtration system, *Biotechnol. Bioeng.* 82 (2003) 429–437. <https://doi.org/10.1002/bit.10584>.

# Annexe

## BASE DE DONNEES

Flux (L/m2h)	Temps (min)	Concentration De fluide d'alimentation (g/l)	Pc (kPa)	Vitesse de Rotation (rpm)	Taille de Pore Membrane ( $\mu$ m)
1126.11	1.88513	3.00	26.1665	1500.00	0.2
1085.35	2.56458	3.00	26.3901	1500.00	0.2
1049.68	2.54904	3.00	26.6138	1500.00	0.2
1029.3	3.23737	3.00	26.8374	1500.00	0.2
1008.92	4.62291	3.00	27.1729	1500.00	0.2
993.631	4.61625	3.00	27.7324	1500.00	0.2
978.344	4.60959	3.00	28.0674	1500.00	0.2
963.057	4.60293	3.00	28.4029	1500.00	0.2
952.866	5.99291	3.00	28.6266	1500.00	0.2
937.58	6.68346	3.00	28.8502	1500.00	0.2
922.293	7.37401	3.00	29.1857	1500.00	0.2
901.911	7.36513	3.00	29.4093	1500.00	0.2
881.529	8.75067	3.00	29.5211	1500.00	0.2
871.338	9.44344	3.00	29.6339	1500.00	0.2
861.146	10.8334	3.00	29.7461	1500.00	0.2
850.955	11.5262	3.00	29.8584	1500.00	0.2
840.764	11.5217	3.00	29.8588	1500.00	0.2
830.573	12.9117	3.00	29.9716	1500.00	0.2
825.478	14.3039	3.00	29.972	1500.00	0.2
810.191	15.6917	3.00	29.9724	1500.00	0.2
805.096	17.0839	3.00	29.9733	1500.00	0.2
794.904	19.8683	3.00	30.0856	1500.00	0.2
784.713	21.2583	3.00	30.0865	1500.00	0.2
779.618	23.3477	3.00	30.0869	1500.00	0.2
779.618	25.4393	3.00	30.1992	1500.00	0.2
769.427	27.5265	3.00	30.2001	1500.00	0.2
769.427	28.2237	3.00	30.2005	1500.00	0.2
764.331	31.0104	3.00	30.2014	1500.00	0.2
759.236	32.4026	3.00	30.2019	1500.00	0.2
743.949	35.8819	3.00	30.2023	1500.00	0.2
749.045	39.3702	3.00	30.2028	1500.00	0.2
743.949	41.4596	3.00	30.2032	1500.00	0.2
738.854	43.5491	3.00	30.2037	1500.00	0.2
728.662	45.6362	3.00	30.2041	1500.00	0.2
718.471	47.7234	3.00	30.2046	1500.00	0.2
713.376	49.8129	3.00	30.3173	1500.00	0.2
708.28	51.9023	3.00	30.2059	1500.00	0.2
698.089	54.6867	3.00	30.2063	1500.00	0.2
692.994	56.7761	3.00	30.3186	1500.00	0.2

## Annexe

687.898	59.5627	3.00	30.3195	1500.00	0.2
687.898	61.6543	3.00	30.3199	1500.00	0.2
687.898	65.8376	3.00	30.3204	1500.00	0.2
682.803	67.2298	3.00	30.209	1500.00	0.2
677.707	68.622	3.00	30.3208	1500.00	0.2
677.707	69.3192	3.00	30.3213	1500.00	0.2
677.707	70.7136	3.00	30.3217	1500.00	0.2
672.611	72.1058	3.00	30.3222	1500.00	0.2
672.611	73.5003	3.00	30.3231	1500.00	0.2
672.611	75.5919	3.00	30.3235	1500.00	0.2
667.516	76.9841	3.00	30.4362	1500.00	0.2
667.516	78.3785	3.00	30.3248	1500.00	0.2
667.516	79.7729	3.00	30.4367	1500.00	0.2
667.516	81.1674	3.00	30.4371	1500.00	0.2
662.42	82.5596	3.00	30.438	1500.00	0.2
662.42	84.6512	3.00	30.4384	1500.00	0.2
657.325	86.0434	3.00	30.4389	1500.00	0.2
662.42	87.44	3.00	30.4398	1500.00	0.2
657.325	89.5295	3.00	30.4402	1500.00	0.2
657.325	91.6211	3.00	30.4407	1500.00	0.2
652.229	95.1049	3.00	30.4411	1500.00	0.2
652.229	97.1966	3.00	30.442	1500.00	0.2
652.229	99.2882	3.00	30.4425	1500.00	0.2
647.134	100.68	3.00	30.4433	1500.00	0.2
647.134	103.469	3.00	30.4442	1500.00	0.2
642.038	106.256	3.00	30.5569	1500.00	0.2
636.943	109.042	3.00	30.5574	1500.00	0.2
642.038	111.136	3.00	30.5583	1500.00	0.2
642.038	113.925	3.00	30.5587	1500.00	0.2
636.943	116.712	3.00	30.671	1500.00	0.2
636.943	118.803	3.00	30.6719	1500.00	0.2
636.943	121.592	3.00	30.6723	1500.00	0.2
636.943	123.684	3.00	30.6732	1500.00	0.2
636.943	125.776	3.00	30.6737	1500.00	0.2
636.943	128.564	3.00	30.7859	1500.00	0.2
636.943	130.656	3.00	30.7868	1500.00	0.2
631.847	132.745	3.00	30.7877	1500.00	0.2
631.847	135.534	3.00	30.9004	1500.00	0.2
631.847	137.626	3.00	30.9013	1500.00	0.2
631.847	139.02	3.00	30.9018	1500.00	0.2
626.752	141.11	3.00	30.9027	1500.00	0.2
631.847	143.204	3.00	31.0149	1500.00	0.2
631.847	145.295	3.00	31.0163	1500.00	0.2
626.752	146.687	3.00	31.0172	1500.00	0.2



## Annexe

626.752	149.476	3.00	30.9062	1500.00	0.2
626.752	152.265	3.00	30.9071	1500.00	0.2
626.752	154.357	3.00	31.0194	1500.00	0.2
626.752	156.448	3.00	31.0198	1500.00	0.2
621.656	159.235	3.00	31.0203	1500.00	0.2
621.656	162.721	3.00	31.1325	1500.00	0.2
616.561	166.205	3.00	31.133	1500.00	0.2
616.561	169.691	3.00	31.1339	1500.00	0.2
616.561	172.48	3.00	31.247	1500.00	0.2
616.561	174.571	3.00	31.2479	1500.00	0.2
616.561	176.663	3.00	31.2484	1500.00	0.2
616.561	178.058	3.00	31.2493	1500.00	0.2
616.561	179.452	3.00	31.3615	1500.00	0.2
616.561	180.846	3.00	31.3624	1500.00	0.2
616.561	182.938	3.00	31.3633	1500.00	0.2
611.465	185.027	3.00	31.3642	1500.00	0.2
611.465	187.816	3.00	31.5	1500.00	0.2
611.465	191.302	3.00	31.65	1500.00	0.2
611.465	192.697	3.00	31.82	1500.00	0.2
611.465	194.788	3.00	31.91	1500.00	0.2
606.369	196.181	3.00	32.01	1500.00	0.2
601.274	198.27	3.00	32.4	1500.00	0.2
519.271	203.812	3.00	25.6247	750.00	0.2
473.264	203.792	3.00	25.9598	750.00	0.2
452.837	205.177	3.00	26.4075	750.00	0.2
442.654	207.962	3.00	26.632	750.00	0.2
432.451	209.352	3.00	26.7456	750.00	0.2
422.278	212.833	3.00	26.747	750.00	0.2
417.227	217.014	3.00	26.7479	750.00	0.2
417.258	219.106	3.00	26.861	750.00	0.2
407.064	221.193	3.00	26.9742	750.00	0.2
401.983	223.283	3.00	26.9755	750.00	0.2
402.044	227.466	3.00	26.8655	750.00	0.2
402.116	232.347	3.00	26.9786	750.00	0.2
402.146	234.438	3.00	26.9795	750.00	0.2
402.197	237.924	3.00	26.9809	750.00	0.2
397.156	242.803	3.00	26.9822	750.00	0.2
397.177	244.197	3.00	27.0949	750.00	0.2
397.228	247.683	3.00	27.0962	750.00	0.2
392.136	249.075	3.00	27.1003	750.00	0.2
392.187	252.561	3.00	27.1194	750.00	0.2
397.34	255.352	3.00	27.1207	750.00	0.2
392.269	258.139	3.00	27.2098	750.00	0.2
387.208	261.623	3.00	27.2107	750.00	0.2

## Annexe

387.238	263.715	3.00	27.2134	750.00	0.2
387.289	267.201	3.00	27.2143	750.00	0.2
387.33	269.989	3.00	27.2156	750.00	0.2
387.401	274.87	3.00	27.217	750.00	0.2
387.442	277.659	3.00	27.2188	750.00	0.2
382.381	281.143	3.00	27.2201	750.00	0.2
382.432	284.629	3.00	27.2214	750.00	0.2
382.473	287.418	3.00	27.2259	750.00	0.2
382.513	290.207	3.00	27.2286	750.00	0.2
382.554	292.995	3.00	27.2303	750.00	0.2
377.463	294.388	3.00	27.2348	750.00	0.2
84.2857	1.21493	9	33.7143	1500	0.002
83.7143	3.36885	9	33.7143	1500	0.002
83.7143	6.25174	9	33.7143	1500	0.002
83.7143	8.4139	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	11.2927	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	14.1755	9	33.7143	1500	0.002
83.7143	17.7833	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	19.9413	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	24.2656	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	26.4278	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	28.59	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	31.4728	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	34.3557	9	33.7143	1500	0.002
83.1429	37.9552	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	40.8422	9	34	1500	0.002
83.4286	44.4458	9	34.2857	1500	0.002
83.7143	45.8914	9	34.2857	1500	0.002
83.7143	49.495	9	33.7143	1500	0.002
83.4286	51.653	9	34.2857	1500	0.002
83.7143	55.2607	9	34.2857	1500	0.002
84.2857	58.1519	9	34.2857	1500	0.002
84.2857	61.0347	9	34.2857	1500	0.002
84	63.1928	9	33.7143	1500	0.002
84	66.0757	9	33.7143	1500	0.002
84	68.2378	9	34.2857	1500	0.002
84.2857	71.1248	9	34.2857	1500	0.002
84.2857	73.287	9	34.2857	1500	0.002
84.5714	76.8947	9	34.2857	1500	0.002
84.8571	79.061	9	34.2857	1500	0.002
84.5714	81.219	9	34.5714	1500	0.002
84.5714	83.3812	9	34.5714	1500	0.002
84.8571	86.9889	9	34.2857	1500	0.002
84.5714	89.147	9	34.5714	1500	0.002

## Annexe

84.8571	92.034	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	93.4795	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	96.3624	9	34.5714	1500	0.002
84.5714	99.2371	9	34.5714	1500	0.002
84.2857	102.116	9	34.5714	1500	0.002
84.5714	105.003	9	34.5714	1500	0.002
84.8571	106.448	9	34.2857	1500	0.002
84.5714	109.327	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	111.498	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	113.66	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	114.38	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	115.822	9	34.5714	1500	0.002
85.1429	117.984	9	34.5714	1500	0.002
85.4286	119.43	9	34.8571	1500	0.002
85.4286	121.592	9	34.8571	1500	0.002
85.4286	123.754	9	34.8571	1500	0.002
86	125.924	9	35.1429	1500	0.002
86	128.807	9	35.1429	1500	0.002
86	129.528	9	34.8571	1500	0.002
86.2857	132.415	9	35.1429	1500	0.002
86.5714	134.581	9	35.1429	1500	0.002
87.1429	138.193	9	35.7143	1500	0.002
87.1429	138.914	9	35.7143	1500	0.002
86.5714	139.626	9	35.7143	1500	0.002
86.2857	142.505	9	35.7143	1500	0.002
86.2857	143.946	9	35.7143	1500	0.002
86.5714	144.671	9	35.7143	1500	0.002
86.8571	146.117	9	35.7143	1500	0.002
86.8571	148.279	9	35.7143	1500	0.002
87.7143	151.174	9	35.7143	1500	0.002
87.7143	153.336	9	35.7143	1500	0.002
87.7143	154.057	9	35.7143	1500	0.002
88.2857	156.948	9	35.7143	1500	0.002
89.1429	159.123	9	36	1500	0.002
89.1429	160.564	9	36.2857	1500	0.002
88.8571	162.002	9	36.2857	1500	0.002
89.1429	163.447	9	36.2857	1500	0.002
89.7143	164.176	9	36.2857	1500	0.002
89.4286	167.776	9	36.2857	1500	0.002
89.7143	170.663	9	36.8571	1500	0.002
90	171.387	9	36.8571	1500	0.002
90.2857	172.833	9	36.8571	1500	0.002
91.1429	175.007	9	36.8571	1500	0.002
92	176.461	9	37.4286	1500	0.002

## Annexe

92.8571	178.636	9	37.4286	1500	0.002
93.7143	180.81	9	37.4286	1500	0.002
93.7143	182.972	9	37.4286	1500	0.002
95.1429	186.597	30	37.7143	1500	0.002
94.5714	188.03	30	38	1500	0.002
94.2857	190.188	30	38.2857	1500	0.002
94	193.067	30	38.2857	1500	0.002
94	194.508	30	38.5714	1500	0.002
94	198.112	30	38.5714	1500	0.002
93.7143	200.27	30	38.5714	1500	0.002
93.1429	202.424	30	38.8571	1500	0.002
93.1429	203.865	30	39.1429	1500	0.002
93.1429	206.748	30	39.1429	1500	0.002
92.8571	208.185	30	39.1429	1500	0.002
92.5714	211.785	30	39.1429	1500	0.002
92.5714	212.506	30	39.4286	1500	0.002
92.2857	215.384	30	39.7143	1500	0.002
91.7143	216.818	30	40	1500	0.002
91.7143	219.7	30	40.5714	1500	0.002
91.7143	222.583	30	40.5714	1500	0.002
91.1429	224.016	30	40.5714	1500	0.002
90.5714	226.17	30	40.5714	1500	0.002
90.2857	227.608	30	40.8571	1500	0.002
90	229.045	30	41.1429	1500	0.002
90	231.928	30	41.1429	1500	0.002
89.7143	234.807	30	41.4286	1500	0.002
89.4286	236.965	30	41.4286	1500	0.002
89.4286	238.406	30	41.4286	1500	0.002
88.8571	239.119	30	41.7143	1500	0.002
88.8571	240.56	30	41.7143	1500	0.002
88.2857	241.273	30	41.4286	1500	0.002
87.7143	244.147	30	41.4286	1500	0.002
87.4286	245.585	30	41.4286	1500	0.002
86.5714	249.176	30	41.7143	1500	0.002
86.2857	252.055	30	41.7143	1500	0.002
85.7143	252.767	30	42	1500	0.002
85.1429	253.48	30	42.2857	1500	0.002
84.5714	254.192	30	42.5714	1500	0.002
84	254.905	30	42.5714	1500	0.002
84.2857	260.674	30	42.8571	1500	0.002
82.8571	260.654	30	42.8571	1500	0.002
82	259.2	30	42.8571	1500	0.002
82	262.804	30	43.1429	1500	0.002
82	265.686	30	43.4286	1500	0.002

## Annexe

81.4286	267.84	30	43.4286	1500	0.002
81.4286	270.003	30	43.7143	1500	0.002
80.8571	272.877	30	44	1500	0.002
80	275.027	30	44.2857	1500	0.002
79.7143	278.627	30	44.5714	1500	0.002
79.4286	280.785	30	44.8571	1500	0.002
79.1429	282.222	30	45.1429	1500	0.002
78.8571	283.659	30	45.1429	1500	0.002
78.2857	285.092	30	45.4286	1500	0.002
78	285.809	30	45.4286	1500	0.002
77.7143	287.967	30	45.7143	1500	0.002
77.1429	290.121	30	46	1500	0.002
76.5714	292.996	30	46.5714	1500	0.002
76.5714	293.716	30	47.1429	1500	0.002
75.4286	295.141	30	47.4286	1500	0.002
74.8571	295.854	30	47.7143	1500	0.002
74.2857	297.287	30	48	1500	0.002
74	298.724	30	48.5714	1500	0.002
73.7143	300.882	30	48.8571	1500	0.002
73.1429	302.316	30	49.4286	1500	0.002
72.5714	303.749	30	49.7143	1500	0.002
72	305.903	30	50.2857	1500	0.002
71.7143	306.619	30	50.8571	1500	0.002
71.4286	306.615	30	51.7143	1500	0.002
70.8571	307.328	30	52	1500	0.002
70.5714	308.765	30	52.8571	1500	0.002
70	309.477	30	53.7143	1500	0.002
68.2857	310.173	30	54	1500	0.002
67.7143	313.048	30	54.8571	1500	0.002
67.1429	313.04	30	55.4286	1500	0.002
66.5714	313.032	30	55.7143	1500	0.002
66.5714	314.473	30	56	1500	0.002
66.5714	316.635	30	56.5714	1500	0.002
66.5714	317.356	30	57.4286	1500	0.002
66.2857	318.073	30	58	1500	0.002
66	318.068	30	58.5714	1500	0.002
65.4286	318.06	30	59.7143	1500	0.002
65.1429	318.777	30	60	1500	0.002
64.5714	319.489	30	60.2857	1500	0.002
64.2857	321.647	30	60.8571	1500	0.002
63.4286	323.076	30	61.4286	1500	0.002
63.1429	323.793	30	61.7143	1500	0.002
62.5714	325.226	30	62.2857	1500	0.002
62.2857	326.664	30	62.5714	1500	0.002

## Annexe

---

61.7143	329.538	30	62.8571	1500	0.002
61.7143	330.98	30	63.4286	1500	0.002
60.2857	333.121	30	63.4286	1500	0.002
59.7143	334.554	30	64.5714	1500	0.002
58.5714	335.979	30	64.8571	1500	0.002
57.7143	338.85	30	65.1429	1500	0.002
56.8571	341.72	30	65.7143	1500	0.002
56.5714	343.158	30	66.8571	1500	0.002
56	343.87	30	67.4286	1500	0.002
55.4286	345.303	30	68	1500	0.002
54.2857	346.728	30	68.5714	1500	0.002
54.2857	347.449	30	68.8571	1500	0.002
53.7143	348.162	30	69.7143	1500	0.002
53.4286	351.04	30	70	1500	0.002
52	346.695	120	70.8571	1500	0.002
33.1429	352.189	120	71.7143	1500	0.002
29.1429	355.735	120	72.2857	1500	0.002
25.1429	353.516	120	72.5714	1500	0.002
23.7143	355.657	120	72.8571	1500	0.002
21.7143	357.79	120	73.1429	1500	0.002
18.5714	359.187	120	73.4286	1500	0.002
16.5714	359.158	120	73.7143	1500	0.002