

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Hassiba Ben Bouali – Chlef*  
*Faculté de Technologie*  
*Département de Génie des Procédés*



*Projet de Fin d'Etudes*

*En vue d'obtention du Diplôme de Master en Génie des Procédés*  
*Option : Procédés et Environnement*

*Thème*

*Caractérisation des membranes d'ultrafiltration.*  
*Application au dessalement et à la concentration*  
*de jus de fruit*

*Présenter par :*

*M<sup>elle</sup> BOUKHIAR – Siham*

*Dirigé par :*

*Pr.OUAGUED.A*

*Devant le jury composé de :*

- ✓ Encadreur : **Pr.OUAGUED.A**
- ✓ Président : **Pr.LABBACIA**
- ✓ Examinatrice : **M<sup>me</sup> MAUCHE.W**

*Promotion 2015/2016*

## *Remerciements*

*Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui m'a donné la volonté et le courage pour parachèvement ce travail*

*«Alahamde li ALLAH».*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur sacrifice et soutien inestimables durant toutes mes études.*

*Je tiens à remercier mon encadreur Professeur OUAGUED.A qui ma met dans la bonne direction et ma donner des conseils précieux tout le long de ce travail.*

*Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de génie des procédés.*

*Je remercie également tous les étudiants de génie des procédés et toute l'équipe de notre laboratoire.*

*Je tiens à remercier toutes personnes qui m'ont aidé de près ou de loin de la réalisation de ce travail.*

*Merci pour tous*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

- *À mes chers parents ;*
- *À mes sœurs et frères;*
- *À mes oncles et leurs familles ;*
- *À mes tantes et leurs familles ;*
- *À mes cousins et mes cousines ;*
  - *À mes amis et collègues ;*
- *A tous les étudiants de ma promotion ;*
  - *Sans oublier tous mes enseignants ;*
- *A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

Table de matière

<b>Introduction générale :</b>	1-2
<b>Chapitre I : les membranes</b>	
I.1. Généralités sur les membranes	3
I.1.1- Définition de la membrane	3
I.2. Types des membranes	4
I.2.1. La nature chimique des membranes	4
I.2.1.a. Les membranes organiques	4
I.2.1.b. Les Membranes inorganiques	5
I.2.1.c. Membranes hybrides (organique – inorganique)	6
I.2.2. Structure des membranes	7
I.2.2.1. Membranes poreuses et membranes denses	7
I.2.2.2. Membranes isotropes et membranes anisotropes	7
I.2.2.2.a. Les membranes isotropes	7
I.2.2.2.b. Les membranes anisotropes	8
I.2.2.2.c. Les membranes composites	8
I.2.3. Caractéristiques des matériaux membranaires	9
I.2.4. Géométrie des supports	9
I.2.4.1- les modules plans	10
I.2.4.2- les modules spiralés	10
I.2.4.3- les modules tubulaires	11
I.2.4.4 - les modules à fibres creuses	11
I.3. Les paramètres déterminant des performances d'un procédé à membrane	12
I.3.1. Seuil de coupure	12
I.3.2. Sélectivité	12
I.3.3. Perméabilité	13
I.3.4. Flux	13
I.3.5. La porosité	13
I.3.6. Résistivité	14
I.3.7. La pression transmembranaire :	14
I.3.8. Le taux de rétention	15
I.3.9. Taux de conversion	15

I.3.10. Taux de passage :	16
I.4- Colmatage de membranes et leur nettoyage	16
<b>Chapitre II : Les procédés baromembranaire</b>	
II.1- Introduction	20
II.2. Les procédés baromembranaire	21
II.2.1. Microfiltration	21
II.2.2. Ultrafiltration	21
II.2.3. Nanofiltration	22
II.2.4. Osmose inverse	22
II.3. Caractéristiques des différents procédés membranaires à gradient de pression	23
II.4.Principe de mise en œuvre des membranes	25
II.4.1.La filtration frontale	25
II.4.2.La filtration tangentielle	25
<b>Chapitre III : l'ultrafiltration</b>	
III.1- Généralité	29
III.2- L'ultrafiltration	29
III.3- Domaine d'application	30
<b>Chapitre IV : Le dessalement de l'eau de mer</b>	
IV.1-Définition du dessalement de l'eau de mer	32
IV.2- Qualité de l'eau de mer	32
IV.3- Etapes du dessalement	32
IV.4- La prise de l'eau de mer	33
IV.4.1- Les forages côtiers	33
IV.4.2- La prise d'eau de surface	33
IV.5- Le prétraitement	33
IV.6-Procédés membranaires	33
IV.6.1- Osmose inverse	33
<b>Chapitre V : la fabrication de jus de fruit</b>	
V.1. Introduction	36
V.2. Définition	36
V.3. La fabrication de jus de fruit	36

V.4. Qualités nutritionnelles	37
<b>Partie expérimentale</b>	
<b>Chapitre I : le pilote d'ultrafiltration</b>	
I.1- Description du pilote d'ultrafiltration	39
I.1.1- Nomenclature	40
I.1.2- Descriptif technique	41
I.2- Principe de fonctionnement du pilote	45
I.3- Descriptive de pilote d'ultrafiltration avec le module tubulaire	46
I.3.1- Tests de filtration sur l'eau pure par la membrane de 50 kD	47
I.4- Descriptive de pilote d'ultrafiltration avec module plan	50
I.4.1. Tests de filtration sur l'eau par la membrane de 0,2 µm	51
I.5. conclusion	53
<b>Chapitre II : Usine de dessalement de Mostaganem</b>	
II.1- Présentation de l'usine de dessalement de Mostaganem :	55
II.2- Captage et pompage de l'eau de mer	55
II.3- Système de prétraitement	55
II.3.1- Filtration de première étape (24 filtres)	56
II.3.2- Filtration de deuxième étape (16 filtres)	57
III.3.3- Système de microfiltration	57
II.4- système d'osmose inverse	58
II.4.1- Châssis d'osmose inverse	59
<b>Chapitre III : prétraitement par l'ultrafiltration</b>	
III. Etude du prétraitement par l'Ultrafiltration	61
III.1. Le prélèvement	62
III.2. la filtration de l'échantillon	62
III.2.1. Flux	63
III.2.2. La perméabilité	64
III.2.3. la conductivité	65
III.2.4. Taux de passage	67
III.2.5. Taux de rétention	68
III.3. Résultat du traitement	69

III.3.1.Etude de la turbidité	70
III.3.2.Etude de la matière en suspension	70
III.3.3Etude de matière totale dissous	71
III.3.4.Etude de la conductivité	72
III.3.5.Etude des éliminations des ions	73
III.4. Rétrolavage	74
Conclusion	75
<b>Chapitre IV : concentration de jus de fruit par l'ultrafiltration</b>	
IV.1. Introduction	76
IV.2. Aperçus d'usine : LA TELOISE	77
IV.2.1 Historique	77
IV.2.2. Localisation	78
IV.2.3.L'organigramme de l'unité	78
IV.2.4. processus de production	79
IV.3 Prétraitement	80
IV.4. Les analyses physico-chimiques de jus	80
IV.4.1 pH	80
IV.4.2. Mesure de l'acidité	80
IV.4.3. Analyse de la concentration en sucre (Brix)	81
IV.4.4. La densité	81
IV.4.5. La pulposité	82
IV.5.Analyse du jus avant ultrafiltration	83
IV-6. La concentration de jus sur membrane PVDF à 0,2 Um	83
IV-7. Le rapport volume de perméat / temps	86
IV-8 Les analyses après l'UF de jus d'orange	88
IV.8.Rétrolavage	88
Conclusion	89
<b>Conclusion générale</b>	90

Liste des figures

<b>Chapitre I : Les membranes</b>	
<b>Figure I-1:</b> membrane sélective	3
<b>Figure I-2 :</b> Représentation schématique de membrane symétrique	8
<b>Figure I-3</b> Représentation schématique des différentes structures membranaires membrane asymétrique.	8
<b>Figure I-4 :</b> Exemple d'un module plan	10
<b>Figure I-5 :</b> Module spiralé	10
<b>Figure I-6 :</b> module tubulaire pour les membranes Carbosep.	11
<b>Figure I-7 :</b> Modules à fibres creuses	11
<b>Figure I-8 :</b> principe de détermination du seuil de coupure d'une membrane	12
<b>Chapitre II : Les procédés baromembranaires</b>	
<b>Figure II-1 :</b> Les opérations de filtration membranaire selon la taille des pores et des espèces retenues	20
<b>Figure II-2:</b> Principe de l'ultrafiltration	21
<b>Figure II-3 :</b> Principe de l'osmose inverse	23
<b>Figure II.4 :</b> Schéma de principe de la filtration tangentielle et frontale	25
<b>Chapitre III : L'ultrafiltration</b>	
<b>Figure III.1 :</b> principe de fonctionnement de la séparation membranaire	29
<b>Chapitre IV : Le dessalement de l'eau de mer</b>	
<b>Figure IV.1 :</b> Schéma représente les étapes principales de dessalement d'eau de mer	32
<b>Figure IV.2 :</b> Principe de l'osmose inverse	34

<b>Chapitre V : la fabrication de jus de fruit</b>	
<b>Figure V.1:</b> Les grandes étapes de production de jus de fruits	36
<b>Partie Expérimentale</b>	
<b>Chapitre I : Le pilote d'ultrafiltration</b>	
<b>Figure I.1 :</b> schéma du pilote d'ultrafiltration	39
<b>Figure I.2 :</b> descriptif technique du pilote d'ultrafiltration	41
<b>Figure I.3:</b> dimension du module tubulaire	42
<b>Figure I.4:</b> dimension du module plan	43
<b>Figure I.5 :</b> module plan vue de face	44
<b>Figure I.6:</b> module plan face arrière	44
<b>Figure I.7 :</b> flux en fonction de la pression transmembranaire	48
<b>Figure I.8 :</b> flux en fonction du débit	48
<b>Figure I. 9 :</b> Perméabilité en fonction de la pression transmembranaire	49
<b>Figure I.10 :</b> flux en fonction de la pression transmembranaire	51
<b>Figure I.11 :</b> flux en fonction du débit	52
<b>Figure I.12:</b> Perméabilité en fonction de la pression transmembranaire	52
<b>Chapitre II : usine de dessalement de Mostaganem</b>	
<b>Figure II.1 :</b> filtre à cartouche	58
<b>Chapitre III : prétraitement par l'ultrafiltration</b>	
<b>Figure III.1 :</b> Schéma de méthode de travail	61
<b>Figure III.2 :</b> Le flux en fonction de pression transmembranaire avec différent solution	63
<b>Figure III.3 :</b> la perméabilité de la membrane par rapport de l'eau distillée et l'eau de mer en fonction de la pression transmembranaire	64

<b>Figure III.4</b> : la conductivité en fonction du temps entre deux membranes	66
<b>Figure III.5</b> : taux de passage en fonction du temps pour deux membranes différentes	67
<b>Figure III.6</b> : le taux de rétention en fonction du temps	68
<b>Figure III.7</b> : la turbidité des différents échantillons	70
<b>Figure III.8</b> : la matière en suspension avant et après l'ultrafiltration à différent membrane	71
<b>Figure III.9</b> : la matière totale dissous avant et après l'ultrafiltration à différent membrane	72
<b>Figure III.10</b> : la conductivité avant et après l'ultrafiltration à différent membrane	73
<b>Figure III.11</b> : Le pourcentage de quelque ion dans l'eau de mer avant et après l'ultrafiltration	74
<b>Figure III.12</b> : le schéma proposé de prétraitement avec l'ultrafiltration avant l'osmose inverse	75
<b>Chapitre IV : concentration de jus de fruit par l'ultrafiltration</b>	
<b>Figure IV.1</b> : schéma de développement de l'usine de la telloise	77
<b>Figure IV.2</b> : l'organigramme de l'usine de la telloise	78
<b>Figure IV.3</b> : Schéma de processus de production	79
<b>Figure IV.4</b> : concentration de jus en fonction du temps	84
<b>Figure IV.5</b> : Variation du flux de perméat et de la $\Delta P$ en fonction du temps	85
<b>Figure IV.6</b> : Le volume de perméat en fonction du temps	87
<b>Figure IV.7</b> : Variation du flux de perméat et concentration de sucre en rétentat en fonction du temps	87



Liste des photos

<b>Partie expérimentale</b>	
<b>Chapitre I : Le pilote d'ultrafiltration</b>	
<b>Photos I.1</b> : pilote d'Ultrafiltration	39
<b>Photos I.2</b> : pilote d'ultrafiltration avec le module tubulaire	46
<b>Photos I.3</b> : pilote d'ultrafiltration avec le module plan	50
<b>Chapitre IV : concentration de jus de fruit par l'ultrafiltration</b>	
<b>Photos IV.1</b> : mesure de l'acidité de jus d'orange	81
<b>Photos IV.2:</b> mesure le taux de sucre dans le jus d'orange	82
<b>Photos IV.3</b> : mesure la densité de jus d'orange	82

## Liste des tableaux

<b>Chapitre I : les membranes</b>	
<b>Tableau I-1</b> : nom, abréviations et formule chimique de différents polymères constitutifs de membrane organique	5
<b>Tableau I-2</b> : Classification IUPAC des pores suivant leur taille	7
<b>Tableau I-3</b> : Caractéristiques générales des membranes	9
<b>Chapitre II : les procédés baromembranaires</b>	
<b>Tableau II- 1</b> : Caractéristiques des procédés de séparation	24
<b>Partie expérimentale</b>	
<b>Chapitre I : Le pilote d'ultrafiltration</b>	
<b>Tableau I.1</b> : Caractéristiques de la membrane tubulaire MICROKLENSP™	46
<b>Tableau I.2</b> : variation du débit et du flux à différentes pression transmembranaire à membrane de 50 KD pour l'eau distillé	47
<b>Tableau I.3</b> : Caractéristique de la membrane plane RAYFLOW	50
<b>Tableau I.4</b> : variation du débit, du flux et de la perméabilité à différentes pression transmembranaire pour une membrane de 0,2 µm	51
<b>Chapitre II : usine de dessalement de Mostaganem</b>	
<b>Tableau II .1</b> : caractéristique des couches de filtration de filtre à sable de première étape	56
<b>Tableau II.2</b> : caractéristique de la couche de filtration de filtre à sable de deuxième étape	57
<b>Tableau II.3</b> : caractéristique de filtre à cartouche	58
<b>Tableau II.4</b> : Les caractéristiques de la membrane d'osmose inverse	59
<b>Chapitre III : prétraitement par l'ultrafiltration</b>	
<b>Tableau III.1</b> : variation du débit et du flux à différentes pression transmembranaire à différent membrane 50 kD et 0,2 µm pour l'eau de mer	62

<b>Tableau III.2:</b> variation de flux en fonction de pression transmembranaire avec différent solution	63
<b>Tableau III.3 :</b> La perméabilité de l'eau distillé et l'eau de mer en fonction de la pression transmembranaire pour les deux membranes à 50 kD et 0,2 µm	64
<b>Tableau III.4 :</b> la conductivité de perméat en fonction du temps	65
<b>Tableau III.5 :</b> résultat de taux de passage en fonction du temps	67
<b>Tableau III.6 :</b> résultat de taux de rétention en fonction du temps	68
<b>Tableau III .7 :</b> les résultats d'analyse de chaque échantillon	69
<b>Tableau III.8 :</b> résultat de la turbidité de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration :	70
<b>Tableau III.9 :</b> résultat de la matière en suspension de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration	70
<b>Tableau III.10 :</b> résultat de la matière totale dissous de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration	71
<b>Tableau III.11 :</b> résultat de la matière totale dissous de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration	72
<b>Tableau III.12 :</b> Le pourcentage de quelques ions dans l'eau de mer avant et après l'ultrafiltration	73
<b>Chapitre IV : concentration de jus de fruit par l'ultrafiltration</b>	
<b>Tableau IV.1 :</b> résultats des analyses physico-chimiques de jus avant la filtration	83
<b>Tableau IV.2 :</b> la concentration de sucre dans le jus au cours du temps	83
<b>Tableau IV.3:</b> paramètres de filtration de la membrane à 0.2µm	86
<b>Tableau IV.4:</b> résultats des analyses physico-chimiques de jus après la filtration	88

Liste des abréviations

<b>A</b>	Alimentation
<b>C</b>	concentrât
<b>Ca</b>	Concentration du composé dans l'alimentation
<b>Cp</b>	Concentration du composé dans le perméat
<b>D</b>	Diamètre extérieur
<b>d<sub>int</sub></b>	diamètre intérieur
<b>e<sub>m</sub></b>	Epaisseur de la couche active de la membrane
<b>J</b>	Joint du module
<b>J<sub>p</sub></b>	Flux de perméat
<b>l</b>	Longueur de la membrane filtrante
<b>L</b>	Longueur de module
<b>L<sub>p</sub></b>	Perméabilité hydraulique
<b>Lp ED</b>	Perméabilité de l'eau distillée
<b>Lp EM</b>	Perméabilité de l'eau de mer
<b>MF</b>	Microfiltration
<b>MES</b>	Matière en suspension
<b>MTD</b>	Matière totale dissoute
<b>NF</b>	Nano filtration
<b>n<sub>p</sub></b>	nombre des pores par unité de surface
<b>OI</b>	Osmose Inverse
<b>P</b>	Perméat.
<b>P<sub>A</sub></b>	Pressions d'alimentation
<b>P<sub>p</sub></b>	Pression de perméat
<b>P<sub>R</sub></b>	Pressions de retentât
<b>PAN</b>	Polyacrylonitrile
<b>PS</b>	Polysulfone
<b>PVDF</b>	Fluorure de polyvinylidène
<b>Q<sub>a</sub></b>	Débit d'alimentation

## Liste des abréviations

---

<b><math>Q_p</math></b>	Débit de perméat
<b><math>r_p</math></b>	rayon des pores
<b><math>S</math></b>	Surface effective de la membrane
<b>TA</b>	Titre Alcalimétrique
<b>TAC</b>	Titre Alcalimétrique Complet
<b>TH</b>	Dureté Totale
<b>TP</b>	Taux de passage
<b><math>T_R</math></b>	Taux de rétention
<b>UF</b>	Ultrafiltration
<b><math>V_v</math></b>	Volume de vide
<b><math>V_s</math></b>	Volume de solide
<b>Y</b>	Taux de conversion
<b><math>\epsilon_m</math></b>	Porosité de la membrane
<b><math>\Delta P_m</math></b>	Pression transmembranaire

# *Partie théorique*

## **Introduction générale**

Les techniques de séparation par membrane ont pris leur essor dans les années 70, en particulier grâce au développement de membranes plus performantes. Elles font partie de l'ensemble des techniques de séparation qui permettent de réaliser des opérations d'extraction [1], de clarification, de concentration, de purification, de séparation de sels et le recyclage dans l'industrie agro-alimentaire, pharmaceutique et de traitement de surface [2]. Leur intérêt réside dans un ensemble d'avantages spécifiques :

- Traitement à température ambiante (sans dégradation thermique), économique (faible coût) et modulable [3]
- Elles permettent d'accéder à des seuils de séparation inaccessibles par d'autres technologies (rétention totale de bactéries, de virus, de molécules organiques...)
- Les opérations d'extraction, de séparation ou de purification s'effectuent par voie purement physique, ce qui ne dégrade pas les produits traités (pas de changement de phase, température adaptée au produit, pas d'oxydation...)
- Elles sont parfaitement modulables (pas de taille critique pour les installations) et permettent de travailler dans des procédés en continu ;
- Elles fonctionnent en systèmes fermés réduisant ainsi les risques de contamination ;
- Elles ne nécessitent pas de recourir à des adjuvants de filtration.

Leur performance technico-économiques expliquent leur présence dans des secteurs d'activités aussi nombreux que variés tels que les industries pharmaceutiques, chimiques, agroalimentaires, textiles, la production d'eau potable, la protection de l'environnement ... [1]

L'ultrafiltration est un procédé membranaire utilisé dans différents secteurs industriels : agro-alimentaire, médicales et traitement de l'eau. En l'absence de changement de phase, la membrane agit comme une barrière permselective qui laisse passer certains composés et qui en retient d'autres. Le flux qui passe à travers la membrane est appelé le perméat et le flux qui est retenu par la membrane est appelé le retentât [4].

L'ultrafiltration est utilisée dans l'industrie pour purifier et/ou concentrer des solutions de macromolécules

L'ultrafiltration est devenue une technique très en vogue ces dernières années du fait de la mise au point de membranes performantes et résistantes du point de vue chimique, thermique et mécanique.

L'ultrafiltration est appliquée comme prétraitement de l'eau avant une nano-filtration ou une étape d'osmose inverse, le prétraitement de l'eau avant les étapes de nano-filtration et d'osmose inverse est très important car l'encrassement de la membrane peut facilement perturber le procédé de purification [5].

L'ultrafiltration est aussi utilisée pour la concentration des liquides alimentaires par exemple dans la fabrication des jus de fruits ; le rendement s'élève de 10 %, les coûts de production sont abaissés de 30 % [6].

Dans le cadre de ce projet de fin d'études notre travail s'est porté sur l'étude de performance de pilote d'ultrafiltration par différentes membranes et différentes solutions pour cela nous avons structuré ce projet de la façon suivante :

Une partie bibliographique qui contient cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les membranes ;
- Le deuxième chapitre, portera sur les procédés baromembranaires;
- Le troisième chapitre nous donne un aperçu générale sur l'ultrafiltration;
- Le quatrième chapitre est axé sur le dessalement;
- Le dernier chapitre est un bref aperçu sur la fabrication de jus de fruit.

La deuxième partie porte sur un travail expérimental. Il est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une description du pilote d'ultrafiltration et son principe de fonctionnement ;
- Le deuxième chapitre concernera la description de la station de dessalement de Mostaganem;
- Le troisième chapitre consacré au prétraitement par l'ultrafiltration sur l'eau de mer ;
- Le quatrième chapitre c'est une étude de la concentration du jus par ultrafiltration ;

Et on termine par une conclusion générale.

## I.1. Généralités sur les membranes

Les procédés à membranes, industrialisés à partir des années soixante, se développent encore à un rythme rapide. Il existe maintenant une grande variété de membranes adaptées à divers procédés de séparation. Cette diversité est à l'origine des applications dans des domaines très différents [7,8].

### I.1.1- Définition de la membrane

La membrane est définie comme une barrière séparant deux compartiments et permettant le passage préférentiel d'au moins une espèce parmi les autres sous l'action d'une force de transfert chimique (concentration ...) ou physique (pression). En général, les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers la membrane sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues.

Le procédé de séparation membranaire est illustré schématiquement (Figure I-1). Le résultat d'une opération membranaire est la séparation du fluide à traiter en deux parties de concentrations différentes :

- le Retentât qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane,
- le Perméat qui contient les molécules qui traversent la membrane [9].

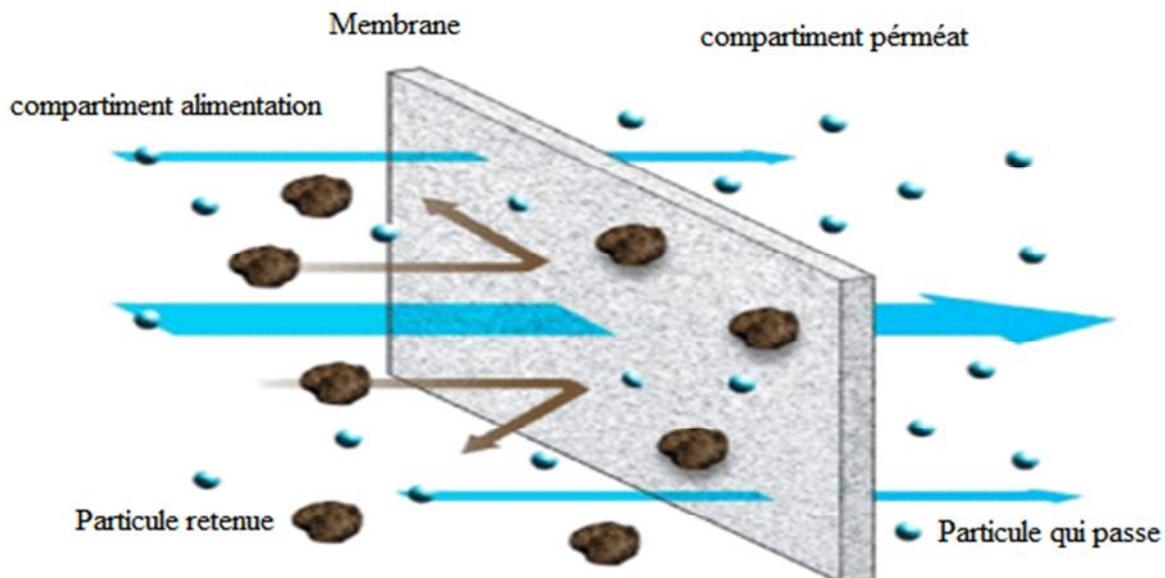


Figure I-1 : membrane sélective [10]

## **I.2. Types des membranes**

Il existe une grande diversité de membranes qui se différencient les unes des autres par leur nature, leur structure et leur géométrie. Les caractéristiques chimiques et structurales de ces matériaux leur confèrent des performances de séparation clairement identifiées les rendant ainsi aptes à réaliser des séparations spécifiques dans divers secteurs de l'industrie (traitement des eaux usées, des effluents industriels et des fluides alimentaires) [9, 11,12].

### **I.2.1. La nature chimique des membranes**

Les membranes utilisées dans les procédés de filtration peuvent être de nature organique ou minérale [1].

#### **I.2.1.a. Les membranes organiques**

Les membranes à base de polymères comptent parmi les plus utilisées dans les installations de dessalement. Différents polymères sont utilisés pour être adaptés au seuil de coupure des poids moléculaires, pour obtenir la résistance au colmatage désirée ou le rendement voulu. Les matériaux les plus usités pour les membranes organiques sont les polymères organiques synthétiques ou naturels : acétate de cellulose, polysulfone, polyamides aromatiques, polyacrylonitrile, Fluorure de polyvinylidène (tableau I-1).

La plupart d'entre elles ont des qualités (facilité de mise en forme, élasticité par exemple) qui leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications.

La majeure partie (aux alentours des 90%) des membranes d'ultrafiltration (UF) et de microfiltration (MF) est actuellement constituée de membranes organiques. En revanche, elles présentent une faible résistance mécanique aux hautes pressions, une résistance thermique limitée, une durée de vie plus faible que les membranes céramiques [13].

Les membranes organiques de microfiltration à nanofiltration ont une matrice organique poreuse d'épaisseur 100 à 200  $\mu\text{m}$  qui servent de support à la membrane filtrante dont l'épaisseur se situe entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$  [14].

**Tableau I-1** : nom, abréviations et formule chimique de différents polymères constitutifs de membrane organique [3,9, 15, 16, 17,18].

Nom	Abréviations	Formule Chimique
Polyethersulfone	PES	
Polysulfone	PSU	
Polyvinylpyrrolidone	PVP	
Polystyrène	PS	
Polyéthylène glycol	PEG	
Polyamide aromatique	PA	
Fluorure de polyvinylidène	PVDF	
Acétate de cellulose	CA	

### I.2.1.b. Les Membranes inorganiques

Les membranes peuvent aussi être préparées à partir de matériaux inorganiques tels que les céramiques, métaux, et verre. Deux principales catégories peuvent être distinguées :

- Denses : elles sont constituées de métaux, hybrides organiques-inorganiques ou d'oxydes conducteurs mixtes ;
- Poreuses : membranes céramiques.

Les méthodes mises en œuvre pour réaliser ces membranes sont les procédés sol-gel, le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma et la synthèse hydrothermale. Les membranes inorganiques rivalisent avec les membranes organiques pour des applications en conditions extrêmes. Elles peuvent fonctionner à des températures très élevées, la plupart des membranes métalliques résistent à des températures de 500 à 800°C, et de nombreuses membranes céramiques sont adaptées pour des usages à des températures supérieures à 1000°C.

Elles sont nettement plus résistantes aux attaques chimiques et ont une durée de vie largement supérieure. Cependant, ces membranes présentent de nombreux inconvénients : leur coût très onéreux, leur porosité... Pour ces raisons, les matériaux inorganiques sont très peu adoptés.

De commercialisation plus récente que les membranes organiques [13], ces membranes sont constituées de matériaux céramiques tels que l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) ou la zircone ( $\text{ZrO}_2$ ) [9, 11, 12].

Leur arrivée et leur production ont permis de travailler dans des conditions élargies de température, d'environnement chimique, de pression, ce qui a ouvert de nouvelles voies d'application pour la séparation membranaire [13].

### I.2.1.c. Membranes hybrides (organique – inorganique)

Ils allient les avantages des uns et des autres, ils offrent des avantages spécifiques pour la préparation de membranes exigeant une sélectivité importante et des débits élevés, ou une résistance chimique et thermique considérable. On les range en deux catégories :

Premier type : seules les forces de Van Der Waals ou les liaisons hydrogène existent entre les parties organiques et inorganiques. Ces matériaux hybrides peuvent être comparés avec des micros ou nano composites dans lesquels une part (organique ou inorganique) est dispersée dans l'autre agissant comme la matrice hôte [18].

Second type : les liaisons covalentes entre les phases organiques et inorganiques sont présentes dans ces modèles. Il en résulte soit un matériau hybride homogène au niveau moléculaire, soit une grande aire de surface inorganique greffée de groupes organiques. [18]

## I.2.2. Structure des membranes :

### I.2.2.1. Membranes poreuses et membranes denses

Un pore est défini comme un interstice entre les constituants solides d'une membrane. Dans le cas des membranes organiques, la structure poreuse résulte des espaces entre les chaînes de polymère tandis que dans le cas des membranes inorganiques les pores sont constitués par les espaces inter-granulaires. Même s'il existe quelques types de membranes ayant des pores droits de géométrie bien définie. La plupart des matériaux commercialisés sont caractérisés par un réseau de pores tortueux et interconnectés. Selon le type de membranes, le diamètre moyen des pores peut varier du nanomètre jusqu'à quelques dizaines de micromètres. L'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) distingue trois catégories de pores selon leur taille et recommande d'adopter la terminologie suivante (tableau I-2) : [9, 11,12]

**Tableau I-2** : Classification IUPAC des pores suivant leur taille [14].

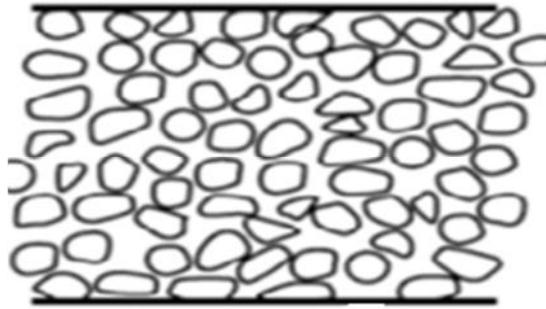
Dénomination	Micropore	Mésopore	Macropore
Taille de pore	< 2 nm	2- 50 nm	>50 nm

La porosité d'une membrane est définie comme le rapport du volume des espaces vides sur le volume total de la matrice. Cette grandeur dépend de la taille des constituants élémentaires de la matrice mais également du procédé d'élaboration de la membrane. [9,12]

### I.2.2.2. Membranes isotropes et membranes anisotropes

Les membranes peuvent être aussi classées en fonction de la structure des différents matériaux qui la composent, On distingue :

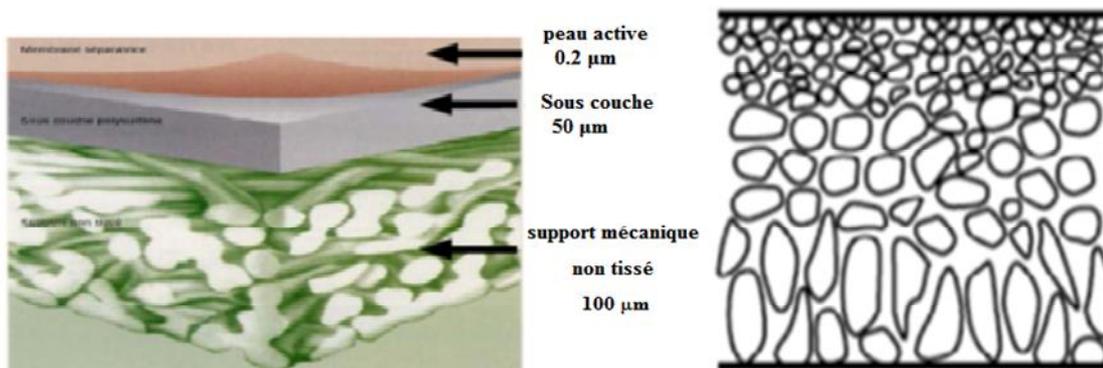
**I.2.2.2.a. Les membranes isotropes (symétrique)** dont la structure est homogène sur toute l'épaisseur (figure I-2). Etant donné que la résistance intrinsèque d'une membrane est proportionnelle à son épaisseur, il est donc nécessaire qu'une membrane symétrique soit la plus mince possible.



**Figure I-2** : Représentation schématique de membrane symétrique [19]

**I.2.2.2.b. Les membranes anisotropes (asymétrique)** dont la structure varie d'une couche à l'autre (figure I-3). Celles-ci présentent une structure hétérogène. Il peut s'agir de membranes constituées d'un même matériau mais de porosité variant de façon graduelle suivant leur épaisseur ou de membranes composées de plusieurs couches de différents matériaux (on parle alors de membranes composites).

Les membranes disponibles sur le marché possèdent une structure asymétrique car celle-ci permet d'allier une bonne résistance mécanique et un débit volumique élevé de perméat [11,12]



**Figure I.3** Représentation schématique des différentes structures membranaires

Membrane asymétrique. [9]

Une membrane asymétrique est constituée généralement d'une couche macroporeuse (assurant une bonne résistance mécanique) et une couche active régissant les propriétés de séparation entre lesquelles s'insèrent une ou plusieurs couches intermédiaires dont le rôle est de permettre le dépôt de la couche active résistante à la pression [11,12]

#### **I.2.2.2.c. Les membranes composites**

Les premières membranes composites sont apparues il y a une vingtaine d'années. Elles sont caractérisées par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de

polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association d'alumine comme support et d'oxyde métalliques tels que la zirconne, le dioxyde de titane)[13].

Elles ont de nombreux avantages : très sélectives, très perméables et peuvent être soumises plus facilement à des procédés de nettoyage assez agressifs sans trop en être altérées. Elles ont une excellente résistance chimique, mécanique et surtout thermique. Leur inconvénient réside dans leur coût élevé et leur mode de préparation relativement complexe [14].

### I.2.3. Caractéristiques des matériaux membranaires

Selon le type de matériaux les caractéristiques physico-chimique et mécanique des membranes peuvent être différentes (tableau I-3)

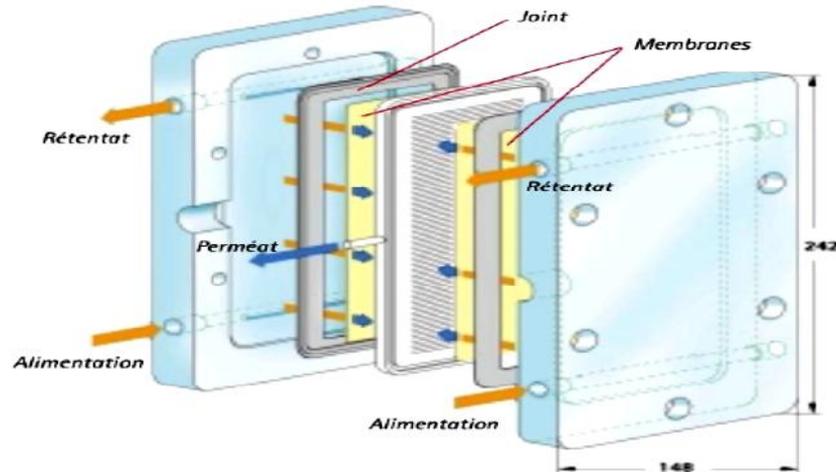
**Tableau I-3** : Caractéristiques générales des membranes [2, 20,21]

	Membranes céramiques			Membranes organiques			
	Alumine	Zirconne	Oxyde de titane	Acétate	PAN	P S	PVDF
pH	0-14	0-14	0-14	3-8.5	3-9	1-13	1-12
Température	pas de limite – stérilisable			<35°C	<35°C	80°C	
Solvant	très bonne résistance			faible résistance			
PAN : Polyacrylonitrile    PS : Polysulfone    PVDF : Fluorure de polyvinylidène							

### I.2.4. Géométrie des supports

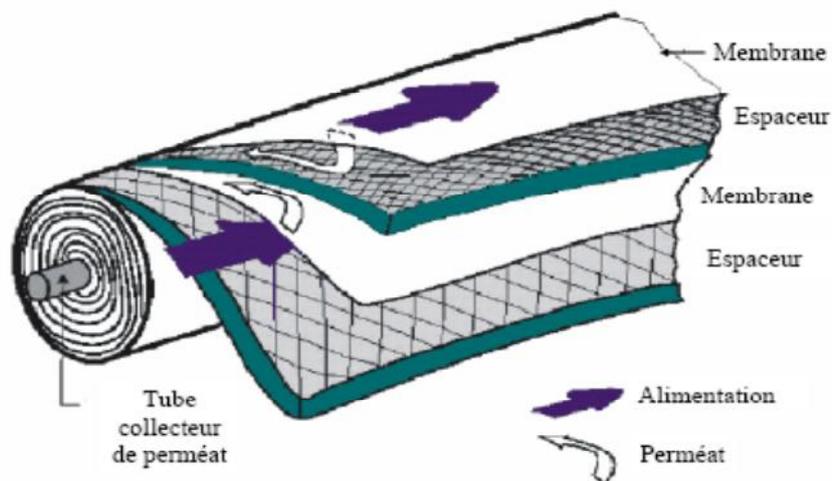
Au niveau industriel, les membranes sont montées dans différents types d'assemblages que l'on appelle modules. Suivant la mise en forme, on distingue alors quatre catégories de modules [12] :

**I.2.4.1- les modules plans** : Il s'agit d'un empilement de plaques séparatrices et de plaques porte-membranes. Ce type de module présente un faible volume mort et une bonne accessibilité des membranes, leur principal inconvénient est le colmatage (figure I.4) et nécessitent généralement un pré filtration [13]



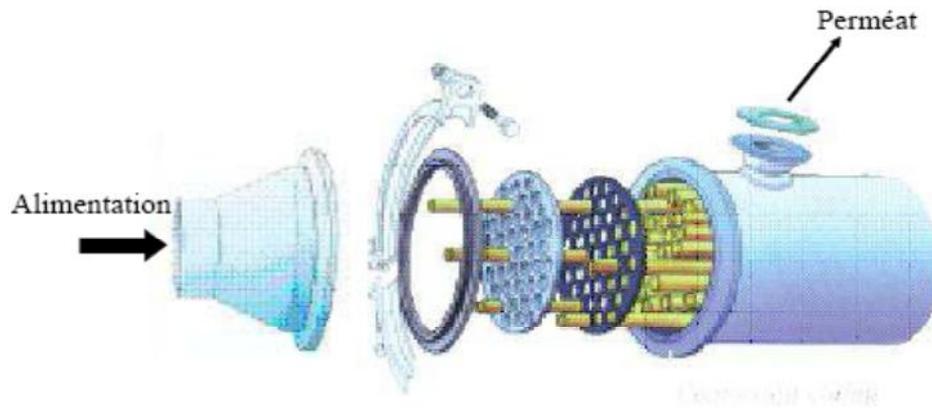
**Figure I-4** : Exemple d'un module plan

**I.2.4.2- les modules spirales** : Ils sont formés à partir de deux membranes planes, déformables de nature organique, enroulées autour d'un tube qui recueille le filtrat. Les espaceurs permettent l'écoulement du fluide et servent aussi de promoteur de turbulence. Les modules spirales les plus couramment employés ont un diamètre de 0,2 m, une longueur de 1 m et contiennent environ 40 m<sup>2</sup> de membrane filtrant (figure I-5) [13].



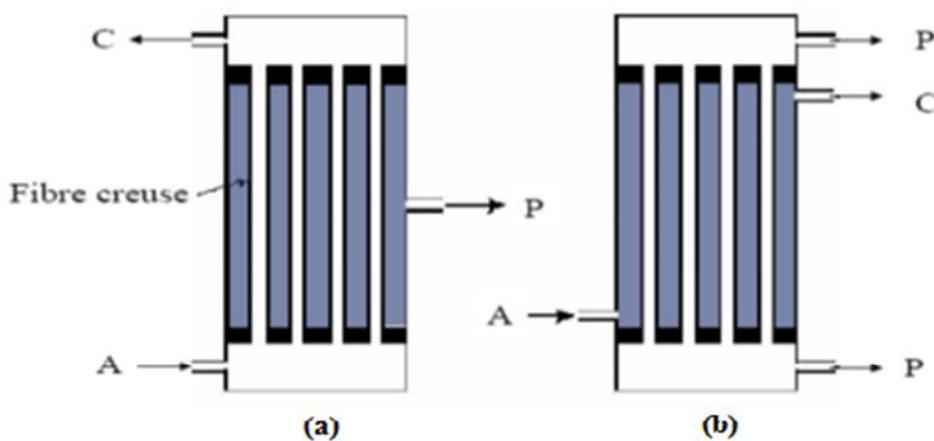
**Figure I-5** : Module spirale

**I.2.4.3- les modules tubulaires :** Constitués de faisceaux de tubes mono ou multicanaux de différents diamètres (quelques mm à quelques cm). 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 (figure I-6) [14].



**Figure I-6 :** module tubulaire pour les membranes Carbosep.

**I.2.4.4 - les modules à fibres creuses :** Les fibres sont disposées en faisceaux de plusieurs centaines d'unités. Le fluide à filtrer s'écoule à l'intérieur du canal de la fibre (figure I-7a) ou l'extérieur (figure I-7b). Ce type de module est compact et généralement moins coûteux [13,14].



**Figure I-7 :** Modules à fibres creuses [14].

A : alimentation ;

C : concentrât ;

P : perméat.

### I.3. Les paramètres déterminant des performances d'un procédé à membrane

#### I.3.1. Seuil de coupure

En pratique, les membranes sont souvent exprimées par leur seuil de coupure (MWCO : Molecular weight Cut off), c'est la masse molaire du plus petit composé modèle retenu à 90% par la membrane. Il s'exprime en Daltons (1Da = 1 g/mol). Plus le seuil de coupure est faible, plus la membrane peut retenir des petites molécules ou des substances colloïdales (figure I-8) [7,8].

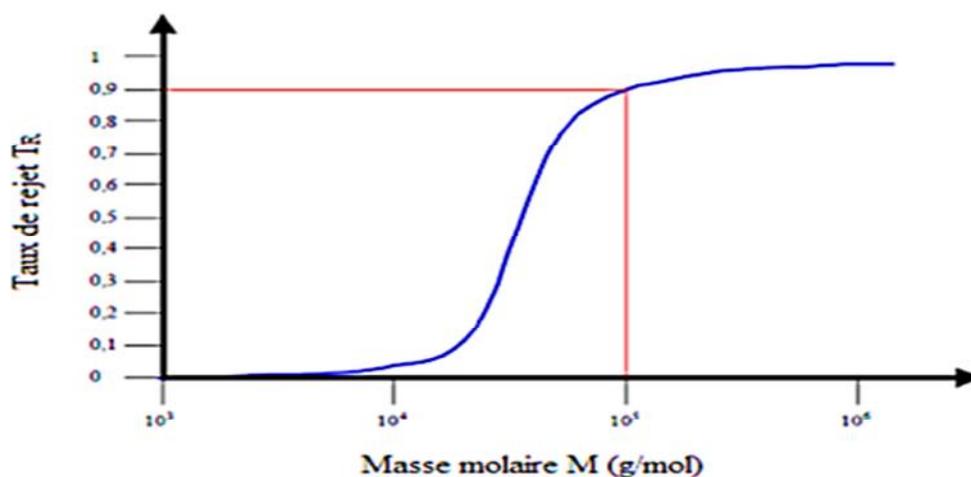


Figure I-8 : principe de détermination du seuil de coupure d'une membrane

#### I.3.2. Sélectivité

La sélectivité d'une membrane pour une substance donnée dépend de sa nature et de sa structure, de l'environnement chimique à proximité de la membrane et des propriétés chimiques de la substance à séparer. La sélectivité s'exprime par un taux de rétention  $T_R$  défini par :

$$T_R = 1 - \frac{C_{SP}}{C_{SA}} \quad (1.1)$$

Il y a deux valeurs extrêmes du  $T_R$  (valeurs exprimées en pourcentages) :

$T_R = 0\%$  signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane;

$T_R=100\%$  signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane.

$C_{SP}$  et  $C_{SA}$  sont successivement les concentrations d'un soluté dans le perméat et dans l'alimentation [7].

### I.3.3. Perméabilité

La perméabilité ( $L_p$ ) d'une membrane est une caractéristique intrinsèque de la membrane qui dépend de sa structure. De façon pratique, la perméabilité peut être définie comme étant le rapport entre le flux de perméat ( $J_p$ ) et la différence de pression transmembranaire effective ( $\Delta P_m$ ) :

$$L_p = \frac{J_p}{\Delta P_m} \quad (1.2)$$

$L_p$  : la perméabilité

$J_p$  : le flux de perméat

$\Delta P_m$  : la pression transmembranaire effective [22].

### I.3.4. Flux

La densité de flux ( $J_p$ ) de perméat (appelée aussi de perméation) est un débit de perméation unitaire, c'est-à-dire, le rapport entre le débit volumétrique de perméation et la surface effective de la membrane :

$$J_p = \frac{Q_p}{S} \quad (1.3)$$

$Q_p$  : débit de perméat

$S$  : la surface effective de la membrane [23]

### I.3.5. La porosité

La taille des pores varie de quelques microns en microfiltration au nanomètre pour la nanofiltration. La porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme. En deçà du nanomètre, le mécanisme de transfert de solvant est plutôt de diffusion de la solution que convection ; l'eau n'est pas seulement poussée pour s'infiltrer au travers de la membrane, mais aussi elle diffuse au travers du matériau membranaire. La structure polymérique du matériau change en fonction des énergies d'activation, donc de la température. La sélectivité de ces membranes dépend de l'affinité chimique du matériau avec les différents composés qui traversent la membrane.

La porosité correspond à la fraction de vide dans le matériau membranaire et désigne l'ensemble de vide par le quelle le flux liquide traverse l'épaisseur filtrante. Le sens physique de cette propriété est donné par l'équation suivante :

$$\varepsilon_m \% = \frac{V_v}{V_s + V_v} \quad (I.4)$$

$\varepsilon_m$  : porosité du membrane

$V_v$  : volume de vide

$V_s$  : volume de solide

L'équation de la valeur de cette propriété de la membrane peut se faire soit pendant la mise au point du matériau, soit avant son usage régulier dans un procédés [24,25]

### I.3.6. Résistivité

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

$$R_m = \frac{1}{L_p} = \frac{S}{C_p} \quad (I.5)$$

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

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

$e_m$  : l'épaisseur de la couche active de la membrane

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

$r_p$  : le rayon des pores. [2, 23,26]

### I.3.7. La pression transmembranaire

Force agissante de l'opération définie par la moyenne des pressions alimentation, et retentât, à laquelle on soustrait la pression du compartiment perméat [13].

$$\Delta P = \frac{P_A + P_R}{2} - P_P \quad (I.7)$$

$P_A$  : pressions d'alimentation

$P_R$  : pressions de retentât

$P_P$  : pression de perméat

### I.3.8. Le taux de rétention

Permet de rendre compte de la sélectivité de la membrane. La microfiltration et l'ultrafiltration sont des membranes semi-perméables permettant la rétention des composés de taille inférieure à son seuil de coupure. Le taux de rétention ( $T_R$ ) est défini par l'équation suivante

$$T_R = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (I.8)$$

$C_p$  : Concentration du composé dans le perméat

$C_a$  : Concentration du composé dans l'alimentation

Lorsque la membrane est propre, en l'absence de colmatage, la membrane a sa propre résistance à l'écoulement ( $R_m$ ). La perméabilité à l'eau pure ( $L_{p0}$ ) correspond au rapport entre le flux de perméat ( $J_p$ ) et la pression transmembranaire ( $\Delta P$ ) [25].

$$L_{p0} = \frac{J_p}{\Delta P} = \frac{1}{\mu R_m} \quad (I.9)$$

### I.3.9. Taux de conversion :

Dans le cas des techniques à membrane, l'écoulement du fluide à filtrer peut être continu et tangentiel.

La fraction de débit du liquide qui traverse la membrane est appelée taux de conversion de l'opération de séparation :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (I.10)$$

$Y$  : taux de conversion

$Q_p$  : débit de perméat

$Q_a$  : débit d'alimentation

Dans le cas de l'ultrafiltration, l'efficacité de la membrane est, en général, caractérisée par le seuil de coupure (cut-off en anglais).

Il s'agit de la masse molaire (g/mol) correspondant à une rétention pratiquement totale (90 % le plus souvent) d'une macromolécule déterminée.

Cette notion de seuil de coupure n'a pas de sens dans le cas de l'osmose inverse ni micro-filtration [27].

### I.3.10. Taux de passage :

Rapport entre la concentration (massique) dans le perméat et celle dans l'eau d'alimentation :

$$TP = \frac{C_p}{C_a} \quad (I.11)$$

TP : taux de passage

$C_p$  : concentration de perméat

$C_a$  : concentration d'alimentation [27]

## I.4- Colmatage de membranes et leur nettoyage

Le colmatage des membranes a pour conséquence de réduire le flux d'écoulement ou d'augmenter la pression d'opération. La détermination de la nature et de la structure des éléments qui colmatent la membrane est nécessaire pour établir le choix des agents de nettoyage et des conditions d'opération les plus efficaces.

Il est possible de classer les éléments colmatant en deux groupes:

- **Les résidus solubles dans l'eau**, qui peut être éliminés par une étape de rinçage.
- **Les résidus non solubles dans l'eau**, qui forment une couche poreuse et résistante, composée principalement de protéines et des sels, ainsi que de microorganismes, colloïdes, polysaccharides insolubilisés, etc.

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

- **Le nettoyage mécanique**, un nettoyage partiel, mais rapide. Son principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques (pression à contre-courant).
- **Le nettoyage chimique**, qui implique un arrêt de production périodique, génère des coûts en solutions de lavages et en traitement des effluents. Il se compose d'une séquence de lavages acide et basique, ainsi que de phases de rinçage.
- **Le nettoyage enzymatique**, qui constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans les cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé [28].

**Références :**

- [1] ESCODA.A, Etude de transfert de solutés neutres et charges à travers des membranes de nanofiltration et caractérisation des propriétés diélectriques des nanopores, thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France ,2011.
- [2]AKRETCHE D. Elaboration de Membranes composites à base d'argiles locales et détermination de leurs performances dans le traitement d'effluents, université houari boumediene – Alger.
- [3]MANSOUR.N, Préparation des membranes composites à base d'Argile pontée au Titane, Fer, Chrome. Pour la séparation des mélanges aromatique aliphatique, mémoire de master, université Mohamed Boudiaf-Oran, 2014
- [4] CHIKHIM, Etude de la complexations des cations métalliques en vue de leur séparation par un procédé membranaire, thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [5] <http://www.lenntech.fr/francais/microfiltration-et-ultrafiltration.htm> 18/06/2016
- [6] [http://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=48513418/06/2016](http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=48513418/06/2016)
- [7] NECHAD A, Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène basse densité et de gypse de Bouzgaïa, mémoire de magister, université Hassiba Benbouali-Chlef, 2009.
- [8] BENHADDOU H, Séparation et pré-concentration du Ni(II) et du Co(II) par la technique de membrane liquide Volumique(MLV), mémoire de master, université aboubekr belkaid-Tlemcen, 2014.
- [9] <http://thesis.univ-biskra.dz/1283/4/Chapitre1.pdf> 18/04/2016
- [10][https://www.google.dz/search?q=les+membrane&bih=653&biw=1366&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjaz4i\\_oPLMAhUCOxoKHRfwBywQ\\_AUIBigB#imgrc=ZQPwMvaIuDPaiM%3A](https://www.google.dz/search?q=les+membrane&bih=653&biw=1366&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjaz4i_oPLMAhUCOxoKHRfwBywQ_AUIBigB#imgrc=ZQPwMvaIuDPaiM%3A) 10/05/2016
- [11]KABA.L, Elaboration de membrane de nanofiltration sur un support composite carbone/zéolite, mémoire de magister, Université Houari Boumediene - Alger, 2014
- [12].ELKHABBAZE H, Traitement des solutions modèles de lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse, thèse de doctorat, Université Mohammed V- AGDAL, 2008.

- [13] BOSCH. F, synthèse et caractérisation de couches minces et de membranes photocatalytiques et mesostructurées à base de TiO<sub>2</sub> anatase, thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2004.
- [14] DJAFER.L, Etude d'un système autonome pour le traitement des eaux usées par les techniques membranaires. Membrane à effet photocatalytique à base de TiO<sub>2</sub>, thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali, Chlef, 2011.
- [15] TOUFFET.A, Etude des performances d'unités d'ultrafiltration : Impact de la qualité de la ressource, des prétraitements et des lavages chimiques, thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2014.
- [16] Marcel Mulder, basic principle of membrane technology, second edition, Kluwer academic publisher, center for membrane science and technology, 1997, p 56, 57.
- [17] NDEYE WEMSY. D, Le nettoyage : une étape clef pour une production durable par procédé à membrane. Réflexion sur le lien entre conditions de production et nettoiyabilité de membranes PES de l'industrie laitière !, thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2013.
- [18] LESLIE DOS .S, Mécanisme de conduction protonique au sein de membrane hybrides pour piles à combustible, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-France, 2014
- [19] [https://www.google.dz/search?q=membrane+sym%C3%A9trique+et+asym%C3%A9trique&biw=1366&bih=653&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiKnIONivjMAhVHvBoKHT2vC9kQ\\_AUIBigB#imgrc=BQTxui5V2gQB7M%3A](https://www.google.dz/search?q=membrane+sym%C3%A9trique+et+asym%C3%A9trique&biw=1366&bih=653&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiKnIONivjMAhVHvBoKHT2vC9kQ_AUIBigB#imgrc=BQTxui5V2gQB7M%3A) 25/05/2016
- [20] BACCHIN.P, Principes de base des Technologies à Membranes », Université Paul Sabatier -TOULOUSE, 2005.
- [21] [http://www.usthb.dz/VRPGRSHU/IMG/zip/chimie/bilan\\_pnr.docx](http://www.usthb.dz/VRPGRSHU/IMG/zip/chimie/bilan_pnr.docx) 21/05/2016
- [22] HARRLEKAS.F, couplage des procédés Membranaire aux techniques physico-chimiques ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie de textile, thèse de doctorat, université cadi ayyad- Marrakech et l'institut national Polytechnique de lorraine, 2008.
- [23] TADDEI.C, AIMAR.P, DAUFIN.G, SANCHEZ.V, Etude du transfert de matière lors de l'ultrafiltration de lactosérum doux sur membrane minérale, 1986.
- [24] DELLALI.M, Elaboration et mise en œuvre des membranes polymères (PS, PMMA), charbon actif et leur application dans le traitement de plomb et l'aluminium, université Hassiba Benbouali-Chlef, 2011

[25] OHERERRE.FZ, synthèse et caractérisation du poly acétate de cellulose. Essai film mince, mémoire de master, Université Hassiba Ben Bouali chlef, 2013

[26] [http://www.usthb.dz/VRPGRSHU/IMG/zip/chimie/bilan\\_pnr.docx](http://www.usthb.dz/VRPGRSHU/IMG/zip/chimie/bilan_pnr.docx) 21/05/2016

[27] METAICHE.M, Technologie membranaire, Université de Bouira, 2014.

[28] AGGAB.C, Caractéristiques physico- Chimiques des eaux de la station de dessalement de Souk Tleta (NW, ALGRIE), Mémoire d'ingénieur d'état, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 2014.

## II.1- Introduction

Actuellement, il y a quatre principaux procédés membranaires qui sont utilisés pour produire de l'eau potable :

- ✓ Microfiltration (MF)
- ✓ Ultrafiltration (UF)
- ✓ Nano filtration (NF)
- ✓ Osmose Inverse (OI) [1].

Ces procédés sont tous des procédés où la force motrice de transport à travers la membrane est un gradient de pression. Les membranes de MF, de UF, de NF et d'OI diffèrent par leur structure poreuse et donc par la taille des particules et des molécules qui peuvent être retenues (figure II.1). [2]

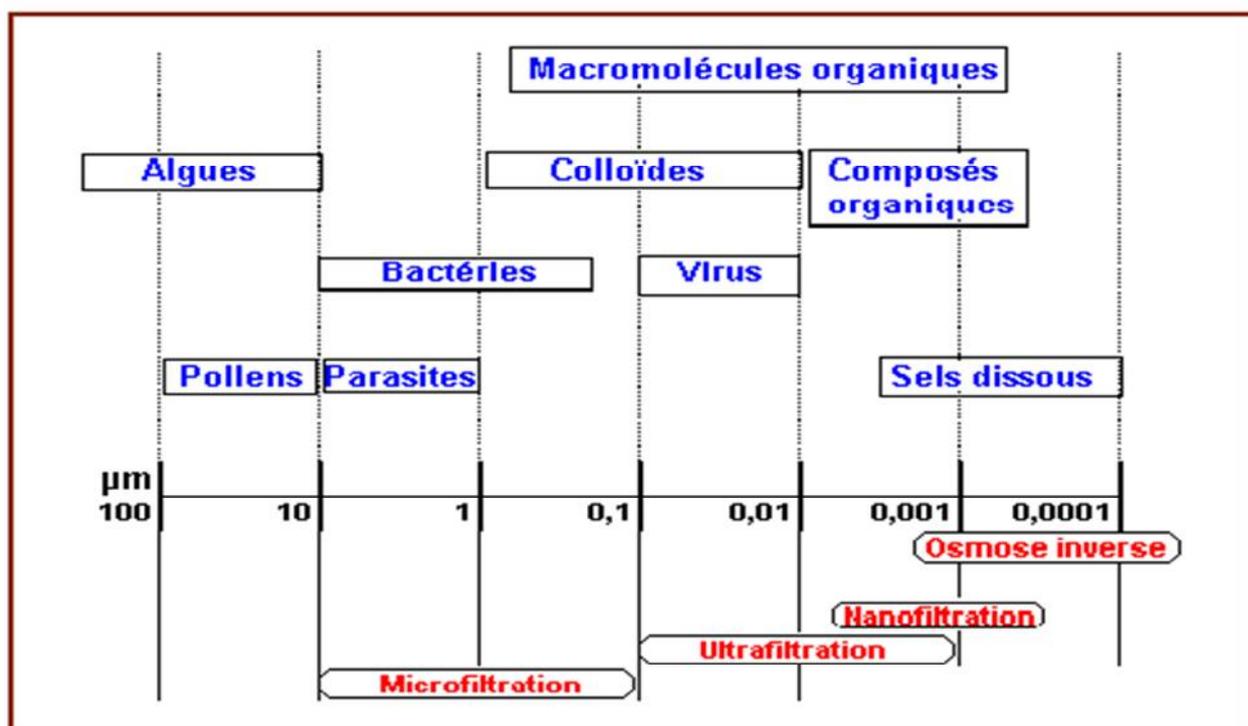


Figure II-1 : Les opérations de filtration membranaire selon la taille des pores et des espèces retenues [3]

## II.2. Les procédés baromembranaires :

### II.2.1. Microfiltration

La Microfiltration est le plus ancien de tous les procédés membranaires, étant utilisé et commercialisé pour la première fois par Sartorius Werke GmbH en Allemagne en 1929. L'utilisation d'un tel procédé a été nécessaire pour assurer une eau potable sûre du point de vue bactériologique dans les villes allemandes bombardées durant la Deuxième guerre mondiale.

Les membranes de MF utilisées dans le domaine de l'eau potable sont capables de retenir des particules plus grandes que  $0,1\mu\text{m}$ . Ces membranes permettent donc de retenir en bonne partie des particules à l'origine de la turbidité.

L'utilisation principale de la MF reste la clarification c'est-à-dire l'enlèvement des particules en suspension. La pression d'opération en MF est relativement basse ( $< 350\text{ kPa}$ ) et les flux de perméation sont élevés ( $10^{-2}$  à  $10^{-4}\text{ m/s}$ ). La MF peut aussi servir de prétraitement pour la NF et l'OI [2,4].

### II.2.2. Ultrafiltration

L'ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes). Pour cette raison, cette technique est utilisée pour l'élimination de macro solutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel (électronique) ou médical (figureII-2) [5, 6, 7,8].

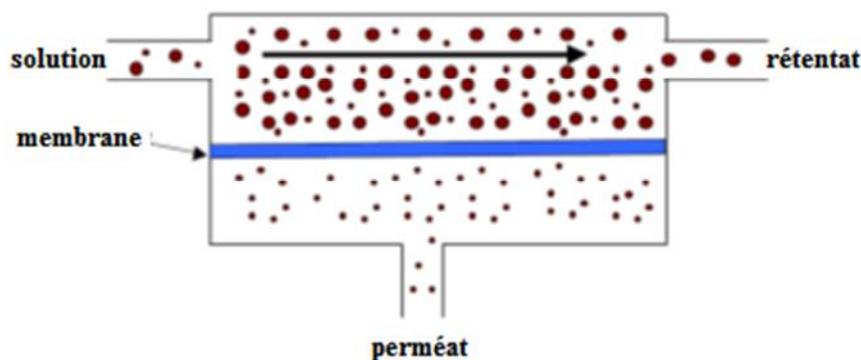


Figure II-2: Principe de l'ultrafiltration

### II.2.3. Nanofiltration

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom. 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 [9].

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. Il est à noter que dans le cas des macromolécules, l'unité de masse molaire que l'on utilise est le dalton : 1 Da = 1 g/mol.

Les mécanismes de transfert sont intermédiaires entre ceux de l'osmose inverse et ceux de l'ultrafiltration. Cette technique est souvent utilisée pour l'adoucissement des eaux [10].

### II.2.4. Osmose inverse

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels [11].

Cette technique est utilisée pour :

- ❖ Le dessalement des eaux de mer ;
- ❖ Le dessalement des eaux saumâtres ;
- ❖ La production d'eau ultra pure ;
- ❖ La production d'eau de process...

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. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires.

La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique [12].

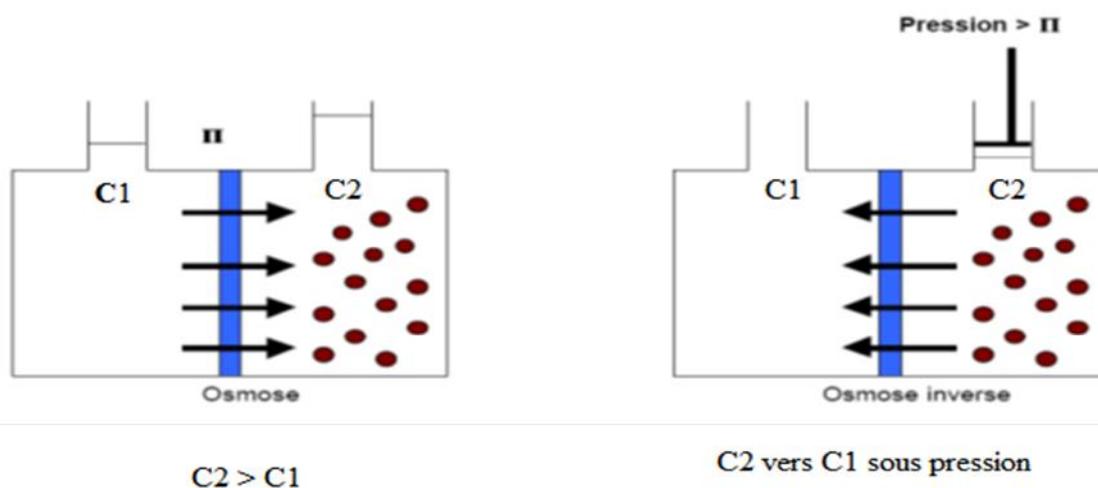


Figure II-3 : Principe de l'osmose inverse

La pression osmotique  $\Pi$  est d'autant plus importante que la concentration est élevée et que la masse molaire est faible [12].

### II.3. Caractéristiques des différents procédés membranaires à gradient de pression.

D'une manière très générale, des différences arbitraires entre ces opérations de séparations membranaires sont faites sur la base des tailles des espèces qu'elles sont censées séparer.

Les principales caractéristiques des différents procédés membranaires à gradient de pression sont regroupées au (tableau II-1).

Tableau II- 1: Caractéristiques des procédés de séparation [2]

Procédé	Origine de la sélectivité	Force motrice (bar)	Diamètre des pores ( $\mu\text{m}$ )	Seuil de coupure (kDa)	Consommation énergétique ( $\text{kWh/m}^3$ )	Procédés concurrents
<b>Microfiltration MF</b>	Différence de taille entre particules ou molécules à séparer	Pression 0,1 à 3	0,1 à 10	-	1 -10	Filtration Centrifugation
<b>Ultrafiltration UF</b>	Différence de taille et de charge entre particules ou molécules à séparer	Pression 3 à 10	0,01 à 0,1	1 -300	1 -10	Evaporation Distillation Echange d'ions
<b>Nanofiltration NF</b>	Différence de taille et de charge entre particules ou molécules à séparer	Pression 30 à 50	$10^{-3}$	0,2 - 1	5 – 50	Evaporation OI Echange d'ions
<b>Osiose Inverse OI</b>	Différence de solubilité et de diffusion à travers la membrane des molécules à séparer	Pression 30 à 100	Membrane dense	< 0,2	10-200	Evaporation Distillation Echange d'ions

## II.4.Principe de mise en œuvre des membranes :

Selon le sens de l'écoulement du fluide à traiter lors d'une opération de microfiltration sur membrane, on peut distinguer (Figure II.4):

**II.4.1.La filtration frontale :** le fluide circule perpendiculairement à la membrane sous l'effet d'un gradient de pression. Les solutés rejetés s'accumulent au fur et à mesure de l'avancement de la filtration sur la membrane et le débit du filtrat diminue de façon très importante au cours du temps. [13,14]

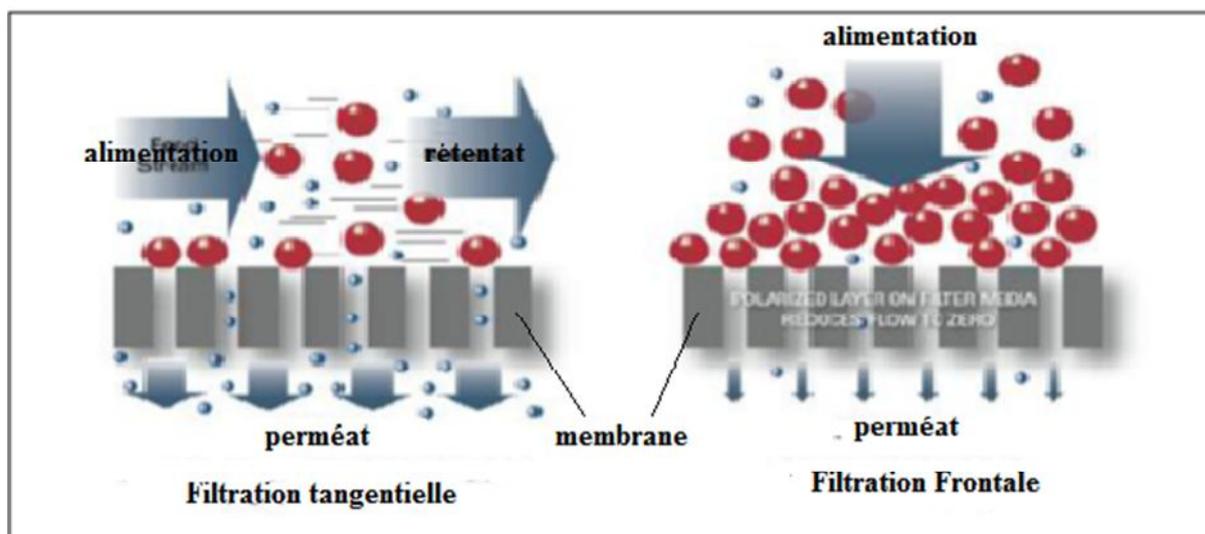


Figure II.4 : Schéma de principe de la filtration tangentielle et frontale

**II.4.2.La filtration tangentielle :** le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane et se partage en deux débits : un traversant la membrane et appelé perméat, et un deuxième ne la traversant pas nommé rétenu. On définit alors un taux de conversion (Y) traduisant la fraction de liquide passant à travers la membrane par rapport au débit initial.[15]

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (II - 1)$$

Y : taux de conversion

Q<sub>a</sub> : débit d'alimentation exprimé en L. h<sup>-1</sup>

Q<sub>p</sub> : débit de perméat exprimé en L. h<sup>-1</sup>.

Ce mode de fonctionnement permet de réduire l'accumulation de la matière à la surface de la membrane mais entraîne une consommation énergétique plus importante qu'en filtration frontale car il nécessite une pompe pour assurer la circulation à haute vitesse du fluide à la surface de la membrane (vitesse entre 1 et 5  $\text{m s}^{-1}$ ) [16, 17,18].

**Référence :**

- [1] DJAFER.L, Etude d'un système autonome pour le traitement des eaux usées par les techniques membranaires. Membrane à effet photocatalytique à base de TiO<sub>2</sub>, thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali, Chlef, 2011.
- [2] NECHAD A, Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène basse densité et de gypse de Bouzgaïa, mémoire de magister, université hassiba benbouali-chlef,2009
- [3]<http://pravarini.free.fr/TraitEPmembrane.htm> 15/05/2016
- [4] <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/22074/ch02.html> 10, 05,2016
- [5] BERLAND.J et JUERY.C, les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, Office international de l'eau SNIDE, 2002.
- [6]CHIKHI.M, Etude de la complexations des cations métalliques en vue de leur séparation par un procédé membranaire, thèse de doctorat, Université Mentouri- Constantine, 2008.
- [7]Service Communication Annemasse Agglo 2007-2010 - Sources SOGEA/Membratec - Mairie de Paris -U picardie -Fotolia - imprimé sur papier recyclé - Impression : Repro Léman
- [8]WENTEN.G, Ultrafiltration in water treatment and its evaluation as pretreatment for reverse osmosis system.
- [9] techniques de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J 2790,
- [10] techniques de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J 2796
- [11] METAICHE.M, Technologie membranaire, Université de Bouira, 2014.
- [12] MAHDI.M, Optimisation des systèmes de dessalement par osmose inverse : conception, paramètres de fonctionnement et simulation numérique, thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006
- [13].ELKHABBAZE H, Traitement des solutions modèles de lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse, thèse de doctorat, Université Mohammed V- AGDAL, 2008.
- [14]LAINE.J-M, VIAL.D, MOULART.P, Status after 10 years of operation -overview of UF technology today, Desalination p 131, 2000.

[15] RAMDHANE .A, Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nano cristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation, thèse de doctorat, université de Grenoble- France, 2014.

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

[17]Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, 2002

[18]PERRIER-CORNET. J. M, Étude d'un pilote d'ultrafiltration (UF) tangentielle, Esiroi-Idai, 2012.

### III.1- Généralité

Suite aux différentes crises énergétiques et économiques, le développement des procédés membranaires a pris de l'essor. En particulier, il s'agit de recycler, transformer ou récupérer la majeure partie de ce qui est considéré comme sous-produit de l'industrie. A ce titre, de nombreux travaux sont consacrés aux procédés de séparation par membrane et plus particulièrement à l'ultrafiltration [1,2].

### III.2- L'ultrafiltration

L'ultrafiltration est devenue une technique très en vogue ces dernières années du fait de la mise au point de membranes performantes et résistantes du point de vue chimique, thermique et mécanique [3].

L'ultrafiltration permet un transfert de matière, à travers une membrane microporeuse, sous l'effet d'un gradient de pression. Elle se différencie de la filtration et de la microfiltration par la taille des particules retenues de 0,001 à 0,1  $\mu\text{m}$  (de 1 à 100nm). [4]

Son principe est de séparer un fluide contenant des macromolécules en deux effluents [1,2] (figure III.1):

- Un effluent enrichi en macromolécules : le retentat,
- Un effluent appauvri en celles-ci : le perméat.

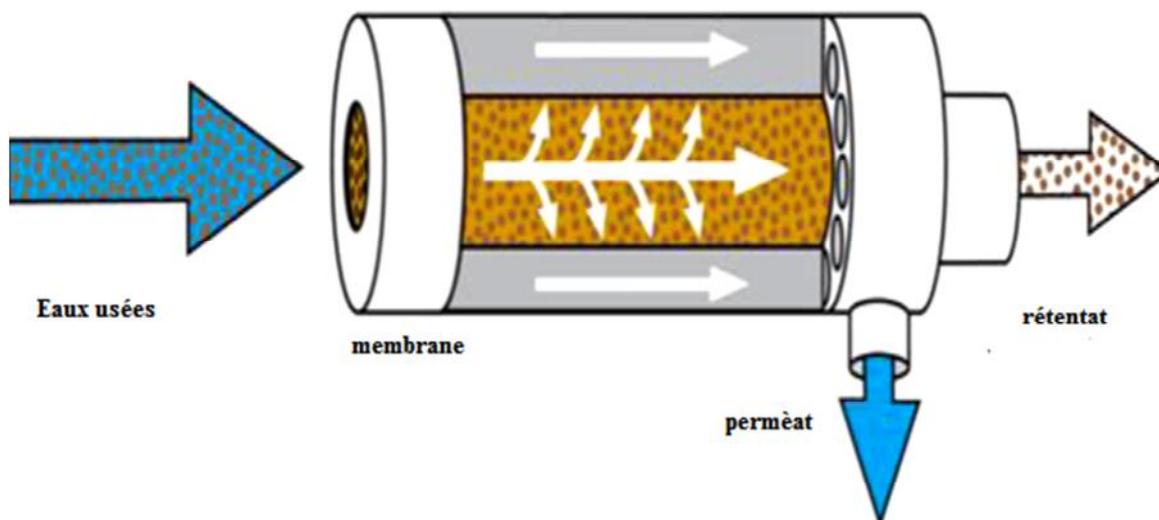


Figure III.1 : principe de fonctionnement de la séparation membranaire [2]

### III.3- Domaine d'application

Les membranes d'ultrafiltration sont des parois semi-perméables destinées à effectuer une séparation moléculaire par filtration en phase liquide; succinctement, elle doit laisser passer les petites molécules du solvant et de solutés (eau, sels minéraux, glucose) et arrêter les grosses particules en solution ou en suspension (protéines, macromolécules, colloïdes, émulsion, etc..). La taille des molécules arrêtées par une membrane d'ultrafiltration peut varier entre 10 et 1000 Å; en deçà ou au-delà de ces limites, on entre soit dans le domaine de l'osmose inverse, soit dans celui de la microfiltration. Le modèle le plus généralement utilisé pour expliquer les mécanismes membranaires en ultrafiltration est le modèle de la paroi poreuse ou, plus exactement, microporeuse. [4]

L'ultrafiltration industrielle permet d'atteindre trois objectifs:

- la concentration de solutions macromoléculaires, (protéine, polymères..) où le retentât est l'objectif principal.
- la rétention de macro solutés nocifs (virus, bactéries, colloïdes...) présents dans les effluents industriels. Le filtrat est dans ce cas l'objectif principal.
- le fractionnement d'un mélange par élimination des solutés de faible taille. Le filtrat et le retentât, sont dans ce cas tous les deux valorisables. [4]

Exemples de domaines où l'ultrafiltration est appliquée:

- L'industrie laitière (lait, fromage) ;
- L'industrie alimentaire (protéines) ;
- L'industrie du métal (séparation d'émulsion huile/eau, traitement peinture) ;
- L'industrie du textile ;
- L'ultrafiltration peut aussi être appliquée comme prétraitement de l'eau avant une nano-filtration ou une étape d'osmose inverse. [1,3]

**Références**

[1] <http://www.lenntech.fr/francais/microfiltration-et-ultrafiltration.htm> 19/04/2016

[2] L'ultrafiltration, TP 3eme année chimie CAP, 2015

[3] RICHARD.W Baker, Membrane Technology and applications 2<sup>nd</sup> edition, 2000 p 237,238

[4] SIDY MAMBAYE.L, Rétention des ions métalliques par complexations ultrafiltration : Application au cadmium, thèse de doctorat, université cheikh anta diop de dakar, 1994

### IV.1-Définition du dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'une eau saumâtre ou salée par l'élimination des sels entrant dans sa constitution [1].

### IV.2- Qualité de l'eau de mer

L'eau de mer est la matière première de l'usine de dessalement.

Chacun peut observer ses changements de température, de limpidité d'un lieu ou d'un jour à l'autre, les écarts de salinité sont moins connus.

Salinité, température et matières en suspension sont les paramètres majeurs du fonctionnement d'une unité de dessalement [1].

### IV.3- Etapes du dessalement

Une installation de dessalement peut être schématiquement subdivisée en 4 postes (Figure IV.1):

- la prise d'eau de mer;
- le prétraitement;
- l'installation de dessalement proprement dite;
- le post-traitement. [2,3]

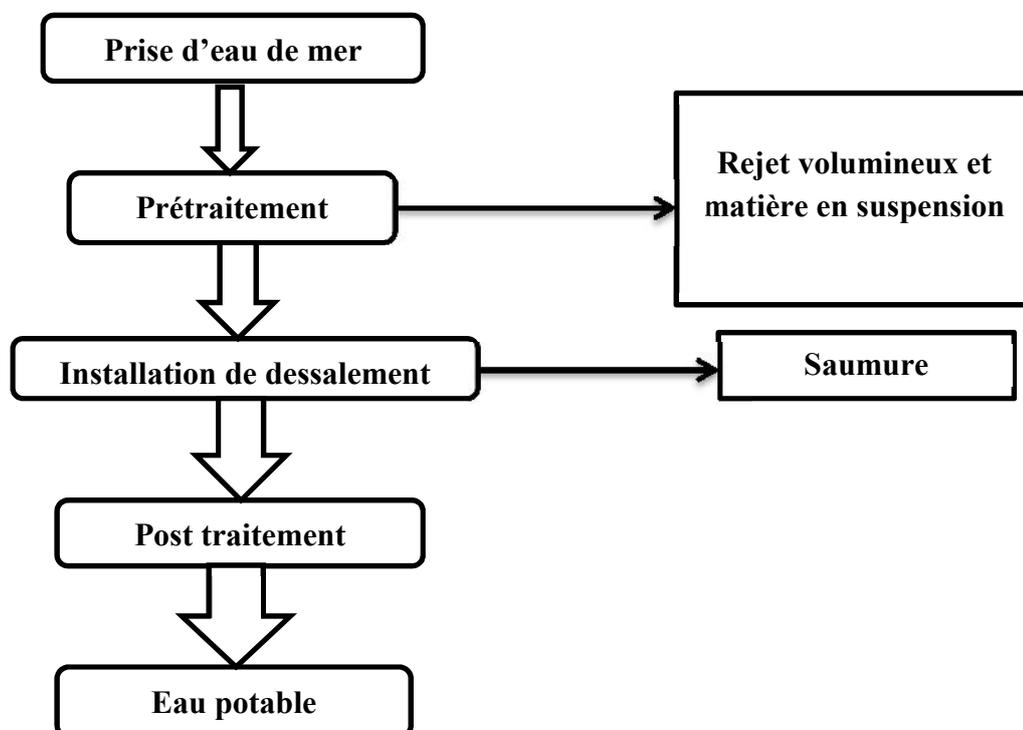


Figure IV.1 : Schéma représente les étapes principales de dessalement d'eau de mer

#### **IV.4- La prise de l'eau de mer**

La prise d'eau de mer doit permettre d'obtenir à l'entrée de l'usine de dessalement une eau de meilleure qualité possible, en particulier du point de vue matière en suspension. Deux technologies peuvent être utilisées [4]:

**IV.4.1- Les forages côtiers:** soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettent d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stable.

**IV.4.2- La prise d'eau de surface :** peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégée des pollutions et des forts courants et ne pas être sous l'infiltration de rejets [2]

#### **IV.5- Le prétraitement**

L'objectif des divers moyens mis en œuvre dans le prétraitement de l'eau de mer est de retenir les particules en suspension. Ceci est réalisable par les procédés de la sédimentation (particules solides) et de la décantation (particules liquides) et/ou par la mise en place d'un système de filtration. Cette dernière s'opère par le passage de l'eau à travers un tamis métallique ou une matière poreuse.

On distingue les types de filtration suivants :

- la filtration directe par des filtres à sable ;
- la filtration directe au moyen des filtres à anthracite ;
- la microfiltration avec des filtres à cartouches. [2]

#### **IV.6-Procédés membranaires**

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives de l'osmose inverse.

##### **IV.6.1- Osmose inverse**

Le phénomène d'osmose (Figure IV.2) est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires.

Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. Si, pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se

traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (Figure. IV.2), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse [6].

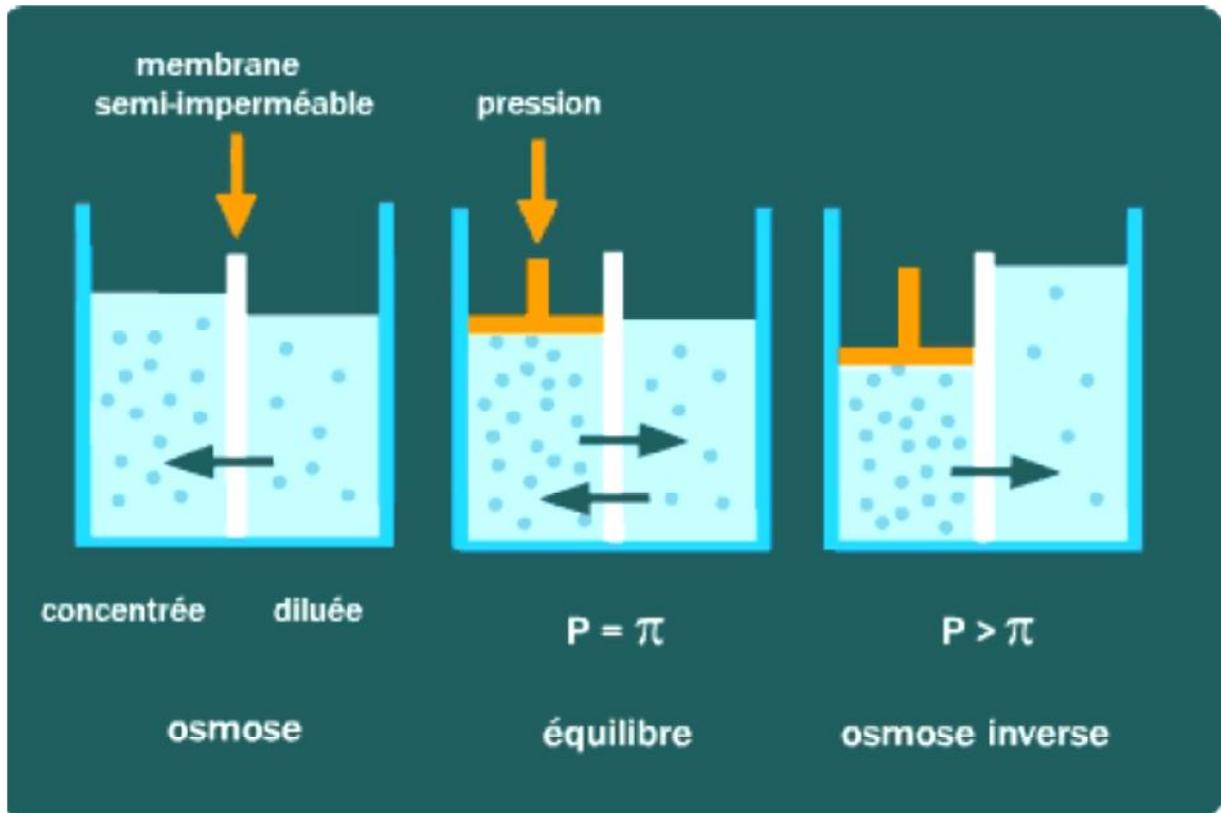


Figure IV.2. Principe de l'osmose inverse [5]

**Référence**

[1] Technique de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J 2700-15

[2]AGGAB.C, Caractéristiques physico- Chimiques des eaux de la station de dessalement de Souk Tleta (NW, ALGERIE), Mémoire d'ingénieur d'état, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 2014.

[3] Technique de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J 2700-2

[4]TAHRAOUI DOUMA, Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès, Chlef. Impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique), 2010

[5] DUNGLAS.J, Le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau, l'Académie d'agriculture de France, 2014.

[6] METAICHE.M, Technologie membranaire, Université de Bouira, 2014.

**V.1. Introduction**

L'industrie agroalimentaire produit comme boissons rafraîchissantes, diverses boissons froides essentiellement gazeuses et aromatisées.

Que ce soit selon le code alimentaire allemand, il s'agit de boissons à base d'eau avec exhausteurs de goût. En outre, les boissons peuvent contenir de l'acide carbonique, des minéraux, des vitamines, du sucre, du concentré de fruits, des arômes, des édulcorants et autres ingrédients [1].

**V.2. Définition**

Jus de fruits C'est le jus obtenu à partir de fruits par des procédés mécaniques, fermentescible, mais non fermenté, possédant la couleur, l'arôme et le goût caractéristique des jus de fruits dont il provient.

Jus de fruits concentré C'est le produit obtenu à partir du jus des fruits, par élimination physique d'une partie déterminée de l'eau de constitution. Lorsque le produit est destiné à la consommation directe, la concentration est d'au moins 50% [2].

**V.3. La fabrication de jus de fruit**

La production étant saisonnière, l'élaboration des jus de fruits demande un matériel imposant.

Elle est pratiquée au niveau industriel peut être schématisée dans les grandes étapes successives de la production.



**Figure V.1:** Les grandes étapes de production de jus de fruits

Au niveau industriel, la majorité de ces étapes est automatisée. Le jus extrait est alors traité avant ou après conditionnement, de façon à en assurer la stabilité microbiologique et colloïdale.

Le coût de transport et de stockage des jus de fruits est élevé, il est souvent plus économique pour les industriels de concentrer les jus puis de les ré diluer dans la région de distribution [3].

Les grandes étapes de la fabrication sont les suivantes:

- extraction du jus de fruits en l'absence d'air pour ne pas détruire les vitamines;
- tamisage;
- la concentration par l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans les fruits;
- pasteurisation (montée rapide de la température à 120-150°C, puis descente à 70°C pour l'embouteillage avant le refroidissement final).

#### **V.4. Qualités nutritionnelles**

Tous les jus de fruits possèdent les composants suivants dont les proportions varient selon les fruits:

- de l'eau végétale : environ 75 à 90 % selon les fruits;
- des glucides ;
- des acides organiques ;
- des sels minéraux ;
- des vitamines [2].

**Référence**

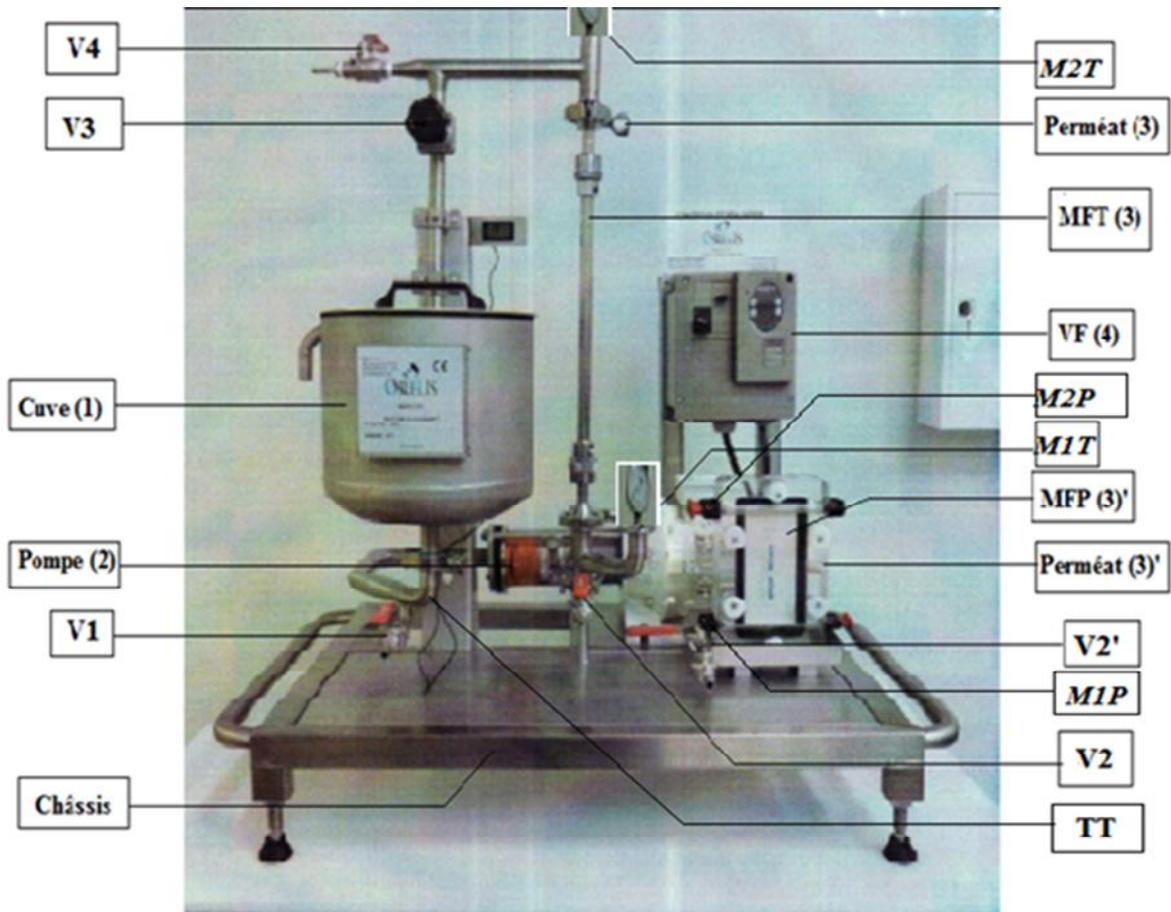
[1] [www.jumo.net](http://www.jumo.net)

[2] Michel CAILHOL & Bernard GROSSELIN, fabrication de jus de fruit

[3] Aurélie Cendres. Procédé novateur d'extraction de jus de fruits par micro-onde : viabilité de fabrication et qualité nutritionnelle des jus. Alimentation et Nutrition. Université d'Avignon, 2010.

*Partie  
expérimentale*

I.1- Description du pilote d'ultrafiltration



Photos I.1 : pilote d'Ultrafiltration

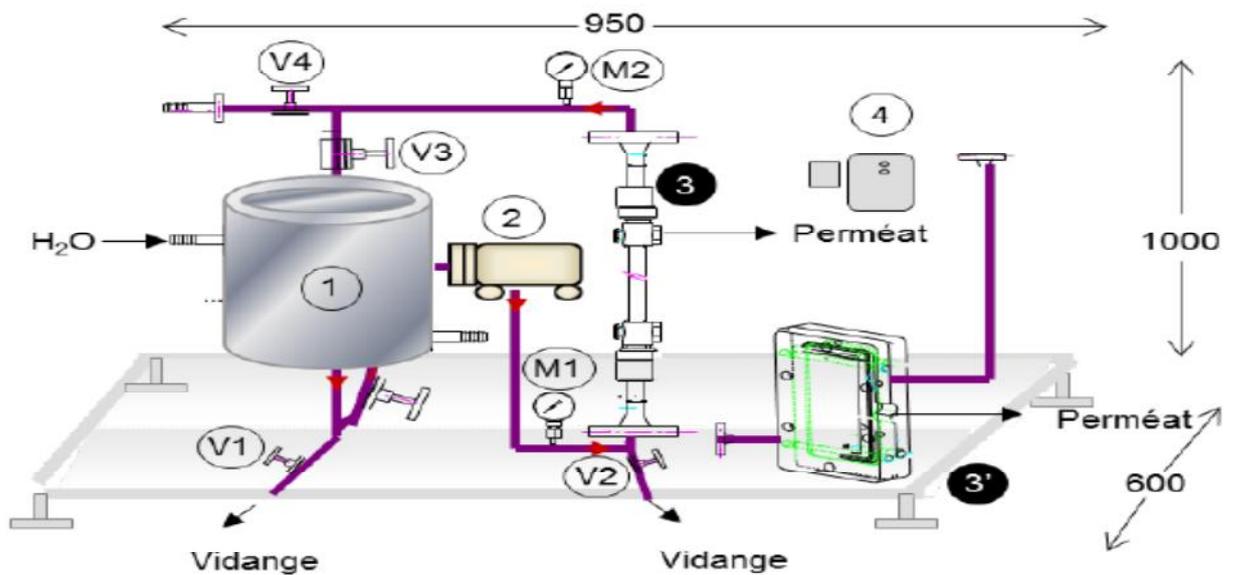


Figure I.1 : schéma du pilote d'ultrafiltration

### **I.1.1- Nomenclature**

**V1** : vannes de vidange de la cuve d'alimentation (1),

**V2** : vannes de vidange de module de filtration tubulaire,

**V2'**: vannes de vidange de module de filtration plan,

**V3** : vanne de retour à la cuve d'alimentation,

**V4** : vanne de prise d'échantillon du retentât.

**M1T** : manomètres pour la mesure de pression à l'entrée de module de filtration (Tubulaire).

**M2T** : manomètres pour la mesure de pression à la sortie de module de filtration(Tubulaire).

**M1P** : manomètres pour la mesure de pression à l'entrée de module de filtration (plan).

**M2P** : manomètres pour la mesure de pression à la sortie de module de filtration (plan).

**Châssis** : Châssis en aluminium, supporté par 4 pieds réglables.

**Cuve (1)** : Cuve d'alimentation(1) d'un volume utile capacité de 10 litres, double enveloppe.

**Pompe (2)** : Pompe volumétrique à vis(2), fréquence maximale de 50 Hz et pression maximale de 4 bars.

**TT** : thermocouple de mesure.

**VF(4)** : variateur de fréquence fonctionnant entre 35 et 50 Hz.

**MFT (3)** : Module de filtration tubulaire (3).

**MFP (3)'** : Module de filtration Plan (3)'.

**Perméat (3)** : Perméat de module de filtration tubulaire.

**Perméat (3)'** : Perméat de module de filtration plan.

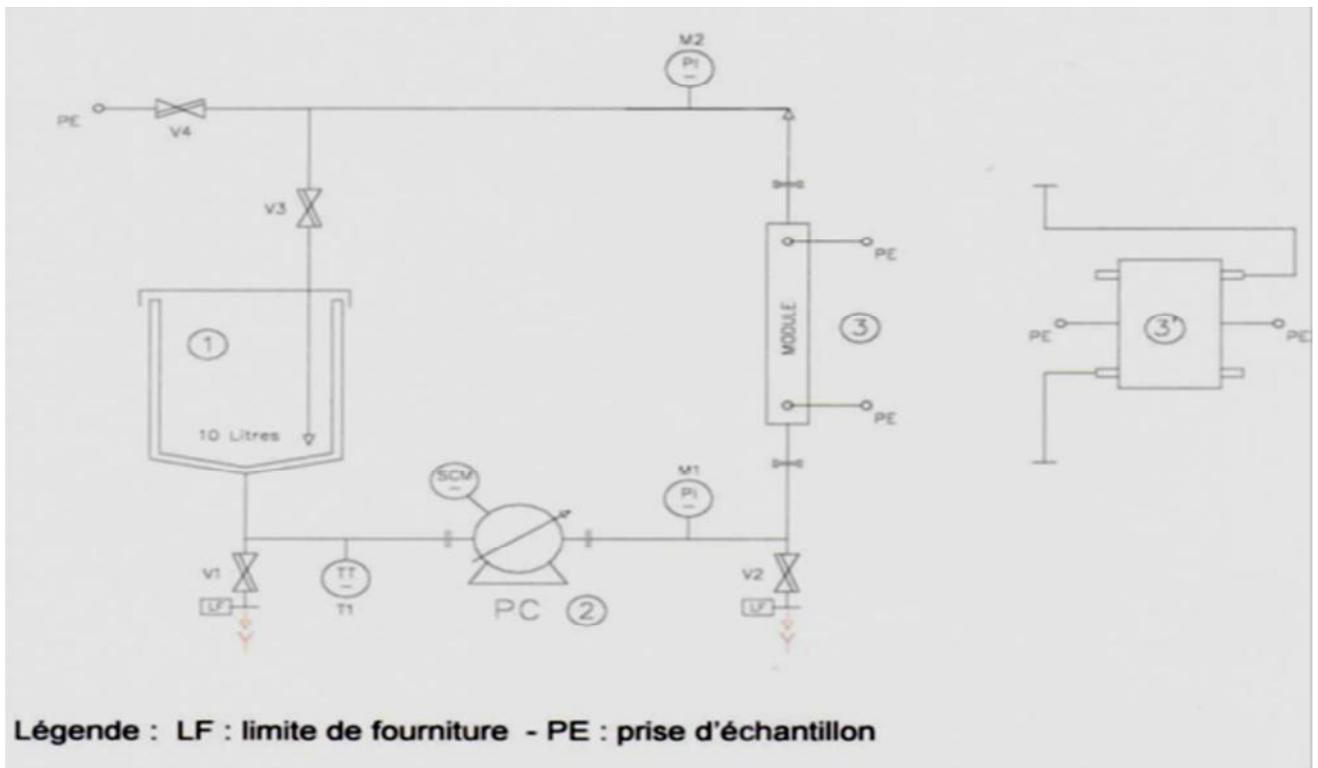
Ce pilote est muni de 4 vannes :

- V1 et V2 sont des vannes de vidange,
- V4 est une vanne de prise d'échantillon,
- V3 est la vanne de retour à la cuve d'alimentation.

M1 et M2 : manomètres pour la mesure de pression en entrée/sortie module de filtration.

7- Châssis en aluminium, supporté par 4 pieds réglables.

### I.1.2- Descriptif technique



**Figure I.2 :** descriptif technique du pilote d'ultrafiltration

- 1- Cuve d'alimentation(1) d'un volume utile capacité de 10 litres, double enveloppe.
- 2- Pompe volumétrique à vis(2), fréquence maximale de 50 Hz et pression maximale de 4 bars. Elle est précédée d'un thermocouple de mesure (TT). La pompe est entraînée par un variateur de fréquence, fonctionnant entre 35 et 50 Hz.

3- Module de filtration tubulaire (3) KLEANSEP™. Ce module développe théoriquement 80 cm<sup>2</sup> de membrane minérale. [1]

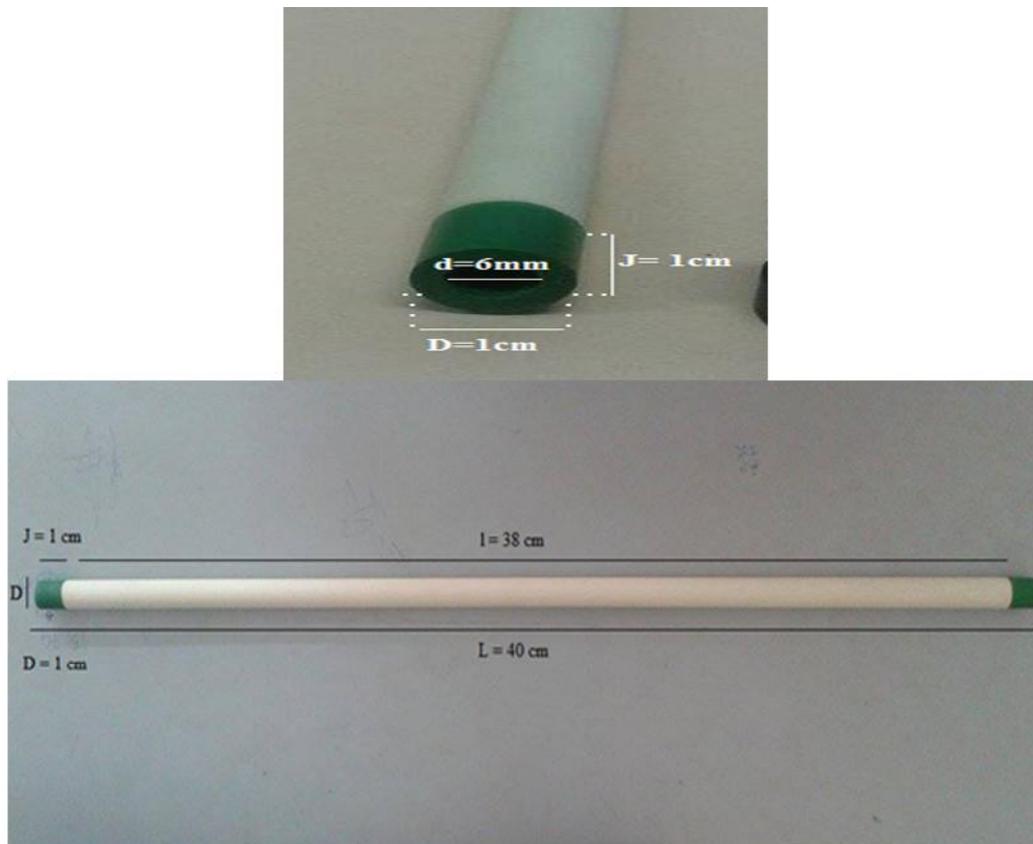


Figure I.3: dimension du module tubulaire

**J** : joint du module : 1 cm

**D** : Diamètre extérieur : 1 cm

**d<sub>int</sub>**: diamètre intérieur : 6 mm

**l** : longueur de la membrane filtrante : 38 cm

**L** : Longueur de module (membrane + 2 joints) : 40 cm

**La surface filtrante :**

$$S = \Pi * d_{int} * l$$

$$S = 3,14 * 0,6 * 38$$

$$S = 71,62 \text{ cm}^2$$

**S**: la surface : 71,62 cm<sup>2</sup>

4- Module de filtration plan RAYFLOW® (3)'. Ce module peut développer théoriquement de 100 à 200 cm<sup>2</sup> de membrane organique.

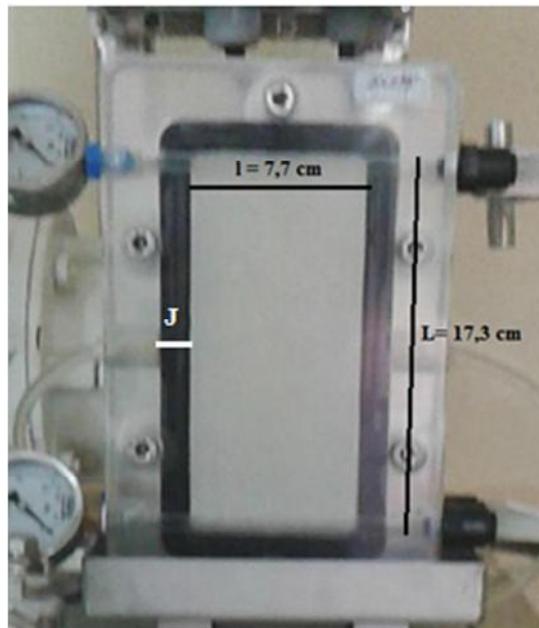


Figure I.4: dimension du module plan

**La surface filtrante :**

**L** : longueur du module : 17,3 cm

**l** : largeur du module : 7,7 cm

**J** : Joint du module : 1 cm

**Remarque** : le module plan y a une double filtration, donc la surface devient :

$$S = (L * l) * 2$$



$$S = 266.42 \text{ cm}^2$$

**S** : la surface : 266,42 cm<sup>2</sup>

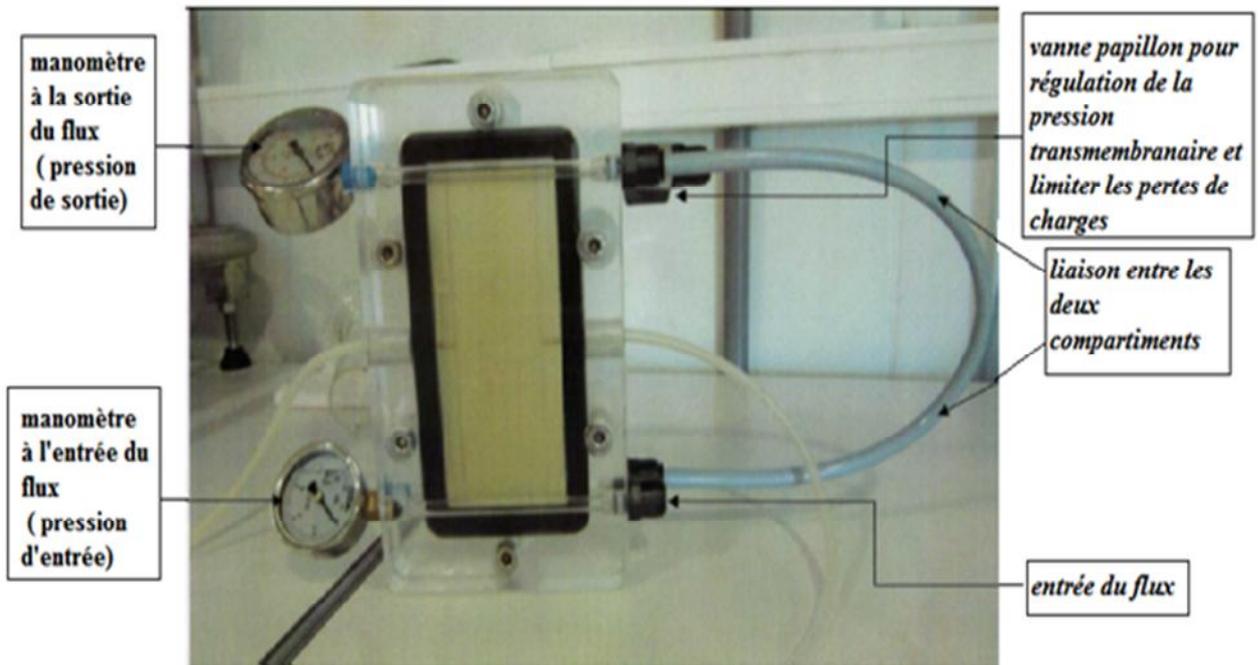


Figure I.5: module plan vue de face

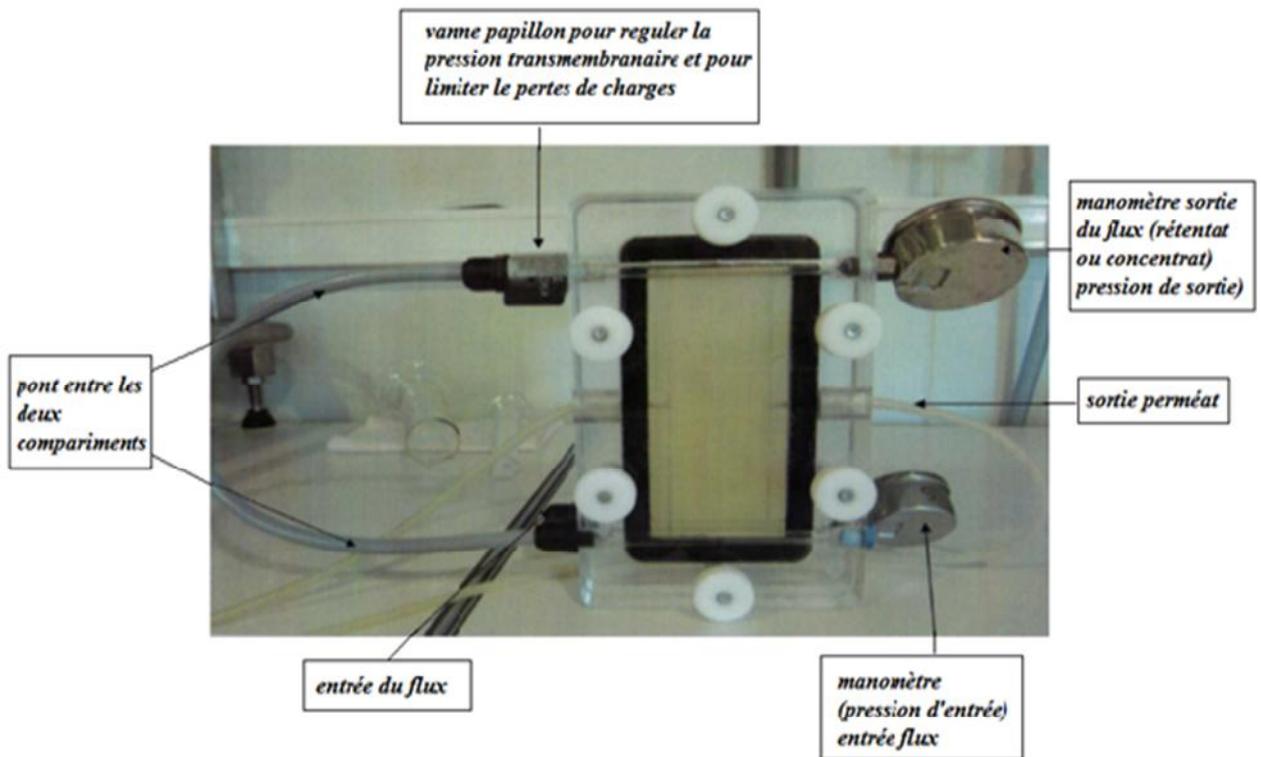


Figure I.6: module plan face arrière

## **I.2- Principe de fonctionnement du pilote**

Les tests d'efficacité des différentes membranes de filtration sur des volumes de 5 litres.

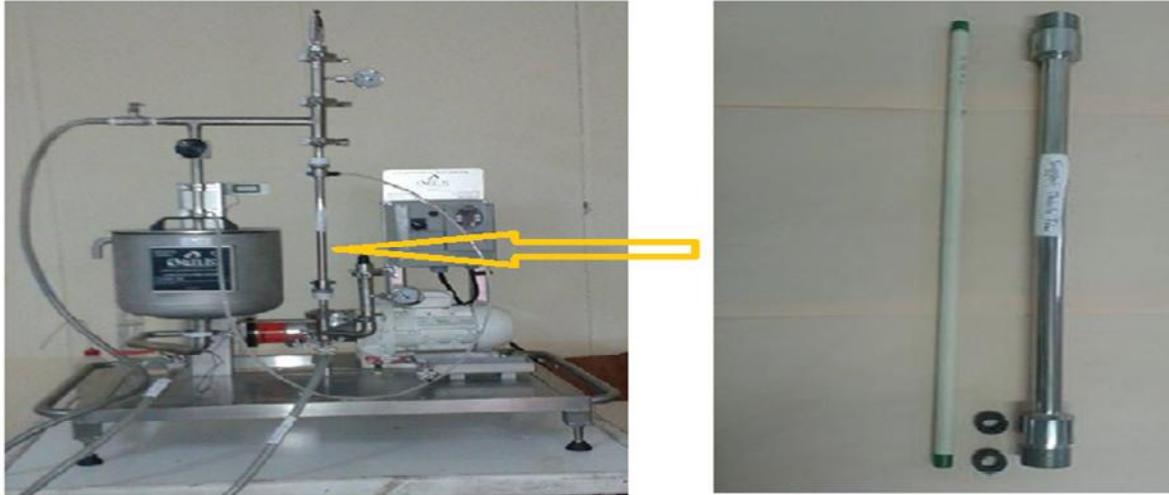
A partir de la cuve d'alimentation(1), le liquide est entraîné par la pompe (2), vers les modules de filtration. Le liquide circule dans le module (Microkleansep™ ou Rayflow®) parallèlement au milieu filtrant. Cette circulation crée, au voisinage de la membrane, une contrainte de cisaillement qui va limiter l'accumulation de molécules retenues au voisinage de la membrane.

Sous l'action d'un gradient de pression, la solution à traiter se divise au niveau de la membrane, en deux flux de composition différente. Celui qui passe à travers la membrane ou perméat, et celui qui est retenu par la membrane ou retentât/concentrât. Selon l'application, la fraction valorisée sera le perméat ou le concentrât, recueillis au point PE (prise d'échantillon).

La fermeture partielle de la vanne V3 fait monter la pression dans le circuit hydraulique, permettant ainsi de varier les paramètres de fonctionnement [2].

### I.3- Descriptive de pilote d'ultrafiltration avec le module tubulaire

La figure suivante nous montre un pilote d'ultrafiltration avec les accessoires y afférents



**Photos I.2 :** pilote d'ultrafiltration avec le module tubulaire

Le tableau (I.1) nous donne les caractéristiques de la membrane tubulaire MICROKLENSP™ d'Orelis environnement

**Tableau I.1 :** Caractéristiques de la membrane tubulaire MICROKLENSP™

Type de membrane	Membrane d'ultrafiltration
Composition de la membrane	En Zircone ( $ZrO_2$ )
Composition de support	En oxyde de titane ( $TiO_2$ ) et oxyde d'aluminium $Al_2O_3$
Seuils de coupure	50 KD
Module	Tubulaire
Type de procédé	Membrane sous pression à filtration tangentielle Interne → Externe
Longueur	40 cm
Diamètre extérieur	1 cm
Diamètre intérieur	0,6 cm
Gamme de pH	0- 14
Limite de température	150 °C
La surface	71,62cm <sup>2</sup>

### I.3.1- Tests de filtration sur l'eau pure par la membrane de 50 kD

Les résultats obtenues sur les essais de filtration de l'eau distillée (**annexe 1**) nous ont permis de fixer les paramètres suivants :

**Tableau I.2 :** variation du débit et du flux à différentes pressions transmembranaire à membrane de 50 kD pour l'eau distillé (annexe 1).

$\Delta P$ (bar)	Q (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	L <sub>p</sub> (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> .bar <sup>-1</sup> )
0,5	0,771	108,591	217,18
1,5	1,367	192,535	128,35
2,5	1,851	260,704	104,28
3,5	2,379	335,070	95,73

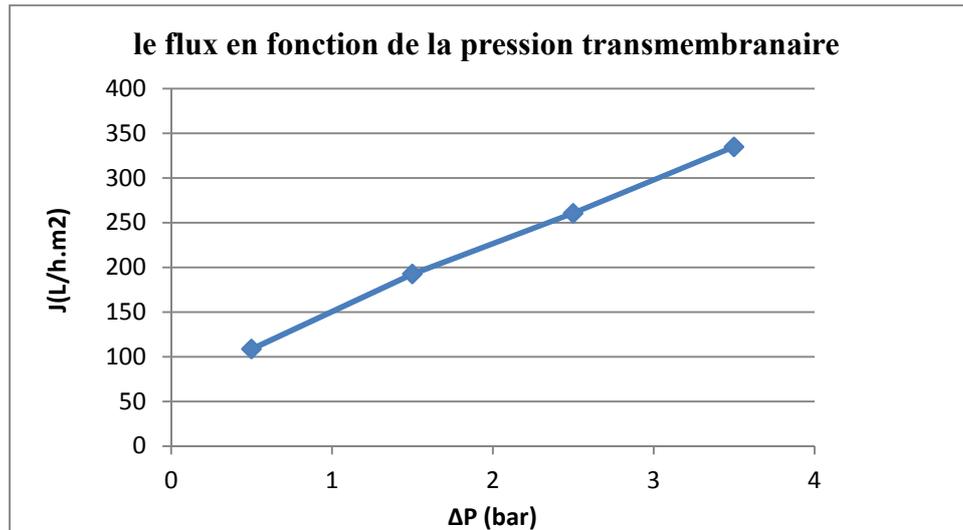
$\Delta P$  : pression transmembranaire

Q : débit de perméat

J : flux de perméat

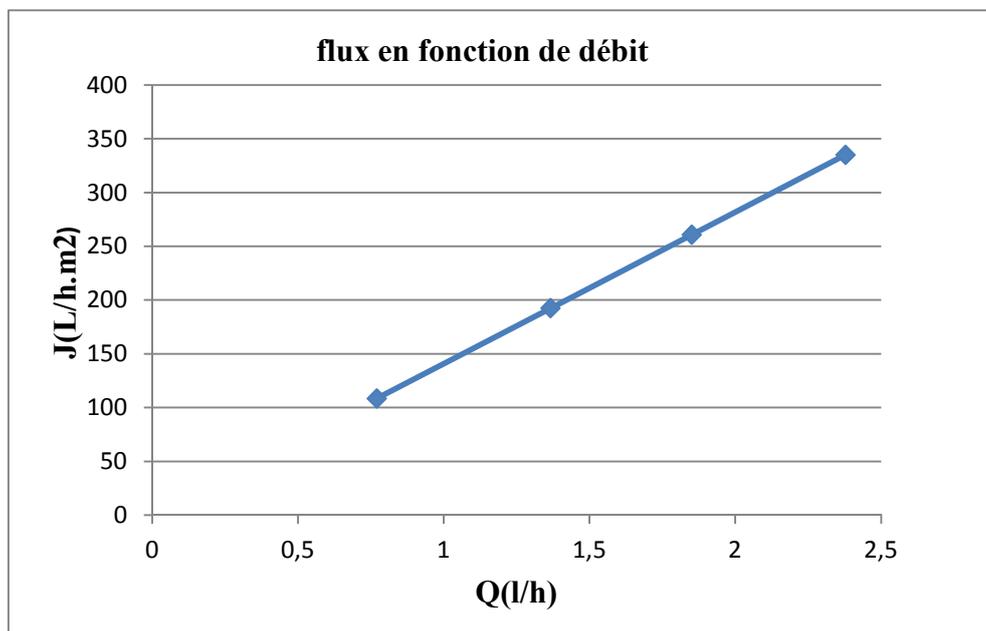
L<sub>p</sub> : la perméabilité

A partir de ces résultats, les paramètres suivants ont été étudiés selon les courbes ci-après



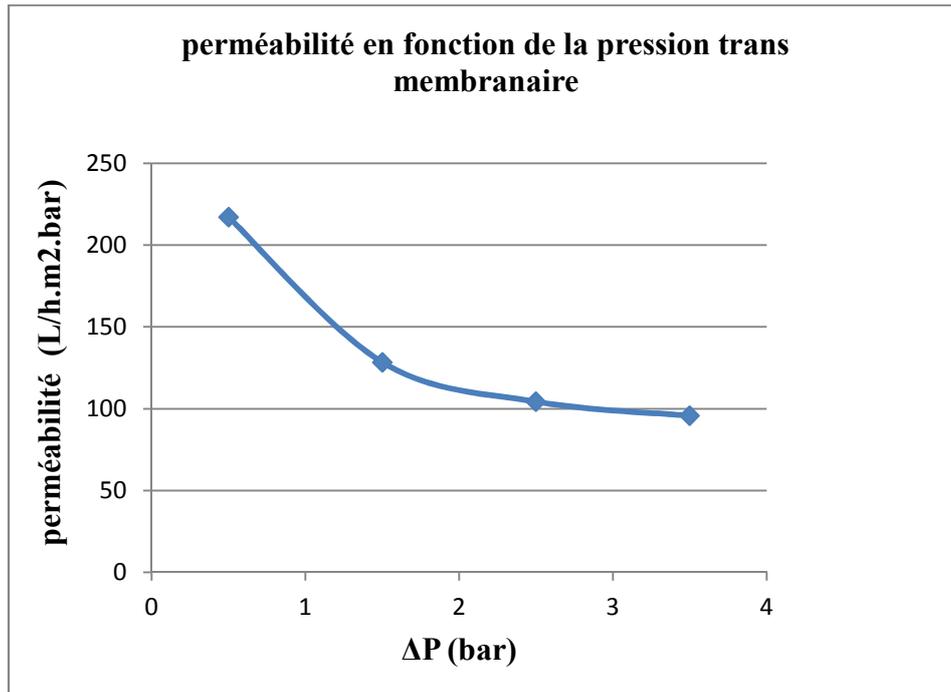
**Figure I.7 :** flux en fonction de la pression transmembranaire

On observe que l'augmentation de la pression transmembranaire entraîne une élévation du flux de perméat.



**Figure I.8 :** flux en fonction du débit

Les résultats de la (figure I.8) montrent que le flux varie proportionnellement avec le débit ce qui est en adéquation avec l'équation  $J=Q/S$ ,  $S= \text{cst}$

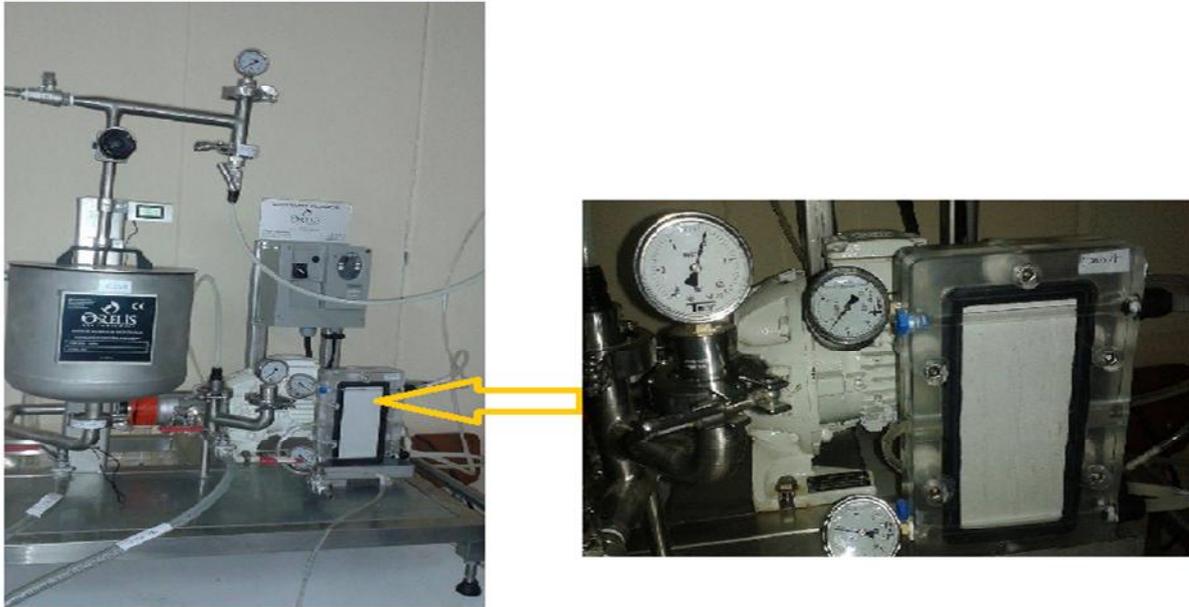


**Figure I. 9 :** Perméabilité en fonction de la pression transmembranaire

On observe que la perméabilité diminue en fonction de la pression transmembranaire, selon la loi de perméabilité :  $L_p = J/\Delta P$ , car la perméabilité est inversement proportionnelle à la pression.

#### I.4- Descriptive de pilote d'ultrafiltration avec module plan

La figure suivante nous montre un pilote d'ultrafiltration avec les accessoires afférent



**Photos I.3 :** pilote d'ultrafiltration avec le module plan

Le tableau (I.3) nous donne les caractéristiques de la membrane plane RAYFLOW d'Orelis environnement

**Tableau I.3 :** Caractéristique de la membrane plane RAYFLOW

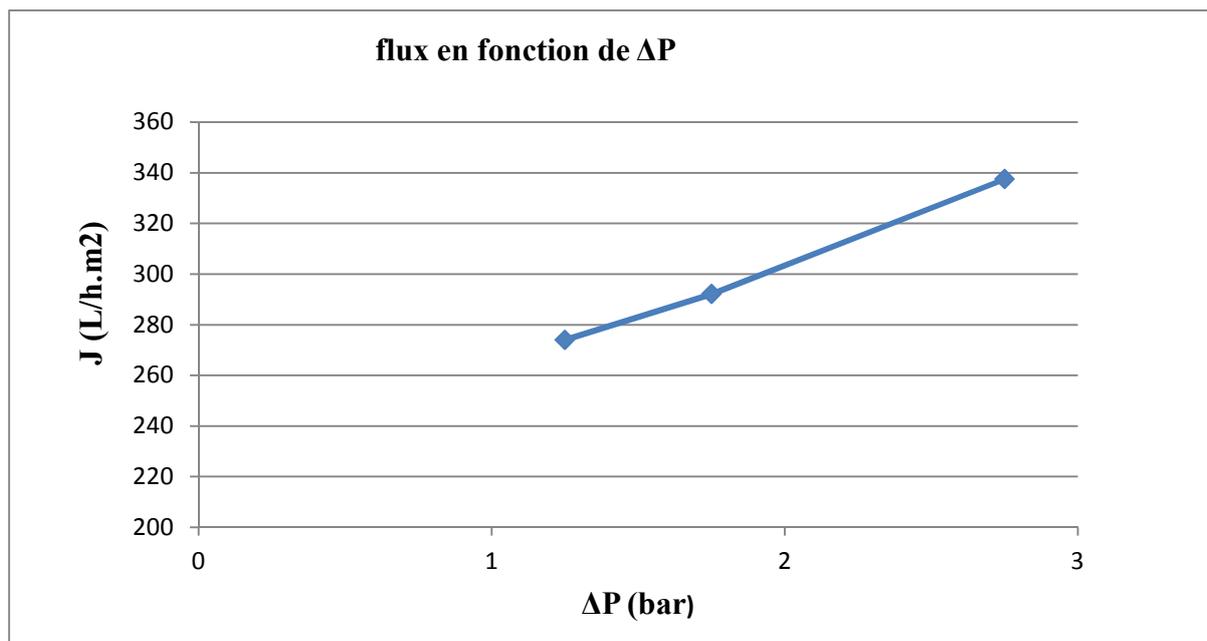
Type de membrane	Membrane d'ultrafiltration
Composition de la membrane	En PVDF (polyvinylidene fluoride)
Composition de support	En polyester
Seuils de coupure	0,2 $\mu\text{m}$
Module	Plan
Gamme de pH	1-12
Limite de température	80°C
Type de procédé	Membrane sous pression à filtration tangentielle
Longueur	17,3 cm
Largeur	7,7 cm
La surface de filtration	266,42 $\text{cm}^2$

#### I.4.1. Tests de filtration sur l'eau pure par la membrane de 0,2 $\mu\text{m}$

Les résultats de l'annexe 2 obtenues à partir des essais de filtration de l'eau distillée sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau I.4 :** variation du débit, du flux et de la perméabilité à différentes pression transmembranaire pour une membrane de 0,2  $\mu\text{m}$  (annexe 2).

$\Delta P$ (bar)	Q (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	L <sub>p</sub> (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> .bar <sup>-1</sup> )
1,25	7,288	273,984	219,187
1,75	7,770	292,105	166,917
2,75	8,976	337,443	122,706



**Figure I.10 :** flux en fonction de la pression transmembranaire

On remarque que le flux augmente en fonction de la pression transmembranaire car la pression exercée sur les parois de la membrane augmente.

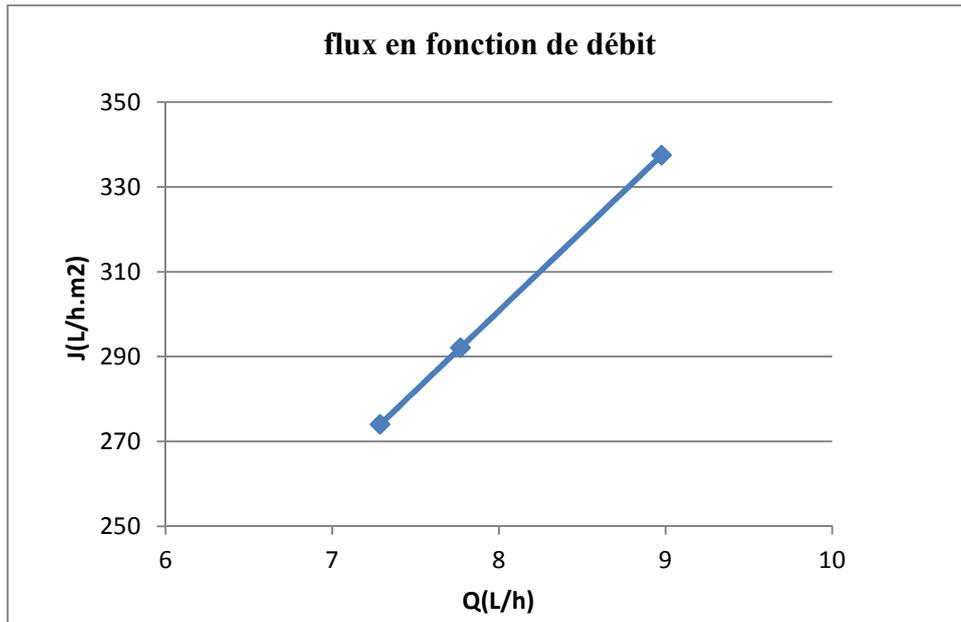


Figure I.11 : flux en fonction du débit

On observe que le flux augmente en fonction du débit donc si le débit de perméat augmente on va voir une augmentation de flux de perméat.

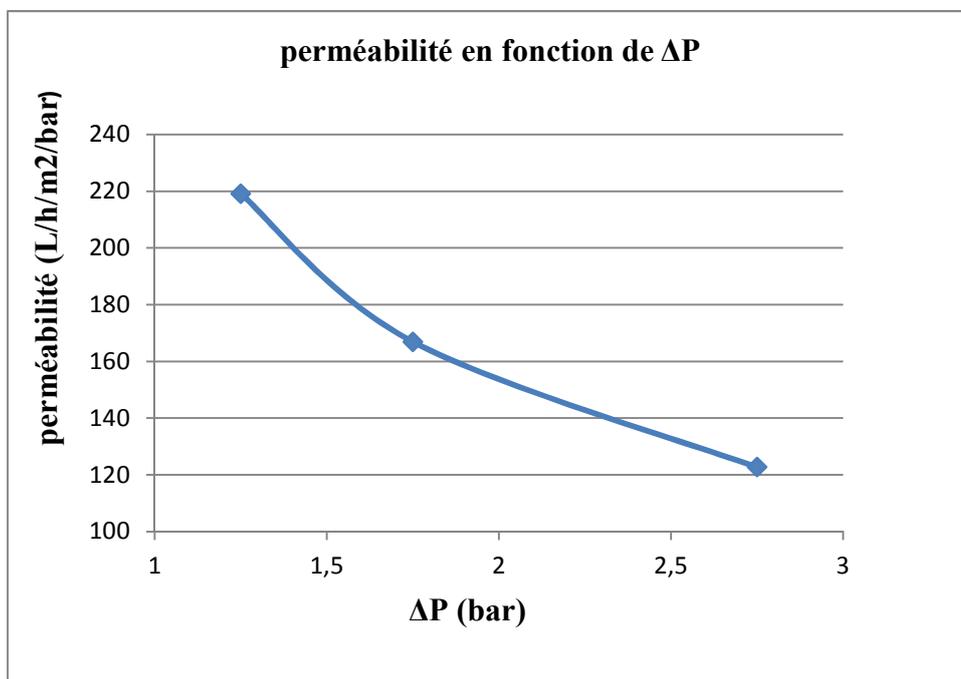


Figure I.12: Perméabilité en fonction de la pression transmembranaire

D'après la figure I.12 on observe une diminution de la perméabilité de la membrane lorsque la pression transmembranaire augmente.

**I.5. Conclusion**

Les résultats obtenus lors de la filtration de l'eau distillée sur les deux membranes d'ultrafiltration nous ont permis de comprendre les mécanismes de mise en marche du pilote d'ultrafiltration ainsi que les paramètres spécifiques aux procédés membranaires. Dans ce contexte, une étude par l'ultrafiltration sur des solutions tel que l'eau de mer, des jus de fruit .....Nous semble appropriée.

**Référence :**

[1] Orelis environnement, mini pilote membrane organique ou céramique, notice d'exploitation, NL007/Rev 12/2014

[2][http://www.orelis-environnement.com/files/downloads/FR%20-%20A3%20-%20Brochure\\_commerciale\\_Minipilote\\_10.pdf](http://www.orelis-environnement.com/files/downloads/FR%20-%20A3%20-%20Brochure_commerciale_Minipilote_10.pdf)

**II.1- Présentation de l'usine de dessalement de Mostaganem**

L'usine de dessalement de Mostaganem, sise à la plage Sonagther (Mostaganem), a une capacité de production d'eau potable de 200.000 m<sup>3</sup>/jour.

Le procédé de traitement d'eau de cette station consiste à :

- Un système de captage et pompage d'eau de mer,
- Un système de prétraitement de l'eau de mer par filtration et microfiltration,
- Un système de déminéralisation de l'eau micro-filtré par osmose inverse
- Un système de reminéralisation et conditionnement de l'eau déminéralisé
- Un système de pompage de l'eau reminéralisé (Eau Commercialisable) vers le réseau de distribution (Réseau de Transport d'Eau Externe)
- Un système d'évacuation de saumure et sous-produits

**II.2- Captage et pompage de l'eau de mer**

Le système de captage a pour but impulser vers le prétraitement de l'eau de mer en quantité et à la pression nécessaire pour produire la quantité d'eau potable désirée.

Le système de captage comprend les sous-systèmes suivants:

- Tours et tuyauteries de prise
- Sous-système anti-méduses
- Sous-système d'amorçage des pompes d'eau de mer
- Sous-système de pompage d'eau de mer [1]

**II.3- Système de prétraitement**

Les bacs de prétraitement sont remplis de filtre à sable qui sert à éliminer les particules en suspension et les matières colloïdales. C'est un filtre de type granulaire qui contient des particules de sable de différents diamètres allant du haut vers le bas (les plus grands diamètres en haut du lit). Cette configuration est indispensable pour pouvoir utiliser la totalité du lit. Le choix du filtre se fait selon les critères suivants :

- ✓ Abilité à retenir les particules solides en suspension juste après le démarrage du prétraitement ;
- ✓ Résistance minimale à l'écoulement ;
- ✓ Résistance aux produits chimiques ;

- ✓ Résistance à l'érosion mécanique ;
- ✓ Coût minimum ;
- ✓ Grande durée de vie.

**II.3.1- Filtration de première étape (24 filtres)**

Chaque filtre a une surface moyenne de filtration de 91,39 m<sup>2</sup> et un diamètre de 4,00 m et une longueur totale de 24,04 m.

Ils sont construits en acier au carbone recouvert à l'intérieur de caoutchouc naturel de 3 mm d'épaisseur.

Le nettoyage des filtres se fait avec de l'air et de la saumure provenant du procédé d'osmose.

Les filtres sont horizontaux - fermés avec fonds semi - elliptique.

La distribution de l'eau à filtrer sera réalisée à l'aide d'un collecteur perforé construit en PEHD afin d'atteindre la distribution homogène du débit tout au long de la surface de filtration.

La couche de filtration a des caractéristiques décrites ci-dessous :

**Tableau II .1 :** caractéristique des couches de filtration de filtre à sable de première étape

<b>La couche supérieure</b>	
Nature	Anthracite
Granulométrie	0.8-1,60 mm
Hauteur de couche	0,80 m
<b>Couche inférieure</b>	
Nature	Sable siliceux
Granulométrie	0,4 - 0,8 mm
Hauteur de couche	0,40 m

Afin d'améliorer une distribution homogène de l'eau et de l'air de nettoyage, les crépines en polypropylène sont installés sur les faux fonds des filtres.

Grâce à une expansion contrôlée de la couche de filtration, un contact parfait entre les grains de sables lors du nettoyage, permettant une bonne séparation des impuretés adhérentes aux grains. Par cette expansion on empêche une partie de la couche filtrante de couler pendant les opérations de nettoyage ou de drain.

### II.3.2- Filtration de deuxième étape (16 filtres)

Chaque filtre a une surface filtrante moyenne de 90,04 m<sup>2</sup>. Leurs dimensions et caractéristiques sont les mêmes que celles des filtres à sable de la première étape.

La couche de filtration a les caractéristiques ci-après détaillées:

**Tableau II.2 :** caractéristique de la couche de filtration de filtre à sable de deuxième étape

<b>Monocouche</b>	
Nature	Sable siliceux
granulométrie	0,4 – 0,8 mm
Hauteur de couche	1.00 m
Pourcentage en SiO <sub>2</sub>	96 %

### III.3.3- Système de microfiltration

La fonction du système de microfiltration est de protéger le système d'osmose inverse empêchant le passage des particules suspendues dans l'eau filtrée non-retenues par les filtres. La microfiltration ne permet pas le passage que des particules de taille inférieure à 0,5 microns.

La microfiltration se fait à l'aide de filtre à cartouche (figure II.1). Les caractéristiques des filtres de microfiltration sont résumées dans le (tableau II.3)



**Figure II.1 :** filtre à cartouche

**Tableau II.3 :** caractéristique de filtre à cartouche

Type de membrane	Membrane de microfiltration
Composition de la membrane	En Polypropylène
Seuils de coupure	0,5 $\mu\text{m}$
Module	Tubulaire
Type de procédé	Membrane sous pression à filtration frontal Extérieur $\rightarrow$ Intérieur
Longueur	1250 mm
Diamètre extérieur	63 mm
Diamètre intérieur	27 mm
La surface de filtration	0,25 $\text{m}^2$

#### II.4- système d'osmose inverse :

Le système d'osmose inverse est le cœur de l'usine, sa fonction est l'élimination des sels dissous, non retenues par microfiltration.

### II.4.1- Châssis d'osmose inverse

Les membranes proposées ont des surfaces élevées (marque FILMTEC). Elles sont spiralées en polyamide aromatique. Les principales caractéristiques de ces membranes sont données par le tableau (II.4) :

**Tableau II.4 :** Les caractéristiques de la membrane d'osmose inverse

Type de membrane	Membrane d'osmose inverse
Composition de la membrane	En polyamide
Module	Spirale
Type de procédé	Membrane sous pression à filtration tangentiel
Rejet des sels (%)	99,6
pH	2-11
Pression maximale	83 bars
Température	45 °C
Diamètre	201 mm
Longueur	1,016 m

Les membranes sont rangées selon un ensemble de sept unités placées en série, ayant la même pression d'entrée. De cette façon, l'eau brute pénètre axialement par un des extrêmes de la carcasse traversant la membrane située en premier lieu. L'eau passe au collecteur central qui occupe l'axe géométrique de la carcasse où elle est recueillie. L'eau de rejet arrive à la membrane suivante où le même phénomène a lieu et ainsi de manière continue jusqu'au septième élément. L'eau de rejet de ce septième élément est envoyée à l'autre extrémité pour être recueillie à l'extérieur [1].

[1]Alberto Justel, MTM-MOM-1000-UTE-0003, Manuel d'exploitation et d'entretien usine de dessalement de Mostaganem, 2010

### III. Etude du prétraitement par l'Ultrafiltration

L'objectif de notre étude est de trouver une solution de remplacement de l'étape de microfiltration par l'ultrafiltration. La microfiltration utilise des filtres à cartouches qui s'encrassent rapidement ne supporte pas la pression ou de là de 2 bars dont la durée de vie ne dépasse pas les 6 mois. Procédés frontal, les filtre à cartouches sont jetables (pas de lavage).

Le procédé préconisé est dans le schéma suivant :

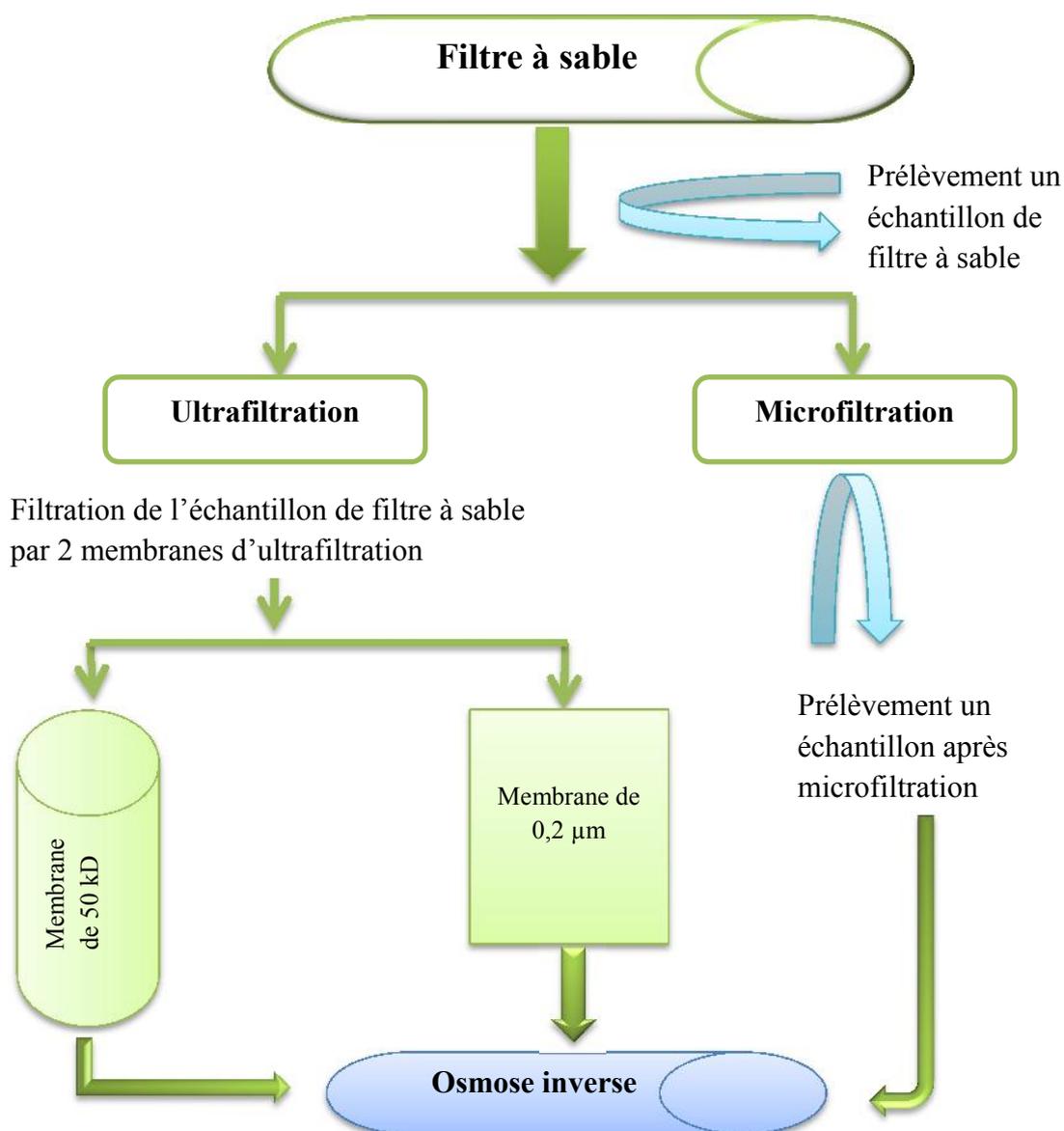


Figure III.1 : Schéma de méthode de travail

### III.1. Le prélèvement

L'échantillon d'eau de mer est prélevé à la sortie de filtre à sable de 2<sup>ème</sup> étape. Il est filtré sur une membrane de seuil de coupure de 50 kD et une membrane de 0,2  $\mu\text{m}$ .

### III.2. La filtration de l'échantillon

**Tableau III.1:** variation du débit et du flux à différentes pression transmembranaire à différent membrane 50 kD et 0,2  $\mu\text{m}$  pour l'eau de mer (Voir Annexe 3,4).

	$\Delta P$ (bar)	Q (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	L <sub>p</sub> (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> .bar <sup>-1</sup> )
50 kD	1,5	0,759	106,901	71,26
	2,5	0,959	135,169	54,06
	3,5	1,235	174,083	49,73
0,2 $\mu\text{m}$	1,15	4,992	242,396	210,779
	1,65	6,898	259,342	157,176
	2,65	7,756	291,578	110,029

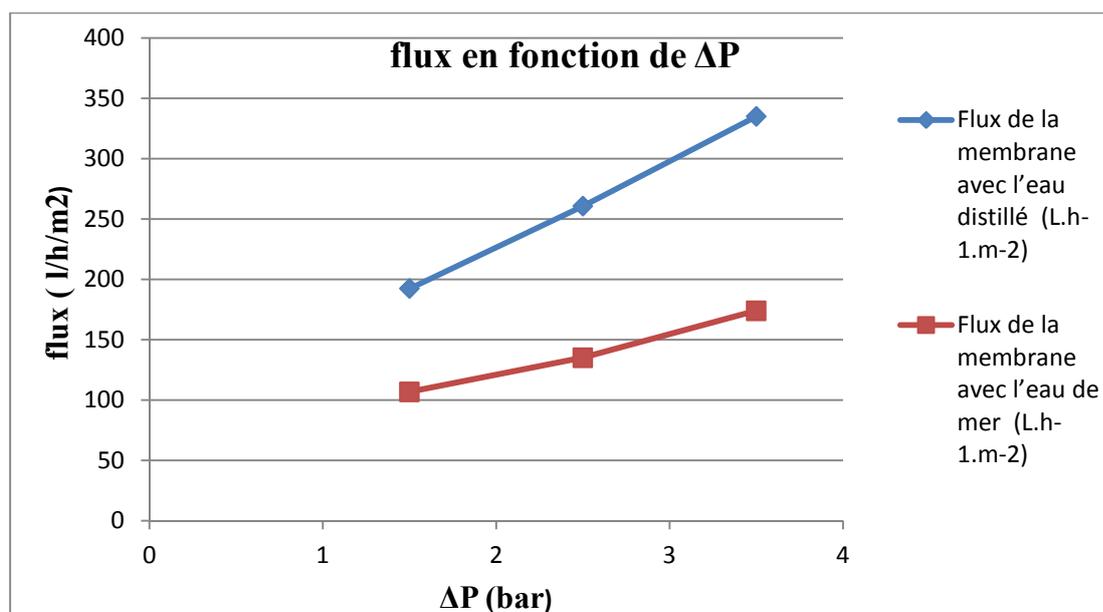
Le tableau présent les résultats des débits et le flux en fonction de la pression transmembranaire pour les deux membranes sur l'eau de mer.

### III.2.1. Le Flux

La comparaison entre le flux de la membrane avec l'eau distillé et l'eau de mer.

**Tableau III.2:** variation de flux en fonction de pression transmembranaire avec différent solution.

$\Delta P$ (bar)	Flux de la membrane avec l'eau distillé ( $L.h^{-1}.m^{-2}$ )	Flux de la membrane avec l'eau de mer ( $L.h^{-1}.m^{-2}$ )
1,5	192,535	106,901
2,5	260,704	135,169
3,5	335,070	174,083



**Figure III.2 :** Le flux en fonction de pression transmembranaire avec différent solution

On observe que le flux de la membrane avec l'eau distillé est supérieur à le flux de la membrane avec l'eau de mer donc on conclure que l'eau de mer est chargé avec des particules qui diminuer le passage à travers la membrane.

III.2.2.La perméabilité :

Tableau III.3 : La perméabilité de l'eau distillé et l'eau de mer en fonction de la pression transmembranaire pour les deux membranes à 50 kD et 0,2 µm.

ΔP (bar)	Lp EM 50 kD	Lp ED 50 kD
1,5	71,26	128,35
2,5	54,06	104,28
3,5	49,73	95,73
ΔP (bar)	Lp EM (0,2µm)	Lp ED(0,2µm)
1,15	210,779	219,187
1,65	157,176	166,917
2,65	110,029	122,706

Lp ED : perméabilité de l'eau distillé

Lp EM : perméabilité de l'eau de mer

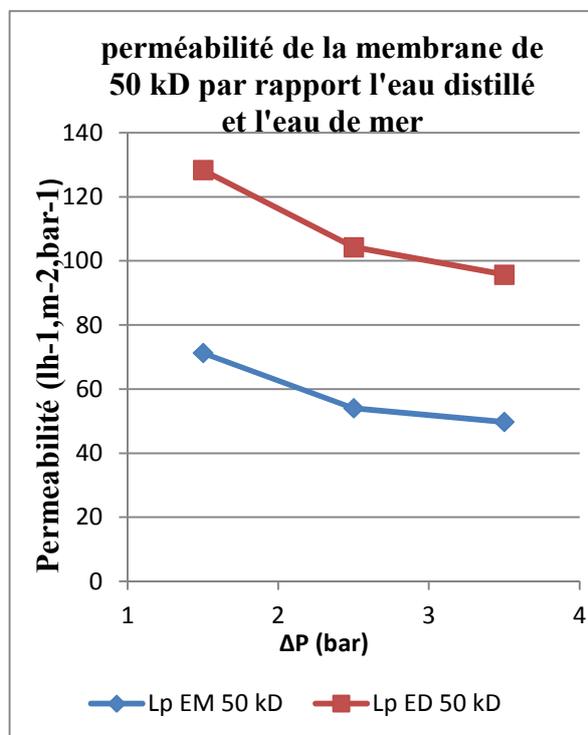
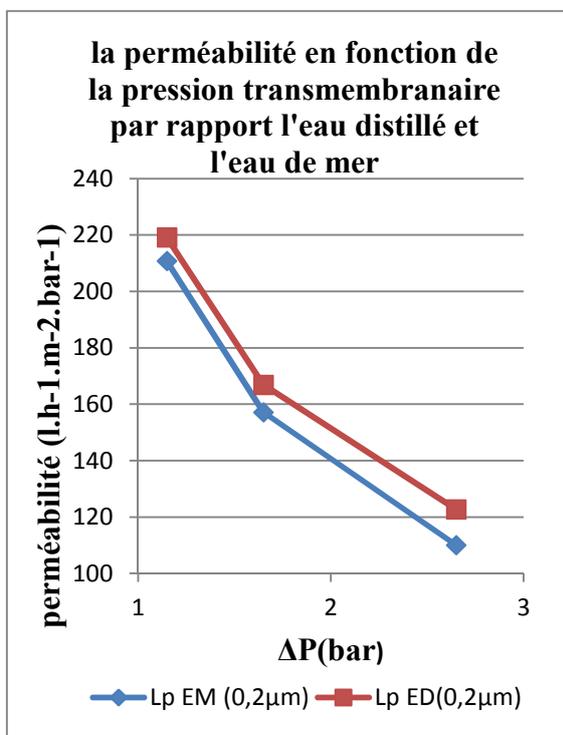


Figure III.3 : la perméabilité de la membrane par rapport de l'eau distillée et l'eau de mer en fonction de la pression transmembranaire.

On remarque que la perméabilité de la membrane avec l'eau distillée est supérieure à la perméabilité de l'eau de mer due aux différentes particules et solutés contenus dans l'eau de mer.

### III.2.3. La conductivité

Lors de la filtration, chaque 5 minutes on prélève un échantillon de perméat et on procède à la mesure de la conductivité.

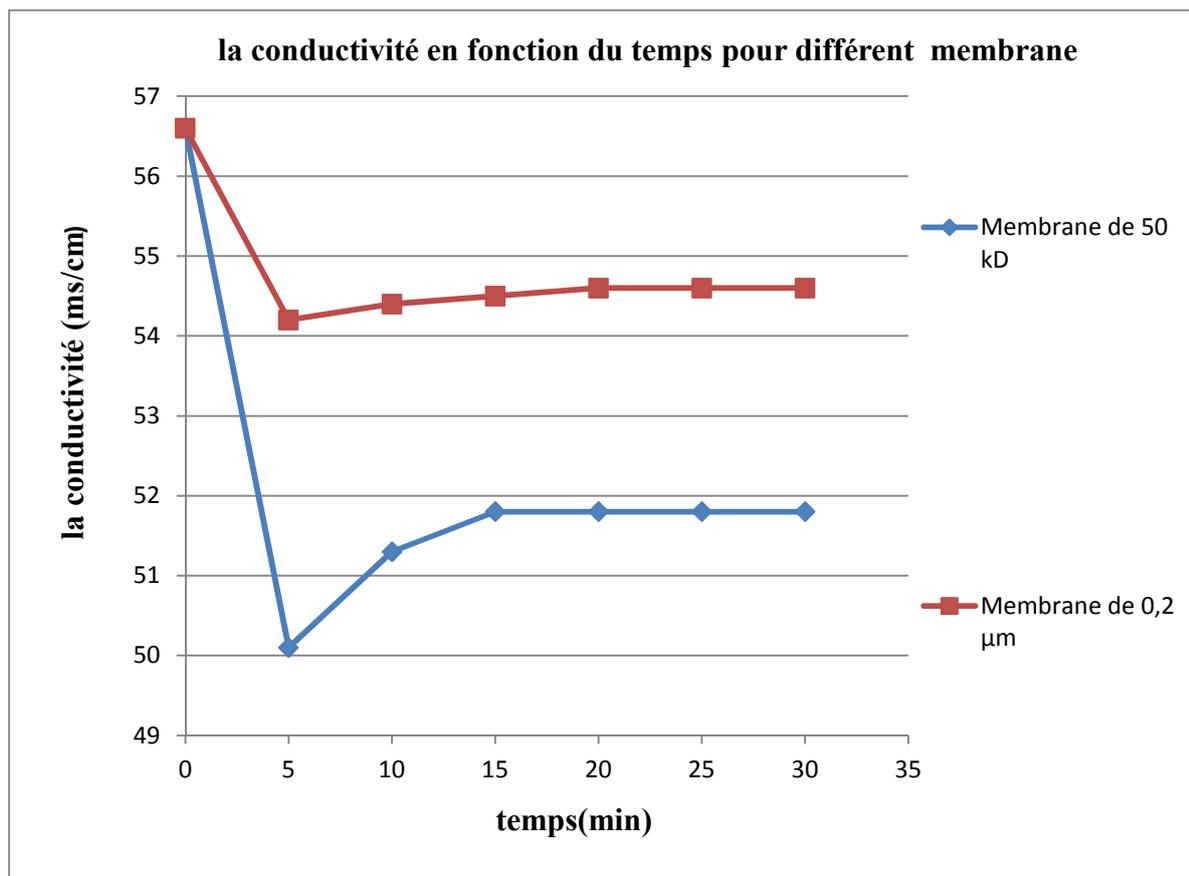
La conductivité de solution recueillie après filtre à sable est de 56,6 ms/cm.

Les valeurs trouvées par les deux membranes sont données dans le (tableau III.4).

**Tableau III.4 :** la conductivité de perméat en fonction du temps.

temps (min)	La conductivité (ms/cm)	
	Membrane de 50 kD	Membrane de 0,2 µm
0	56,6	56,6
5	50,1	54,2
10	51,3	54,4
15	51,8	54,5
20	51,8	54,6
25	51,8	54,6
30	51,8	54,6

La figure suivante donne les valeurs de la conductivité pour chaque membrane : membrane céramique de 50 kD et membrane organique de 0,2 µm.



**Figure III.4 :** la conductivité en fonction du temps entre deux membranes

D'après la figure (III.4), on observe une diminution de la conductivité pour les deux membranes. Elle passe de 56,6 ms/cm à 50 ms/cm pour la membrane de 50 kD et 54 ms/cm pour la membrane de 0,2 μm après 5 min, puis augmente pour se stabiliser à 51,8 ms/cm pour la membrane de 50 kD et à 54,6 ms/cm pour la membrane de 0,2 μm après 10 min.

## III.2.4. Taux de passage

TP : Taux de passage :

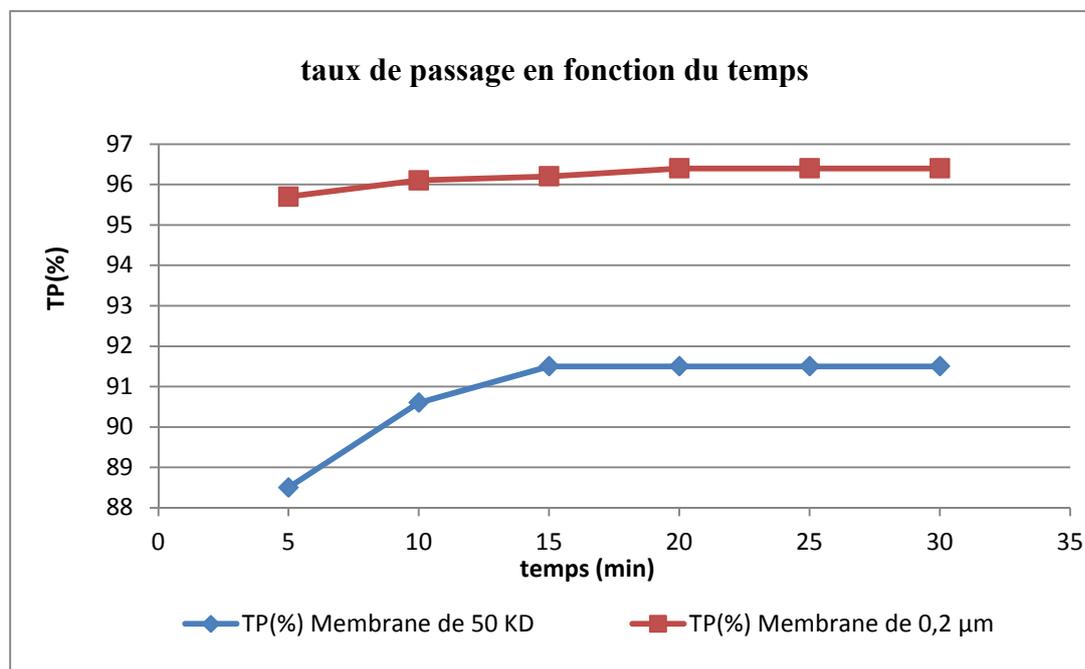
$$TP = \frac{C_p}{C_a}$$

$C_p$  : conductivité de perméat.

$C_a$  : conductivité d'alimentation.

**Tableau III.5** : résultat de taux de passage en fonction du temps

Temps (min)	TP (membrane de 50 KD)	TP(%) Membrane de 50 KD	TP (membrane de 0,2 KD)	TP(%) Membrane de 0,2 $\mu\text{m}$
5	0,885	88,5	0,957	95,7
10	0,906	90,6	0,961	96,1
15	0,915	91,5	0,962	96,2
20	0,915	91,5	0,964	96,4
25	0,915	91,5	0,964	96,4
30	0,915	91,5	0,964	96,4



**Figure III.5** : taux de passage en fonction du temps pour deux membranes différentes

D'après la figure comparative du taux de passage on remarque que le taux de passage de la membrane de 0,2  $\mu\text{m}$  est supérieur à celle de 50 kD. L'élimination du sel par la membrane de 50 kD est meilleure par rapport à la membrane de 0,2  $\mu\text{m}$ .

## III.2.5. Taux de rétention

Taux de rétention :

$$T_R = 1 - TP$$

$$T_R = 1 - \frac{C_p}{C_a}$$

Tableau III.6 : résultat de taux de rétention en fonction du temps

Temps (min)	T <sub>R</sub> (membrane de 50 KD)	T <sub>R</sub> (%) (membrane de 50 KD)	T <sub>R</sub> (membrane de 0,2 μm)	T <sub>R</sub> (%) (membrane de 0,2 μm)
5	0,115	11,5	0,043	4,3
10	0,094	9,4	0,039	3,9
15	0,085	8,5	0,038	3,8
20	0,085	8,5	0,036	3,6
25	0,085	8,5	0,036	3,6
30	0,085	8,5	0,036	3,6

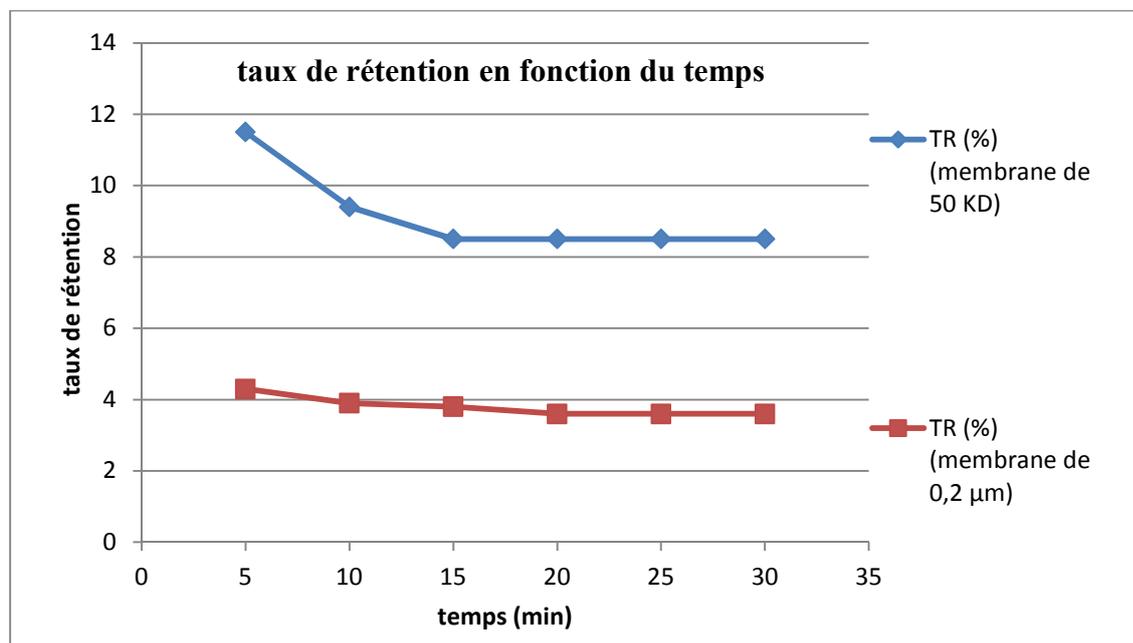


Figure III.6 : le taux de rétention en fonction du temps

D'après la figure (III.6), on remarque que le taux de rétention de la membrane à 50 kD est supérieur à celui de la membrane à 0,2 μm dont le seuil de coupure est plus grand.

**III.3.Résultat du traitement**

Les résultats de l'analyse (Annexe 5) après l'ultrafiltration sur les membranes : 0,2  $\mu\text{m}$  et 50 kD sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau III .7** : les résultats d'analyse de chaque échantillon

	Echantillon 1 après le filtre à sable	Echantillon 2 après la Microfiltration	Echantillon 3 Membrane de 0,2 $\mu\text{m}$	Echantillon 4 Membrane de 50 kD
La conductivité (ms/cm)	56,6	56,5	54,2	50, 5
Le pH	8,04	8,02	8,03	8,01
La turbidité (NTU)	0,58	0,42	0,26	0,16
MES (mg/L)	2,9	1,4	0,7	<0,1
MTD ( g/L)	39,917	39,070	38,550	37,687
TH	6900	6900	6900	6900
Calcium	440	440	440	440
TA	6	6	6	6
TAC	135	135	135	135
Température (°C)	19,9	17,7	21,9	22,3

**TH** : La Dureté Totale

**TA** : Le Titre Alcalimétrique

**TAC** : Titre Alcalimétrique Complet

**Calcium** : Dureté Calcique

**Echantillon 1** : échantillon après le filtre à sable

**Echantillon 2** : échantillon après la microfiltration

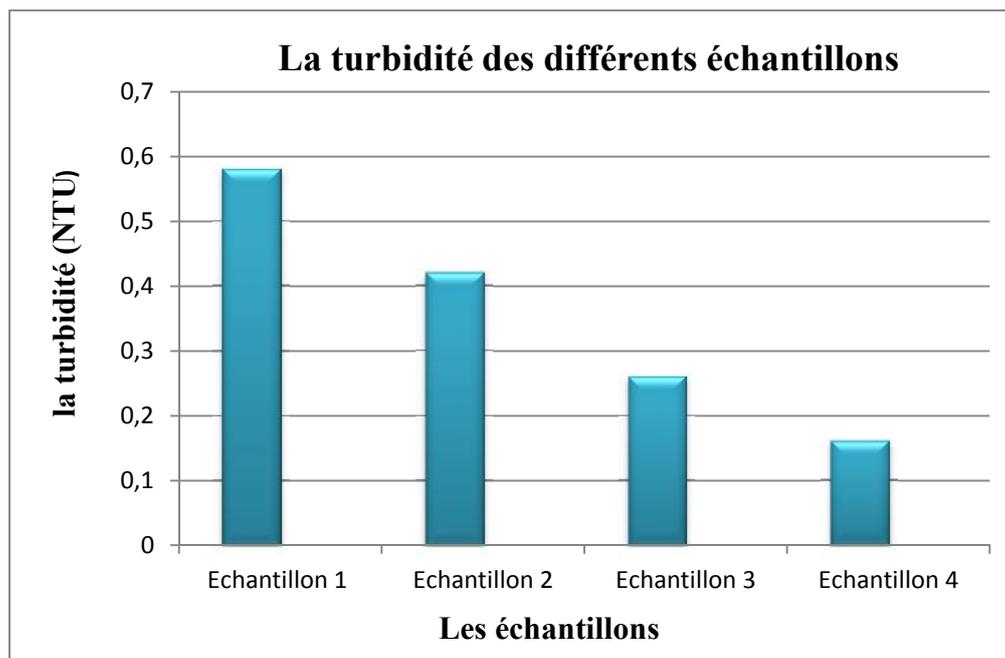
**Echantillon 3** : perméat après l'ultrafiltration (membrane de 0,2  $\mu\text{m}$ )

**Echantillon 4** : perméat après l'ultrafiltration (membrane de 50 kD)

### III.3.1. Etude de la turbidité :

**Tableau III.8 :** résultat de la turbidité de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
La turbidité (NTU)	0,58	0,42	0,26	0,16



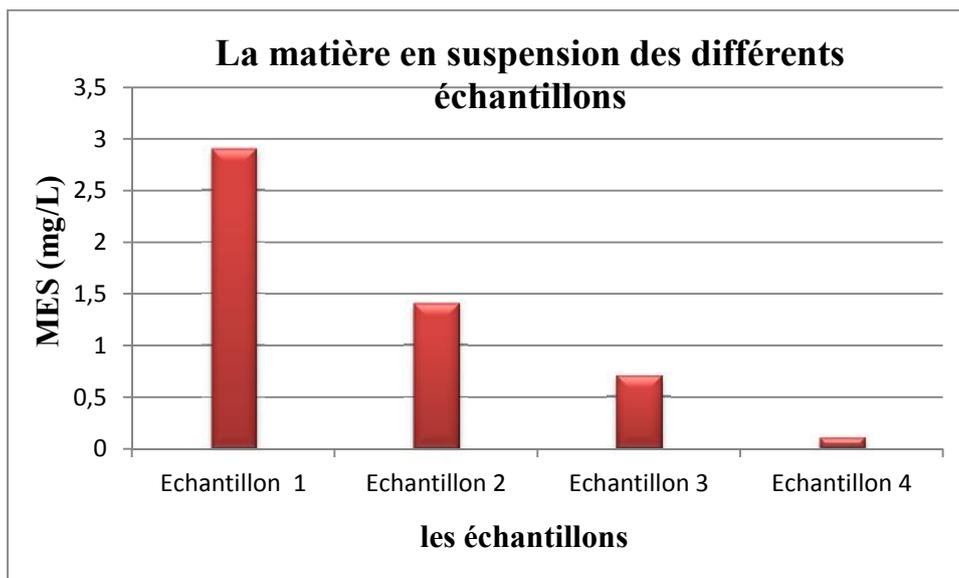
**Figure III.7 :** la turbidité des différents échantillons

On observe que la solution la moins turbide est donnée par la membrane à 50 kD. Car elle permet l'élimination des macromolécules et les colloïdes.

### III.3.2. Etude de la matière en suspension :

**Tableau III.9 :** résultat de la matière en suspension de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
La matière en suspension MES (mg/L)	2,9	1,4	0,7	< 0,1



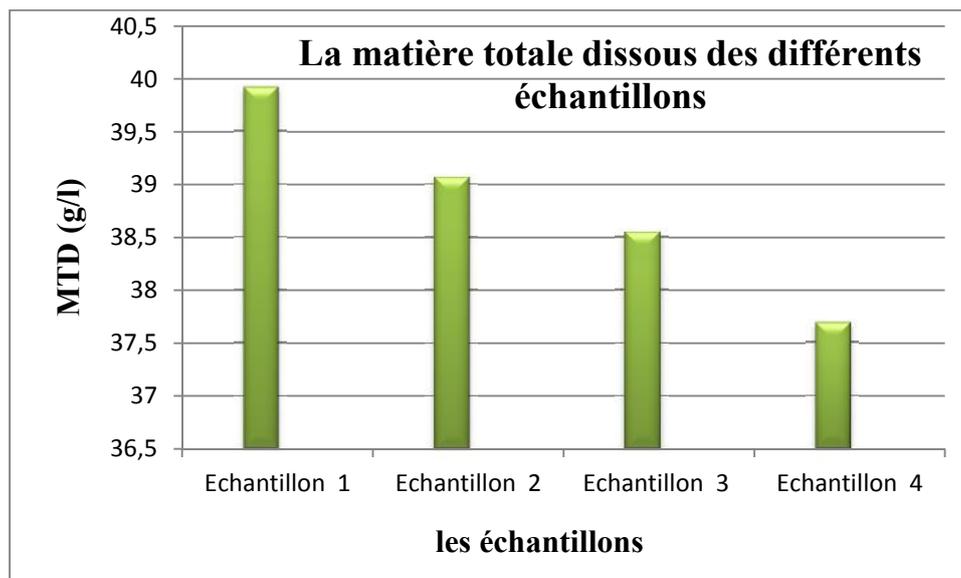
**Figure III.8 :** la matière en suspension avant et après l'ultrafiltration à différent membrane

On remarque que la membrane le plus éliminé la matière en suspension est donnée par la membrane de 50 kD. Les particules en suspension et les colloïdes sont éliminés

### III.3.3 Etude de matière totale dissous

**Tableau III.10 :** résultat de la matière totale dissous de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
la matière totale dissous MTD (g/L)	39,917	39,070	38,550	37,687



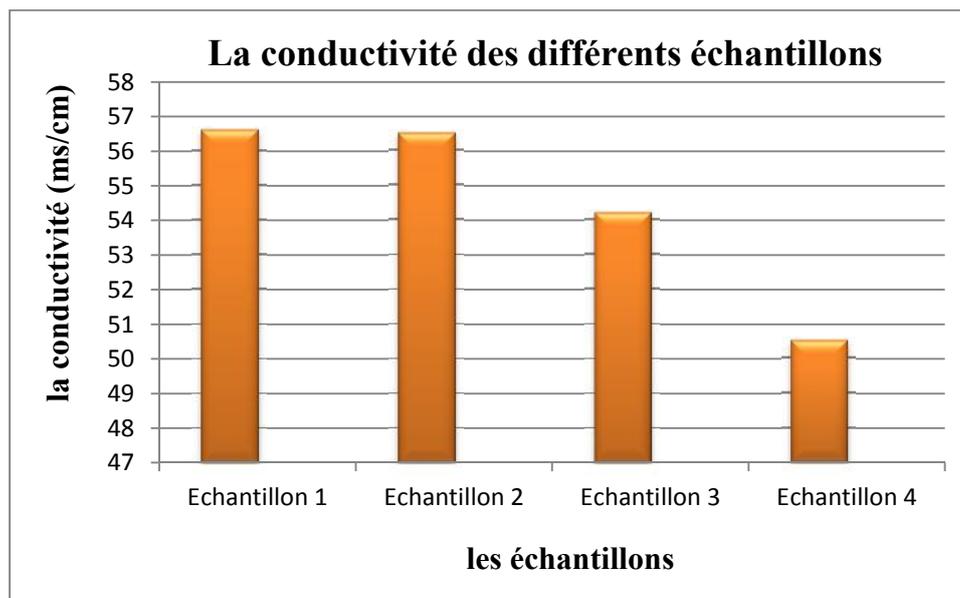
**Figure III.9 :** la matière totale dissous avant et après l'ultrafiltration à différent membrane

On observe que la membrane de 50 kD est la plus élimine la matière totale dissous par rapport à la membrane de 0,2 µm.

### III.3.4. Etude de la conductivité

**Tableau III.11 :** résultat de la matière totale dissous de différent échantillon avant et après l'ultrafiltration :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
la conductivité (ms/cm)	56,6	56,5	54,2	50,5



**Figure III.10:** la conductivité avant et après l'ultrafiltration à différent membrane

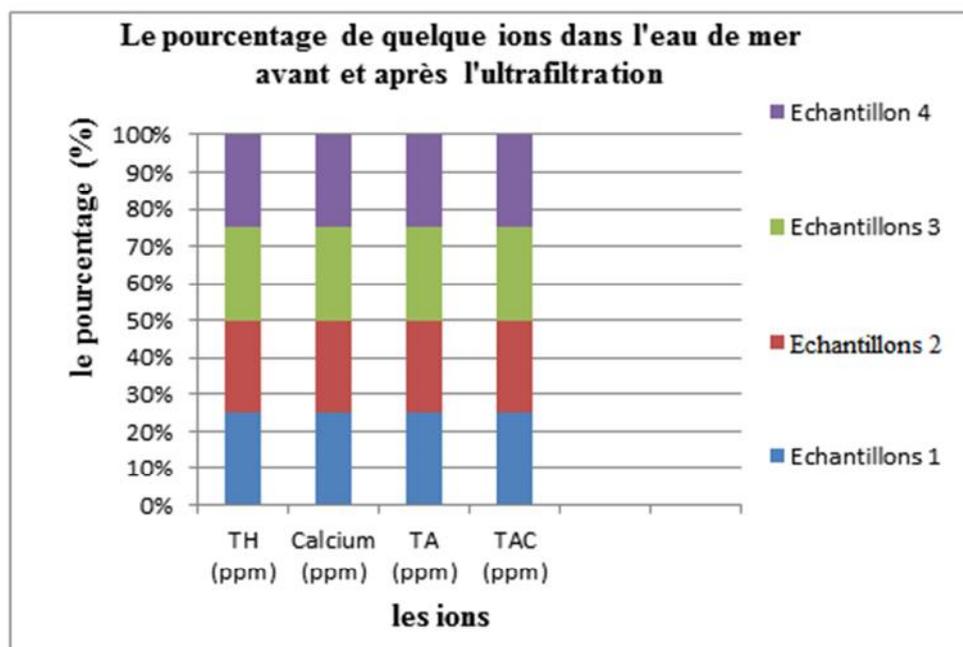
D'après la figure on observe que la conductivité diminue juste après l'ultrafiltration donc l'élimination des sels se fait au niveau d'ultrafiltration et selon le seuil de coupure de la membrane

### III.3.5. Etude des éliminations des ions

D'après (Annexe 5) on obtient ces résultats qui sont dans le tableau ci-dessus

**Tableau III.12 :** Le pourcentage de quelques ions dans l'eau de mer avant et après l'ultrafiltration

	Echantillons 1	Echantillons 2	Echantillons 3	Echantillon 4
TH (ppm)	6900	6900	6900	6900
Calcium (ppm)	440	440	440	440
TA (ppm)	6	6	6	6
TAC (ppm)	135	135	135	135



**Figure III.11 :** Le pourcentage de quelques ions dans l'eau de mer avant et après l'ultrafiltration.

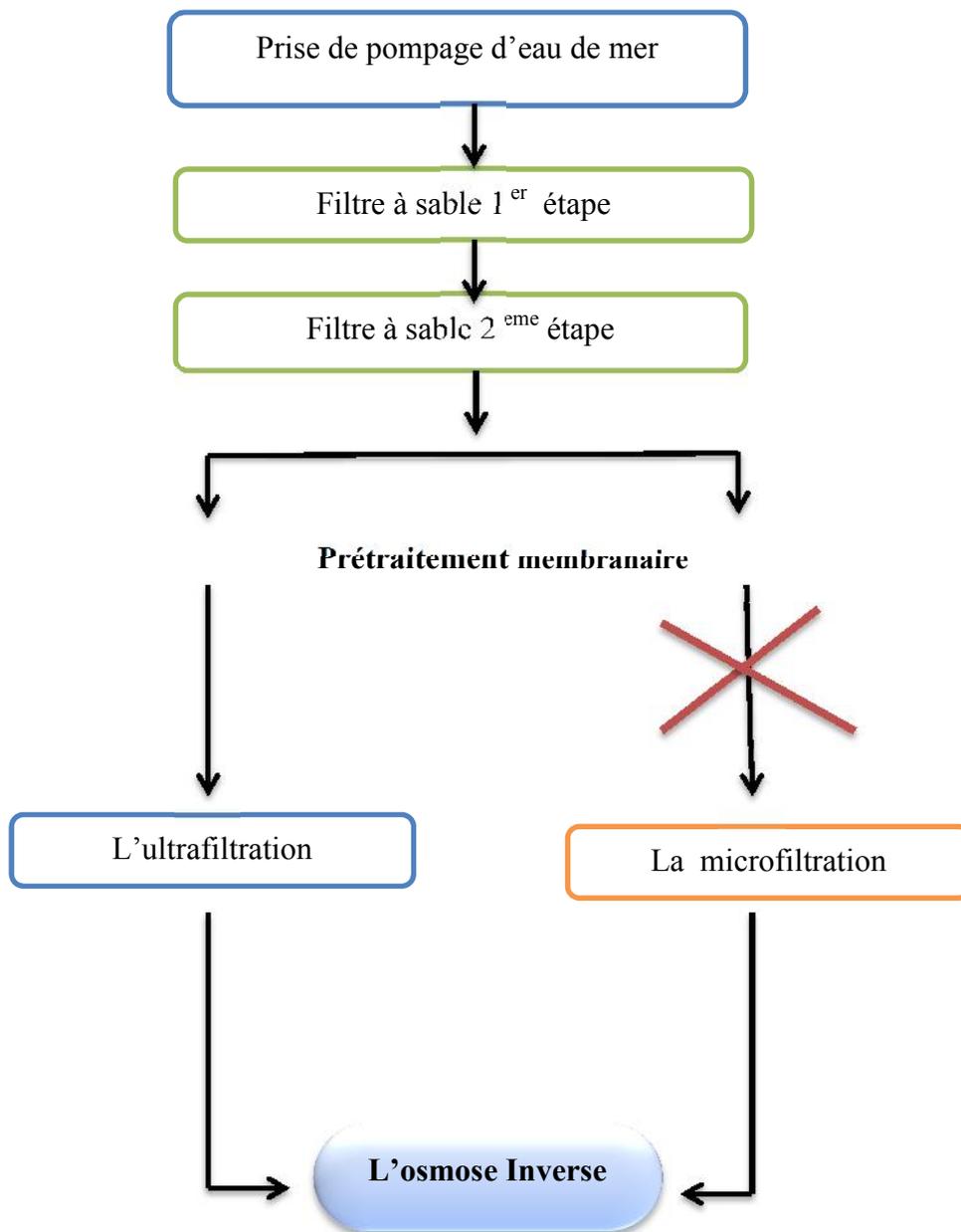
On remarque que les valeurs de TH, Calcium, TA et TAC reste constant dans toute les étapes donc on conclure que l'ultrafiltration n'élimine pas les ions.

#### III.4. Rétrolavage

Rincer le circuit de filtration en alimentant le réservoir avec le perméat de la membrane et on rince la membrane pendant 15 min sous pression de 4 bars.

**Conclusion**

D'après les résultats obtenus pour les différents essais effectués sur l'eau de mer par ultrafiltration, on peut dire que l'ultrafiltration est mieux adaptée que la microfiltration. On préconise dans les étapes de traitement, l'ultrafiltration avec une membrane à 50 kD à la place de la microfiltration selon le diagramme suivant :



**Figure III.12 :** le schéma proposé de prétraitement avec l'ultrafiltration avant l'osmose inverse.

### **IV.1. Introduction**

L'intérêt pour la qualité des aliments fait que les industries recherchent les meilleurs moyens de les conserver. Il y a déjà eu des avancées significatives sur les méthodes de conservation post-récolte ainsi qu'au niveau des aliments technologiquement modifiés.

La conservation et la concentration des jus de fruits sont traditionnellement réalisées en utilisant la chaleur qui peut modifier l'arôme, la saveur et le profil nutritionnel des produits car ces caractéristiques dépendent de substances thermosensibles. Le progrès de la connaissance scientifique des méthodes qui impliquent le traitement thermique a abouti au développement des technologies réduisant au minimum l'effet nuisible de la chaleur ainsi qu'à l'intensification des recherches sur les technologies alternatives. Parmi ces méthodes, on peut citer les traitements à haute pression hydrostatique, les technologies membranaires ; plus particulièrement, la microfiltration, l'ultrafiltration, l'osmose inverse sont des procédés de séparation avec des membranes qui peuvent être utilisés comme alternatives à la pasteurisation et à la concentration thermique.

Dans l'ultrafiltration tangentielle. Avec les membranes on peut enlever de l'eau à froid sans changer l'état physique des liquides à concentrer et l'énergie demandée est jusqu'à 100 fois inférieure vers l'évaporation. Cette dernière en tout cas continuera à être partiellement employée en combine son avec les membranes comme on explique ici de suite. Quand on doit concentrer par exemple du jus de tomate, de fruits ou de moûts on peut arriver par les membranes à enlever le 30% - 60%.

IV.2. Aperçus d'usine : LA TELLOISE

IV.2.1 Historique : la société été nommée

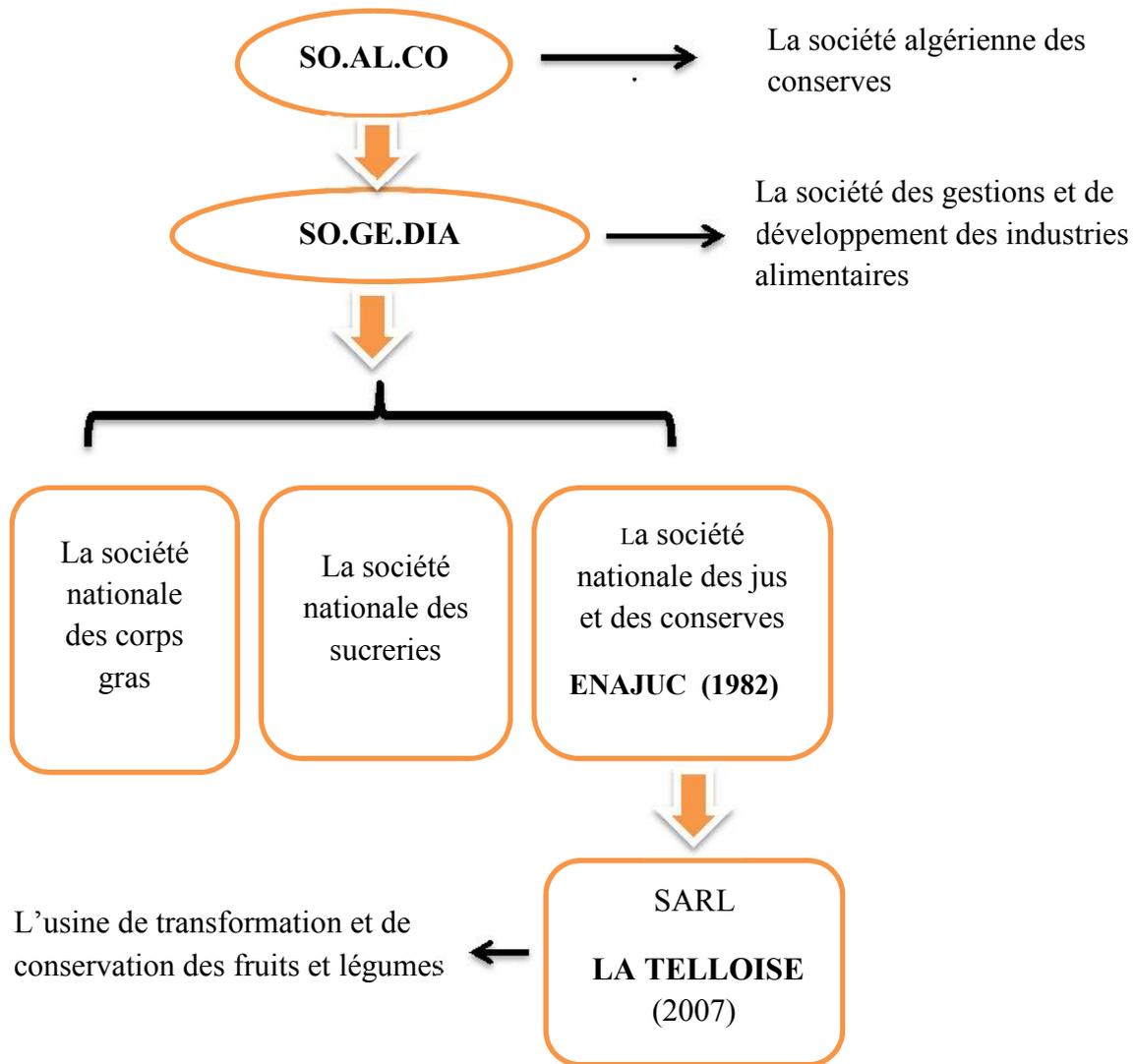


Figure IV.1 : schéma de développement de l'usine de la telloise

### IV.2.2. Localisation :

Sarl la Telloise est située au bord de la route nationale N=° 04 Alger-Oran à environ 4 km de la ville de Chlef.

Elle occupe un terrain de 05 Ha et 50Are.

L'entreprise est déterminée :

- Au nord par R.N 04 Alger-Oran à 10 m et par Oued Chlef à 400m.
- Au sud par la voie ferrée.
- A l'ouest par l'unité de protection civile.

### IV.2.3.L'organigramme de l'unité

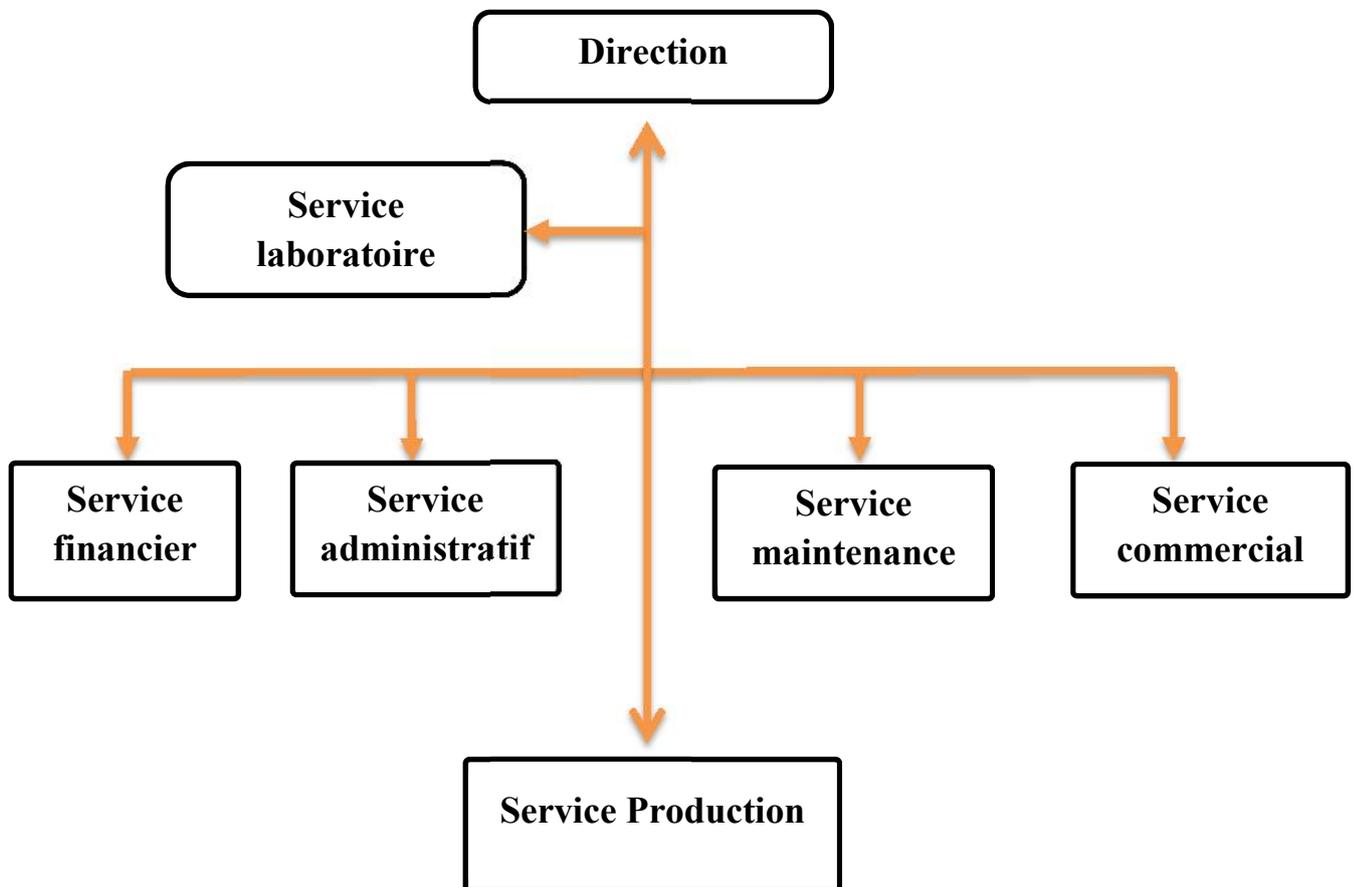


Figure IV.2 : l'organigramme de l'usine de la telloise

IV.2.4. processus de production :

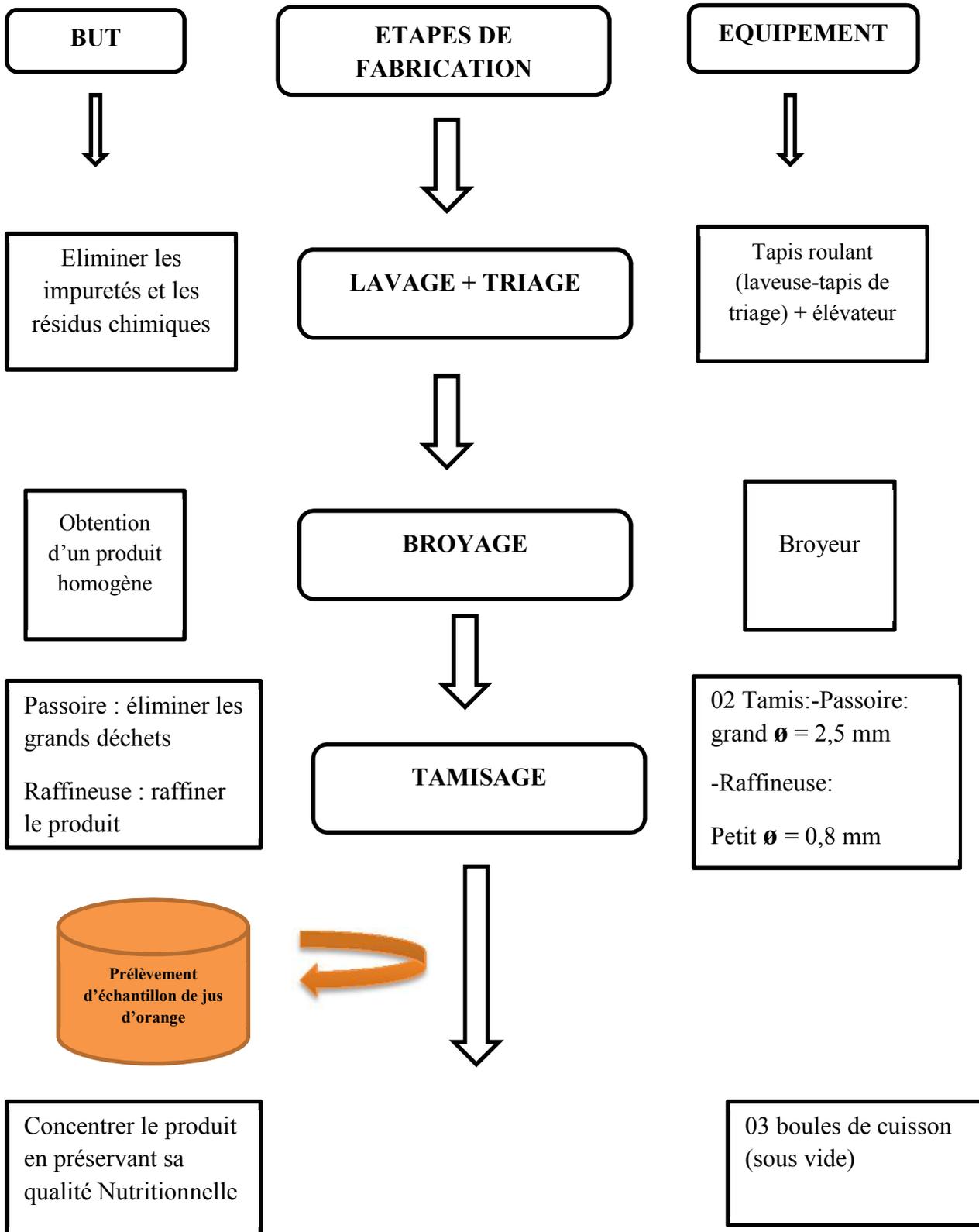


Figure IV.3 : Schéma de processus de production

La concentration de jus se fait selon le procédé classique après tamisage, par une cuisson. Notre étude a porté sur la concentration de jus en utilisant l'ultrafiltration sans passer par l'étape cuisson. L'échantillon prélevé pour subir la filtration est situé juste après l'étape tamisage.

### **IV.3 Prétraitement**

Le jus d'orange brute (prélevé) présente une forte turbidité. Les molécules responsables de ce trouble sont les pulpes et les croûtes d'orange, susceptibles d'encrasser les membranes. C'est pourquoi un prétraitement est envisagé.

-Filtration du jus sur filtre de taille des pores équivalent à 0,01 mm, pour éliminer les grosses particules (pulpe, croûte ...etc.), afin d'éviter un colmatage lors de la filtration sur membrane.

Les analyses physico-chimiques du jus d'orange avant et après filtration membranaire sont données dans le paragraphe suivant.

### **IV.4. Les analyses physico-chimiques de jus**

#### **IV.4.1 pH**

- Etalonner le pH à l'aide des deux solutions tampons.
- Plonger l'électrode dans l'eau à analyser et lire la valeur du pH.
- Introduire l'électrode dans le bécher contenant le jus d'orange à analyser dont la température doit être 20°C.
- A chaque détermination du pH, retirer l'électrode, rincer avec l'eau distillée et sécher.

#### **IV.4.2. Mesure de l'acidité :**

L'acidité correspond à la somme des acides minéraux et organiques libres dans un produit (ex : l'acide citrique, malique, tartrique).

#### **Mode opératoire :**

- Verser 10g de produit à analyser dans un erlenmeyer ;
- Ajouter 50ml d'eau distillée+10 gouttes de phénolphtaléine ;
- Titrer par NaOH 0.1N jusqu'à l'apparition de la couleur rose ;

Expression des résultats de l'acidité (g/kg) =  $V(\text{NaOH}) \times 0,64$



Photos IV.1 : mesure de l'acidité de jus d'orange.

#### IV.4.3. Analyse de la concentration en sucre (Brix)

C'est le taux de la matière sèche soluble dans le produit fini.

1° Brix = 1% de la matière sèche dissoute.

La mesure est effectuée par réfractométrie (en %).



Photos IV.2: mesure le taux de sucre dans le jus d'orange

#### IV.4.4. La densité

- L'analyse s'effectue par un densimètre :

##### Mode opératoire :

- Remplir une éprouvette de 1000 ml par le jus à analyser ;
- Plonger le densimètre dans le jus ; laisser le se stabilise ;

→ Lire la valeur limitée par le bord de jus.



**Photos IV.3 :** mesure la densité de jus d'orange

#### IV.4.5. La pulposité :

Pour déterminer le taux de la pulpe qui existe dans le jus, on utilise la méthode de la centrifugation.

##### Mode opératoire :

- Peser 04 tubes à centrifuger vides (T1, T2, T3, T4) ;
- Les Remplir par le jus, les peser une 2eme fois (P1, P2, P3, P4) ;
- Puis centrifuger pendant 03 min à 6000t/min ;
- Procédé à la peser après centrifugation (R1, R2, R3, R4).

Expression des résultats :

Poids de jus :  $P = (P1 + P2 + P3 + P4) - (T1 + T2 + T3 + T4)$

Poids de pulpe :  $R = (R1 + R2 + R3 + R4) - (T1 + T2 + T3 + T4)$

Le taux de pulpe (%) = $R/P * 100$
------------------------------------

**IV.5. Analyse du jus avant ultrafiltration :**

Les caractéristiques physicochimiques du jus avant la filtration sont données dans le tableau IV.1 suivant.

**Tableau IV.1** : résultats des analyses physico-chimiques de jus avant la filtration.

Les paramètres	Les résultats
Concentration de sucre (brix)	10
L'acidité (g/kg)	8,96
pH	3,3
Densité	0,38
Pulposité (%)	2,953

**IV-6. La concentration de jus sur membrane PVDF à 0,2 µm en fonction du temps****Les conditions opératoires :**

Pression d'entrée 4 bars

Pression de sortie 2,5 bars

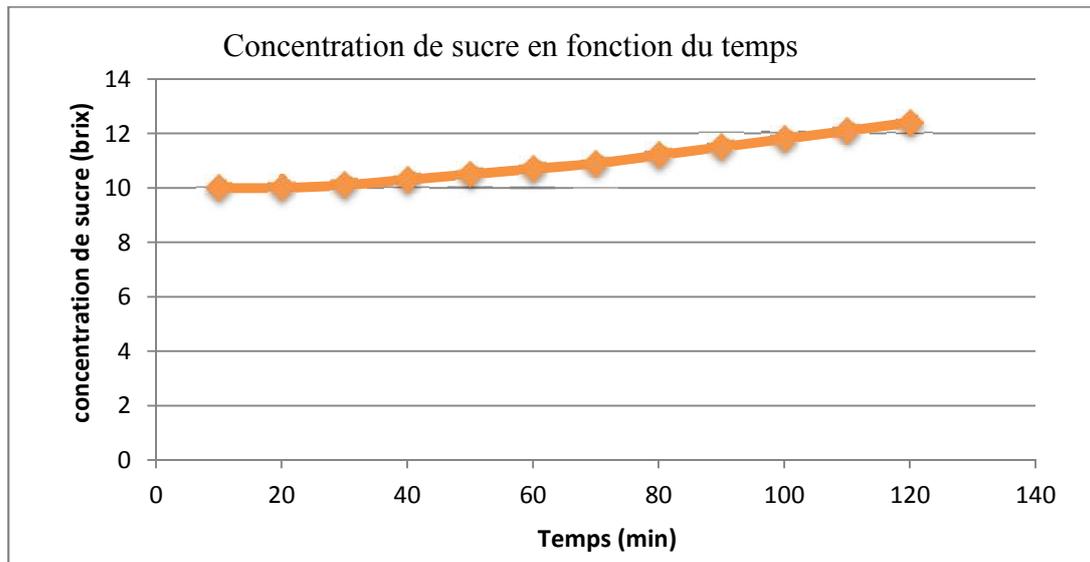
 $\Delta P$ : 2,25 bars

Température 17,9 °C

Lors de la filtration, des échantillons sont prélevés tous les 10 min puis analysés selon le tableau IV.2

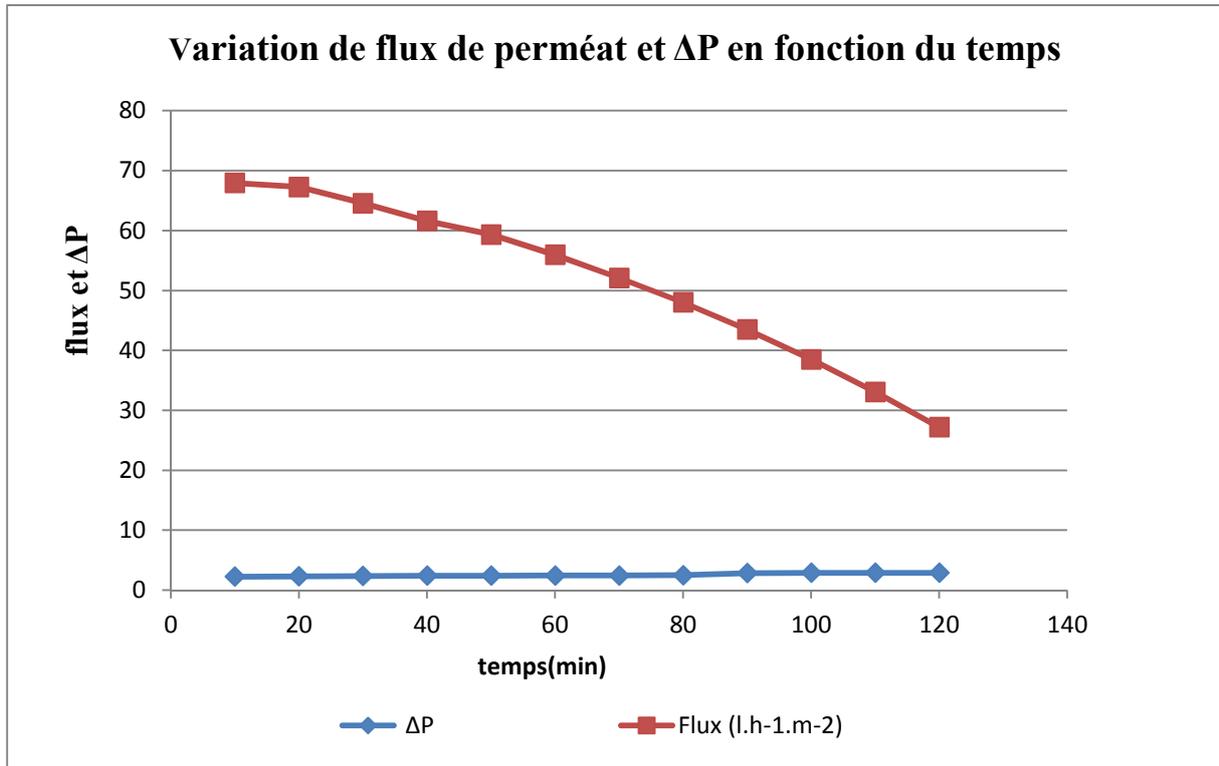
**Tableau IV.2** : la concentration de sucre dans le jus au cours du temps.

Le temps (min)	La concentration de sucre (brix)
10	10
20	10
30	10,1
40	10,3
50	10,5
60	10,7
70	10,9
80	11,2
90	11,5
100	11,8
110	12,1
120	12,4

**-Courbe de concentration de sucre en fonction du temps****Figure IV.4** : concentration de jus en fonction du temps

Cette figure montre que la concentration en sucre de jus d'orange augmente au cours du temps. Elle passe de 10 à 12,4 % brix après deux heures. La valeur de 12,4% brix obtenue par ultrafiltration correspond à la valeur de concentration en brix au niveau de l'industrie après traitement par cuisson.

La concentration par membrane s'effectue généralement sans changement de phase, compte-tenu du caractère semi-perméable des membranes; la séparation solvant-soluté n'est pas totale, le solvant passant au travers de la membrane étant accompagné des composés solubles de bas poids moléculaire. L'ultrafiltration utilise des membranes assez poreuses à des pressions de quelques bars pour concentrer les colloïdes (les pulpes) et solutés de bas poids moléculaire.

-La variation de flux de perméat et de  $\Delta P$  en fonction du temps

**Figure IV.5 :** Variation du flux de perméat et de la  $\Delta P$  en fonction du temps

D'après la figure IV.5, on observe que l'augmentation de la  $\Delta P$  est accompagnée par une diminution du flux de perméat.

Le flux de perméat décroît de 67,955 à 27,182 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> en raison de l'accumulation des molécules (pulpe) sur la paroi de la membrane, provoqué par l'augmentation de la pression transmembranaire (perte de charge).

Pour comprendre l'influence de la filtration sur la concentration, une étude sur le rapport volume de perméat-volume de solution en fonction du temps paraît nécessaire.

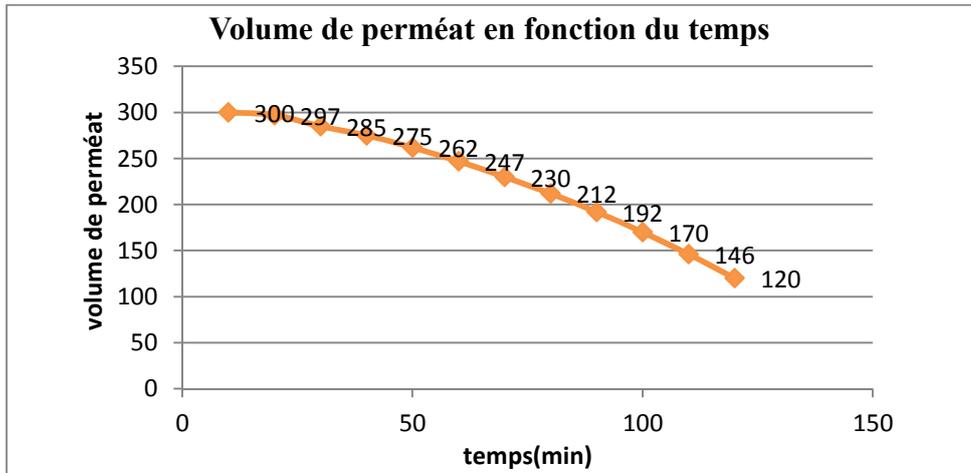
## IV-7. Le rapport volume de perméat / temps

Le tableau suivant résume le volume de perméat au cours du temps pour déterminer la quantité globale d'eau filtré durant la filtration pour un volume prélevé de 4 litres.

**Tableau IV.3:** paramètres de filtration de la membrane à 0,2  $\mu\text{m}$

Temps (min)	Volume de perméat (mL)	Débit (L.h)	$P_E$ (bar)	$P_S$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	Flux ( $\text{L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )
10	300	1,800	4	2,5	2,25	67,955
20	297	1,782	4	2,6	2,3	67,275
30	285	1,710	4	2,7	2,35	64,557
40	275	1,632	4	2,8	2,4	61,612
50	262	1,572	4	2,8	2,4	59,347
60	247	1,482	4	2,9	2,45	55,949
70	230	1,380	4	2,9	2,45	52,099
80	212	1,272	4	3	2,5	48,021
90	192	1,152	4	3,7	2,85	43,491
100	170	1,020	4	3,8	2,9	38,508
110	146	0,876	4	3,8	2,9	33,071
120	120	0,720	4	3,8	2,9	27,182

**-Le volume de perméat en fonction du temps**



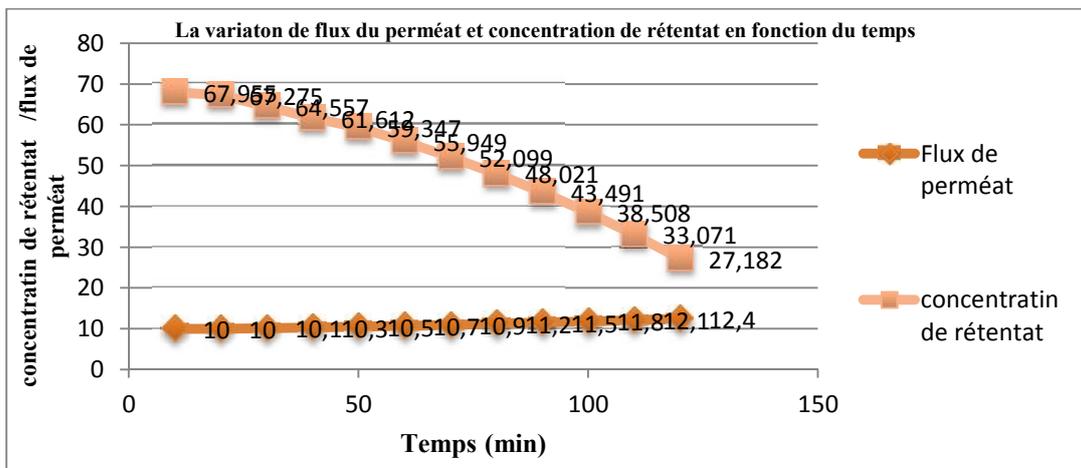
**Figure IV.6 :** Le volume de perméat en fonction du temps

La figure ci-dessus représente le volume de perméat en fonction de temps de filtration.

L'importance de cette courbe est de déterminé le volume total de perméat retiré pendant la filtration pour obtenir un jus finale à concentration en sucre de 12,4% Brix.

D'où le volume totale de perméat récupéré après deux heures de filtration :  
 $volumeperméat = 300+297+285+275+262+247+230+212+192+170+146+120=2736$   
 mL donc 2,736 L pendant 2 heures. Soit un taux :  $2,736 / 4 = 0,684$  soit 68,4%

**-La variation du flux du perméat et concentration de rétentat en fonction du temps**



**Figure IV.7 :** Variation du flux de perméat et concentration de sucre en retentât en fonction du temps.

La figure IV.7 indique que le flux de perméation et la concentration de sucre de retentât varient en sens inverse l'une de l'autre. La diminution de flux de perméat conduit à une augmentation de la concentration de sucre au niveau de retentât. Pour un flux de perméat final (2,736 l), on obtient une concentration de sucre en retentât de 12,4%brix.

#### IV-8 Les analyses après l'UF de jus d'orange :

Les caractéristiques physicochimiques du jus final sont données dans le tableau IV.4.

**Tableau IV.4:** résultats des analyses physico-chimiques de jus après la filtration.

Les paramètres	Les analyses physico-chimiques	
	Avant filtration	Après filtration
Concentration de sucre (brix)	10	12,4
L'acidité (g/kg)	8,96	9,6
pH	3,3	3,5
Densité	0,38	0,50
Pulposité (%)	2,953	6,996

L'ultrafiltration est réalisée avec une membrane d'ultrafiltration en PVDF de seuil de coupure de l'ordre de 0,2 $\mu$ m et en appliquant une pression transmembranaire de l'ordre de 2,25 bars.

Le procédé permet d'obtenir un jus d'orange à teneur élevée en sucre, si on compare le produit initiale (10 Brix) par rapport au produit finale (12,4 Brix).

#### IV.9. Rétrolavage

Rincer le circuit de filtration en alimentant le réservoir avec le perméat de la membrane et on rince la membrane pendant 30 min sous pression de 4 bars.

**Conclusion**

Cette étude a montré que :

- le prétraitement par un tamis de 0,01  $\mu\text{m}$  permet une clarification du jus d'orange et réduit la charge des pulpes et des croutes.
- la concentration affecte donc peu la membrane d'ultrafiltration (0,2  $\mu\text{m}$ ) au niveau des flux. Cette membrane retient faiblement les molécules de bas poids moléculaire. Celles-ci se retrouvent dans le perméat au bout de deux heures de filtration, le jus d'orange obtenu à une concentration en sucre de 12,4 Brix.

Donc l'ultrafiltration permet une amélioration de la qualité de jus d'orange sans applications des hautes températures qui influe sur la valeur nutritionnelle du jus.

## **Conclusion générale**

Lors de cette étude les performances du pilote d'ultrafiltration ont été étudiées sur des solutions d'eau distillée afin de fixer les paramètres d'utilisation du pilote à savoir une pression d'alimentation de 4 bars.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'exploitation de l'ultrafiltration dans le processus de dessalement d'eau de mer de Mostaganem par une étude de substitution de l'étape de microfiltration par l'ultrafiltration en utilisant 2 types de membrane dont le seuil de coupure est de 50 kD et 0,2  $\mu\text{m}$ .

Les résultats ont montré que La membrane de 50 kD présente de meilleurs résultats puisqu' elle donne une turbidité inférieure à 0,16 NTU (pour la microfiltration la turbidité est de 0,42 NTU), les matières en suspension inférieure à 0,1 mg/l (pour la microfiltration les matières en suspension sont de l'ordre de 1,4 mg/l).

D'autant plus que les cartouches de la microfiltration sont jetables après une durée de vie 6 mois par contre les modules d'ultrafiltration sont modulables et facilement nettoyés et une durée de vie de plus de 3 ans.

On pense que la méthode la plus adaptée comme prétraitement avant l'osmose inverse est l'ultra filtration.

Parmi les avantages importants de pilote d'ultrafiltration tels que la consommation de faible énergie, la souplesse de fonctionnement, la facilité d'automatisation et la température ambiante ou à proximité ambiante de fonctionnement. Nous ont orienté à utiliser l'ultrafiltration dans la concentration du jus. Le jus d'orange obtenu à une concentration en sucre de 12,4 Brix.

# *Annexes*

## Annexes

### Annexe 1 :

Les essais de filtration de l'eau pure pour les membranes à 50 KD et 0,2  $\mu\text{m}$  pour différent fréquence et pression ( Annexe A) d'entrée nous ont permis de comprendre les phénomènes de filtration du pilote et ces performances

**Tableau :** Testes de filtration de l'eau distillée sur une membrane de 50 KDa à différent pression transmembranaire

$\Delta P$ (bar)	t(min)	V (ml)	Q(ml/min)	Q moy (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	J moy (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	T(°C)
0,5	5	66	13,200	0,771	111,549	108,591	19,9
	10	130	13,000		109,859		21,2
	15	193	12,866		108,726		22,2
	20	255	12,750		107,746		23,1
	25	318	12,720		107,492		24,0
	30	379	12,633		106,757		24,8
1,5	5	115	23,000	1,367	194,366	192,535	23,8
	10	229	22,900		194,366		24,4
	15	342	22,800		194,366		25,1
	20	455	22,750		194,366		25,6
	25	567	22,680		194,366		26,2
	30	680	22,666		194,366		26,8
2,5	5	156	31,200	1,851	263,661	260,704	25,5
	10	310	31,000		261,971		26,1
	15	464	30,933		261,405		26,7
	20	616	30,800		260,281		27,3
	25	767	30,680		259,267		28,0
	30	916	30,533		258,025		28,5
3,5	5	200	40,000	2,379	338,028	335,070	24,5
	10	398	39,800		336,338		25,1
	15	596	39,733		335,771		25,7
	20	792	39,600		334,647		26,3
	25	987	39,480		333,633		26,9
	30	1180	39,333		332,391		27,5

## Annexes

$\Delta P$  : pression transmembranaire

$t$  : temps

$Q$  : débit de perméat

$Q_{\text{moy}}$ : débit moyen de perméat

$J$  : flux de perméat

$J_{\text{moy}}$  : flux moyen de perméat

$T$  : température

$V$  : volume

### Annexe 2 :

**Tableau :** Testes de filtration de l'eau distillée sur une membrane de 0,2  $\mu\text{m}$  à différent pression transmembranaire :

$\Delta P$ (bar)	$t$ (min)	$V$ (ml)	$Q$ (ml/min)	$Q_{\text{moy}}$ (L.h <sup>-1</sup> )	flux (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	flux moy (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	$T$ (°C)
1,25	5	610	122,000	7,288	275,187	273,984	24 ,5
	10	1216	121,600		274,285		24 ,7
	15	1820	121,333		273,683		24 ,9
	20	2420	121,000		272,932		25,0
1,75	5	650	130,000	7,770	293,233	292,105	25 ,1
	10	1295	129,500		292,105		25,3
	15	1941	129,400		291,879		25,5
	20	2582	129,100		291,203		25,7
2,75	5	750	150,000	8,976	338,345	337,443	25,9
	10	1497	149,700		337,669		26,2
	15	2242	149,460		337,127		26,4
	20	2985	149,250		336,654		26,6

## Annexes

### Annexe 3 :

**Tableau :** Testes de filtration de l'eau de mer sur une membrane de 50 KD

$\Delta P(\text{bar})$	t (min)	V (ml)	Q (ml/min)	Q moy (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	J moy (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	T(°C)
1,5	5	65	13,000	0,759	109,859	106,901	23 ,5
	10	129	12,900		109,014		24 ,1
	15	190	12,666		107,036		24 ,6
	20	252	12,600		106,478		25,2
	25	312	12,480		105,464		25,7
	30	370	12,333		104,222		26,2
2,5	5	82	16,400	0,959	138,591	135,169	24 ,0
	10	161	16,100		136,056		24 ,7
	15	240	16,000		135,211		25,2
	20	318	15,900		134,366		26,0
	25	396	15,840		133,859		26,6
	30	472	15,733		132,954		27,2
3,5	5	105	21,000	1,235	177,464	174,083	25 ,9
	10	207	20,700		174,929		26 ,6
	15	310	20,666		174,642		27,2
	20	412	20,600		174,084		27,9
	25	510	20,400		172,394		28,5
	30	607	20,233		170,983		29,1

**Annexe 4**

**Tableau :** Testes de filtration de l'eau de mer sur une membrane de 0,2 µm

$\Delta P$ (bar)	t (min)	V(ml)	Q (ml/min)	Q moy (L.h <sup>-1</sup> )	J (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	J moy (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> )	T(°C)
1,15	5	540	108,000	4,992	243,609	242,396	21,8
	10	1076	107,600		242,706		22,1
	15	1610	107,333		242,104		22,5
	20	2138	106,900		241,167		22,9
1,65	5	578	115,600	6,898	260,751	259,342	22,0
	10	1152	115,200		259,849		22,4
	15	1722	114,800		258,947		22,9
	20	2286	114,300		257,819		23,5
2,65	5	650	130,000	7,756	293,233	291,578	23,4
	10	1295	129,500		292,105		23,9
	15	1936	129,066		291,126		24,3
	20	2571	128,550		289,962		24,8



**Mode opératoire :**

- On met la membrane dans la cuve pendant 30 min
- Maitre la membrane dans le dessiccateur pendant 20 min
- Pesé la membrane sec  $m_1$
- On prendre 1 L de l'échantillon et à l'aide d'un pompe à vide on filtrant l'échantillon par la membrane
- On met la membrane dans la cuve pendant 1h
- Sortie et maitre la membrane dans le dessiccateur pendant 20 min
- Pesé la membrane  $m_2$

**Calcule :**

$$\text{MES} = (m_2 - m_1) * 1000 / 1$$

**La Dureté Totale (TH) :**La dureté totale d'une eau, encore appelée TH (abréviation de titre hydrotimétrique), exprime la teneur en sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau, c'est évalué en F°

**Equipement :**

- Burette 50ml
- Pipette
- Solution tampon PH=10
- Agitateur
- Eprouvette de 100ml
- Erlenmeyer 250ml
- Baro magnétique
- indicateur noir d'ériochrome T (NET).

**Mode opératoire :**

- Mesurer  $V_1 = 100$  ml d'échantillon. Si la valeur de l'alcalinité de l'échantillon est supérieure à 300 mg/l, on prendra une dilution de l'échantillon tel que l'alcalinité de celle-ci se situera sur des valeurs inférieures à 300mg/l.
- On fait une dilution de 1 ml de l'échantillon et remplir la fiole jusqu'à 100 ml avec l'eau distillé.
- Ajouter 08 ml de solution tampon PH=10, ainsi que 1 à 2 ml d'indicateur NET.
- Titrer avec EDTA 0.02N, jusqu'à que le virage de couleur apparait du mauve au bleu et ceci a la dernière goutte  $V_2$ .

**Calcule :**

$$\text{Dureté total} = N \text{ EDTA} \times V_2 \times 50.044 \times 1000 / V_1$$

**Dureté Calcique** : La dureté d'une eau est relative à sa concentration en cations  $\text{Ca}^{2+}$  et en  $\text{Mg}^{2+}$ . La dureté totale d'une eau est égale à la somme de sa dureté calcique et de sa dureté magnésienne. La dureté Calcique se rapporte aux ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$ .

### Equipement :

- Eprouvette de 100 ml
- Burette de 10mL
- Hydroxyde de sodium NaOH (1 N).
- Indicateur coloré murexide (0.2 %) en NaCl.
- Erlenmeyer 250 ml
- Baro magnétique
- Agitateur

### Mode opératoire :

- Prendre  $V_1$  100 ml d'échantillon dans un Erlenmeyer de 250 ml si la valeur de l'alcalinité est supérieur à 300 mg/l diluer jusqu'à avoir une alcalinité inférieure à 300 mg/l.
- On fait une dilution de 1 ml de l'échantillon et remplir la fiole jusqu'à 100 ml avec l'eau distillé.
- On ajoutera 04 ml de la solution de NaOH 1N
- Ajouté quelque goutte de murexide 0.2 %.
- Titrer avec l'EDTA (0.02N)  $V_2$  à la dernière goutte au virage de couleur qui passe du rose au violet.

Calcule

$$\text{Ca(mg/l)} = N \text{ EDTA(eq/l)} \times V_2 \times 20.04 \times 1000 / V_1$$

### Le Titre Alcalimétrique (TA)

Le titre alcalimétrique, mesure la totalité des ions  $\text{OH}^-$  et une valence de  $\text{CO}_3$ . C'est évalué en  $\text{F}^\circ$ .

### Equipement :

- Eprouvette de 50 ml
- Baro magnétique
- Agitateur
- Pipette
- Burette de 10ml
- Erlenmeyer de 250 ml
- Phénophtaléine

### Mode opératoire :

- On fait la dilution 10 ml d'échantillon et remplir la fiole jusqu'à 100 ml avec l'eau distillé
- Introduire dans un erlenmeyer 50ml d'eau à analyser
- Ajouter 05 gouttes de phénolphtaléine à 0.1%
- Titrer par le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 0.01N jusqu'à le virage de la couleur rose vers l'incolore

**Calcule**

$$\text{Le TA (F}^\circ\text{)} = V \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ versé} * 10$$

**Le TAC (F°)**

C'est le titre alcalimétrique complet, mesure la totalité des ions OH<sup>-</sup> et tous les carbonates CO<sub>3</sub> et les ions HCO<sub>3</sub>

**Equipement :**

- Eprouvette de 50 ml
- Baro magnétique
- Agitateur
- Indicateur mix
- Burette de 10ml
- Erlenmeyer de 250 ml
- Pipette

**Mode opératoire :**

- On fait la dilution 10 ml d'échantillon et remplir la fiole jusqu'à 100 ml avec l'eau distillé, Introduire dans un erlenmeyer 50ml d'eau à analyser
- Ajouter quelque goutte d'indicateur mix
- Titrer par le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 0.01N jusqu'à le virage de la couleur bleu vers la couleur vert

**Calcule**

$$\text{Le TAC (F}^\circ\text{)} = V \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ versé} * 10$$

- Noter la valeur de la conductivité dans le format correspondant
- Sortir la cellule ou l'électrode de l'échantillon, laver avec de l'eau distillée et sécher avec du papier, Laisser la cellule immergée dans de l'eau distillée si on va plus mesurer

**Annexes**

**Annexe A**

**I - les essais sur module plan à 10 KD à circuit fermé à La fréquence 10 Hz (à température ambiante 19 °C).**

Pression d'entrée 3 bars

pression de sortie 2.5 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	100 s	19.1	1	1.01 ml/s	3.636 l/h	J=Qm/S  137.269l/h.m <sup>2</sup>
200	97s	19.3	1.030			
300	100 s	19.4	1			

Pression d'entrée 3.5 bar

pression de sortie 3 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	89 s	20.9	1.123	1.123 ml/s	4.042 l/h	J=Qm/S  152.627l/h.m <sup>2</sup>
200	90s	21.1	1.111			
300	88 s	21.4	1.136			

Pression d'entrée 4 bars

pression de sortie 3,5 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	84 s	23.8	1.190	1.185ml/s	4.266 l/h	J=Qm/S  161.054l/h.m <sup>2</sup>
200	83s	28.9	1.204			
300	86 s	29	1.162			

**Les essais sur module plan a circuit fermer à La fréquence 30 Hz à température ambiante**

Pression d'entrée 3 bars

pression de sortie 2.5 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	95 s	24.6	1.052	1.034 ml/s	3.722 l/h	J=Qm/S  140.531l/h.m <sup>2</sup>
200	98s	24.8	1.020			
300	97 s	24.9	1.030			

## Annexes

Pression d'entrée 3.5 bar

pression de sortie 3bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	85 s	25.1	1.176	1.176 ml/s	4.233l/h	J=Qm/S  159.830l/h.m <sup>2</sup>
200	84s	25.2	1.190			
300	86 s	25.3	1.162			

Pression d'entrée 4 bars

Pression de sortie 3.5 bars

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	80s	25.5	1.250	1.271 ml/s	4.578 l/h	J=Qm/S  172.742
200	79s	25.6	1.265			
300	77 s	25.7	1.298			

**Les essais module plan a circuit fermer à La fréquence 50 Hz à température ambiante**

Pression d'entrée 3 bars

pression de sortie 2.5 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	93s	26	1.075	1.067 ml/s	3.841 l/h	J=Qm/S  145.016
200	96s	26.1	1.041			
300	92 s	26.2	1.086			

Pression d'entrée 3.5 bar

pression de sortie 3 bar

Volume (ml)	Temps (sec)	Température (°C)	Débit (ml/s)	Débit moyen (l/h)		Flux (l/h.m <sup>2</sup> )
100	82s	26.4	1.219	1.219 ml/s	4.388 l/h	J=Qm/S  165.675
200	83s	26.5	1.204			
300	81 s	26.6	1.234			

## Annexes

### 2<sup>ème</sup> essais module tubulaire boucle fermé à fréquence 10 Hz à température ambiante.

Pression d'entrée 2bar

pression de sortie 1bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	14min 01s	25.6	0,11 ml/s	15.49
200	28min12 s	25.8		
300	42min 10 s	25.9		

Pression d'entrée 3bar

pression de sortie 2bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	8min 26s	26.1	0,19ml/s	26.76
200	16min 52s	26.2		
300	25min 18 s	26.3		

Pression d'entrée 4bar

pression de sortie 3bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	5min 25s	26.4	0.30 ml/s	42,25
200	10min 50s	26.5		
300	16min 15 s	26.5		

### 2<sup>ème</sup> essais module tubulaire boucle fermé à fréquence 30 Hz à température ambiante.

Pression d'entrée 2bar

pression de sortie 1 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	8min 45s	26.7	0,19ml/s	26.76
200	17min 30s	26.7		
300	26min 15 s	26.8		

Pression d'entrée 3bar

pression de sortie 2 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	5min 3s	28	0,33ml/s	46.47
200	10min 6s	28.2		
300	15min 8 s	28.4		

Pression d'entrée 4bar

pression de sortie 3 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	3min 52s	28	0.43 ml/s	60,56
200	7min 45s	28.1		
300	11min 37 s	28.2		

## Annexes

---

### 2<sup>ème</sup> essais module tubulaire boucle fermé à fréquence 50 Hz à température ambiante.

Pression d'entrée 2bar

pression de sortie 1 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	7min 40s	28.3	0.21ml/s	29,57
200	15min 20s	28.4		
300	23min 05 s	28.5		

Pression d'entrée 3bar

Pression de sortie 2 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	4min 21s	28.7	0.38ml/s	53,52
200	8min 42s	28.8		
300	13min 03 s	28.9		

Pression d'entrée 4bar

pression de sortie 3 bar

Volume (ml)	Temps	Température	Débit moyen	Flux
100	3min 19s	29	0.50ml/s	70,42
200	6min 36s	29.1		
300	9min 58 s	29.2		

D'après les essais la meilleure fréquence est 50 Hz et pression de 4 bars.