

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des procédés et raffinage

Spécialité : Génie des procédés

Présenté par : MAZOUZI Aziza

BENAOUALI Imane

Thème

**Étude diagnostique de l'unité de
dessalement par osmose inverse de Djamaa**

Devant le jury composé de :

KAMARCHO Abbas

Examineur

LAMI Nassima

Examineur

BENKEZIM Lounes

Promoteur

2010-2011

Sommaire

Introduction	1
---------------------------	----------

Chapitre. I Intérêt du traitement des eaux

I.1. Généralités sur les traitements des eaux	2
I.2. Composition de l'eau	2
I.3. Différents impuretés présente dans l'eau	2
I.3.1. Matières solides en suspension	2
I.3.2. Matières en émulsion	2
I.3.3. Matières colloïdales	2
I.3.4. Matières organiques dissoutes	3
I.3.5. Matières minérales dissoutes	3
I.3.6. Gaz Dissous	3
I.3.7. Organismes vivants	3
I.4. Caractéristiques des différents types d'eau.....	3
➤ Eau de pluie	3
➤ Eau de surface	3
➤ Eaux souterraines	4
➤ Eau de mer	4
I.5. But du traitement des eaux	5
I.6. Importance du traitement des eaux.....	6
I.7. Filières de traitement	6

Chapitre. II Techniques des séparations membranaires

II.1. Généralités	7
II.2. Structure de la membrane	7
II.3. Matériaux de construction	7
II.4. Membranes de filtration	8
II.4.1. Notion de pression de filtration efficace	8
II.4.2. Polarisation de concentration	8
II.4.3. Colmatage	9
II.4.4. Solutions au phénomène	10

II.4.5. Etude des procédés de filtration	11
II.4.5.1. Configuration générale	11
II.4.5.2. Microfiltration	11
II.4.5.3. Ultrafiltration	12
II.4.5.4. Nanofiltration	12
II.4.5.5. Osmose inverse	12
II.5. Membranes d'osmose inverse	13
II.5.1. Matériaux membranaires	13
II.5.1.1. Membranes asymétrique.....	13
II.5.1.2. Membranes en acétate de cellulose.....	13
II.5.1.3. Membranes en polyamide.....	14
II.5.1.4. Membranes en polysulfone.....	15
II.5.1.5. Membranes composites.....	16
II.5.1.6. Performance des membranes commercial.....	17
II.5.8. Résistance au PH, à la température et au chlore.....	18
II.5.9. Durée de vie des membranes.....	19
II.5.2. Modules d'osmose inverse	20
II.5.2.1. Modules tubulaires	20
II.5.2.2. Modules fibres creuses	21
II.5.2.3. Modules plans	22
II.5.2.4. Modules spirales	22

Chapitre. III Osmose inverse

III.1. Définition	24
III.2. Principe	24
III.3. Applications de l'osmose inverse	25
III.4. Schéma général d'une installation d'osmose inverse.....	26
III.5. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse	27
III.6. Mécanisme de transfert	28
III.7. Conditions de fonctionnement	29
III.7.1. choix du type de procédé.....	29
III.7.2. La pression.....	32
III.7.3. La température.....	33

III.7.4. surface d'échange.....	33
III.7.5. Le PH.....	33
III.7.6. Turbidité.....	33
III.7.7. Vitesse 'alimentation.....	33
III.8. Consommation d'énergie ...	34
III.9. Récupération d'énergie	34
III.10. Avantage d'osmose inverse	36

Chapitre. IV Données de base sur la région d'étude

IV.1. Présentation de la ville de Djamaa.....	37
IV.1.1. Situation géographique.....	37
IV.1.2. Hydrologie.....	37
IV.1.3. Climat.....	38
IV.2. Ressource en eau de la Djamaa.....	39
IV.3. Réseau de distribution.....	40
IV.4. Evaluation des débits d'eau potable.....	40
IV.4.1. Estimation de la population.....	40
IV.4.2. Calcul de débit de consommation.....	41
IV.5. La microfiltration.....	43
IV.6. Les prétraitement chimiques.....	44
IV.6. Poste de traitement	42
IV.7. la pompe HP et augmentation de pression pour l'osmose inverse.....	45
IV.8. l' osmoseur organigramme de la station Djamaa.....	46

Chapitre. V Partie expérimentale

V.1. Résultats et interprétations.....	47
V.2. Analyses physico-chimiques	49

Conclusion	60
-------------------------	-----------

Références bibliographiques...

Annexe

Liste des tableaux

N° de tableau	Titre	page
Tableau I.1	Concentration des principaux ions dans les eaux de mer	05
Tableau II.1	Différentes épaisseurs des membranaire composites	16
Tableau II.2	Ordre de grandeur des perméabilités et des débits spécifiques des membranes planes ou spirales d'osmose inverse	18
Tableau II.3	Résistance au PH et à la température	18
Tableau IV.1	forages d'eau de la ville Djamaa	40
Tableau IV.2	Caractéristiques techniques des filtres à sable	42
Tableau IV.3	Caractéristiques techniques des microfiltres	44
Tableau V.1	Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau brut	48
Tableau V.2	Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée	49

Liste des figures

N° de figure	Titre	page
Figure n°3	Principe de base de filtration membranaire	08
figure n°4	Phénomène de polarisation de concentration	09
Figure n°5	Différent type de colmatage	10
Figure n°6	Comparaison entre filtration frontale (ou classique) et filtration tangentielle	10
Figure n°7	Schéma de principe d'une boucle ouverte ou formée	11
Figure n°8	Structure d'une membrane asymétrique	13
Figure n°9	Différentes formules de l'acétate de cellulose	14
Figure n°10	Différentes formules du polyamide	15
Figure n°11	Polyamide	15
Figure n°12	Principe d'une membranaire d'osmose inverse composite	16
Figure n°13	Membrane dynamiquement formée	17
Figure n°14	Résistance des Différente membranaire au chlore	18
Figure n°15	Evolution des performances d'une membrane d'osmose inverse au cours du temps	19
Figure n°16	Schéma de principe d'un module tubulaire	21
Figure n°17	Schéma de principe d'un module à fibres creuses	21
Figure n°18	Modules d'osmose inverse plans	22
figure n°19	Schéma d'un module spirale	23
Figure n°20	Phénomène d'osmose inverse	24
Figure n°21	Unité alimentaire d' osmose inverse	26
Figure n°22	Influence de la pression sur le taux de rejet	27
Figure n°23	Influence de la pression sur le flux du solvant à travers la membrane	28
Figure n°24	Influence de la pression sur le flux de sel à travers la membrane	29
Figure n°25	Système en discontinu	29
Figure n°26	Système en semi continu	30
Figure n°27	Système en continu	30
Figure n°28	Montage en parallèle	31
Figure n°29	Montage série-rejet	32
Figure n°30	Schéma de principe de récupération d'énergie par turbine	34
Figure n°31	Turbine PELTON utilisée en récupération d'énergie sur une unité d'osmose inverse	35
Figure IV.1	Filtres à sables	42
Figure IV.2	Micro filtre	44
Figure IV.3	Cartouches des microfiltres saturées	44
Figure IV.4	Pompe HP	46
Figure IV.5	Les modules d' osmose inverse	46

Liste des figures

	Titre	Page
Figure II.1	Principe de base de filtration membranaire	08
Figure II.2	Phénomène de polarisation de concentration	09
Figure II.3	Différents types de colmatage	10
Figure II.4	Comparaison entre filtration frontale (ou classique) et filtration tangentielle	10
Figure II.5	Schéma de principe d'une boucle ouverte ou fermée	11
Figure II.6	Structure d'une membrane asymétrique	13
Figure II.7	Différentes formules de l'acétate de cellulose	14
Figure II.8	Différentes formules du polyamide	15
Figure II.9	Polysulfone	15
Figure II.10	Principe d'une membrane d'osmose inverse composite	16
Figure II.11	Membrane dynamiquement formée	17
Figure II.12	Résistance des différentes membranes au chlore.	18
Figure II.13	Evolution des performances d'une membrane d'osmose inverse au cours du temps.	19
Figure II.14	Schéma de principe d'un module tubulaire	21
Figure II.15	Schéma de principe d'un module à fibres creuses	21
Figure II.16	Modules d'osmose inverse plans	22
Figure II.17	Schéma d'un module spirale.	23
Figure III.1	Phénomène d'osmose inverse	24
Figure III.2	Unité alimentaire d'osmose inverse	26
Figure III.3	influence de la pression sur le taux de rejet	27
Figure III.4	influence de la pression sur le flux du solvant à travers la membrane	28
Figure III.5	influence de la pression sur le flux de sel à travers la membrane	29
Figure III.6	Système en discontinu	29
Figure III.7	Système en semi continu	30
Figure III.8	Système en continu	30
Figure III.9	Montage en parallèle	31
Figure III.10	montage série –rejet	32
Figure III.11	Schéma de principe de récupération d'énergie par turbine	34
Figure III.12	Turbine PELTON utilisée en récupération d'énergie sur une unité d'osmose inverse	35
Figure IV.1	Filtres à sables	42
Figure IV.2	Micro filtre	44
Figure IV.3	Cartouches des microfiltres saturées	44
Figure IV.4	Pompe HP	45
Figure IV.5	Les modules d'osmose inverse	46

Introduction

La disponibilité de l'eau est synonyme de vie. L'homme commence à se rendre compte qu'il faut ménager ce capital aussi indispensable que l'air pour le maintien de cette vie. L'importance de l'eau dans l'économie humaine ne cesse de croître et l'approvisionnement en eau douce devient ainsi de plus en plus difficile.

Des techniques industrielles se sont développées rapidement en raison de l'accroissement de la population et sont niveau de vie, sous la pression des besoins considérables de la civilisation moderne. On est passé de l'emploi des eaux des sources et des nappes à une utilisation de plus en plus poussée des eaux de surface, parallèlement se sont développées des recherches sur les méthodes de recyclage. Actuellement on se préoccupe de plus en plus au dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres.

Pour l'Algérie, le dessalement de l'eau de mer est une alternative inscrite et au registre des questions stratégiques pour le futur. Cette option est susceptible d'offrir de l'eau potable dans des conditions économiques et écologiques acceptables pour la population de la bande côtière du pays.

Dans cette étude on se propose d'étudier le dessalement des eaux de mer par osmose inverse dans la station de dessalement des eaux de mer de Corso dont le but est la production d'une eau de consommation. Nous sommes basés essentiellement sur l'optimisation de l'installation de l'osmose inverse ; d'une part sur une étude analytique de la teneur du rejet en sels dissous, et d'autre part, on s'est intéressé à l'optimisation du débit et de la pression.

I. Intérêt du traitement des eaux

I.1. Généralités sur les traitements des eaux :

Le traitement des eaux a pour but l'élimination plus ou moins poussée des éléments étrangers présents dans une eau et qui en fonction des besoins.

I.2. Composition de l'eau :

L'eau est le constituant terrestre le plus caractérisé, elle a permis l'apparition de la vie. Et lui indispensable chimiquement l'eau est un mélange d'oxyde d'hydrogène et d'oxyde de deutérium, ce dernier est d'une proportion infinie, c'est la raison pour laquelle une eau pure est définie comme un mélange isotopique d'oxyde d'hydrogène et d'oxyde de deutérium.

L'eau dont nous disposons dans la nature n'est pas suffisamment pure, sauf dans des rares cas, lors de sa circulation dans le sol et la surface de la terre. L'eau pure est dite de propriétés exceptionnelles qui la rendent responsable de nombreux phénomènes dans le globe. Une des principales propriétés de l'eau à l'état liquide est son pouvoir solvant élevé vis à vis des éléments minéraux, organiques et des gaz.

Lorsque après évaporation à la surface des océans, l'eau sous forme de vapeur, est d'une très grande pureté. En se condensant dans les couches froides de l'atmosphère, de son apparition sous forme de fines gouttelettes nuages, l'eau perd la pureté qu'elle avait sous forme de vapeur pour devenir une solution diluée de gaz. Les substances présentes dans l'eau peuvent faire l'objet de diverses classifications. [1]

I.3. Différentes impuretés présentes dans l'eau :

I.3.1. Matières solides en suspension :

Généralement ils sont visibles à l'œil nu car ils déterminent la turbidité de l'eau. Les matières solides sont pratiquement séparées par la technique de filtration.

I.3.2. Matières en émulsion :

Ce sont des matières insolubles, présents sous forme de fines gouttelettes réparties de façon uniforme dans l'eau, la présence de ces matières confère à l'eau un aspect laiteux, les émulsions sont plus ou moins stables.

I.3.3. Matières colloïdales :

Ce sont très fines particules des matières solides, d'origines minérales ou organiques. On peut dire d'une façon simple qu'il s'agit de très petites particules solides

invisibles à l'œil nu examen direct. Pratiquement ces matières ne sont pas séparées par décantation ni par filtration, pour leur élimination il est nécessaire de neutraliser au préalable charges électriques et les rassembler en particules peu grosses décantables et filtrables par agents des produits dits coagulants.

I.3.4. Matières organiques dissoutes :

Elles proviennent des rejets urbains et Industriels et des solutions, par l'eau des pluies, des végétaux et des animaux décomposés. Ces matières ont à l'origine de couleur, d'odeur et des mauvais goûts, certaines d'eux ont un caractère toxique.

I.3.5. Matières minérales dissoutes :

De nombreuses substances minérales dissoutes proviennent, pour Leurs plus grandes majorités, des roches avec laquelle l'eau a été en contact au cours de son cheminement dans la nature toute fois, pour certains, les chlorures de nitrate par exemple, leur origine se trouve dans les polluants urbains, industriels et agricoles.

I.3.6. Gaz Dissous :

Ils présents dans les eaux en deux origines :

- 1 - Les gaz de l'atmosphère (azotes, oxygène, ammoniaque, hydrogène, sulfure) ;
- 2 - La présence du CO₂ rend l'eau agressive. D'autres impuretés accidentelles ou des solutions que l'eau peut charger avec, comme les pluies, elles sont chargées des poussières, des fumés industriels et des gaz volcaniques.

I.3.7. Organismes vivants :

L'eau est non seulement un des constituants des cellules mais le milieu dans lequel ces cellules peuvent puiser les substances indispensables à leur croissance et leur production.

Des réactions chimiques d'échange interviennent sont de diverses natures (phot synthèse, oxydoréduction minérales oxydoréduction organique). [1] [2]

I.4. Caractéristiques des différents types d'eau :

➤ Eau de pluie :

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine .Elles sont saturées d'oxygène et d'azote et elles ne contiennent pas des sels dissous tel que le magnésium et le calcium, elles sont donc très douces.

➤ Eau de surface :

On distingue trois catégories d'eau de surface :

• **Eau de rivière (partie amont) :** L'amont d'une rivière est en général situé dans une région montagneuse, où la densité populaire est faible. Les principales caractéristiques sont :

1. Turbidité élevée ;
2. Contamination bactérienne faible ;
3. Température moyenne ;
4. Indice de couleur faible.

• **Eau de rivière (partie aval) :** L'aval d'une rivière est en général situé dans une région où la population est dense et leur principales caractéristiques sont :

1. Contamination bactérienne élevée ;
2. Contamination organique et inorganique élevée ;
3. Indice de couleur élevée.

• **Eau de lac :** on peut considérer un lac comme un bassin naturel de décantation dont la période de rétention longue .les caractéristiques de cette eau sont :

1. Turbidité faible ;
2. Contamination bactérienne peu importante.

Ces caractéristiques varient très lentement au cours de l'année.

➤ **Eaux souterraines :**

Les eaux souterraines, enfouissant dans le sol, sont habituellement à l'abri des sources de pollution, puisque les caractéristiques de ces eaux varient très peu dans le temps.

Les caractéristiques de ces eaux souterraines sont :

1. Contamination bactérienne faible ;
2. Température constante ;
3. Débit constant ;
4. Turbidité faible ;
5. Concentration de fer et de manganèse élevée ;
6. Dureté élevée ;
7. Indice de couleur faible.

➤ **Eau de mer :**

Les eaux de mer sont une source d'eau brute qu'on n'utilise que lorsque il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mer sont caractérisées par leur concentration en sels dissous. La salinité de la plus part des eaux de mer est de 33000 à 37000mg /l. [2]

Tableau 1.1 : concentration des principaux ions dans les eaux de mer

Ions		Salinité mg/ l
Anions	Chlorures (Cl^-)	18,98
	Sulfates (SO_4^{2-})	2,65
	Bicarbonates (HCO_3^-)	0,140
Cations	Sodium (Na^+)	10,56
	Magnésium (Mg^{++})	1,27
	Calcium (Ca^{++})	0,14

I.5. But du traitement des eaux :

Le traitement des eaux en ses points d'utilisation a connu, ces dernier années, le profond changement associé à une importante évolution technologique dans de nombreux secteurs d'activités. Une chaîne de traitement se fait en fonction de la nature des polluants à éliminer et des objectifs de qualité recherchés.

Les principales opérations unitaires mise en œuvre font appelle à des procédés mécaniques, physiques, chimiques, biologiques et biochimiques.

Dans tous les cas, l'eau mise à disposition du consommateur dans le réseau de distribution doit être traitée, même si l'homme ne consomme directement qu'une très faible proportion. Il est en effet dangereux pour la santé et économiquement prohibitif d'envisager un double réseau de distribution. L'un des réseaux distribuant l'eau destinée à la consommation et l'autre réseau distribuant l'eau destinée en autres usages.

Quelque soit l'usage que fera le consommateur, l'eau arrivant au robinet de se consommateur doit être potable ; c'est-à-dire répondre à la réglementation en vigueur. Il est nécessaire de traiter l'eau chaque fois que l'un des paramètres analytiques est supérieur aux normes de potabilité. L'OMS (organisations mondiale de la santé) établit pour chaque paramètre des recommandations, qui doivent être adapter dans chaque pays, en fonction de l'état sanitaire et des considérations économiques de ce pays pour aboutir aux normes réglementaires nationales. [3]

I.6. Importance du traitement des eaux :

L'organisation des nations unies (ONU) a déclaré les années 1981 à 1990 la décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement. L'ONU s'est fixé pour objectif l'approvisionnement en eau pure et l'assignement pour tous les individus de la planète en 1990. Ce qui constitue une entreprise de taille.

L'OMS et la banque mondiale estimaient qu'il faudrait investir au départ de 300 à 600 milliard de dollars américains pour atteindre cet objectif.

L'ONU espère ainsi améliorer les conditions de vie d'environ 2 milliards de personnes.

Ces Organisations donnent cette importance pour le traitement des eaux pour éviter les problèmes de pollution tels que les maladies. [2]

I.7. Filières de traitement :

Le choix de l'eau à traiter avant distribution dépend de plusieurs facteurs pour chacune des ressources dont on dispose (eaux souterraine, eau de surfaces courante ou stockée) on évalue :

- La qualité de la source ;
- La qualité de l'eau brute ;
- L'économie ;
- Les qualités requises pour les besoins. [2]

II. Importance des techniques de séparation membranaire

II.1. Généralités :

Est appelée membrane tout matériaux qui mis sous la forme de paroi mince, d'épaisseur compris entre 0,05 et 2 mm, a la propriété d'opposer une résistance sélective au transfert des constituants d'un fluide, et donc de permettre la séparation de certains des éléments (suspension, solutés ou solvant) composants ce fluide.

Les procédés de séparation par membranes sont connus depuis une certaine d'années, il a fallu, tout fois, atteindre les années 60 pour voir, avec le développement des membranes synthétiques, la concentration industrielle de ces techniques.

Depuis les années 70 ces procédés de séparation ont connu un développement considérable au nombre de membranes développées puis mise sur le marché. Leur performance a donc un potentiel d'applications industrielles aussi bien dans le traitement des eaux que celui d'autres fluides. [3]

II.2. Structure de la membrane :

C'est une paroi mince, liquide ou solide qui oppose une résistance sélective au transfert des différents constituants d'un fluide. Elle possède donc la propriété de séparer sélectivement les espèces chimiques moléculaires ou ioniques. Dans ce chapitre, on ne traitera que des membranes semi-perméables. [4]

II.3. Matériaux de construction :

Les membranes sont fabriquées avec des matériaux organiques ou minéraux. Les premières membranes organiques ont été réalisées à partir des dérivées cellulose et des polyamides aromatiques. Leur méthode de fabrication est basée sur un mélange de polymère et de solvant. L'évaporation de ce collodion permet de distinguer des zones riches en polymère donnant la membrane et des zones creuses donnant les pores. Les membranes organiques sont assez sensibles au PH acide et aux fortes températures.

Les membranes minérales sont mises en forme par frittage. Ce procédé consiste en une agglomération de poudre minérale sous l'action conjuguée de la pression et de la température. La mise en place des couches successives de poudre de granulométrie décroissante règle la taille des pores à la valeur désirée. Les matériaux utilisés sont l'alumine, l'oxyde de titane et l'oxyde de zirconium (zircone). [4]

II.4. Membranes de filtration :

II.4.1. Notion de pression de filtration efficace :

La séparation des composés de l'eau peut se faire sous l'influence d'un potentiel chimique, électrique ou d'une pression hydraulique. Dans le traitement des eaux, ce dernier procédé est le plus répandu.

La pompe assure la mise sous pression de l'alimentation notée P_a et la circulation le long de la membrane.

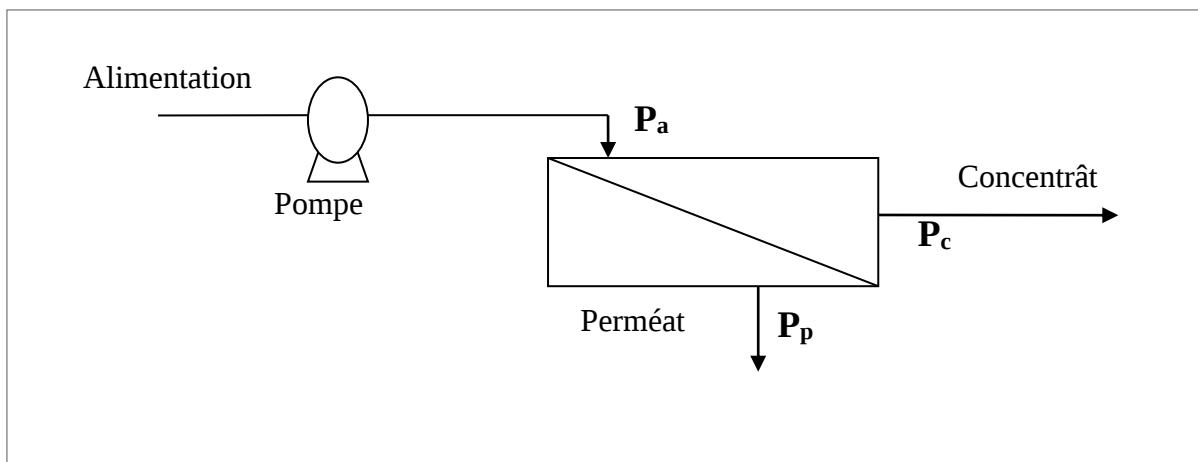


Figure II.1 : Principe de base de filtration membranaire

L'eau à traiter a donc l'énergie nécessaire pour assurer son passage sélectif. La pression de filtration s'exerce de part et d'autre de la membrane. C'est la pression transmembranaire notée P_{tmb} . La pression du perméat est notée P_p , celle du concentrât P_c , la perte de charge J du module est égale à $P_a - P_c$.

L'expression de P_{tmb} est $\frac{P_a + P_c}{2} - P_p$. Dans cette formule, on considère que la pression moyenne s'exerçant en tout point de la membrane est donnée par la fraction, il s'agit d'une approximation. Le choix de la pompe et le réglage de la vanne fixent indépendamment la pression et le taux de conversion. [5]

II.4.2. Polarisation de concentration :

Les membranes utilisées ayant la propriété d'effectuer des séparations à l'échelle moléculaire, il va y avoir accumulation progressive des espèces arrêtées à la surface de la membrane. C'est le phénomène de polarisation de concentration. Lors de la filtration, les solutés sont retenus à la surface de la membrane, leur concentration augmente, un gradient se crée et entraîne une rétrodiffusion des molécules loin de la membrane.

La polarisation est un phénomène réversible qui disparaît si le transfert est annulé.

Les conséquences du phénomène de polarisation de concentration sont les suivantes :

- Diminution du flux de perméat ;
- Diminution de la sélectivité ;
- Colmatage dû à des précipitations. [4]

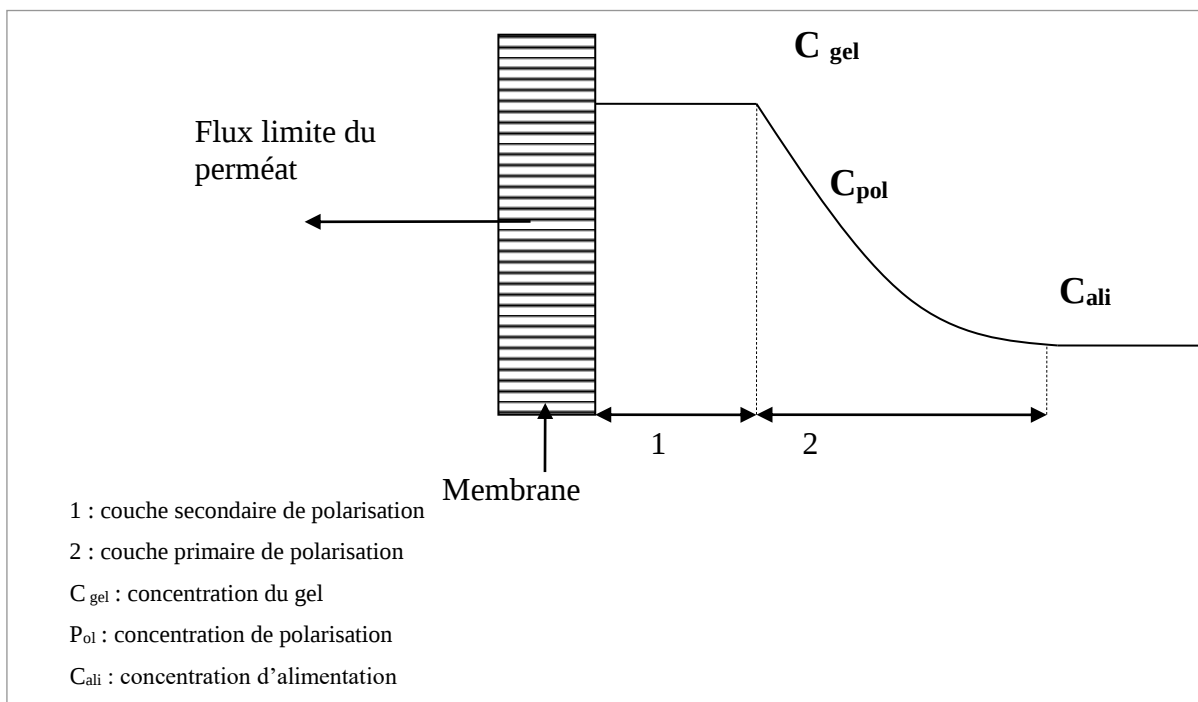


Figure II.2 : Phénomène de polarisation de concentration

II.4.3. Colmatage :

Les particules retenues en amont de la membrane provoquent un colmatage progressif des pores. Il existe plusieurs formes de colmatage.

Les particules finissent généralement par former un gâteau assimilable à une deuxième membrane. Le flux de perméat devient donc nul.

On distingue deux types de colmatage en terme de conséquence sur le flux de perméat. Le colmatage réversible est dû à l'accumulation des particules sur la face amont de la membrane. Le colmatage irréversible est la conséquence du dépôt des matières minérales et organiques au niveau des pores. [4]

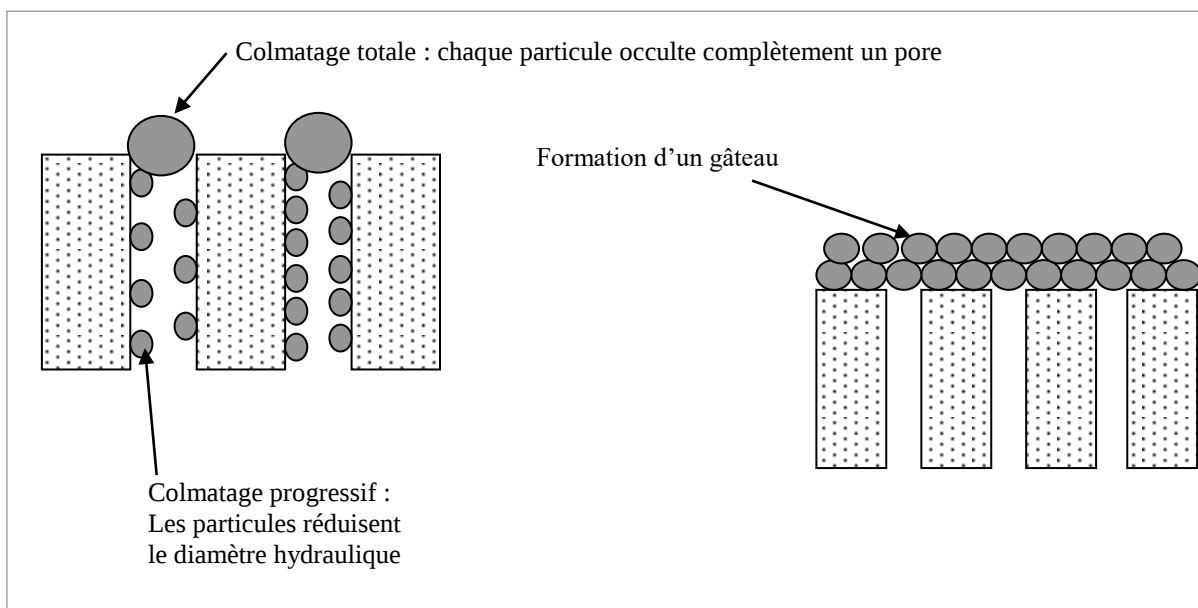


Figure II.3: Différents types de colmatage

II.4.4. Solutions au phénomène :

L'écoulement de l'eau à traiter doit être tangentiel et non pas frontal. Il permet un balayage de la face amont de la membrane pour limiter l'épaisseur de la couche limite de polarisation et facilite la rétrodiffusion des solutés. En même temps, l'eau évacue le gâteau de façon continue avec le rejet. Cet écoulement tangentiel nécessite une certaine vitesse de l'eau spécifique à chaque procédé.

Le rétrolavage à l'eau ou à l'air permet de décolmater les pores. La pression du rétrolavage est supérieure à la pression du service. Les procédures de décolmatage sont différentes selon qu'il s'agit de colmatage réversible ou irréversible. [4]

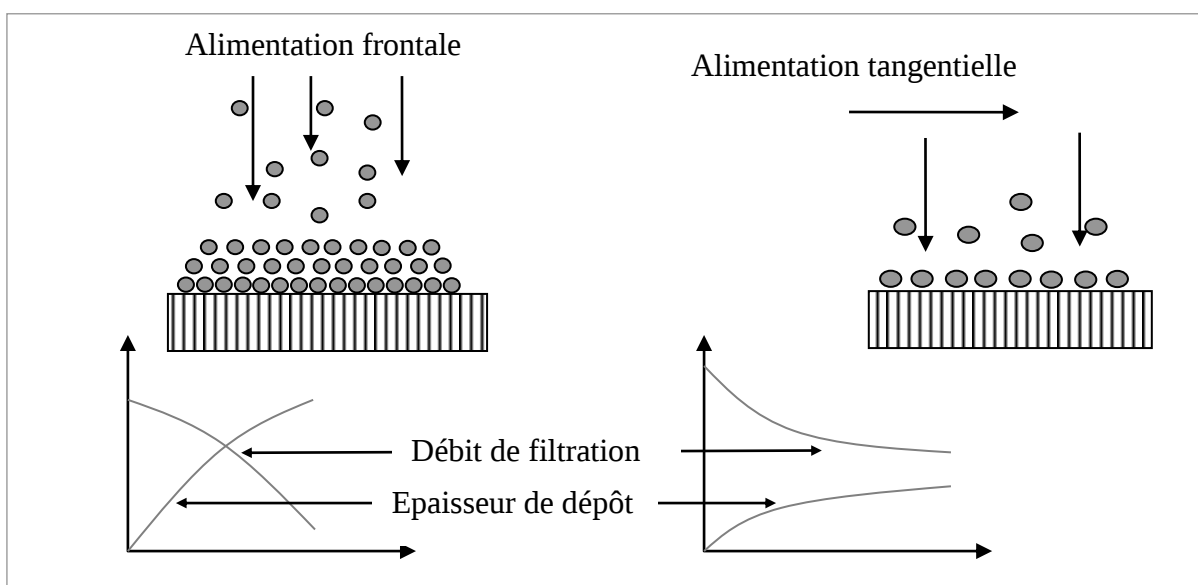


Figure II.4 : Comparaison entre filtration frontale (ou classique) et filtration tangentielle

II.4.5. Etude des procédés de filtration :

II.4.5.1. Configuration générale :

Le taux de conversion est limité. Par exemple, les valeurs obtenues pour l'ultra et la microfiltration sont de 15% maximum. L'une des voies d'optimisation du procédé consiste à recirculer le volume normalement éliminé. Le concentrât au lieu d'être rejeté est ramené au niveau de l'alimentation est retraité. Du mode de filtration à simple passage, on obtient une filtration tangentielle avec boucle de récirculation ou boucle de concentration.

En mode industriel, le système à boucle fermée est le seul utilisé. La pompe de circulation assure le balayage de la membrane ; et celle de gavage ; introduit le fluide à traiter à un débit égale à celui du perméat. L'énergie nécessaire à la mise en oeuvre de procédé est relativement réduite. [4]

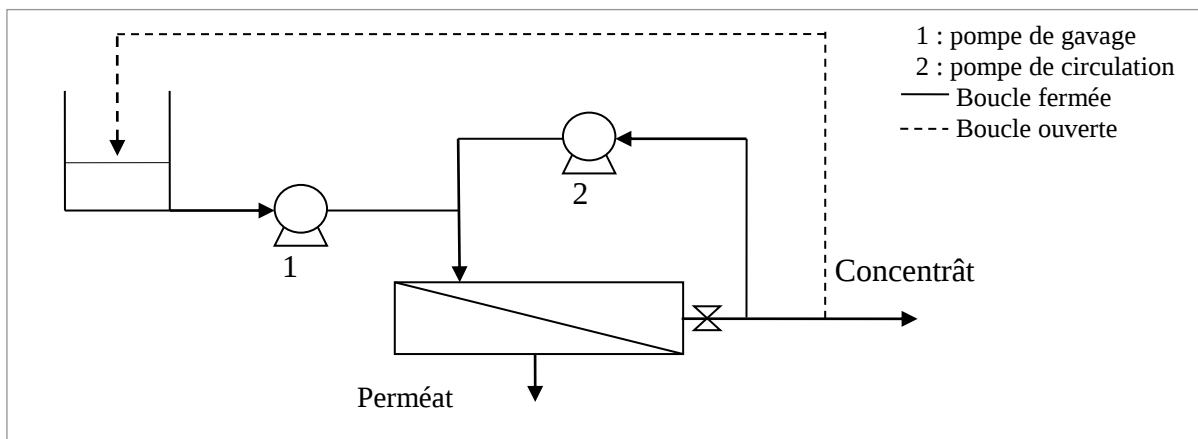


Figure II.5 : Schéma de principe d'une boucle ouverte ou fermée

II.4.5.2. Microfiltration :

La microfiltration atteint le domaine des particules en suspension de diamètre supérieur à 20 nm. Les matières en suspension, les colloïdes et les bactéries sont rejetés. Lors de la séparation, la composition physicochimique de l'eau demeure échangée. Les ions n'étant pas retenus, il n'y a aucun phénomène de concentration par polarisation ni de différentiel de pression osmotique. Seuls les processus de colmatage interne des pores et par accumulation de gâteau existant. Une pression de filtration comprise entre 0,5 et 0,3 bars, un flux de l'ordre de 0,2 à 0,45 m³/hm² et une vitesse de l'eau d'environ 3 m/s sont les paramètres moyens de fonctionnement.

La microfiltration est utilisée pour le traitement des eaux de surfaces exemptes de micropollution et à titre de prétraitement des chaînes d'ultrafiltration et d'osmose inverse. [4]

II.4.5.3. Ultrafiltration :

La porosité de la membrane est comprise entre 0,5 et 0,002 μm . la pression de service est en moyenne de 0,5 à 3 bars et la vitesse tangentielle de l'eau est 1 m/s. les ions sont en partie retenus en amont de la membrane, ce qui provoque une polarisation de concentration et un colmatage.

L'ultrafiltration permet la rétention de la totalité des particules en suspension, des colloïdes et des microorganismes, y compris les virus.

Comme la microfiltration l'ultrafiltration n'élimine pas les micropolluants organiques, ce procédé peut être utilisé seul ou en association avec le charbon actif en poudre. [4]

II.4.5.4. Nanofiltration :

On définit la nanofiltration pour les membranes qui ont un seuil de coupure en masse molaire de 250 daltons pour les molécules organiques. Ce seuil correspond à l'existence hypothétique des pores d'un diamètre proche de 1 nm. La pression de service est de 8 bars, le taux de conversion Y est environ 85%. L'eau filtrée à sable subit un double prétraitement chimique et physique. Un réactif est injecté pour éviter la précipitation des ions sulfates qui pourraient colmater de manière irréversible les membranes. [4]

II.4.5.5. Osmose inverse :

Il permet d'éliminer quasiment tout composé de l'eau en effet le passage global en sels est très faible, en conséquence la polarisation de concentration est forte, la filtration tangentielle limite ce phénomène, mais la fraction d'eau dessalée est amoindrie. La pression est compris entre 15 et 80 bars. Les membranes généralement utilisées sont en polyamide non biodégradable de porosité 0,2 nm, les prétraitements peuvent être, dans certains cas, très poussés pour éviter toute détérioration de la membrane. [4]

II.5. Membranes d'osmose inverse :

II.5.1. Matériaux membranaires :

II.5.1.1. Membranes asymétriques :

L'osmose inverse n'a pu se développer que grâce à la découverte vers 1960, d'un nouveau type de membranes à une structure anisotrope ou asymétrique. Une telle membrane, examinée en section transversale au microscope électrique, est constituée de deux couches superposées :

- Une sous-couche de 100 à 200 micromètres d'épaisseur et de texture relativement poreuse ;
- Une peau de très fine épaisseur (de 0,1 à 1,5 micromètres).

Les propriétés de séparation de la membrane (perméabilité, sélectivité) dépendent uniquement de la structure de cette peau. En particulier, la perméabilité d'une membrane étant inversement proportionnelle à son épaisseur, il est aisé de comprendre que ces membranes auront des débits de perméat élevés. [5]

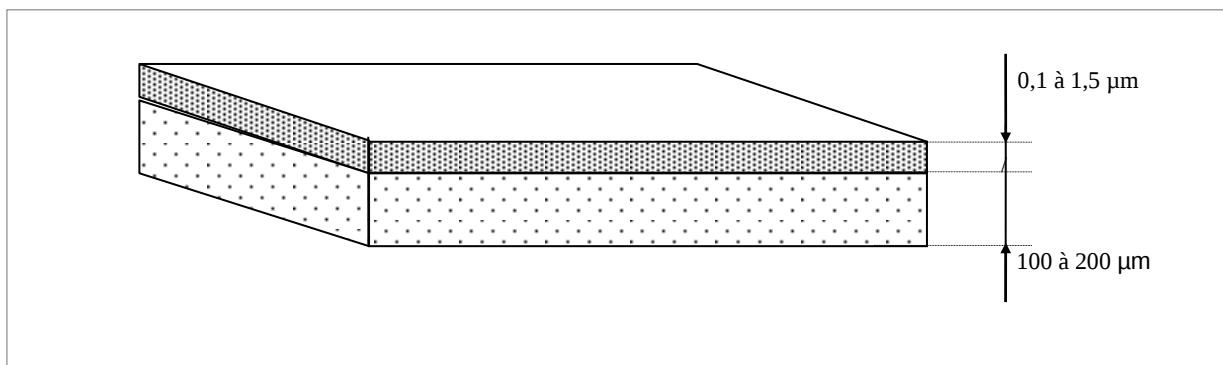


Figure II.6: Structure d'une membrane asymétrique

II.5.1.2. Membranes en acétate de cellulose :

Le matériel de base est la cellulose dont on remplace un ou plusieurs groupements hydroxyle par des groupements acétate. On peut ainsi obtenir soit le diacétate, soit le triacétate de cellulose. Notons toutefois qu'un polymère avec un degré de substitution 3 (DS=3) est assez rare et qu'on a coutume d'appeler triacétate de cellulose tout polymère d'acétate de cellulose ayant un degré de substitution supérieur à 2,75 soit une teneur en groupement acétyle supérieure à 42,3% (en poids).

Ce type de polymère est le plus ancien. C'est un effet vers 1957 qu'une équipe de chercheurs de l'Université de Californie à Los Angeles, étudiant la semi perméabilité des

films organiques vis-à-vis de solution aqueuse de chlorure de sodium, découvrit qu'un film d'acétate de cellulose, non traité, permettait d'obtenir avec une solution aqueuse de chlorure de sodium à 3,72%, sous une pression de 85,8 bar, un taux de rejet de 94,4% et un débit d'eau à travers la membrane de 1,22 l/m²/jour.

L'étape suivante, en 1960, fut la réalisation par LOEB S. et SOURRIRAJAN S. d'une membrane d'acétate de cellulose par la méthode d'inversion de phase, permettant d'obtenir un débit d'eau potable 5 l/h/m², sous une pression de fonctionnement de 103 à 137 bar, à partir d'eau de mer concentrée, contenant 5,25% de sel dissous.

Les membranes en acétate de cellulose ont à la fois, une perméabilité et une sélectivité très élevées ; leur matériel de base (cellulose) est très répandu et donc bon marché ; la mise en œuvre est relativement aisée et l'adsorption des protéines est faible d'où une tendance au colmatage moins élevée que pour d'autres matériaux. Par contre elles sont sensibles à la température (plus de 30°C), au PH acide ou basique, au chlore et aux microorganismes. [5]

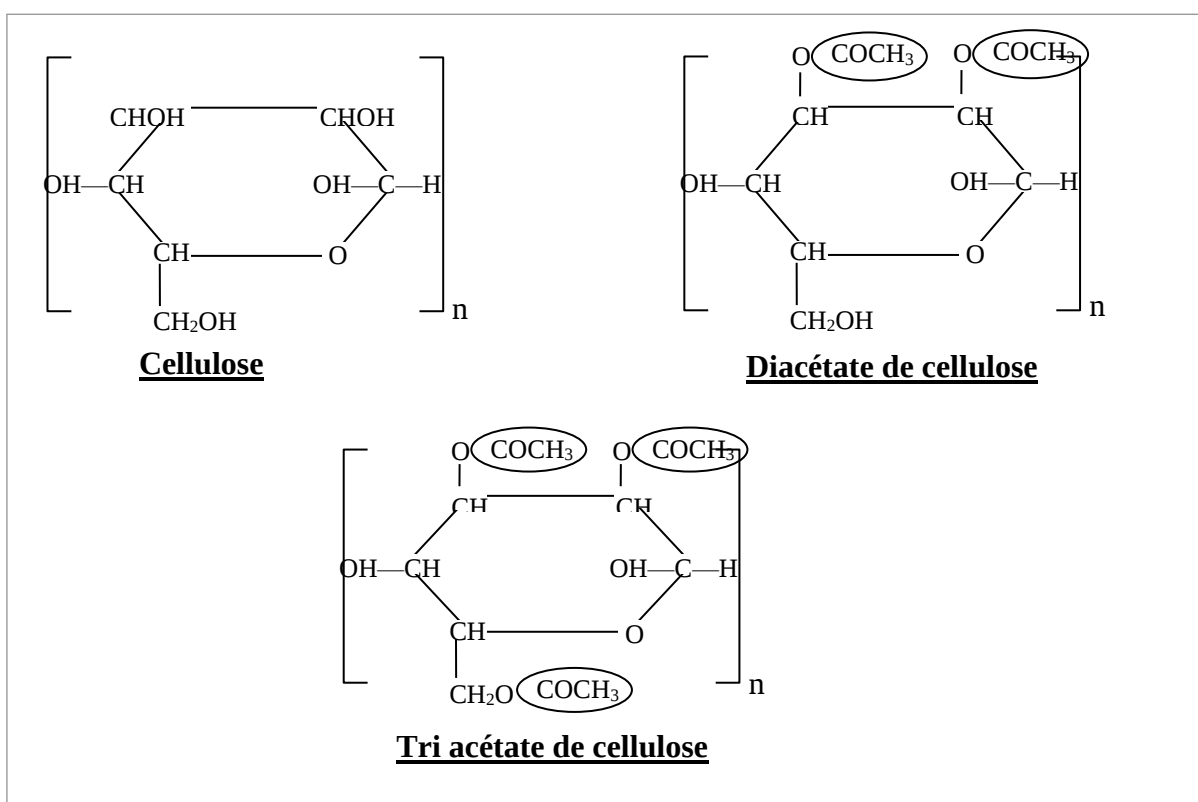


Figure II.7 : Différentes formules de l'acétate de cellulose

II.5.1.3. Membranes en polyamide :

Compte tenu des inconvénients de l'acétate de cellulose, des membranes de type polyamide ont été développées. Il existe plusieurs types de polymères caractérisés par une liaison amide (-CONH-) dans la chaîne.

Les membranes en polyamide les plus répandues sont commercialisées par DUPONT de NEMOURS sous forme de fibres creuses (B9 et B10). Les fibres creuses sont fabriquées en continu selon la technique de séparation des phases. Ce type de membranes a une bonne résistance mécanique et de bonnes stabilités chimique et thermique. Comme elles ont une très grande sensibilité aux oxydants ; une faible perméabilité et problèmes d'adsorption. [5]

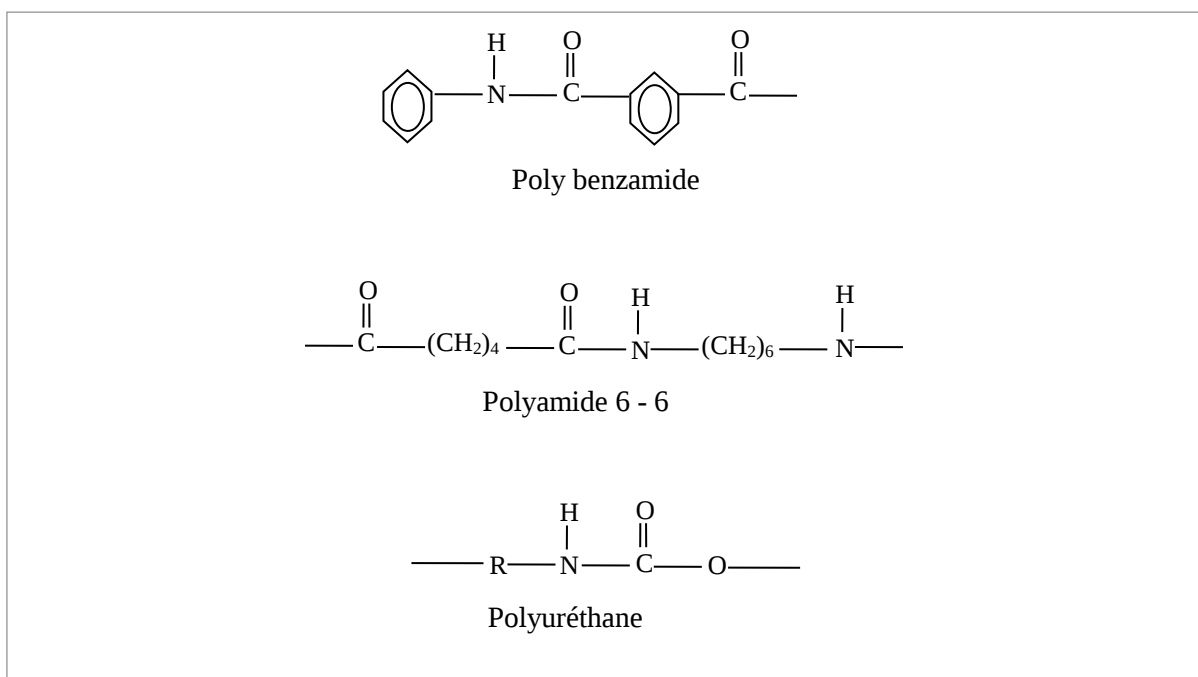
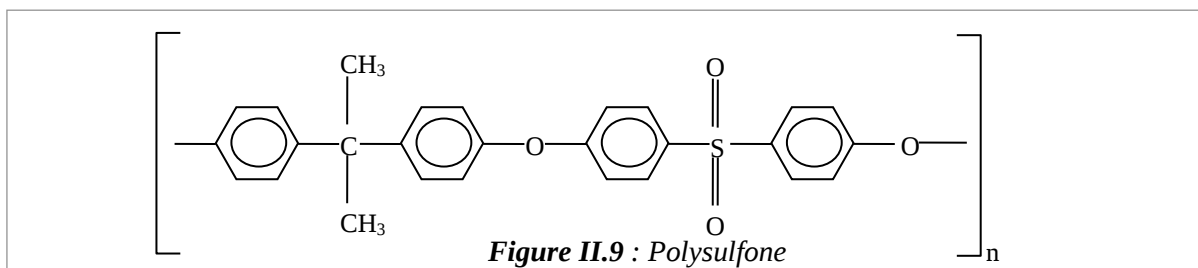


Figure II.8: Différentes formules du polyamide

II.5.1.4. Membranes en polysulfone :

Les premières membranes à base de polysulfone sont apparues au milieu des années 1970. Elles sont caractérisées par un groupement -SO₂- relativement stables relié à deux noyaux benzéniques. Elles ont bonne stabilité thermique (jusqu'à 75°C) ; bonne tenue en PH (1 à 13) et une bonne résistance au chlore. Mais elles sont sensibles au compactage et elles possèdent des problèmes d'adsorption en particulier de protéines. [5]



II.5.1.5. Membranes composites :

Les membranes composites sont apparues entre 1970 et 1980 et constituent un net progrès par rapport aux membranes classiques. Ce sont en effet des membranes asymétriques dont l'épaisseur de la « peau » est nettement plus fine que celle des membranes classiques de LOEB-SOURIRANJAN (facteur 10 environ) comme le montre le tableau :

Tableau II.1: différentes épaisseurs des membranes composites

Type de membrane	Epaisseur de la couche active
Membranes homogènes à pores capillaires (NUCLEPORE – MILLIPORE)	6 à 10 μm
Membranes asymétriques classiques (type LOEB-SOURIRAJAN)	0,1 à 1,5 μm
Membranes composites (type FILTEC FT 30)	0,01 à 0,1 μm

Elles sont constituées de deux couches de polymères qui sont presque toujours de composition chimique différente. Ceci les différencie des membranes asymétriques classiques qui sont constituées d'un seul polymère (acétate de cellulose par exemple).

Les membranes composites ont de très bonnes caractéristiques perméabilité/sélectivité et une bonne tenue en température (40 à 60°C), elles sont stables dans une gamme de PH élevé (2 à 11). contrairement elles ont mauvaise tenue au chlore.
[5]

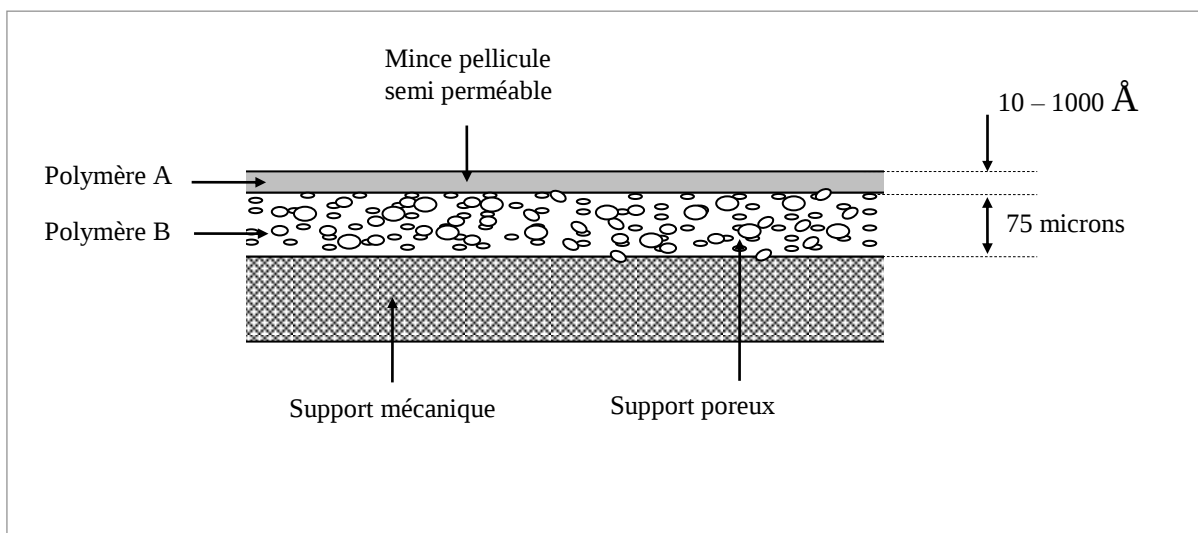


Figure II.10 : Principe d'une membrane d'osmose inverse composite

II.5.1.6. Membranes dynamiques :

Les membranes dites dynamiques, ou dynamiquement formées, sont fabriquées in situ par l'utilisateur à partir des tubes poreux en acier inoxydable ayant un diamètre de pore compris entre 0,5 et 5 micromètres. On fait circuler à l'intérieur de ces tubes une dispersion colloïdale d'un hydroxyde tel que celui de zirconium associé à un polymère tel qu'un polyacrylate. La dispersion colloïdale en se déposant sur le corps poreux constitue une membrane dynamiquement formée dont les rayons de pores peuvent être aussi bas que 1 nanomètre.

Ce type est caractérisé par un investissement faible pour la fabrication et une bonne tenue en température, en chlore en PH et en milieu oxydant. [5]

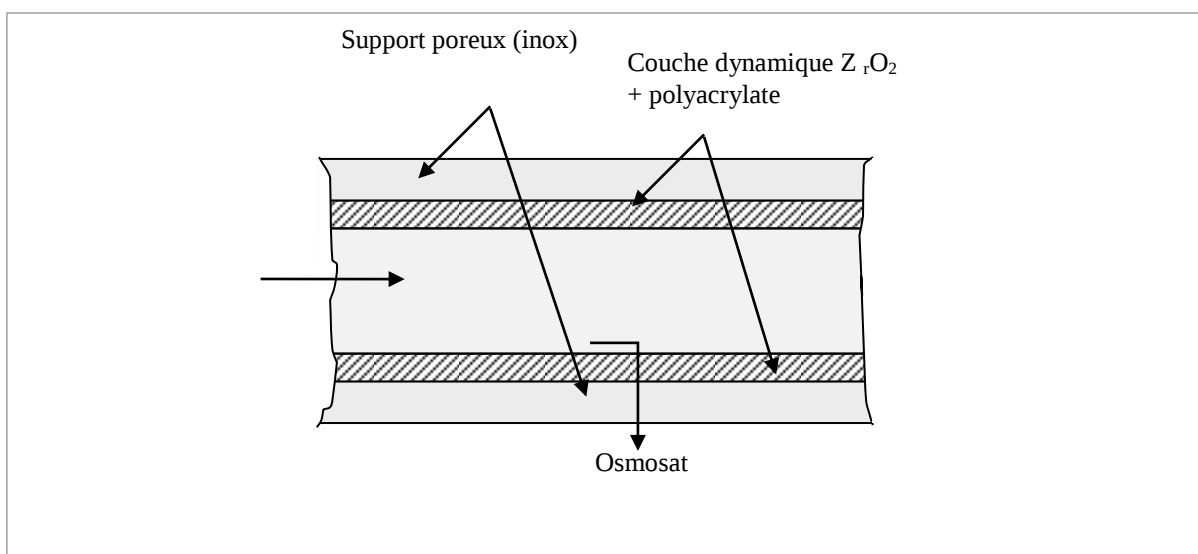


Figure II.11 : Membrane dynamiquement formée

II.5.1.7. Performance des membranes commerciales :

Les membranes d'osmose inverse ont été développées principalement pour le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. C'est pourquoi, leurs performances sont données le plus souvent en prenant comme référence des solutions NaCl à des concentrations égales soit à 3,5%(eau de mer), soit à 0,3-0,5%(eaux saumâtres).

Les taux de rejet ont fait des progrès considérables en passant de 98,6 à 99,6% en 20 ans ce qui permet désormais de dessaler des eaux de mer même très salines comme celles du « Golfe arabe » en un seul étage. Les perméabilités aussi ont augmenté.

Des ordres de grandeur des perméabilités et des débits spécifique calculés pour une pression efficace de 40 bars sont donnés dans le tableau ci dessous pour des membranes planes ou spirales. [5]

Tableau II.2 : Ordre de grandeur des perméabilités et des débits spécifiques des membranes planes ou spirales d'osmose inverse.

	Perméabilité ($\text{l.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$)	Débit spécifique ($\text{l.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
Membranes Acétate cellulose		
- Haute sélectivité (type eau de mer)	0,5	20
- Faible sélectivité (type eau saumâtre)	1	40
Membranes composites		
- Haute sélectivité (type eau de mer)	1,2	50
- Faible sélectivité (type eau saumâtre)	1,5	60

II.5.1.8. Résistance au PH, à la température et au chlore :

Il est important de noter que, pour l'utilisateur, les performances limites dépendent à la fois de la nature de la membrane mais aussi à la technologie du module. [4] [5]

Tableau II.3 : Résistance au PH et à la température

Matériaux membranaires	Gamme du PH	Température maximale
• Acétate de cellulose	4 à 7	40
• Polyamide	4 à 11	45
• Polysulfone	3 à 11	90

• composites	2 à 11	70
--------------	--------	----

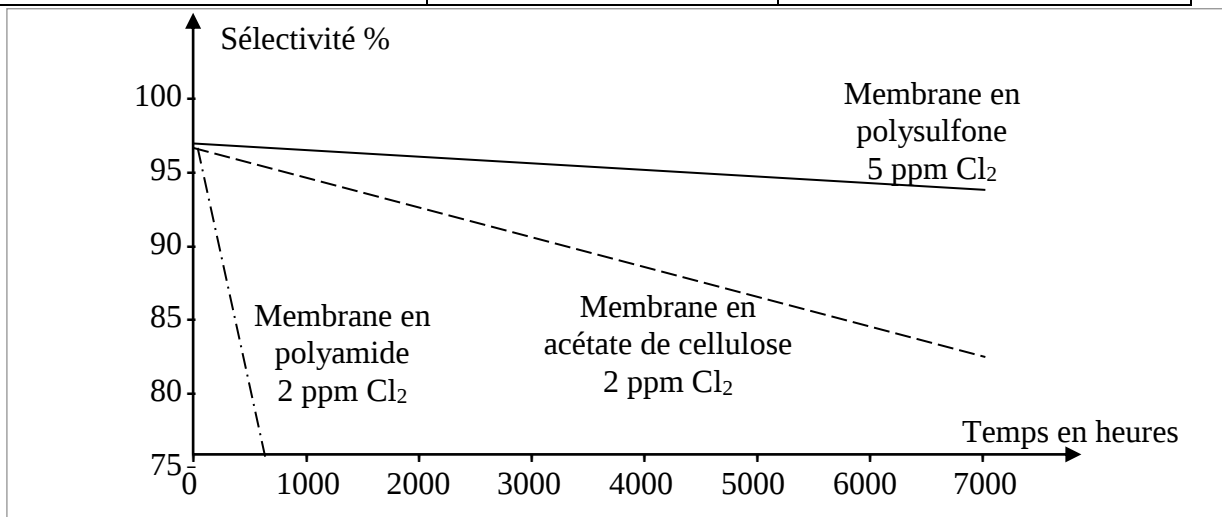


Figure II.12: Résistance des différentes membranes au chlore.

II.5.1.9. Durée de vie des membranes :

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse. En effet, la durée de vie dépend de la nature de la membrane mais aussi des conditions d'utilisation :

- Pression de fonctionnement ;
- Température de l'eau ;
- PH ;
- Qualité du prèrs traitement.

Enfin, la notion même de la durée de vie d'une membrane n'est pas très nette. Les performances d'une membranes d'osmose inverse évoluent lentement au cours du temps, et en générale on change les membranes lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Mais pour différentes raisons. L'exploitant peut très bien augmenter la durée de vie des membranes en faisant fonctionner l'installation au-delà de ce seuil.

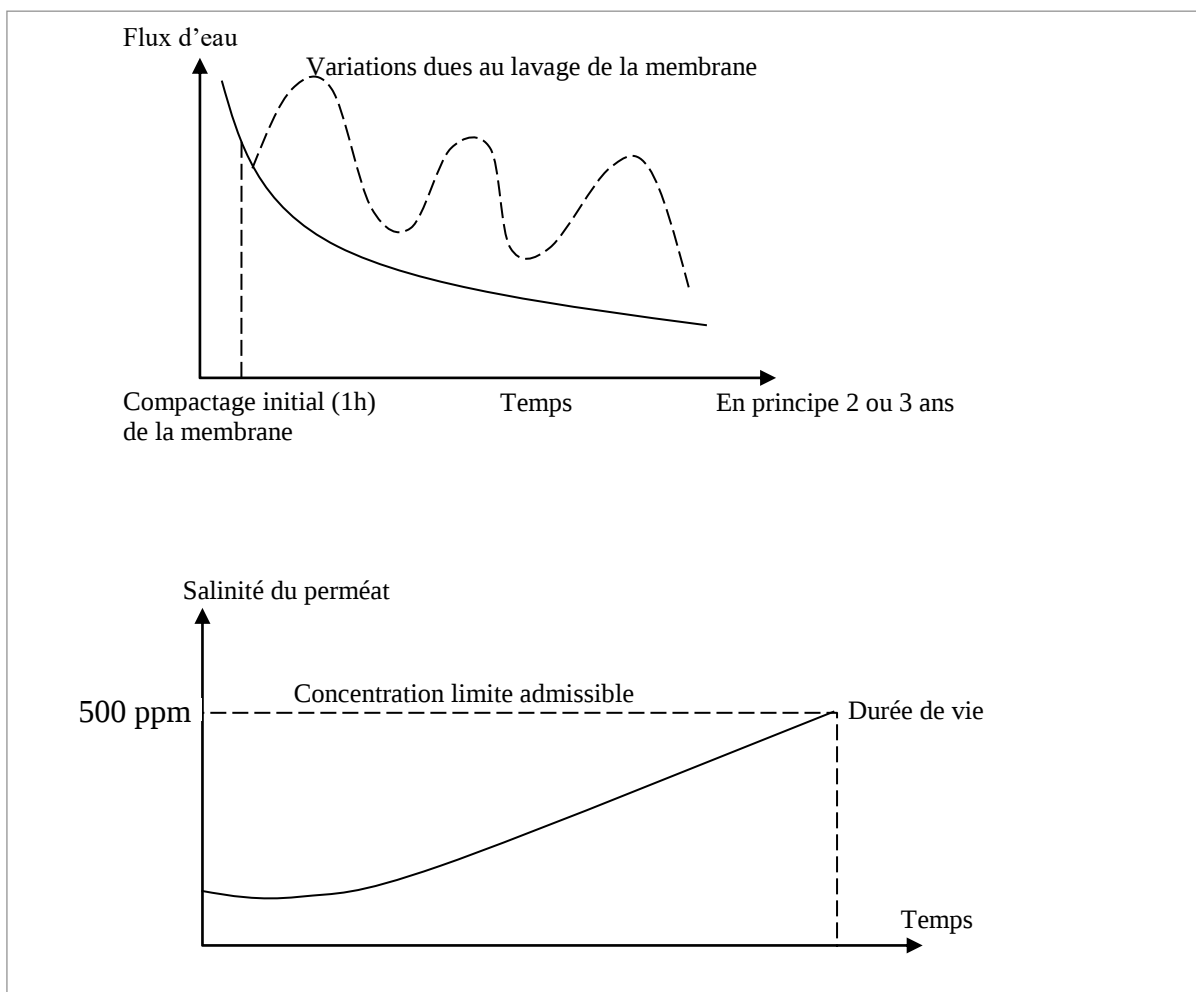


Figure II.13 : Evolution des performances d'une membrane d'osmose inverse au cours du temps.

La durée de vie des membrane, qui était, il y a quelques années, de 2 à 3 ans, est actuellement supérieure à 5 ans : ce qui se traduit par un taux de renouvellement compris entre 10 et 20% par an. [5]

II.5.2. Modules d'osmose inverse :

Pour être mises en œuvre, les membranes doivent être montées dans des support appelés modules. Actuellement quatre types de modules sont commercialisés :

- modules tubulaires,
- modules plans,
- modules fibres creuses,
- modules spiraux.

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module :

- régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation (écoulement laminaire ou turbulent),

- compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil,
- facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses,
- volume mort de l'appareil (exprimé en l/m²),
- Adaptation au produit à traiter (nécessité ou non de préfiltration). [5]

II.5.2.1. Modules tubulaires :

Ce type de modules est constitué de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixée la membrane semi-perméable. Le diamètre du tube est compris entre 7 et 25 mm et le plus souvent de 12,5 mm. En générale, l'eau de mer sous pression circule à l'intérieur du tube et l'eau douce produite est récupérée à l'extérieur du tube. Le tube est soit poreux, soit perforé de trous pour permettre l'évacuation du perméat.

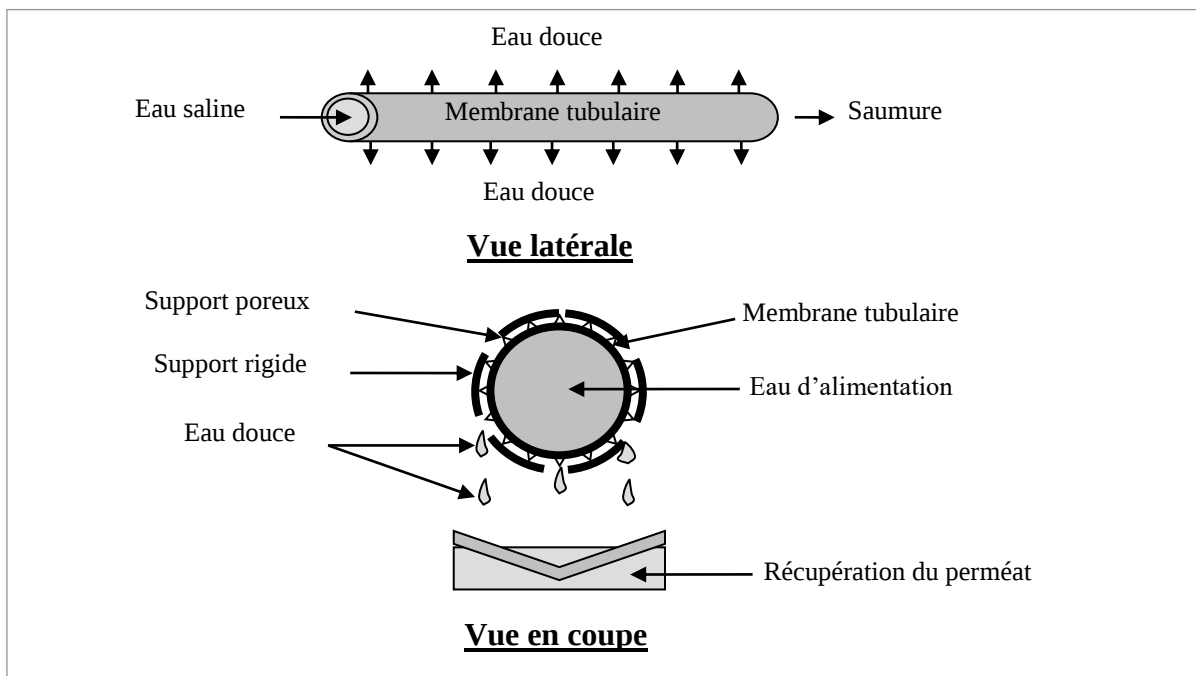


Figure II.14 : Schéma de principe d'un module tubulaire

II.5.2.2. Modules fibres creuses :

Les modules fibres creuses peuvent être considérés comme des modules tubulaires composés de tube de petit diamètre compris entre quelques millimètres et quelques dizaines de microns. Mais à la différence des modules tubulaires qui sont constitués d'une membrane et d'un support inerte, les fibres creuses jouent à la fois le rôle de membrane et de support.

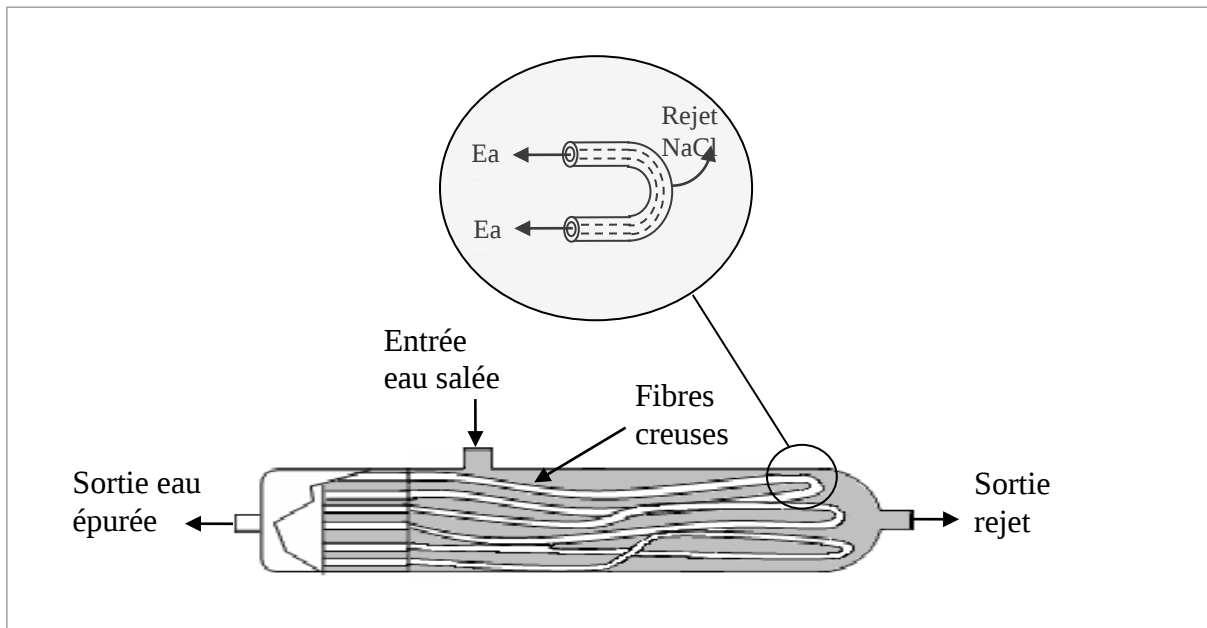


Figure II.15: Schéma de principe d'un module à fibres creuses

II.5.2.3. Modules plans :

Ce type de module qui est le plus simple, est aussi le plus ancien car sa technologie a été calquée directement sur celle des filtres presse. Il peut se présenter soit sous formes de plaques unitaires, soit sous forme de cartouches. Un des paramètres importants est la distance entre membranes :

- faible épaisseur : nécessité de préfiltration et difficulté de nettoyage ;
- forte épaisseur : volume mort important et énergie de pompage élevée.

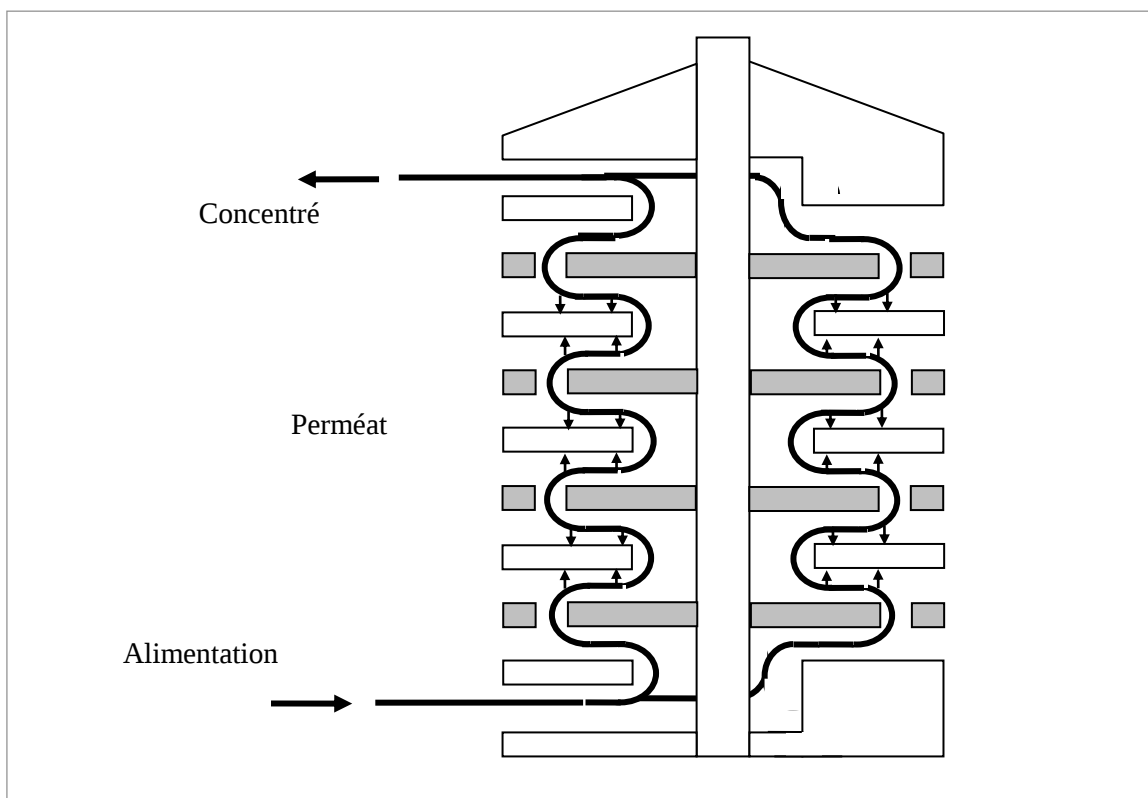


Figure II.16: Modules d'osmose inverse plans

II.5.2.4. Modules spirales :

Dans ce type de modules, les membranes planes sont enroulées autour d'un tube perforé et creux destiné à collecter le perméat. Entre les membranes est placé un grillage plastique de 0,8 à 1,2 mm d'épaisseur, qui a pour but de créer une turbulence dans la circulation du fluide. L'eau à traiter renfermant les sels dissous entre à l'une des extrémités du rouleau et passe axialement à travers la membrane. Afin de pouvoir exercer la pression requise sur le liquide à traiter, les rouleaux de membranes (appelées souvent cartouches) sont insérés dans des corps de pression tubulaires avec un système de joints aux extrémités. En générale, plusieurs cartouches sont assemblées dans un seul corps de pression.

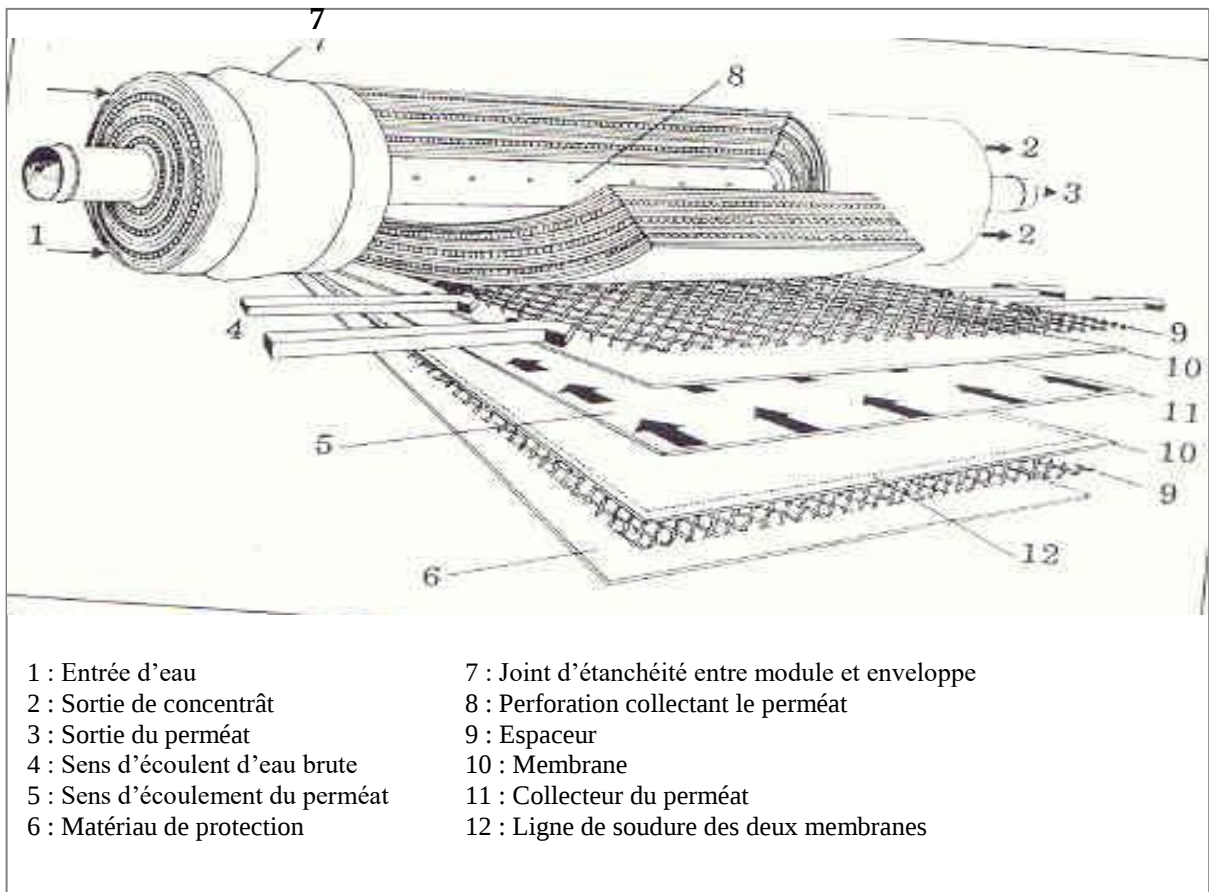


Figure II.17: Schéma d'un module spirale.

III. Osmose inverse :

III.1. Définition :

L'osmose est un phénomène de diffusion se produisant lorsque deux solutions de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable qui laisse alors passé le solvant de la solution la plus diluée vers la solution la plus concentrée, la plupart des membranes se laissent traverser par tous les composés ou bien sont imperméables.

L'osmose inverse suit le procédé inverse de l'osmose classique. On provoque une osmose inverse en exerçant sur la solution la plus concentrée une pression supérieure à la pression osmotique.

III.2. Principe :

On considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes.

- Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée.

- On applique une pression mécanique sur la solution concentrée pour avoir l'osmose inverse, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer, on arrivera à un moment où la pression appliquée s'annule avec le flux d'eau, cette pression d'équilibre est appelée la pression osmotique.

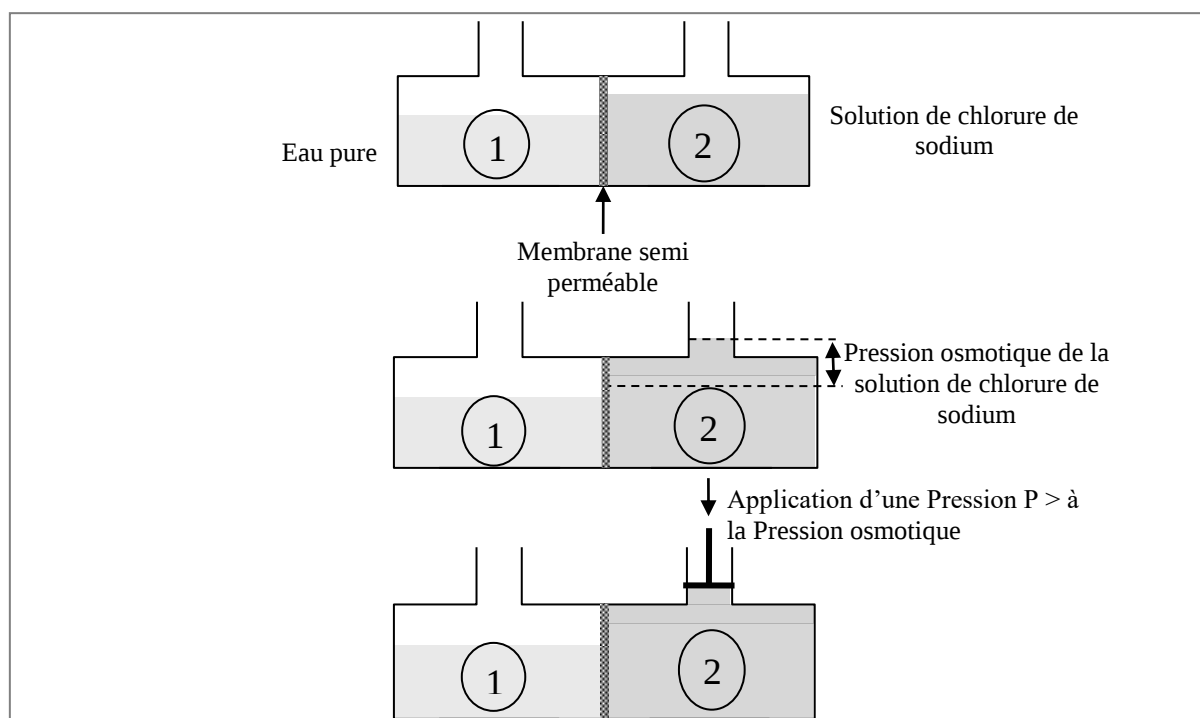


Figure III.1 : Phénomène d'osmose inverse

- La pression osmotique d'une solution saline est donnée par la formule suivante :

$$P = C . R . T$$

P : Pression osmotique en bar.

C : Différence de concentration en mol/m³ = $\frac{\text{concentration en Kg/m}^3}{\text{masse molaire en Kg/mole}}$

R : Constante molaire des gaz parfait.

R = 8.314 J /mole.K

T = Température en K.

La pression osmotique d'une solution dépend donc de la nature des sels dissous et de sa concentration.

Plus la molécule est petite (faible masse molaire) plus la pression osmotique créée est élevée.

- Quand la pression appliquée est supérieure à la pression osmotique on va avoir un transfert de la solution concentrée vers la solution moins concentrée. Ce phénomène a reçu le nom d'osmose inverse. [5]

III.3. Applications de l'osmose inverse :

L'osmose inverse s'applique à tous les cas où une déminéralisation ou une concentration des ions des molécules organiques à rechercher.

La principale application de l'osmose inverse est :

- **Alimentation en eau potable :**

Pour palier le déficit des ressources en eaux souterraines, les eaux de surface sont utilisées comme ressources destinées à la consommation humaine après leur traitement par osmose inverse. [6]

- **Production d'eau de très haute qualité :**

Telles que les eaux de chaudières, les eaux ultra pures des industries électroniques, pharmaceutiques, nucléaires...ainsi que celles des laboratoires ou des hôpitaux.

- **Dessalement de l'eau de mer :**

Une eau potable s'obtient en fait passe de dessalement car il y a certaines membranes qui assurent une élimination de plus de 98,5% des ions monovalents.

- **Traitement des eaux résiduaires industrielles :**

L'osmose inverse est utilisée pour récupérer certains résidus, on peut citer :

- La récupération des métaux dans le rinçage à l'aval des bains de galvanisation (nickelage, cuivrage, laitonage ...).
- La récupération de nitrate d'ammonium dans les condensations des industries de productions des engrais azotes.

- **Utilisation de l'osmose inverse dans l'industrie agro-alimentaire :**

- Concentration de lait pour la production du fromage et du yaourt.
- Clarification des jus de fruits de pomme notamment.
- Utilisation de l'osmose inverse pour augmenter le degré alcoolique des vins.

- **L'osmose inverse dans l'industrie textile :**

Traitement des effluents provenant le lavage de la line servant au tissage, récupération des produits non biodégradables et coûteux tel que l'alcool polyvinylique.

III.4. Schéma général d'une installation d'osmose inverse :

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- La membrane proprement dit.
- Le module.
- La pompe haute pression.
- Eventuellement un système de récupération d'énergie.
- Le poste de prétraitement.
- Vanne

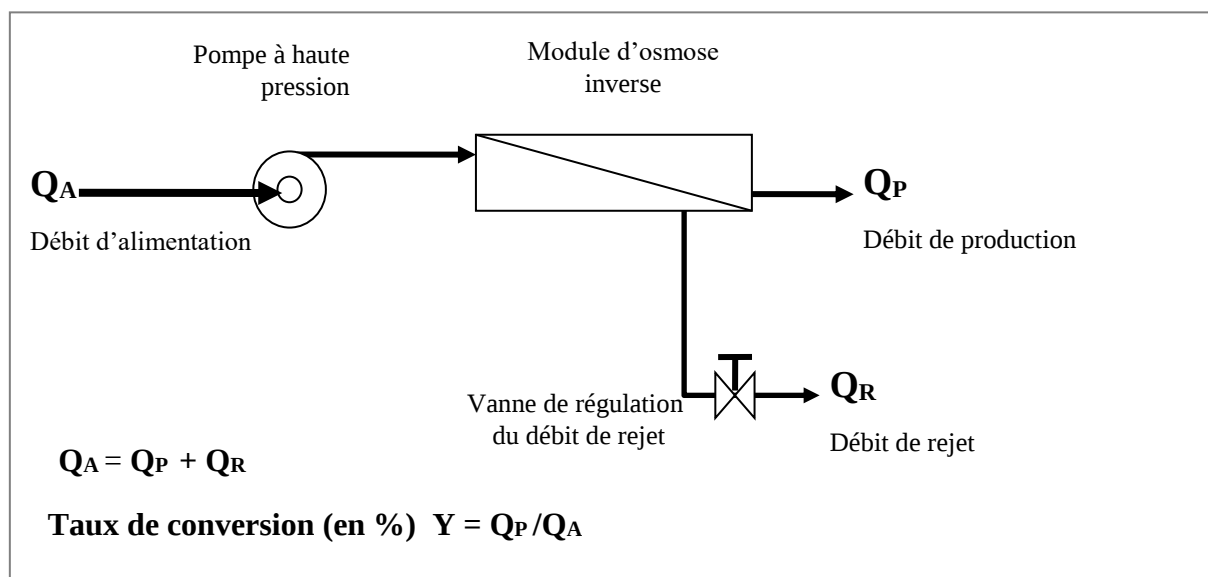


Figure III.2 : Unité alimentaire d'osmose inverse

III.5. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :

- **Taux de conversion :**

Le taux de conversion (Y) est la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane.

$$Y = Q_p / Q_a$$

- **Sélectivité :**

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

$$TR = (C_0 - C_p) / C_0$$

$$= (1 - C_p) / C_0$$

C_0 : concentration de l'espèce à retenir dans la solution.

C_p : concentration de la même espèce dans le perméat.

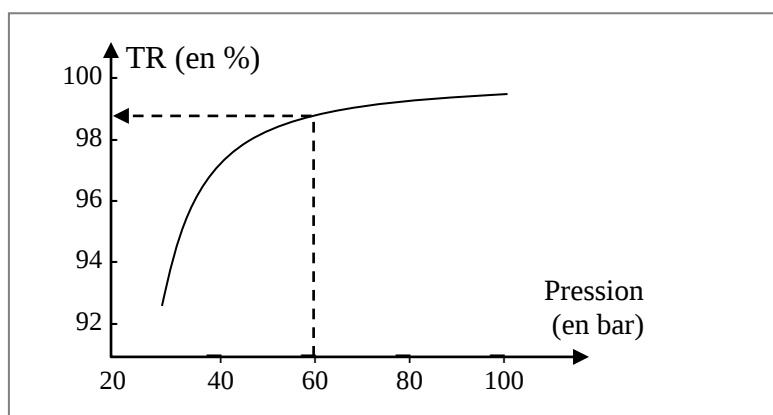


Figure III.3 : influence de la pression sur le taux de rejet

Le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium (NaCl), compte tenu du fait que la déminéralisation des eaux est l'application la plus importante de l'osmose inverse. On trouve ainsi couramment des dessalements des membranes qui ont été développées soit pour le dessalement de l'eau de mer et qui ont un taux de rejet au NaCl de **99%**, soit pour le dessalement des eaux saumâtres et qui ont un taux de rejet au NaCl de **96%** et ceci pour des conditions opératoires déterminées (pression, température, taux de conversion...).

- **Débet spécifique :**

Un taux de conversion donné, le débit par unité de surface (densité de flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de la membrane à mettre en œuvre et par le même investissement.

III.6. Mécanisme de transfert :

Dans le cas de l'osmose inverse, les transferts de solvant et de soluté à travers une membrane semi-perméable se font par solubilisation-diffusion : toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieure de celle-ci comme à travers un solide ou un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. [5]

- Le flux de solvant à travers la membrane est donné par la relation suivante :

$$Q_s = A (\Delta P - \Delta \pi)$$

Q_s : flux de l'eau à travers la membrane.

A : perméabilité de la membrane.

$\Delta \pi$: différence de pression osmotique de part et de la membrane d'autre part.

ΔP : différence de pression de part et d'autre de la membrane.

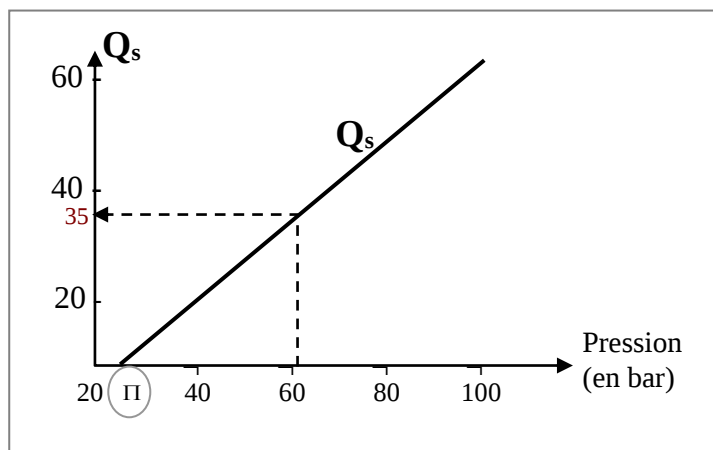


Figure III.4 : influence de la pression sur le flux du solvant à travers la membrane

- Le flux de soluté à travers la membrane est donné par la relation suivante :

$$Q_{sel} = B \Delta C$$

Q_{sel} : flux de sel à travers la membrane.

B : perméabilité de la membrane au sel.

ΔC : différence de concentration de part et de membrane d'autre part.

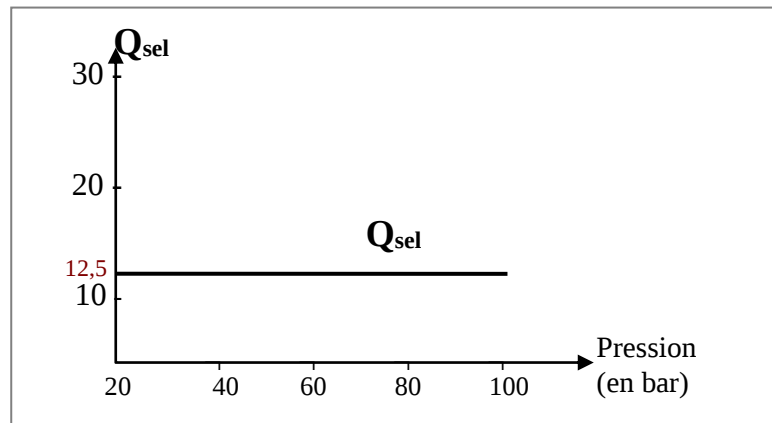


Figure III.5 : influence de la pression sur le flux de sel à travers la membrane

III.7. Conditions de fonctionnement :

Pour qu'un procédé d'osmose inverse fonctionne, il est évidemment de disposer d'une membrane et des modules adaptés. Mais ce ci n'est pas suffisant, donc il faut mise en œuvre les conditions suivantes : [5]

III.7.1. Choix du type de procédé :

Le fonctionnement d'une telle installation peut se faire selon le procédé discontinu ou bien continu.

a. Système en discontinu :

Le liquide à traiter est pompé vers le module d'osmose inverse, le retentât est renvoyé dans la cuve servant à l'alimentation des modules, jusqu'à l'obtention de la concentration désirée. Le perméat est recueilli à part. Ce système est surtout utilisé pour les unités ayant de faible volume à traiter.

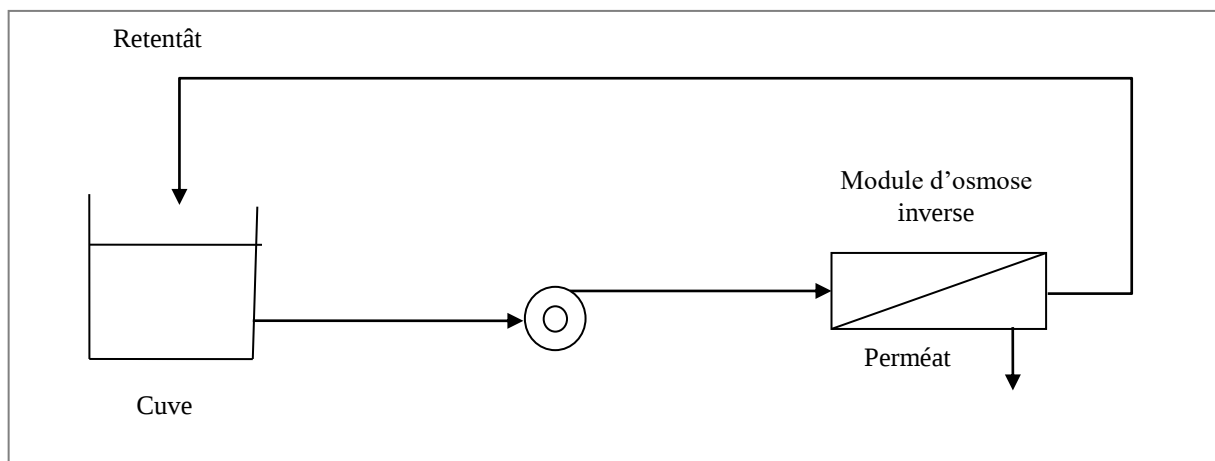


Figure III.6 : Système en discontinu

b. Système en semi continu :

Une partie du retentât tourne sur le module d'osmose inverse en circuit fermé à une pompe de recirculation. Une pompe d'alimentation alimente cette boucle en solution à traiter. Ce système consomme moins d'énergie que le système discontinu, il convient pour de grandes unités.

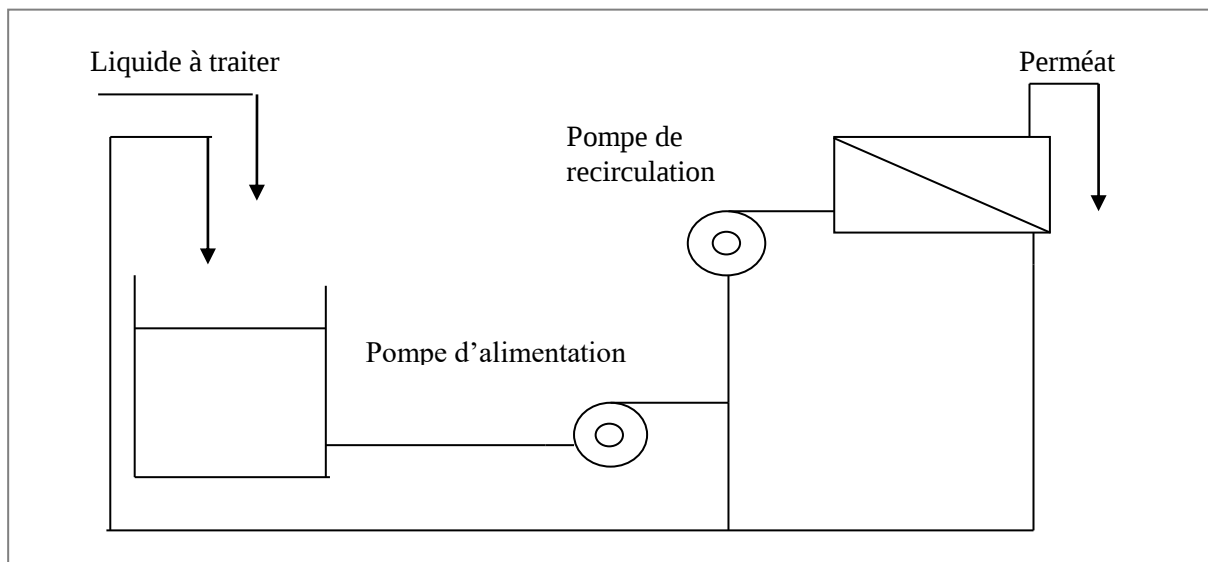


Figure III.7 : Système en semi continu

c. Système continu :

Le retentât n'est pas recyclé, mais extrait en continu.

- Dans le dessalement d'eau de mer on utilise le système continu ; les modules étant montés en série ou en parallèle.

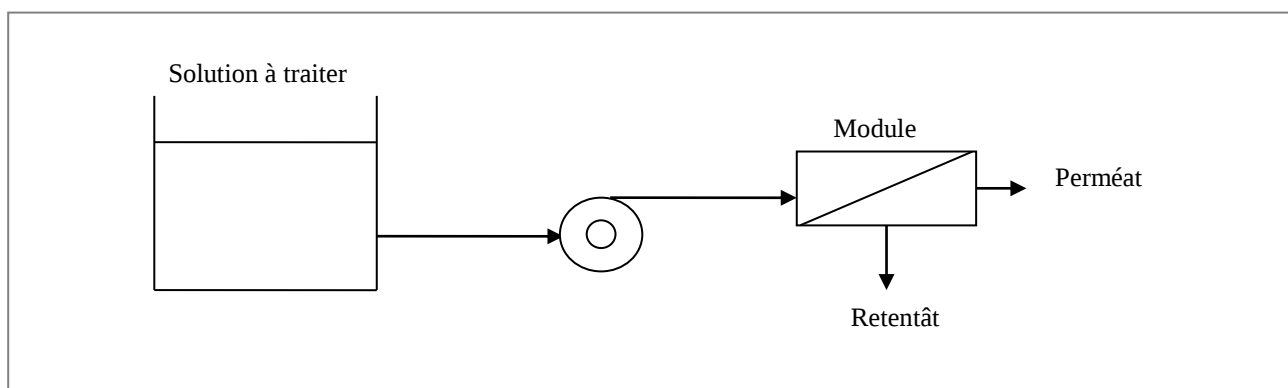


Figure III.8 : Système en continu

- **Montage en parallèle :**

Tous les modules travaillent dans les mêmes conditions de pression et de conversion. Ce système est utilisé pour des unités de faible capacité. [6]

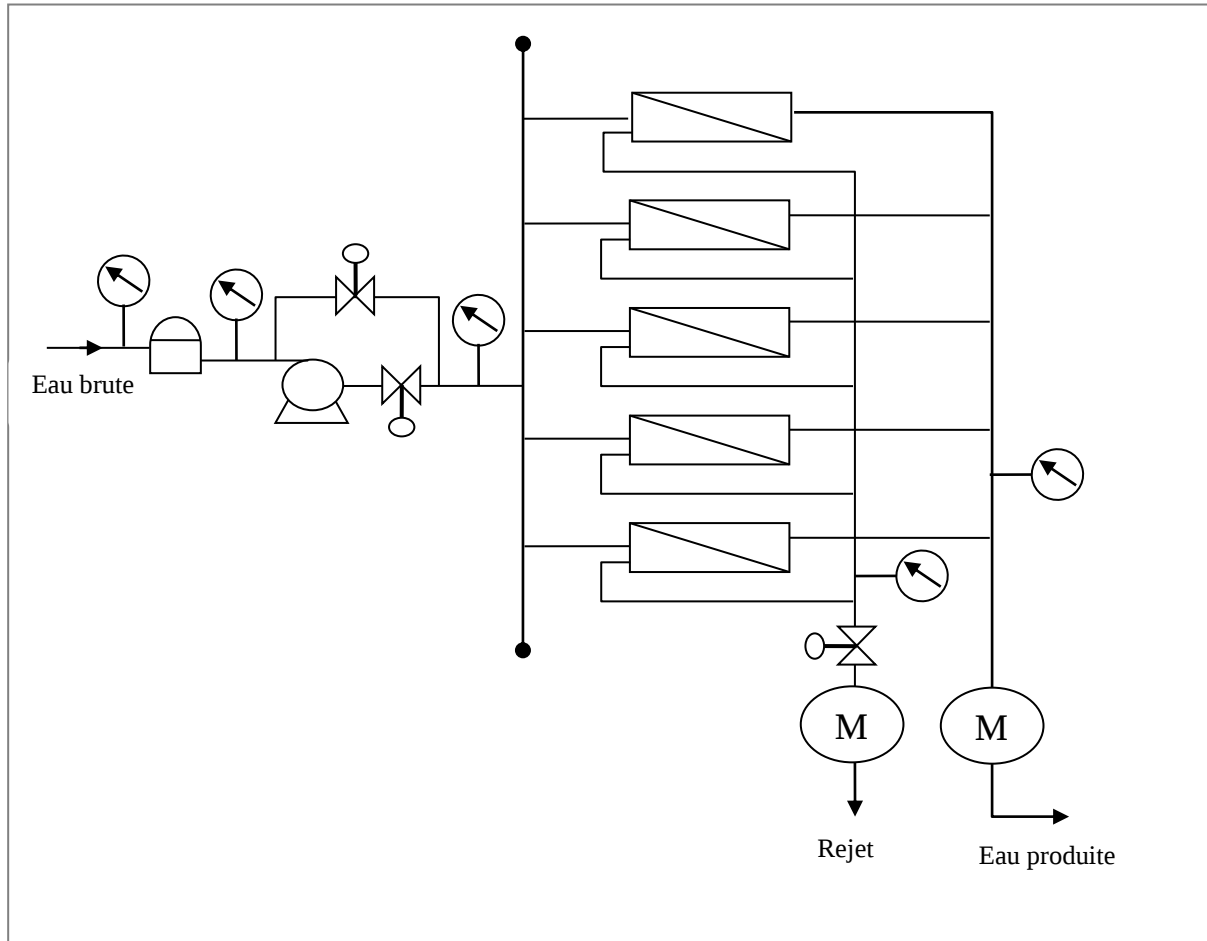


Figure III.9: Montage en parallèle

- **Montage en série :**

Le rejet du 1^{er} étage alimente les modules du 2^{ème} étage, un tel système est utilisé pour augmenter le taux de conversion, il atteint aisément les conversions de 70 à 90% [6]

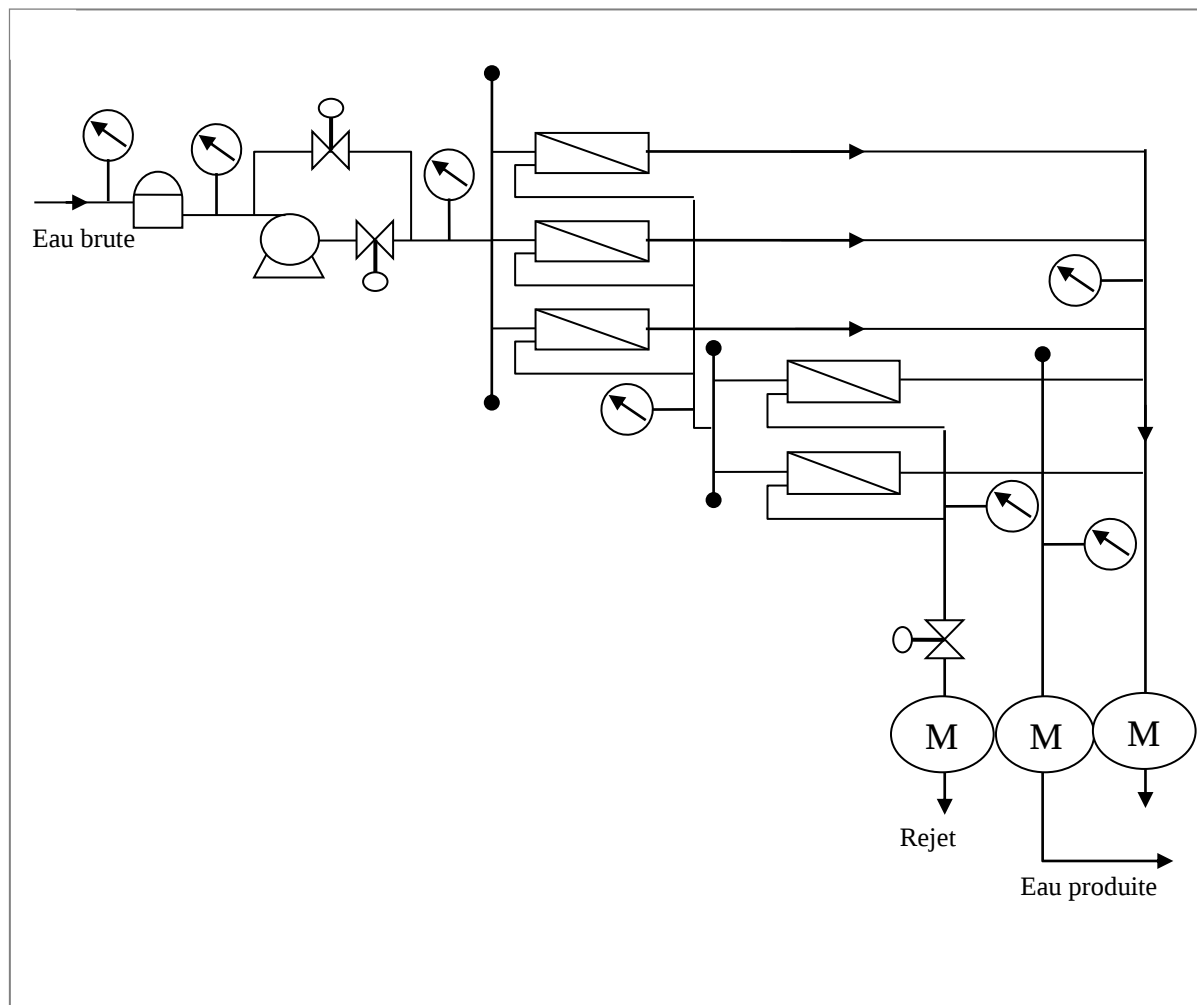


Figure III.10: montage série -rejet

III.7.2. La pression :

Le débit d'eau épurée est en fonction de la différence entre la pression osmotique engendrée de l'eau brute. Plus la différence est grande, plus le débit d'eau épurée est élevé, mais la pression maximale appliquée est déterminée par la résistance des membranes elles mêmes.

Le traitement des solutions à fortes pressions osmotiques tel que l'eau de mer (pression osmotique 25bar) nécessite de mise en œuvre des pressions de l'ordre de 60 à 70 bar, par contre dans la majorité des applications, l'eau de salinité à 10 g/l, des pressions de 30 à 40 bar sont suffisantes.

III.7.3. La température :

Le débit de perméat à travers une membrane d'osmose inverse augmente avec la température d'environ 3% par °C ce qui correspond approximativement à une augmentation proportionnelle à l'inverse de la viscosité de l'eau.

La viscosité en fonction de la température est donnée par la relation suivante :

$$\mu = \mu_0 \exp E_0/RT$$

E_0 : l'énergie d'activation du liquide (E_0 pour l'eau est égale à 15675 J.mol^{-1})

μ_0 : viscosité initiale de l'eau.

μ : viscosité du perméat.

La viscosité de l'eau évolue inversement avec la température.

III.7.4. Surface d'échange :

On peut définir aussi la surface des membranes qui peut être placée par unité de volume de la cellule mise sous pression plus élevée par la surface d'échange, plus la surface augmente plus le volume d'eau augmente.

III.7.5. Le PH :

Les membranes sont constituées en acétate de cellulose résistant mal aux valeurs extrêmes du PH (hydrolyse). Le PH optimum pour ce type est de 4.5 et le domaine d'utilisation se situe entre 4.5 et 7.5.

III.7.6. Turbidité :

La technique d'osmose inverse peut être utilisée pour l'élimination de la turbidité des eaux, toutes fois les unités d'osmose inverse fonctionnent mieux, si l'eau à traiter n'est pas turbide, on considère que la turbidité de l'eau ne doit pas contenir des particules dont la taille excède 25microns.

III.7.7. Vitesse d'alimentation :

Les vitesses varient de 1,2 à 7,8 cm/s, les plus faibles vitesses rapportent aux membranes construites sous forme de fibres creuses, pour éviter les risques de polarisation à la surface de la membrane, il est nécessaire d'avoir des vitesses élevées et d'assurer un régime hydraulique turbulent.

III.8. Consommation d'énergie :

Le procédé d'osmose, ne faisant pas intervenir de changement de phase, doit présenter une consommation d'énergie plus faible que d'autres procédés de séparation.

En effet, la consommation d'énergie est toujours supérieure au minimum théorique et ça pour des plusieurs raisons :

a)- Si l'on veut que le flux d'eau à travers la membrane ait une valeur acceptable, il est nécessaire que la pression de fonctionnement soit entame supérieure à la condition de réversibilité.

b)- La minimisation du phénomène de polarisation, les vitesses de passage dans le module doivent être suffisamment élevées. [5]

III.9. Récupération d'énergie :

Dans la plupart des installations actuelles d'osmose inverse, le circuit de concentration est détendu à travers une vanne, ce qui représente une perte d'énergie. On peut aussi envisager de récupérer l'énergie contenue dans le fluide haute pression soit au moyen d'une turbine soit au moyen d'un système à piston. [5]

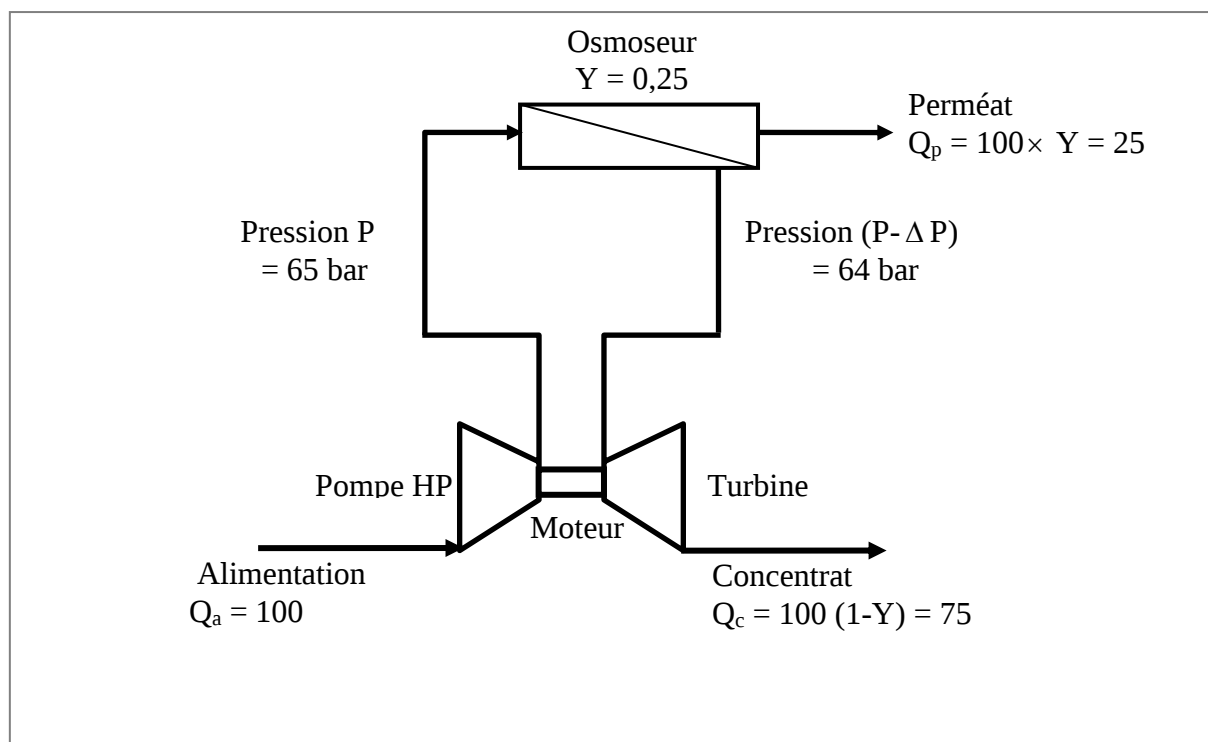


Figure III.11: Schéma de principe de récupération d'énergie par turbine

Du point de vue technologique, trois solutions sont actuellement disponibles :

Turbine PELTON :

Des petites turbines PELTON de quelques kilowatts de puissance ont été testées sur des unités d'osmose inverse alimentées en énergie soit par des aérogénérateurs soit par des photopiles. Actuellement plusieurs industriels proposent des turbines PELTON pour des débits allant de 10 à 1200 m³/h. bien qu'ayant un bon rendement compris entre 80 et 90 %, ces machines présentent quelques inconvénients :

- Coût de construction élevé,
- Corrosion des augets due à la vitesse élevée du jet (environ 100 m/s),
- Centrage du jet difficile à maintenir.

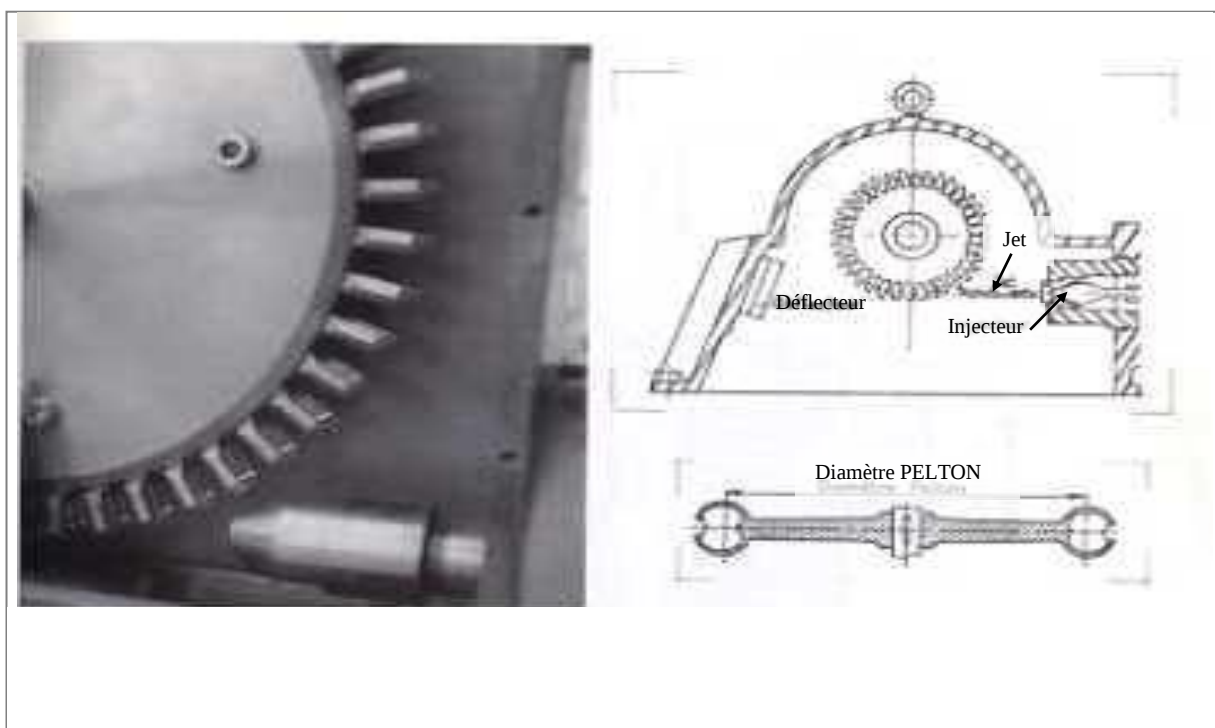


Figure III.12: Turbine PELTON utilisée en récupération d'énergie sur une unité d'osmose inverse

Turbopompes intégrées :

Le principe de ces machines est de récupérer l'énergie de la saumure dans une turbine hydraulique de haut rendement montée sur le même arbre que la pompe haute pression.

Systèmes à piston :

Ces systèmes peuvent être considérés comme une pompe à piston qui utilise le rejet de saumure (environ 60 bar) pour «aider» le déplacement du piston.

III.10. Avantage d'osmose inverse :

- Faible consommation énergétique : environ 3 à 4 KWh /m³ dans le cas d'eau de mer à 35 g/l, grâce en particulier à la mise en place de système de récupération d'énergie et à l'augmentation de taux de conversion ;
- Investissement plus faible dus en particulier à l'amélioration des performances des membranes (taux de rejet sur les eaux de mer de 99,6% avec une perméabilité de 1l.h¹.m².bar¹) et à une diminution des coûts des membranes ;
- Gamme de capacités disponibles commercialement très vaste ;
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins ;
- PH légèrement acide de 6,6 (idéale pour la digestion, assimilation des aliments et rééquilibrage de PH du sang généralement trop toxique) ;
- L'énergie de l'eau osmosée (7200 unités Bovis) est nettement supérieure à celle de l'eau en bouteille (5000) qui est en outre chargée de tous les rayonnement nocifs qu'elle subit pendant son transport et dans les lieux de stockage.

A la lecture de la description du procédé, on aura compris que le point de l'osmose inverse est le prétraitement. Une mauvaise qualité de l'eau prétraitée réduit la durée de vie des membranes qui représente une part importante de l'investissement.

- Les membranes sont sensibles au colmatage et en particulier au biofouling.
- La salinité d'eau produite qui se situe aux environs de 300 à 500 ppm convient bien pour les usages domestiques mais trop importants pour certains usages industriels.
- La salinité de l'eau de mer, si elle est trop élevée (45-50 g/l), elle entraîne une augmentation non négligeable des coûts (nécessite de prévoir dans certains cas deux étages pour maintenir la qualité de l'eau déminéralisée). [5]

V.I- RESULTATS ET INTERPRETATIONS:

Pour entamer notre étude, nous avons commencé à analyser au premier lieu l'eau de nauts côtière. appelée « eau brute ».

Tableau V.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau brute :

Paramètres	Essais A
pH	7.68
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2500
Turbidité (NTU)	0.321
SDT (mg/l)	1268
T($^{\circ}\text{C}$)	28.4
Ammonium NH_4^+ (mg/l)	0.093
Nitrates NO_3^- (mg/l)	2.134
TA ($^{\circ}\text{F}$)	0
TAC ($^{\circ}\text{F}$)	14.8
Bicarbonates HCO_3^- (mg/l)	180.560
TH ($^{\circ}\text{F}$)	7.80
Calcium Ca^{2+} (mg/l)	212.424
Magnésium Mg^{2+} (mg/l)	60.762
Chlorures Cl^- (mg/l)	542.430
Résidus sec à 180°C (mg/l)	1600

Interprétation des résultats:

Les résultats obtenus par de nombreuses expériences physico-chimiques, nous a permit de constater ce qui suit, sur l'eau brute :

- Une acidité normale
- Très forte concentration des sels minéraux
- Teneur excessive en résidus secs
- Conductivité trop élevé
- Turbidité normale

Tableau V.2 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée

Paramètres	Essais A
pH	6.8
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4650
Turbidité (NTU)	0.301
SDT (mg/l)	225
T($^{\circ}\text{C}$)	28.5
Ammonium NH_4^+ (mg/l)	0.004
Nitrates NO_3^- (mg/l)	1.508
TA ($^{\circ}\text{F}$)	0
TAC ($^{\circ}\text{F}$)	3.3
Bicarbonates HCO_3^- (mg/l)	40.260
TH ($^{\circ}\text{F}$)	11.6
Calcium Ca^{2+} (mg/l)	24.048
Magnésium Mg^{2+} (mg/l)	13.610
Chlorures Cl^- (mg/l)	91.468
Résidus sec à 180°C (mg/l)	320

1. Mesure du PH :

- **But d'analyse :**

Le but de détermination la nature de milieu (acide, basique ou neutre).

- **Principe :**

La mesure du PH est basée sur la différence de potentiel existant entre une électrode verre et une électrode de référence.

- **Matériels :**

- PH mètre
- Electrode de mesure.

- **Mode d'opérateur :**

On rince l'électrode avec de l'eau distillée, on plonge l'électrode dans l'eau à analyser et on laisse jusqu'à la stabilisation du PH.

La lecture se fait directement sur le PH mètre, exprimée en unité de PH à la température 25 °C.

2. Turbidité :

- **Définition :**

Réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de la matière non dissoute.

- **Principe :**

Pour tout échantillon d'eau, la mesure de la lumière diffusée et de la lumière transmise permet la détection de matières non dissoutes, absorbant mais diffusant mal, qui passeraient inaperçues par le seul mesure de la lumière diffusée.

- **Mode opératoire :**

Remplir une cuvette de mesure propre et bien essuyer avec du papier hygiénique avec l'échantillon à analyser bien homogénéisé et effectuer rapidement la mesure, il est nécessaire de vérifier l'absence de bulle d'air avant la mesure.

- **Expressions des résultats :**

La mesure est obtenue directement en NTU.

IV. Données de base sur la région d'étude

IV.1.Présentation de la ville de Djamaa

IV.1.1.Situation géographique

La commune de djamaa est située au nord d'El oued (chef lieu de wilaya). Elle est considérée parmi les communes du nord de la wilaya et se situe sur l'axe Biskra-touggourt. Elle occupe une superficie de 780 km dont la densité est de 47Hab/km. [7]

Elle est limitée administrativement par:

- Au nord : la commune d Tinedla
- Au sud : la commune de Sidi Amrane
- A l'est : la commune de Reguiba
- A l'ouest : la commune de Merara

IV.1.2. Hydrologie

Il existe quatre niveaux aquifères de plus ou moins de grande importance dans le sous-sol de la région qui sont [7] :

- les sables de surface qui constitue la nappe phréatique
- l'ensemble détritique sableux de formation continentale avec la nappe dite Moipliocène
- les calcaires sénoniens ou éocènes
- le contiennent intercalaire avec la nappe dite de l'Albien

*** Nappe phréatique:**

Elle est essentiellement constituée de sables très perméables, dite liber, sa profondeur a tendance à diminuer du sud vers le nord, varie entre (50cm) et (1m) plus rarement jusqu'à (1.5m) (de 1.34m au niveau de kardeche à 0.7m à ELharhira) .les variations de la profondeur de la nappe phréatique sont liées à la fréquence des irrigations et aux phénomènes d'évacuations. L'eau est très salée ayant entraîné des sels présents à travers les horizons de la nappe. [7]

- **Nappe du Miopliocène:**

C' est une nappe non éruptive d'où la nécessité de pomper de l'eau souvent avec Miopliocène des électro-pompes immergées la température de l'eau en tête des puits Miopliocène varie de (15) à (25°C) de point de vue bactériologique, il semble qu'il n'existe pas d'indice de pollution ,la nappe est généralement surmontée d'une coque d'argile imperméable. [7]

- * **Nappe du Sénonien:**

Cette nappe est pratique à celle du Miopliocène, eau froide non éruptive et en général présente de meilleures qualités chimiques. [7]

- * **Nappe de l'Albien :**

La nappe de l'albien souvent appelée la nappe du contient intercalaire se trouve sous le sahar algérien et lybien, elle est limitée à l'ouest par la ligne Béchar-Reggane, au nord par l'accident sud atlantique , au sud par la faille de la hamada de Tihert et le plateau du Tidikelt dans la région de Ain Saleh , à l'Est la nappe s'étend au –delà des frontières lybiennes. cette nappe constitue la principale réserve du Sahara algérien . les réserves naturelles de cette nappe se situent selon les estimations entre 30.000 et 50.000 Milliards de m³

Cette nappe est éruptive, la pression en tête de puits (vanne fermée) peut atteindre les 30 bars par endroits, à plein débit elle chute jusqu'à 12bar, l'eau sort du sol à une température proche de 60°C, qui nécessite un refroidissement préalable avant son utilisation que ce soit pour l'AE P ou pour l'irrigation. [7]

IV.1.3.Climat

***Température :**

Les températures mensuelles varient de (16°C) jusqu'à (48.2°C) On peut théoriquement diviser le climat en trois périodes:

- période froide à partir de (Novembre) jusqu'à (Février).
- . - période tempérée de (Février) à (Avril) et de (Octobre)
- période chaude de (Mars) à (Septembre).

La température moyenne annuelle entre les années (1996-2006) est de 21.1°C. [8]

***Vents :**

Quant aux, ils sont beaucoup plus responsables de l'aridité du climat, ces vents dominants ont la direction Nord- Nord, Ouest. En période tempérée, on peut craindre les vents du Sud-ouest qui rafle le secteur. [8]

***Précipitation :**

Généralement, il pleut rarement à djamaa, les précipitations sont irrégulières entre les saisons et les années. Le cumulé moyen de 1996 à 2006 est de 33.5mm car la période pluviale de l'année

IV.2.Ressource en eau de la ville Djamaa

La ville de Djamaa dispose de deux dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau (IV.1), en plus d'un forage de réserve de 30 l/s. Le débit d'eau total exploité en AEP de la ville de djamaa est égal à 160 l/s.

Tableau IV.1 forages d'eau de la ville Djamaa [7]

Forage	D'bit d'exploitation	Pression
Forage Djamaa 03	130 l/s	12 bar
Forage Souissi Teli	30 l/s	16bar

Par contre pour les ouvrages, la ville est dotée d'un seul château d'eau destiné à la régulation de débit et de pression dans le réseau de distribution. Il est implanté en tête du réseau de distribution (hors de l'agglomération), de hauteur de 10 m et de 1000 m³ de volume. ce château est alimenté par une conduite de refoulement de 250mm de diamètre en amiante ciment. [7]

IV.3. Réseau de distribution

PVC de différents diamètres : 40, 63, 90, 110, 125,160 et 200 de pression nominale de 10 bar. Il couvre toute la ville, est en mauvais état car la date de réalisation était en 1983, les fuites dans le réseau sont importantes et la gestion est mauvais .[7]

IV.4. Evaluation des débits d'eau potable

IV.4.1. Estimation de la population :

Le nombre d'habitant actuel de la ville Djamaa est égale à 45209 hab. Le nombre d'habitant futur se calcule par la relation suivante: [6]

$$[6] \quad P^n = p^o (1 + T)^n$$

Avec :

P: nombre d'habitant future

P°: nombre d' habitant actuel

T: taux d'accroissement

n: nombre d'année

T: 2.92% [8]

n = 10 ans

$$p_{2018} = 45209 (1+0.0292)^{10} = 60287 \text{ hab.}$$

IV- 4-2 calcul des débit de consommation*** calcul de débit moyen journalier actuel et futur**

de débit moyen est déterminé par la formule suivant:

$$Q_{\text{moy}} = N * D \quad [6]$$

Avec :

N: nombre d'habitant

D: dotation

Q: débit moyen journalier

Le nombre d'habitant actuel de la ville de Djamaa est égale à 45209 hab et la dotation est égale à 190 l/j

$$Q_{\text{moy ac}} = 45209 * 190 = 8589,710 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$Q_{\text{moy,fr}} = 60287 * 190 = 11454,530 \text{ m}^3/\text{j}$$

*** Détermination du débit maximal journalier**

Il est déterminé par la formule suivant:

$$Q_{\text{max j}} = Q_{\text{moy j}} * k_j \quad [6]$$

Avec:

K j: coefficient de pointe an de régularité $1.1 < K_j < 1.3$

Dans ces cas on prendre $k_j = 1.3$

$$Q_{\text{max j ac}} = 8589,710 * 1.3 = 11166,623 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$Q_{\text{max j}} = 11455,30 * 1.3 = 1489,889 \text{ m}^3/\text{j}$$

*** détermination de débit de pointe**

Il est déterminé par la formule suivant:

$$Q_{\text{max j}} = Q_{\text{moy}} * K_j$$

Avec :

$$Q = 8589,710 * 1.5 = 12884,565 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$Q = 11454,530 * 1.5 = 17181,795 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$K_p = 1.5 + 2.5 / \sqrt{Q_{\text{moy j}}} = 1.5$$

Donc :

$$Q_{\text{pointe ac}} = 8589,710 * 1.5 = 12884,565 \text{ m}^3/\text{j} \quad [6]$$

➤ **filtration par filtres à sable :**

La filtration à travers les filtres à sable sert à séparer les matières troubles et en suspension de l'eau brute, le moyen de filtration est un remblai en sable et anthracite (c'est du charbon de faible teneur en matières volatiles moins de 6 à 8% réparti en quatre réservoirs filtrants, les filtres à sable fonctionnent à une pression de 3,5 bars. La perte de charge à travers les couches filtrantes ne devrait pas dépasser les 600 mbars pour chaque filtre, si non on doit procéder au rinçage à contre-courant.



Figure IV.1 : Filtres à sables

L'objectif de la filtration est d'éliminer toutes les matières en suspension dont le diamètre varie entre 5 à 10 μm et qui n'ont pas été éliminés lors de la décantation. [9]

Tableau IV.2 : Caractéristiques techniques des filtres à sable

Nombre	4
Diamètre	2800 mm
Hauteur	3600 mm
Surface de filtration	6,15m ² /filtre
Température de service	20°C

➤ **Le rinçage à contre-courant des filtres à sable :**

Lorsque la perte de charge atteint une valeur de 500 à 600 mbars, un processus de rinçage à l'air et à l'eau est enclenché pour le nettoyage des filtres, l'alimentation en eau brute du filtre à rincer est coupée pendant ce processus. Le nettoyage doit t'être une fois tout les 24 à 48 heures (cela dépend du Colmatage des filtres) .Le processus complet de rinçage à contre-courant dure 25 à 30 minutes.

Note : Après la filtration, on injecte du méta bisulfite de sodium (SMBS) pour déchloration, et de l'acide sulfurique (H_2SO_4) pour éviter la précipitation des sels avec un PH de 6,5. [9]

IV.5-La microfiltration :

La microfiltration est la dernière étape du prétraitement, elle a pour objectifs :

- L'affinage de l'eau pré-filtrée afin d'abaisser la turbidité et l'indice de colmatage.
- Arrêter les impuretés contenues dans les solutions injectées en amont.
- C'est une barrière de sécurité pour les membranes du fait qu'elle écarte les matières en suspension.
- Mélangeur des produits de prétraitement chimique grâce au régime turbulent qui règne à l'intérieur des corps de microfiltration.

elle doit passer par deux filtres fins à filtres bougies remplaçables, raccordés en parallèles, qui ont une porosité de 5 μm . Ils possèdent des conduites d'alimentation, des conduites d'écoulement, un système de purge et des manomètres qui indiquent la perte de charge. La pression dans les microfiltres devrait s'élever à environ 2,1 bars, les filtres-bougies doivent être remplacés tous les 3 à 4 mois, pour cela, il faut mettre la station en arrêt. [9]



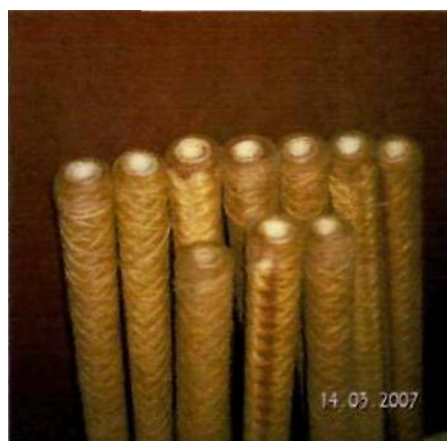
Figure IV.2 : Micro filtre

Tableau IV.3 : Caractéristiques techniques des microfiltres

Nombre	2
Pouvoir de rétention	5 micromètres
Pression maximale de service	4 bars
Perte de charge maximale	1,5 bars
Température admissible	Environ 40°C

Les deux corps de microfiltration sont déposés verticalement, chaque corps contient 31 cartouches

Les cartouches bobinées sont fabriquées par un fil en polypropylène enroulé de façon croisée et continue autour d'un noyau, la filtration s'effectue de l'extérieur des cartouches vers l'intérieur. Les cartouches utilisés ont la couleur d'oxydation du fait de la présence du fer, et devront être remplacés. [9]

**Figure IV.3 : Cartouches des microfiltres saturées**

IV.6- Les prétraitements chimiques :

Les prétraitements chimiques ont pour objectifs de :

- Eviter l'entartrage dans la zone alimentation/concentration dû à la précipitation de certains sels si leur solubilité maximale est atteinte.
- Limiter au maximum l'encrassement biologique des membranes (biofouling).

❖ La prévention de l'entartrage :

La prévention de l'entartrage se fait par l'acidification et/ou l'injection de séquestrant qui ont pour but d'éviter la précipitation des sels normalement dissous dans la zone du concentrât des modules d'osmose inverse, si leur concentration dépasse leur solubilité maximale.

Les dépôts de sels formés vont entartrer les grilles de séparation des membranes, ce qui va augmenter les pertes de charges.

Pour éviter le phénomène d'entartrage des membranes, il faut conditionner chimiquement l'eau en utilisant, de l'acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique qui empêchera la précipitation du carbonate de calcium. L'acide sulfurique est le plus employé du point de son avantage économique. [9]

❖ La prévention du biofouling :

La prévention de l'encrassement biologique se fait par injection de biocides qui peuvent être des produits halogènes tel que le chlore, ayant un pouvoir oxydant, ou des produits non oxydants d'origine organique ou non.[10]

❖ Le traitement biostatique :

Le but du traitement biostatique est d'éliminer les matières biologiques de façon indirecte; en empêchant leur développement en réduisant l'oxygène dissous nécessaire à leur respiration en employant un réducteur, c'est le bisulfite de sodium, et ceci pour éviter le colmatage biologique des membranes. [10]

IV.7- La pompe HP et augmentation de pression pour l'osmose inverse :

La pompe haute pression sert à alimenter l'unité d'osmose inverse en eau prétraitée et filtrée, Les pompes hautes pressions utilisées dans la station de dessalement de DJAMAA sont des pompes volumétriques à pistons adaptées aux faibles débits. La pression d'alimentation doit être de l'ordre de 45 bars maximum. [10]



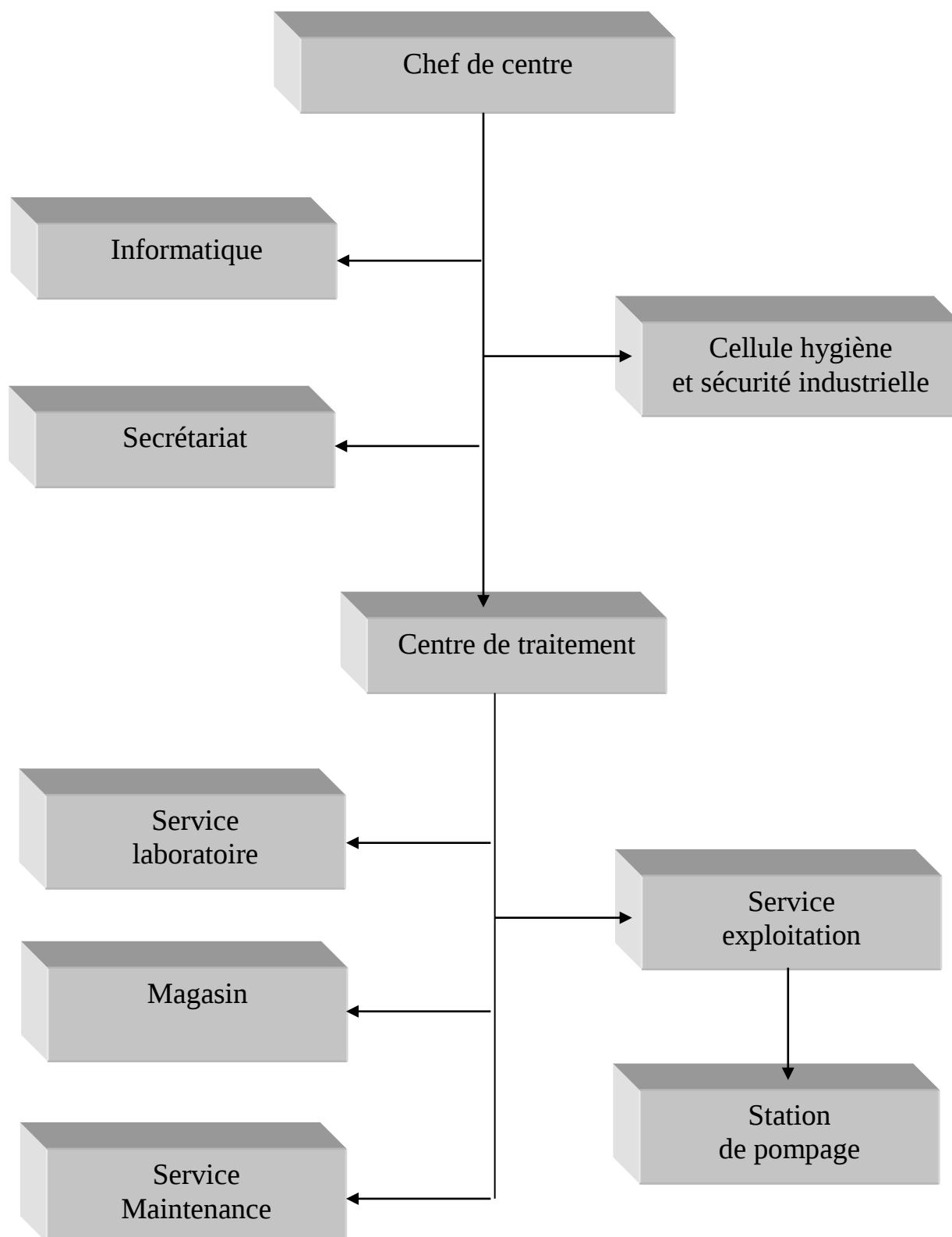
Figure IV.4 : Pompe HP

IV.8- L'osmoseur :

C'est à l'intérieur de l'osmoseur que s'effectue l'opération du dessalement, les médiums utilisés sont des tubes de pression qui contiennent des membranes semi-perméables, ces dernières ont pour but de réduire ou même d'éliminer la concentration en sels dissous dans l'eau produite.



Figure IV.5 : Les modules d'osmose inverse

Organigramme de la station de Djamaa

Conclusion

L'objectif de cette étude est de concevoir une station de déminéralisation pour les eaux de la ville de Djamaa qui se caractérisent par une forte salinité et une température élevée . la station conçue trois étapes principales, la première étape concerne le prétraitement qui se compose d'un filtre à sable et d'une microfiltration à cartouche. La deuxième étape est celle de traitement principal , on a choisi l'emploi de l'osmose inverse . La membrane utilisée comprend quatre lignes ,chaque ligne comporte trois étages .

Afin d'assurer une durée de vie assez longue pour cette station , une bonne exploitation ainsi qu'une gestion rationnelle s'avère d'une grande importance.

Tableau : Norme Algerie de potabilité des eaux de consommation “première édition 20-8-1992 Normes Algérienne NA 63.60 journal officiel n°57”

• **Normes physico – chimiques:**

Pays référence paramètres	Unités	Algérie
Turbidité	FTU	10
Température	°C	25
PH	Un.PH	6.5 à 8.5
Conductivité	µs/cm(20°C)	1250
Résidus secs	mg/l	2000
Chlorures	mg/l	200
Sulfates	mg/l	200
Calcium	mg/l	75 à 200
Magnésium	mg/l	30 à 150
Sodium	mg/l	200
Potassium	mg/l	20
Nitrites	mg/l	0.1
Ammniaques	mg/l	0.5
Hydrocarbures	µg/l	-
Fer	µg/l	-
Manganèse	µg/l	-
Cuivre	µg/l	-
Zinc	µg/l	-
Fluore	µg/l	-
MES	µg/l	-
Cadmium	µg/l	-
Chrome	µg/l	-
Nickel	µg/l	-
Plomb	µg/l	-
Clore	µg/l	-
Dureté	°F	50
Minéralisation	mg/l	250
Alcalinité	°F	-
Nitrates	mg/l	0



خزان



مختلف أنواع الترشيح والحصي



عملية التجفيل



مصفاة رملية



شركة الغزلان

Bibliographie

- [1] JACQUES MAYET, 2^{ème} édition 1994, Pratique de l'eau page 1994.
 - [2] RAYMOND DESJARDAINS, Traitement d'eau, 2^{ème} édition en 1997, Qualités générales des eaux page 3.
 - [3] J- MONOD DEGREMONT, Mémento technique de l'eau, 9^{ème} édition, techniques de séparation par membranes page 208.
 - [4] CLAUDE CARODOT, Traitement des eaux, Edition 1999, Techniques membranaires page 71.
 - [5] ALAIN MAUREL, Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres Edition 2001, Osmose inverse page 61.
 - [6] Anonyme : 2007 guide statistique wilaya de l'oued O.N.S (office national statistique) édition juin 2007 page 22.
 - [7] Anonyme: 2006 rapport des projet réalisé, Subdivision d'hydraulique de la daora de Djamaa page 21-55.
 - [8] Anonyme : 2007 guide des météo de la région de l'oued Righ ,office national de la météo page 34.
 - [9] www.membrane.com
 - [10] JEAN RODIER, Analyse de l'eau, 8^{ème} édition, Analyses des eaux de mer page 661.
-