

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**



**Ecole Nationale Polytechnique**

**Département de Génie de l'Environnement**

**Mémoire de Master en Génie de l'Environnement**

**Thème**

**Utilisation des procédés membranaires dans le traitement des eaux de surface**

GUITOUN Safa

**Sous la direction de : Mr M.DROUCHE**

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (01/07/2017)

**Composition du Jury :**

**Président de jury : Mr N.MAMRI**

Professeur (ENP)

**Examineur : Mr H.GRIB**

Professeur (ENP)

**Promoteur : Mr M.DROUCHE**

Professeur (ENP)

**ENP 2017**



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**



**Ecole Nationale Polytechnique**

**Département de Génie de l'Environnement**

**Mémoire de Master en Génie de l'Environnement**

**Thème**

**Utilisation des procédés membranaires dans le traitement des eaux de surface**

GUITOUN Safa

**Sous la direction de : Mr M.DROUCHE**

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (01/07/2017)

**Composition du Jury :**

**Président de jury : Mr N.MAMRI**

Professeur (ENP)

**Examineur : Mr H.GRIB**

Professeur (ENP)

**Promoteur : Mr M.DROUCHE**

Professeur (ENP)

**ENP 2017**

## الملخص

المصادر الرئيسية لمياه الشرب هي المياه السطحية. وغالبا ما توجد هذه المياه غير صالحة للاستهلاك بسبب التلوث الناجم عن دينا الحضرية والصناعية والزراعية. والواقع أن نوعية المياه السطحية تتراوح ما بين مناطق وفترات السنة. الطبيعة لا تسمح دائما النهر لتخفيف أو تحييد التلوث إلى مستويات مقبولة، حتى أن المياه لا يمكن أن تستخدم للاستهلاك العلاج لذا اللازمة لجعلها صالحة للشرب. في موقعنا دراسة استخدمنا تقنيات الغشاء: الدقيق، والترشيح الفائق الترشيح الدقيق جدا

**كلمات البحث:** المياه السطحية، المياه السدود، معالجة المياه، تقنيات الغشاء، معايير مياه الشرب.

## Abstract

The main sources of drinking water are surface water. These waters are often unfit for consumption because of the pollution generated by our urban, industrial and agricultural activities. The quality of surface water varies according to region and time of year. Nature does not always allow the watercourse to dilute or neutralize pollution to an acceptable level, so water can not be used for consumption, so treatment is needed to make it drinkable. Study we used membrane techniques: microfiltration, ultrafiltration and nano-filtration.

**Keywords:** Surface water, dam water, water treatment, membrane techniques, drinking water standards

## Résumé

Les principales sources d'eau potable sont les eaux de surface. Ces eaux s'avèrent souvent impropres à la consommation en raison de la pollution générée par nos activités urbaines, industrielles et agricoles. En effet, la qualité des eaux de surface varie selon les régions et les périodes de l'année. La nature ne permet pas toujours au cours d'eau de diluer ou de neutraliser la pollution à un niveau acceptable, si bien que l'eau ne peut pas être utilisée pour la consommation donc il le faut un traitement pour le rendre potable. dans notre étude nous avons utilisé les techniques membranaires : la microfiltration, l'ultrafiltration et la nano-filtration.

**Mots clés :** Eaux de surface, eaux de barrages, traitement des eaux, techniques membranaires, normes eaux potables.

## Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	9

### Chapitre I : Les ressources en eau dans le monde

I.1 Introduction.....	11
I.2 Les réserves de l'eau sur terre.....	12
I.3 Les réserve en eaux de barrages.....	12

### Chapitre II : La qualité des eaux de barrages

II.1 Introduction .....	15
II.2 Caractéristiques générales .....	15
II.3 Les type de pollutions.....	16
II.4 La qualité des eaux naturelles.....	18
II.4.1 Contrôle de la qualité de l'eau .....	18
II.4.2 Les normes de potabilité .....	19
II.5 Conclusion .....	20

### Chapitre III : Généralités sur les techniques membranaires

III.1 Introduction .....	22
III.2 Généralités sur les procédés de séparation membranaire .....	22
III.3 Présentation des procédés de séparation membranaire .....	23
III.3.1 Filtration membranaire .....	23
III.3.1.2 Ultrafiltration (UF).....	25
III.3.1.3 Nano-filtration (NF).....	26
III.3.1.4 Osmose inverse (OI) .....	26
III.3.2 Caractéristiques des procédés de séparation membranaire.....	27
III.3.3.1 Types de membrane .....	29

III.3.3.2 Caractéristiques des membranes .....	29
III.3.3.2.1 Taille des pores.....	29
III.3.3.2.2.Seuil de coupure .....	30
III.3.3.2.3.Sélectivité .....	30
III.3.3.2.4.Perméabilité.....	30
III.3.4. Géométrie des modules .....	30
III.3.4. Nettoyage .....	32
III.3.4.1.Colmatage des membranes .....	32
III.3.4.2.Types de nettoyage .....	33
III.3.4.2.1.Nettoyage mécanique.....	33
III.3.4.2.2.Nettoyage chimique .....	34
III.3.4.2.3.Nettoyage enzymatique.....	35
III.3.4.3.Eau utilisée pour le nettoyage.....	35

#### **Chapitre IV : Le traitement des eaux de barrages par des techniques membranaires**

IV.1 Introduction .....	37
IV.2 Objectif de traitement des eaux de barrages .....	38
IV.3 Traitement des eaux de barrages par des techniques membranaires.....	38
IV.3.1.La microfiltration .....	40
IV.3.1.1.Les domaines de la microfiltration .....	40
IV.3.2.L'ultrafiltration.....	40
IV.3.2.1 Fonctionnement de l'ultrafiltration .....	40
IV.3.2.2.Trajet de l'eau dans le module.....	41
IV.3.2.3.Entretien des modules.....	42
IV.3.2.4.Caractéristiques du système d'ultrafiltration .....	42
IV.3.2.5.L'ultrafiltration appliquée aux eaux potables .....	43
IV.3.2.6.Stratégie de nettoyage des membranes .....	43
IV.3.2.7.Performances et qualité de l'eau ultrafiltrée.....	43
IV.3.2.7.Les avantages de l'ultrafiltration .....	44
IV.3.2.La nano-filtration.....	44
IV.3.2.1.Fonctionnement de la nano-filtration.....	44
IV.3.2.2.Description d'une installation de nano-filtration .....	44
IV.3.2.3.Trajet de l'eau dans le module.....	45

Figure IV.5 : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane .....	45
IV.3.2.4.Performances des membranes de la nano-filtration.....	45
IV.3.2.5.La nano-filtration appliquée aux eaux potables.....	46
IV.3.2.6.Performances et qualité de l'eau filtrée.....	46
IV.3.2.7.Les avantages de la nano filtration .....	46
<b>Chapitre V : Le traitement des eaux de barrages lors d'une catastrophe naturelle</b>	
V.1.Traitement de l'eau de barrages (catastrophe naturelle).....	48
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	53

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Répartition eau salée/eau douce sur terre .....	12
<b>Figure III.1</b> : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane sélective.....	23
<b>Figure III.2</b> : Représentation schématique des procédés de séparation membranaire par rapport à une échelle de taille des espèces susceptibles d'être présentes dans des fluides à traiter.....	28
<b>Figure IV.1</b> : les quatre techniques membranaires.....	37
<b>Figure IV.2</b> : schéma explicatif de la production de l'eau potable .....	38
<b>Figure IV.3</b> : 1 <sup>ère</sup> installation d'ultrafiltration en Suisse, Thyon, Juillet 2000, 1500 m <sup>3</sup> /jour.....	41
<b>Figure IV.4</b> : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane.....	42
<b>Figure IV.5</b> : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane.....	45

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau II.1</b> : La source de pollution de quelques barrages dans l'Algérie.....	17
<b>Tableau II.2</b> : Classification des paramètres de contrôle de la qualité de l'eau.....	18
<b>Tableau II.3</b> : Grille normative pour estimer la qualité de l'eau en Algérie.....	19
<b>Tableau III.1</b> : Principales caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire.....	27
<b>Tableau III.2</b> : Comparaison entre différents types de modules à membranes (UF, MF, NF, OI) industriels.....	31

# **Introduction générale**

**Introduction générale**

La demande en eau pour les besoins domestiques, industriels et agricoles ne cesse de croître, au fur et à mesure de la pression démographique, des disparités régionales vis à vis de son accessibilité, du dérèglement climatique, voir des catastrophes naturelles.

L'objectif de notre étude est de permettre la production d'eau potable à partir des eaux de surface en général et des eaux de barrages en particulier, en appliquant des procédés propres tels que les procédés membranaires.

En effet, le traitement couramment appliqué de par le monde, est le procédé physico chimique par coagulation/floculation. Ce procédé présente des inconvénients significatifs tels que la formation de sous-produits nocifs pour la santé et l'environnement.

Cette problématique pourrait être résolue par l'utilisation des techniques membranaires, notamment la microfiltration, l'ultrafiltration ou la nano filtration. Ce procédé est déjà opérationnel dans divers pays dans le monde et a donné des résultats probants tant du point de vue efficacité économique que celui de la santé environnementale.

C'est à cette question de permettre la possibilité de produire de l'eau potable en quantité et en qualité à partir des eaux de surface, notamment celles des barrages, dans le monde en général et en Algérie particulièrement, que nous nous sommes intéressée dans cette contribution.

Notre mémoire est composé de cinq chapitres traitant respectivement de la disponibilité des eaux de surface à l'état brute, de l'état de leur qualité affectée par des pollutions diverses, et ensuite de proposer l'utilisation des procédés membranaires pour un traitement adéquat et conforme aux normes de potabilité

# **Chapitre I**

Les ressources en eau dans le  
monde

## I.1 Introduction

Partout dans le monde, les ressources en eau disponibles s'amenuisent en raison des activités humaines et des facteurs naturels. Même si la population a pris davantage conscience au cours des dix dernières années de la nécessité de mieux gérer et protéger l'eau, les critères économiques et les considérations politiques ont toujours tendance à déterminer la politique de l'eau à tous les niveaux. La recherche scientifique et les meilleures pratiques ne reçoivent que très rarement une attention suffisante.

Les pressions qui pèsent sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie, la concurrence croissante pour les ressources en eau et la pollution.

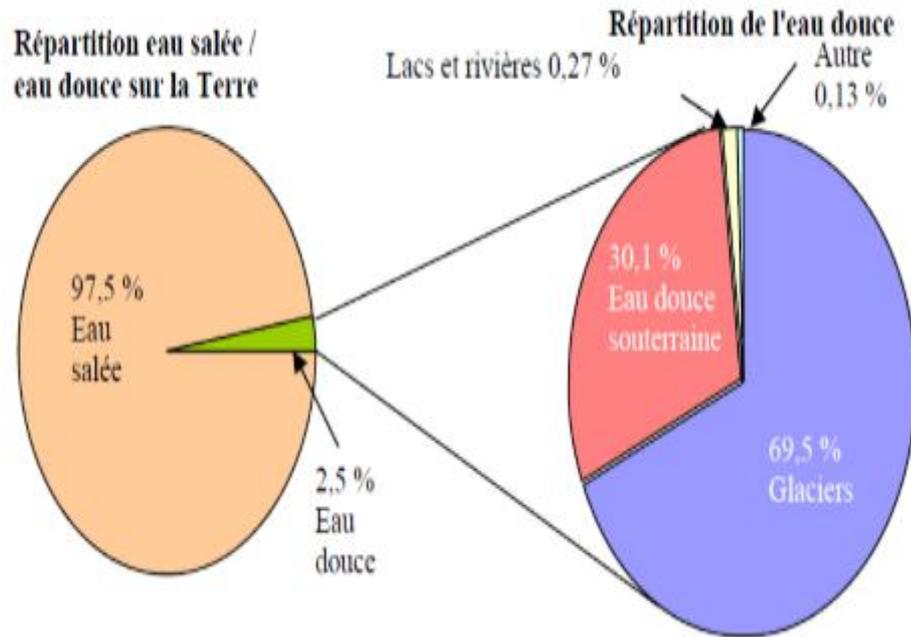
De plus, le changement climatique et les variations des conditions naturelles viennent aggraver ces pressions. On peut cependant noter certains progrès. En effet, de plus en plus, les autorités évaluent à la fois la quantité et la qualité de l'eau et coordonnent les efforts de gestion au-delà des frontières [1].

## I.2 Les réserves de l'eau sur terre

La masse d'eau totale de l'hydrosphère ne varie pas au cours des années. L'eau change d'état au cours de son cycle mais sa quantité globale reste inchangée depuis 3 milliards d'années, date de son apparition sur terre. C'est l'énergie solaire qui est le moteur du cycle de l'eau en entraînant ses changements d'état [1].

La quantité d'eau sur terre est gigantesque. Elle est estimée à environ 1,4 milliards de km<sup>3</sup>. Cette réserve se décline par 97,5 % d'eau salée et 2,5 % sous forme d'eau douce, soit environ 35 millions de km<sup>3</sup> (**figure I.1**).

L'eau douce est composée de 69,5 % de glace et de neige permanente, 30,1 % d'eau souterraine, 0,27 % d'eau présente dans les lacs et rivières, 0,13 % sous d'autres formes (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.) [2].



**Figure I.1** : Répartition eau salée/eau douce sur terre [2]

Les ressources en eau se constituent à partir des  $45\,000\text{ km}^3$ /an d'eau douce qui s'écoulent sur terre, mais on estime que seulement  $10\,000$  à  $12\,000\text{ km}^3$ /an sont utilisables. En effet, une partie de l'eau s'écoule en des lieux inhabités, une partie s'écoule trop vite pour être stockée (lors de crues) et une certaine quantité d'eau doit continuer à s'écouler au sein des écosystèmes naturels et des nappes souterraines, pour ne pas mettre en danger les équilibres et dynamiques naturels.

Remarquons toutefois que de grandes quantités d'eau douce ne sont pas comptabilisées dans les ressources en eau, car elles n'entrent pas dans le cycle annuel de l'eau [3].

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressées aux eaux superficielles et spécifiquement les eaux de barrages.

### I.3 Les réserve en eaux de barrages

Les barrages ont été longtemps le principal vecteur disponible en matière de domestication des eaux superficielles. Globalement, la capacité de mobilisation installée est répartie entre les barrages (21,4%), les forages (72,6%) et les sources (6,0%) [4].

Les barrages algériens sont de moyenne capacité, le plus grand d'entre eux a une capacité de  $450\text{ hm}^3$ /an (Gargar sur l'oued R'Hiou, Wilaya de Rélizane). Les experts

soulignent que les conditions naturelles et économiques en Algérie ne permettent pas d'avoir des barrages de plus grandes capacités comme c'est le cas par exemple de l'Égypte, où le barrage d'Assouan renferme une capacité théorique de 160 milliards de m<sup>3</sup> (soit 4 fois les écoulements superficiels de tous les pays du Maghreb) ou du Maroc, qui avec 80 barrages mobilise une capacité totale de 10 milliards de m<sup>3</sup>.

Les barrages ont commencé à être érigés en Algérie à partir du 19<sup>ème</sup> siècle, c'est le cas du premier barrage construit à Meurad (Wilaya de Tipaza). Le deuxième barrage réalisé en terre à Tlelat possède une capacité de 800000 m<sup>3</sup>.

A partir de 1930, des barrages de plus grandes capacités ont été édifiées. Les 15 barrages réalisés avant 1962 régularisent un volume annuel évalué à près de 600 millions de m<sup>3</sup>.

Depuis 1962, de nombreux barrages ont été réalisés, 110 barrages sont aujourd'hui en exploitation dont 43 avec une capacité supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup> et un volume régularisé globale de l'ordre de 1.988 millions de m<sup>3</sup>, 22 ouvrages sont en construction et 52 en projet [4].

Selon les dernières évaluations faites par les services techniques de l'ANB, les barrages dont la capacité est supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup>, mis en service à ce jour, permettent avec une capacité totale de 4,9 milliards de m<sup>3</sup> de régulariser un volume annuel estimé à 1,75 milliards m<sup>3</sup>, ce qui représente environ 40% du potentiel mobilisable.

# **Chapitre II**

## Diagnostic de la qualité des eaux de surface

**II.1 Introduction**

Les principales sources d'eau potable sont les eaux de surface. Ces eaux s'avèrent souvent impropres à la consommation en raison de la pollution générée par les activités urbaines, industrielles et agricoles. En effet, la qualité des eaux de surface varie selon les régions et les périodes de l'année. La nature et l'intensité des activités ne permettent pas toujours au cours d'eau de diluer ou de neutraliser la pollution à un niveau acceptable, si bien que l'eau ne peut pas être utilisée pour la consommation. L'emplacement des prises d'eau par rapport aux sources de pollution est aussi déterminant pour la qualité de l'eau. Il convient ainsi de situer la prise d'eau en amont d'une source importante de pollution (comme une ville ou une zone agricole) et de protéger cette prise d'eau en interdisant l'émission de contaminants aux alentours dans une zone d'une étendue respectable.

La qualité des eaux de surface varie fortement suivant leurs origines. Selon le cas, elles sont naturellement riches en matières en suspension et en matières organiques naturelles,... Elles sont également vulnérables aux pollutions. De ce fait, les eaux de surface nécessitent des installations de traitement conséquentes comprenant généralement des opérations de chloration, coagulation, floculation, décantation/ flottaison, filtration, minéralisation, neutralisation de l'acidité... [1, 2, 11].

**II.2 Caractéristiques générales**

Une eau de surface peut être chargée de gaz dissous, issus de l'atmosphère : le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, l'azote N<sub>2</sub>, l'oxygène O<sub>2</sub>... Elle peut dissoudre des constituants minéraux contenus dans le sol, des particules, matériaux divers,... en suspension :

- ❖ **Matières En Suspension (MES)** : Elles représentent tout élément en suspension dans l'eau dont la taille permet sa rétention sur un filtre de porosité donnée. Les MES sont liées à la turbidité (mesure du trouble de l'eau).
- ❖ **Les Colloïdes** : Ce sont des micelles chargées négativement (diamètre de 0,5 µm à 0,5 mm).
- ❖ **Matières Organiques (MO)** : Elles sont issues de la décomposition des animaux et végétaux morts.

- ❖ Plancton (Phytoplancton, Zooplancton) : Il est constitué par des bactéries, des protozoaires, algues, animaux et végétaux de petites tailles vivant en surface ou proche de la surface.

Les eaux de surface sont sujettes à des :

- ❖ Variations de la teneur en oxygène, fer, plancton,... en fonction de la profondeur.
- ❖ Pollutions bactériennes et/ou virales (virus de la poliomyélite, le Choléra,...).
- ❖ Pollutions organiques (eutrophisation : surmultiplication des algues).

### **II.3 Les type de pollutions**

Les eaux de surface présentent diverses pollutions, telles que :

- ❖ Pollutions microbiologiques.
- ❖ Pollution urbaine (eaux de lavages, de lessives, de vaisselles, urée, etc...).
- ❖ Pollution agricole (engrais, pesticides, herbicides,...).
- ❖ Pollutions industrielles : radioactivité (Hôpitaux, Centre nucléaire).
- ❖ Pollutions chimiques :
  - polluants organiques (Hydrocarbures, phénols, cellulose,...).
  - polluants inorganiques (Molybdène, fer, manganèse,...) [3, 4,11].

En Algérie, la pollution des ressources en eau commence à atteindre des proportions inquiétantes notamment dans la région tellienne où se trouve la plus grande partie des ressources en eau de surface.

La pollution d'origine agricole est plus élevée dans les régions où l'agriculture est intensive. De plus, l'azote et le phosphore se trouvent rarement en concentrations jugées toxiques pour la vie aquatique. Toutefois, ces éléments peuvent nuire à la qualité de l'eau à cause du processus d'eutrophisation. Les teneurs en éléments nutritifs dans les eaux de surface dépassent souvent un ou plusieurs des seuils recommandés pour la qualité de l'eau dans les régions où l'agriculture est importante. Les pesticides pénètrent dans les eaux superficielles par écoulement de surface sur les terres agricoles. Il n'est pas rare de rencontrer des bactéries dans les eaux de ruissellement qui proviennent des champs amendés avec du fumier. L'usage de l'eau par les populations provoque une pollution non seulement biologique, mais aussi, et de plus en plus souvent, physico-chimique.

Les cartes de qualité des eaux publiées par l’agence nationale des ressources hydrauliques montrent que des tronçons importants de cours d’eau dans les bassins de Tafna, Macta, Chélif, Soummam et Seybouse sont aujourd’hui pollués [5,11].

La pollution de certains barrages, tant par les eaux usées domestiques que par des rejets industriels, a déjà été soulignée (**tableau II.1**).

**Tableau II.1** : La source de pollution de quelques barrages en l’Algérie [6, 11]

<b>barrage</b>	<b>wilaya</b>	<b>Source de pollution</b>
Cheffia	El-Taref	Rejets urbains et industriels
Zardezas	Skikda	Rejets urbains
Hammam Grouz	Mila	Detergent
Lakhal	Bouira	Detergent
Béni Amrane	Boumerdes	Hydrocarbures
Kaddara	Boumerdes	Hydrocarbures
Hamiz	Alger	Hydrocarbures
Harbil	Médéa	Médicament
Fergoug	Mascara	Rejets urbains et industriels
Béni Bahdel	Tlemcen	Rejets urbains et industriels
Sidi Abdelli	Tlemcen	Rejets industriels
Merdja Sidi Abed	Relizane	Rejets urbains et industriels

La protection des ressources en eau contre les effets de la pollution, a été prise en considération par les pouvoirs publics. C'est ainsi que de nombreuses stations d'épuration (STEP) ont été réalisées. Quarante-neuf stations d'épuration d'une capacité totale de près de quatre millions équivalent-habitant ont été édifiées. La capacité de traitement de ces stations varie de 100000 à 750000 équivalents-habitants.

La pollution de certaines eaux de surface du nord d'Algérie a atteint ces dernières années un seuil critique du fait des différentes formes de contamination telles que fuites des effluents domestiques, nitrates, produits phytosanitaires et engrais chimiques. Elles sont par ailleurs, menacées par le déversement d'effluents industriels notamment les huiles usagées et solvants chlorés [6, 11]

**II.4 La qualité des eaux naturelles**

On note que 5 millions de personnes meurent chaque année dans le monde du fait de la mauvaise qualité de l'eau. L'assurance de la qualité et de l'hygiène de l'eau est l'une des exigences prioritaires de la santé publique.

**II.4.1 Contrôle de la qualité de l'eau**

Dans le but d'avoir une eau de qualité, les contrôles sont de plus en plus rigoureux. 5 paramètres étaient contrôlés en 1954 ; alors qu'ils sont de l'ordre de 61 en 1989. L'eau est l'aliment le plus surveillé. Cela est fonction du développement des techniques d'analyses mais aussi de l'introduction dans le milieu de nouvelles substances dangereuses.

**Tableau II.2 : Classification des paramètres de contrôle de la qualité de l'eau [6, 11]**

<b>Paramètres</b>	<b>Exemples</b>
Organoleptiques	Couleur, turbidité, odeur, saveur.
Physico-chimiques liés à la structure naturelle des eaux	Température, pH, chlorures, sulfates, magnésium, sodium, potassium, etc.
Substances Indésirables	Nitrates, nitrites, hydrocarbures, détergents, phénols, fer, manganèse, fluor, argent...
Substances toxiques	Arsenic, cadmium, mercure, chrome, béryllium, plomb, nickel, hydrocarbures polycycliques aromatiques...
Pesticides	Aldrine, dieldrine, hexachlorobenzène...
Microbiologiques	Coliformes, streptocoques, salmonelles, entérovirus, staphylocoques, bactériophages fécaux...

### II.4.2 Les normes de potabilité

L'eau destinée à la consommation urbaine ne doit contenir ni substances chimiques, ni germes nocifs pour la santé. En outre, elle doit être aussi agréable à boire que les circonstances le permettent. Cette définition doit être traduite en termes permettant de déterminer si une eau est potable ou non. C'est là l'objet des normes de potabilité, approche quantitative de la notion qualitative de potabilité. Ces normes s'appliqueront à un certain nombre de grandeurs jugées pertinentes en la matière [9, 10,11].

Pour estimer la qualité de l'eau potable, une grille a été établie par l'agence nationale des ressources hydrauliques pour limiter les concentrations des paramètres physico-chimiques dans les eaux potables (tableau II.3).

**Tableau II.3 :** Grille normative pour estimer la qualité de l'eau en Algérie [18].

Paramètres	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise
<b>Physico-chimiques :</b>				
pH	6.5-8.5	6.5-8.5	>8.5, <9	>9
T (°C)	25	25-30	30-35	>35
Minéralisation (mg/l)	300-1000	1000-1200	1200-1600	>1600
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	40-100	100-200	200-300	>300
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	30	30-100	100-150	>150
Na <sup>+</sup> (mg/l)	10-100	100-200	200-500	>500
Na <sup>+</sup> (mg/l)	10-150	150-300	300-500	>500
Chlorures mg/l	50-200	200-300	300-400	>400
Sulfates (mg/l)				
<b>Organiques :</b>				
O <sub>2</sub> dissous (%)	>100	100-50	50-30	<30
DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	5	5-10	10-15	<15
DCO (mg/l O <sub>2</sub> )	20	20-40	40-50	<50
Matières organiques	5	5-10	10-15	<15
<b>Composés azotés :</b>				
Ammonium (mg/l)	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3
Nitrites (mg/l)	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3
Nitrates (mg/l)	0-10	10-20	20-40	>40
<b>Composés phosphorés :</b>				
Phosphates (mg/l)	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3

<b>Eléments toxiques et indésirables :</b>	0-0.5	0.5-1	1-2	>2
Fe (mg/l)	0-0.1	0.1-0.3	0.3-1	>1
Mn (mg/l)	0	0-0.05	0.05-0.5	>0.5
Cr (mg/l)	0-0.02	0.02-0.05	0.05-1	>1
Cu (mg/l)	0	0-0.5	0.5-1	>1
Zn (mg/l)	0	0	0-0.01	>0.01
Cd mg/l	0	0	0-0.05	>0.05
Pb mg/l	0	0-0.8	0.8-1.5	>1.5
F <sup>-</sup> mg/l	0	0	0-0.02	>0.2
CN <sup>-</sup> mg/l	0.001-0.002	0.002-0.02	0.02-1	>1
Phénols mg/l				

### II.5 Conclusion

Les eaux de surface sont généralement de qualité passable à mauvaise. Les classes extrêmes de potabilité apparaissent rarement. La dégradation de la qualité des eaux est visualisée en période des basses eaux pour devenir mauvaise à saveur peu désagréable. En général, l'amélioration de la qualité des eaux ne se fait qu'en saisons froides et pluvieuses. En Algérie Les eaux de surface sont caractérisées par une charge organique assez élevée.

La pollution des eaux se manifeste sous différentes formes (pollution domestique, industrielle et agroalimentaire), et la pression démographique influence négativement sur la disponibilité en eau déjà faible [18].

# **Chapitre III**

## Généralités sur les techniques membranaires

**III.1 Introduction**

Bien que connue depuis fort longtemps, la technique de séparation membranaire a suivi un développement industriel récent et très rapide. Depuis les années 1970, on retrouve ces techniques principalement dans l'industrie laitière, des boissons, des ovo-produits, des jus et concentrés de fruits et légumes, du traitement de l'eau, de l'acériculture, ainsi que dans les secteurs pharmaceutique, chimique, biotechnologique et de l'environnement. Elles sont en particulier aussi utilisées pour la potabilisation des eaux, l'affinage des eaux de procédés, les traitements des eaux usées et la valorisation de sous-produits.

Ces procédés sont en général appréciés pour leur faible consommation énergétique et leur bonne sélectivité. Les conditions particulièrement douces de fonctionnement, en ce qui a trait aux contraintes de cisaillement, de température et d'absence de changement d'état font partie des avantages de ces procédés.

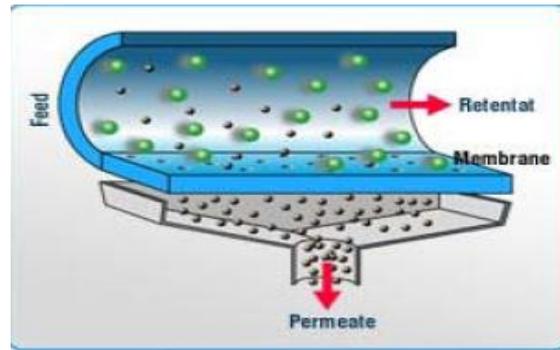
Les procédés de séparation membranaire doivent aujourd'hui être considérés comme des technologies avancées, performantes et avantageuses à l'usage. Leur installation et leur mise en œuvre a besoin d'une attention et une expertise particulière afin d'obtenir des procédés industriels extrêmement performants, fiables et économiques.

La principale difficulté pour l'utilisateur d'une technologie nouvelle est d'acquérir rapidement l'information nécessaire au choix et à la mise en œuvre du procédé adapté à ses besoins [1].

**III.2 Généralités sur les procédés de séparation membranaire**

Les procédés de séparation membranaire sont utilisés pour séparer et surtout concentrer des molécules ou des espèces ioniques en solution, ou pour séparer des particules ou des microorganismes en suspension dans un liquide.

Le but recherché peut être de concentrer une solution, d'isoler ou de séparer un ou plusieurs constituants. Pour ce faire, des membranes sélectives sont utilisées, c'est-à-dire des barrières minces, qui sous l'effet d'une force arrêtent ou laissent passer des substances entre les deux milieux qu'elles séparent (figure 1). Cette force peut être un gradient de pression, un gradient de potentiel électrique ou un gradient de potentiel chimique, souvent assimilé à un gradient de concentration [17].



**Figure III.1 :** Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane sélective [1]

Les avantages des procédés de séparation membranaire sur d'autres procédés de séparation sont :

- Une séparation à température modérée, ce qui est particulièrement intéressant vis-à-vis des composés thermosensibles traités surtout en agro-alimentaire et biotechnologies.
- Une absence de changement de phase, donc une moindre dépense énergétique comparée à des opérations comme la distillation ou l'évaporation.
- Accumulation nulle de constituants dans la membrane, d'où un fonctionnement quasiment en continu, n'ayant pas besoin de cycle de régénération comme en échange d'ions. Des arrêts sont cependant nécessaires pour le nettoyage périodique des membranes [2].

### III.3 Présentation des procédés de séparation membranaire

Parmi les divers procédés de séparation membranaire, on distingue bien sûr la filtration et la technique d'osmose inverse. Ce chapitre est dédié exclusivement aux procédés pour lesquels le transfert de matière à travers la membrane est dû à un gradient de pression, soit la filtration membranaire et l'osmose inverse.

#### III.3.1 Filtration membranaire

Les techniques de filtration membranaire ont recours à des membranes de type poreux. Les composés retenus sont sélectionnés sur une base stérique, c'est-à-dire en fonction de la taille des molécules qui les composent. Aux effets stériques peuvent s'ajouter des effets d'interaction électrostatique lorsque des membranes à petites tailles de pores sont utilisées. On distingue trois niveaux de filtration membranaire, principalement par la taille des pores :

- a. La microfiltration (MF) pour laquelle la taille des pores est de l'ordre du micromètre se situant généralement entre 0,1 à 10  $\mu\text{m}$ .

- b. L'ultrafiltration (UF) se situe entre la microfiltration et la nanofiltration, avec une taille de pores variant de 1 à 100 nm (0,001 à 0,1  $\mu\text{m}$ ).
- c. La nanofiltration (NF) où la taille de pores est de l'ordre du nanomètre (0,001  $\mu\text{m}$ ).

### III.3.1.1 Microfiltration (MF)

La séparation par microfiltration concerne en général les particules en suspension. Dans la pratique, on rencontre ce type d'opération lorsqu'on procède à la clarification d'un milieu, en recherchant à éliminer la matière colloïdale et particulaire, avant utilisation ou post-traitement du milieu. Une autre grande application de cette technique est la rétention de micro-organismes tels que les bactéries. Des réductions de l'ordre de log de 6 à 8, en fonction des micro-organismes présents, du type de membrane et des conditions d'utilisation ont été constatées.

Cette opération se caractérise par des débits volumiques de perméat plutôt élevés et par la présence, parfois, de particules en suspension dans le rétentat. Les configurations planes et spiralées sont alors peu adaptées. Des modules à fibres creuses et des membranes tubulaires sont plutôt employées.

La mise en œuvre de la microfiltration doit tenir compte des caractéristiques des membranes et de leur facilité au colmatage. La membrane étant choisie, sa mise en marche a une importance très grande sur le colmatage, donc sur le rendement de l'opération. De façon générale, deux règles aux contraintes parfois antagonistes doivent être observées :

- La pression transmembranaire (PTM) doit être maintenue très faible, en particulier, au démarrage de l'installation, lors de la mise en route des pompes et lors de la fermeture des vannes de régulation de la pression. Il est indispensable de veiller à ce que la pression transmembranaire augmente très progressivement. En effet, pour les membranes de microfiltration ayant une très grande perméabilité, si la pression initiale augmente trop rapidement, le flux risque d'être immédiatement très élevé, mais pour une durée de temps très courte. Un tel fonctionnement génère un colmatage de la membrane très important compromettant ainsi le rendement pour le restant de l'opération. Une régulation de l'installation sur la base d'un flux de filtration constant plutôt que sur une pression de consigne est en général bien plus avantageuse du point de vue de la maîtrise du colmatage.
- La vitesse de circulation doit être élevée, car l'origine du colmatage est ici particulaire. Plus les particules que l'on souhaite éliminer de la surface de la membrane sont petites, plus la vitesse doit être élevée. Cette règle va cependant à l'encontre de la précédente, car un débit de recirculation élevé entraîne une perte de charge le long de chaque module, donc nécessite une

augmentation de la pression d'entrée, ce qui augmente la différence de pression transmembranaire.

Un compromis est donc à chercher entre la longueur des modules, la vitesse de circulation et la pression transmembranaire maximale qui est, très souvent, le critère le plus important. Des modules à fibres creuses et des membranes tubulaires sont généralement employées.

Les membranes de microfiltration sont caractérisées essentiellement par un diamètre nominal de pores [24].

### **III.3.1.2 Ultrafiltration (UF)**

Cette opération concerne la rétention de macromolécules (protéines, polysaccharides, etc.) et d'autres espèces de taille analogues comme des virus et des particules colloïdales. Toutes les espèces de plus grande dimension sont retenues également. Outre la dimension des espèces concernées, la différence majeure avec les autres procédés de filtration tangentielle connexes réside dans les mécanismes de transport mis en jeu et les propriétés des fluides.

La plus importante application dans le domaine agroalimentaire est dans l'industrie laitière. Le traitement du lactosérum permettant la récupération de protéines aux propriétés fonctionnelles très intéressantes et la réduction de la charge polluante dans les rejets est un exemple de l'application. Dans la pratique, ce type de membrane est souvent utilisé pour réaliser des opérations de séparation de petites particules ou de gros colloïdes. La raison à cela est que les pores de ces membranes étant plus petits en moyenne que ceux d'une membrane de microfiltration, on peut éviter dans certains cas un colmatage interne difficile à nettoyer. La décision de procéder de la sorte repose sur le flux moyen de filtration obtenu. Des essais pilotes peuvent permettre de trancher entre l'utilisation de membranes de microfiltration de perméabilité à l'eau élevée, mais qui se colmatent beaucoup, et l'utilisation de membranes d'ultrafiltration de perméabilité moyenne, mais dont le colmatage peut être moins sévère.

Dans la pratique, il est utile de connaître le flux limite, qui doit être déterminé expérimentalement tout en assurant que les conditions industrielles soient bien représentées d'un point de vue hydrodynamique. Une règle empirique recommande souvent de choisir le flux de travail à 80 % du flux limite. Travailler à un flux proche du flux limite favorise le colmatage irréversible et induit des coûts de nettoyage excessifs.

Les membranes d'ultrafiltration sont probablement celles pour lesquelles on trouve la plus grande variété de matériaux et de géométries. Des modules tubulaires, à fibres creuses, plans et spiralés sont employés en ultrafiltration. Ces membranes sont caractérisées par leur

perméabilité et par leur seuil de coupure qui remplace la taille de pores lorsque les membranes sont classées par la sélectivité [22].

### **III.3.1.3 Nano-filtration (NF)**

Les espèces concernées par la nano-filtration ont des tailles proches à celle de la molécule d'eau. Des molécules et des ions sont souvent partiellement retenus par ces membranes. Plus que toutes les autres membranes, ces membranes présentent des mécanismes de sélectivité mixtes basés à la fois sur la charge et sur la taille des molécules. Elles permettent donc des séparations entre ions et petites molécules sur la base de leur taille. Les tailles des pores étant petites, les pressions nécessaires sont plus élevées qu'en ultrafiltration et les flux sont en général modérés. Les applications de la nano-filtration sont développées dans le domaine du traitement de l'eau et du traitement de certains fluides biologiques.

Les membranes de nano-filtration sont presque exclusivement polymériques et se présentent essentiellement sous forme de modules en fibres creuses et de modules spiralés. Ce sont des membranes anisotropes, parfois composites, mais toujours avec une peau aux pores de petite taille. Quelques membranes inorganiques sont également proposées sur le marché dans une gamme de sélectivité se situant entre l'ultrafiltration et la nanofiltration.

Ces membranes se caractérisent par leur rétention pour un ou plusieurs sels inorganiques simples (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, etc.) et par leur rétention pour des molécules neutres (en général des sucres tels que fructose, glucose, etc.). La concentration des solutions à laquelle ces mesures sont faites est une donnée qui peut être utile à l'utilisateur, lorsqu'elle est disponible, car ces caractéristiques dépendent fortement de l'environnement physico-chimique [24].

### **III.3.1.4 Osmose inverse (OI)**

La technique d'osmose inverse ne s'apparente en rien aux techniques de filtration décrites ci-dessus. L'espace libre entre les enchevêtrements des matériaux qui composent ces membranes est voisin de l'Angström (1/10 du nanomètre ou 1/10000 du micromètre), soit de l'ordre de la taille d'une molécule d'eau. À cette échelle, on ne parle plus de membrane poreuse, mais plutôt de membrane dense. Les phénomènes de transfert de matière à travers la membrane sont bien différents de ceux qui ont lieu dans les cas de la filtration. Seul le solvant, l'eau le plus souvent, est diffusée à travers la membrane et la quasi-totalité des sels et autres constituants du système sont retenus.

Rappelons que le principe de l'osmose est basé sur l'équilibre de concentration d'espèces entre deux milieux séparés par une membrane semi-perméable. Sans la présence de

membrane, les solutés se transportent par diffusion (et éventuellement convection naturelle), de façon à obtenir un seul milieu homogène avec une concentration uniforme. Avec une membrane, les solutés ne peuvent changer de milieu et c'est donc le solvant qui traverse la solution diluée vers la solution concentrée. La différence de concentration est ainsi réduite, mais une différence de pression de part et d'autre de la membrane est aussi créée, ceci jusqu'à l'atteinte d'un équilibre. La figure 2 illustre ce phénomène. Lorsqu'il n'y a plus de mouvement de flux à travers la membrane et qu'il y a une différence de concentration entre les deux côtés de la membrane, la pression correspondante est la pression osmotique.

Il apparaît donc que cette pression osmotique dépend bien sûr du milieu solvant/soluté (donc aussi de la membrane car c'est elle qui définit quelle substance est soluté) et de la différence de concentration [23].

### III.3.2 Caractéristiques des procédés de séparation membranaire

Les principales caractéristiques des procédés de séparation membranaire sont regroupées au tableau III.1.

**Tableau III.1** : Principales caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire [17]

	Procédé			
	Microfiltration	Ultrafiltration	Nanofiltration	Osmose inverse
<b>Caractéristiques de la membrane</b>	Poreuse Convection 100 à 10000 nm	Poreuse Convection 1 à 100 nm	Poreuse Solubilisation/ diffusion + Convection 1 à 10 nm	Dense Solubilisation/diffusion
<b>Perméation de</b>	Solvants et espèces dissoutes	Solvants, sels et petites molécules	Solvants, ions monovalents et petites molécules	Solvants
<b>Rétention de</b>	Particules, colloïdes	Macromolécules, colloïdes	Petites molécules ( $M > 300$ g/mol) Ions	Sels
<b>Pression d'opération usuelle et débit à</b>	0,2 à 2 bar (3 à 30 psi) 150 à 1500 l/h/m <sup>2</sup>	2 à 10 bar (30 à 150 psi) 50 à 300 l/h/m <sup>2</sup>	7 à 40 bar (100 à 600 psi) 50 à 100 l/h/m <sup>2</sup>	30 à 80 bar (450 à 1200 psi) 10 à 60 l/h/m <sup>2</sup>

<b>travers la membrane</b>				
<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Épuration bactérienne du lait</li> <li>-Fractionnement des globules gras du lait</li> <li>-Fractionnement de protéines</li> <li>-Traitement d'émulsions huile/eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentration de protéines</li> <li>-Clarification et stabilisation de moûts, jus, vins</li> <li>-Fabrication de préformage liquide</li> <li>-Traitement des effluents (saumure)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Séparation et concentration d'antibiotiques</li> <li>-Fractionnement d'acides aminés</li> <li>-Adoucissement d'eau potable</li> <li>-Concentration et déminéralisation du lactosérum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentration de lactosérum, de sang, de blanc d'oeuf, de sève d'érable</li> <li>Dé-alcoolisation des vins et de la bière</li> <li>-Dessalement des eaux</li> </ul>

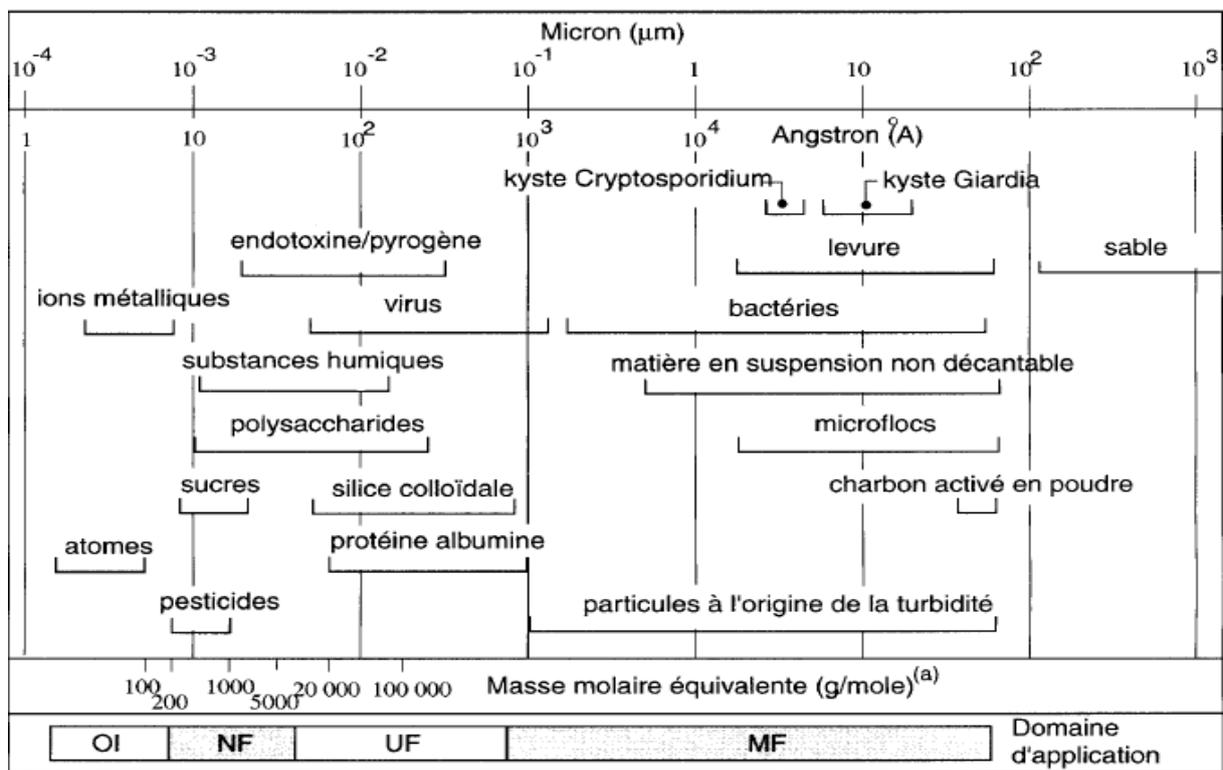


Figure III.2 : Représentation schématique des procédés de séparation membranaire par rapport à une échelle de taille des espèces susceptibles d'être présentes dans des fluides à traiter [17]

### III.3.3 Les membranes

Il existe une grande diversité de membranes. Elles sont classées par familles, selon leur nature chimique, leur structure et leur forme physique liée à leur mode de fabrication.

Une membrane est une interface physique, de faible épaisseur, qui contrôle le transfert d'espèces chimiques entre les deux milieux qu'elle sépare. Cette interface peut être homogène au niveau moléculaire, uniforme en composition et structure, ou elle peut être chimiquement et physiquement hétérogène, contenant des pores de dimension finie ou contenant des couches superposées [26].

#### III.3.3.1 Types de membrane

**Leur nature :** Les membranes sont fabriquées à partir de différents matériaux, de type organique ou minéral.

**Leur porosité :** nous avons la membrane poreuse qui est similaire par sa structure au filtre conventionnel (de diamètre de pore supérieur au micron), mais elle diffère par la taille de ses pores 0,01 à 1 micron. Et la Membrane dense qui consiste en un film dense à travers lequel le perméat est transporté par diffusion sous l'effet d'une force de pression, de concentration ou de gradient de potentiel électrique [17].

**Leur fabrication :** Pour obtenir une perméabilité sélective élevée, compatible avec un usage industriel, il est nécessaire que la barrière soit la plus mince possible. Il en résulte une certaine fragilité qui a été palliée par la consolidation de la barrière mince par différents moyens que ce soit, un support à pores de même nature ou de nature différente, un support tissé [26].

#### III.3.3.2 Caractéristiques des membranes

Les membranes sont généralement caractérisées par leur taille des pores, leur seuil de coupure relatif à une masse moléculaire critique, leur sélectivité ainsi que leur perméabilité à l'eau pure dans des conditions standard.

##### III.3.3.2.1 Taille des pores

La taille des pores varie de quelques microns en microfiltration à un nanomètre en nano-filtration. La porosité d'une membrane n'est jamais parfaitement uniforme. En deçà du nanomètre, le mécanisme de transfert de solvant est plutôt de type solution/diffusion 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 [17].

#### **III.3.3.2.2. Seuil de coupure**

Le seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire critique pour laquelle 90 % des solutés sont retenus par la membrane. Celui-ci se mesure en g/mol ou en Dalton. Le seuil de coupure est une façon pratique de caractériser les membranes, mais pas tout à fait rigoureuse d'un point de vue scientifique, car il dépend aussi des autres caractéristiques du soluté ainsi que des conditions d'opération. Aussi le seuil de coupure doit-il être défini par rapport à un soluté donné [17].

#### **III.3.3.2.3. Sélectivité**

La sélectivité est une caractéristique difficile à quantifier et pourtant essentielle. C'est une caractéristique de surface de la membrane, qui détermine quels composés de la solution la traversent. Cette caractéristique est liée à la nature même de la membrane, physique et chimique [17].

#### **III.3.3.2.4. Perméabilité**

La perméabilité est un paramètre qui caractérise l'aisance avec laquelle l'eau traverse la membrane. La perméabilité dépend principalement de la taille des pores ainsi que de l'épaisseur de la membrane pour les membranes poreuses. Elle dépend aussi des propriétés chimiques pour les membranes denses [26].

### **III.3.4. Géométrie des modules**

Les membranes se présentent sous forme de films plans (feuilles), de tubes ou de fibres creuses. Elles sont mises en œuvre dans des modules regroupant un ou plusieurs éléments de base.

Les différents types de modules développés au cours du temps se distinguent en termes de performance par leur coût, la surface filtrante par module, la consommation énergétique par unité de volume de perméat produit, la susceptibilité au colmatage, la facilité de nettoyage et l'aptitude à travailler dans les conditions de procédé (température, viscosité, pression, débit, pH, abrasion, résistance aux traitements de nettoyage). Les quatre types de module disponibles de nos jours pour des applications industrielles sont les suivants :

- module à membrane plane ;

- module à membrane tubulaire ;
- module à membrane spiralée ;
- module à fibres creuses.

**Tableau III.2** : Comparaison entre différents types de modules à membranes (UF, MF, NF, OI) industriels [25]

	<b>Géométrie</b>			
	<b>Plan</b>	<b>Spiralée</b>	<b>Tubulaire</b>	<b>Fibres creuses</b>
<b>Membranes</b>	Organique en format rectangulaires ou en disque	Organiques	<b>Organiques :</b> monotubulaires <b>Minérales :</b> monotubulaires ou multicanaux	Organiques avec la couche séparatrice ou peau à l'intérieur ou à l'extérieur
<b>Assemblage</b>	Selon le principe du filtre-pressé. Le côté rétentat se trouve entre les plaques porte-membranes, qui sont séparées entre elles par des joints cadres. Le côté perméat se trouve dans la partie creuse de la plaque	Les membranes d'origine plane sont enroulées et collées sur un tube perforé avec des grilles flexibles pour séparer le côté rétentat du côté perméat	Le module consiste en un assemblage de plusieurs membranes tubulaires parallèles séparées par des joints d'étanchement. Le côté rétentat se trouve l'intérieur et le côté perméat à l'extérieur des tubes. L'ensemble est incorporé dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable	Le module consiste en un ou plusieurs faisceaux de fibres creuses empotés dans une résistance et assemblés dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable
<b>Surface filtrante par module industriel</b>	jusqu'à 100 m <sup>2</sup>	jusqu'à 30 m <sup>2</sup>	jusqu'à 25 m <sup>2</sup>	jusqu'à 74 m <sup>2</sup>

<p><b>Avantages</b></p>	<p>Flexibilité du système Modulaire Échange standard par plaque Faible consommation d'énergie Accès aux membranes Performance (flux) Plaques réutilisables</p>	<p>Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Prix</p>	<p><b>En général :</b> Faible colmatage Facilité de nettoyage Échange standard par Tube Traitement de produits visqueux facile <b>Membranes minérales :</b> Durée de vie Tenue mécanique Thermostabilité Résistance aux lavages chimiques Stérilisation à la vapeur</p>	<p>Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Tenue mécanique Prix</p>
<p><b>Inconvénients</b></p>	<p>Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage Prix</p>	<p>Performance (flux) Échange standard par module Traitement de produits visqueux difficile Faible résistance thermique des matières plastiques Perte de charge élevée Zones mortes Colmatage Nettoyage difficile Accès aux membranes Membranes collées Télescopage de la membrane</p>	<p><b>En général :</b> Volume mort important Consommation d'énergie Prix <b>Membranes organiques :</b> Faible résistance thermique des matières plastiques</p>	<p>Traitement de produits visqueux difficile Échange standard par module Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage</p>

### III.3.4. Nettoyage

#### III.3.4.1. Colmatage des membranes

Le colmatage des membranes a pour conséquence de réduire le flux d'écoulement ou d'augmenter la pression d'opération, ainsi que de modifier la sélectivité des membranes. Le but du nettoyage est de retrouver, par une procédure chimique, mécanique ou enzymatique, les caractéristiques initiales des membranes. Cependant, les membranes propres ne retrouvent jamais les caractéristiques qu'elles avaient lorsqu'elles étaient neuves et au fur et à mesure des nettoyages, elles ont toujours plus ou moins tendance à se dégrader.

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. Les caractéristiques de ces éléments sont fonction de la composition physicochimique du fluide filtré (solvant et soluté), de la nature chimique de la membrane, de sa perméabilité ainsi que des conditions d'opération (température, pression, hydrodynamique, pH, force ionique, etc.) du procédé de séparation. Il est possible de classer les éléments colmatant en deux groupes :

- les résidus solubles dans l'eau, qui peuvent être éliminés par une étape de rinçage (par exemple, les sucres)
- 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.

Les protéines constituent le principal agent de colmatage dans le domaine agroalimentaire et biologique. L'expérience montre que leur élimination doit être réalisée avec des détergents à pH alcalin, et que plus la valeur du pH est élevée, plus son hydrolyse et sa solubilité augmentent. Les membranes colmatées par des protéines ne doivent pas être conservées sous formaldéhyde, car il en résulte la formation de composés du type bakélite très difficiles à éliminer [27].

#### **III.3.4.2. Types de nettoyage**

Trois types de nettoyage sont de façon générale pratiqués :

- Le nettoyage mécanique, un nettoyage partiel, mais rapide ;
- le nettoyage chimique, qui implique un arrêt de production périodique, génère des coûts en solutions de lavage et en traitement des effluents ;
- le nettoyage enzymatique.

##### **III.3.4.2.1. Nettoyage mécanique**

Le principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques, d'origine hydrodynamique. La procédure généralement utilisée est le rétrolavage.

Une partie du perméat est retourné à contre-courant à travers la membrane. Une telle pratique nécessite une membrane qui soit en mesure de supporter physiquement un gradient de pression inversé. Une autre pratique consiste à utiliser des écoulements pulsés, ce qui permet d'augmenter périodiquement la vitesse tangentielle à la surface de la membrane.

Enfin, par injection continue ou occasionnelle d'air (ou de gaz) à travers la membrane, la matière déposée en surface peut éventuellement se détacher.

Très efficace dans le cas de dépôts faiblement liés au support, ce type de nettoyage ne concerne que les configurations tubulaires ou spiralées. Toutefois il ne permet pas de se libérer totalement du nettoyage ou de la désinfection par voie chimique, mais vise à réduire leur fréquence.

#### **III.3.4.2.2. Nettoyage chimique**

Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phases de rinçage. La durée d'une séquence de nettoyage peut aller de 30 à 60 min. Les nettoyages sont généralement effectués à la température la plus élevée que la membrane peut supporter sans dégradation, pour une meilleure efficacité, soit de 60 à 80 °C. Les principales étapes de nettoyage se déroulent ainsi :

- Le premier rinçage a pour but d'éliminer les composants solubles accrochés à la membrane. On utilise donc l'effet mécanique d'un écoulement tangentiel à haute vitesse ainsi que l'effet solvant de l'eau ;
- le premier nettoyage à base d'acide, a pour objectif de solubiliser les couches d'entartrage contenant calcium, tartre et minéraux, et ainsi d'éviter la formation d'hydroxydes insolubles donc très difficiles à éliminer;
- un deuxième rinçage permet d'éviter la neutralisation de la deuxième solution de nettoyage ;
- le deuxième nettoyage, alcalin, a principalement pour effet d'hydrolyser la matière organique et biologique.

La séquence de nettoyage dépend bien évidemment du contexte d'utilisation. Par exemple, pour une application de traitement du lait, où les protéines constituent le principal composant du colmatage, le traitement alcalin précèdera le nettoyage acide. Par contre, lorsque le colmatage inorganique domine, le traitement acide sera généralement effectué en premier lieu. L'agent de nettoyage doit à la fois être efficace pour éliminer l'agent colmatant et inoffensif vis-à-vis des membranes et du procédé. Par exemple, des solutions d'HCl ne sont pas utilisables en présence d'acier inoxydable. La connaissance de la nature du matériau membranaire et de son environnement conduit à exclure certains réactifs et impose la limite en pH, en température, en temps de contact et en concentration.

### III.3.4.2.3. Nettoyage enzymatique

Ce type de nettoyage 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. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes requièrent des temps de traitement plus longs que les traitements chimiques et sont aussi plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont peu souvent adoptés [12].

### III.3.4.3. Eau utilisée pour le nettoyage

La qualité de l'eau utilisée dans les opérations de nettoyage des membranes est déterminante.

On considère qu'au niveau industriel dans plus d'un cas sur dix, l'eau utilisée est elle-même encrassante vis-à-vis des membranes. Idéalement l'eau de nettoyage des membranes (eau de rinçage ou eau de préparation des solutions) doit satisfaire de façon générale aux conditions suivantes :

- indice de colmatage (Fouling index) inférieur à 1 – 5 ;
- dureté totale entre 1 à 5 milliéquivalent/L ;
- teneur en silicates inférieure à 1 – 5 mg/L ;
- teneur en fer inférieure à 0,1 – 0,5 mg/L ;
- teneur en manganèse inférieure à 0,02 – 0,2 mg/L.

Si l'eau disponible dans l'installation est entartrante ou agressive, on devra la traiter. Pour des applications dans le secteur agroalimentaire, la qualité microbiologique de l'eau doit être surveillée [17].

## **Chapitre IV**

Le traitement des eaux de  
barrages par des techniques  
membranaires

### IV.1 Introduction

La complexité et la difficulté du problème des effluents ont motivé et encouragés les chercheurs d'envisager un grand nombre de solutions [1]. Par conséquent, le monde des scientifiques et des industriels s'est intéressé depuis longtemps aux techniques mettant en œuvre un transfert liquide-liquide aux travers d'une membrane qui joue un rôle prépondérant.

Dans ce chapitre nous allons présenter le traitement des eaux de barrage par les techniques membranaires et spécifiquement la microfiltration, l'ultrafiltration et la nano filtration, on ne va pas utiliser l'osmose inverse parce que les eaux de barrage ne contiennent pas les sels. À l'époque les eaux de barrages sont utilisées dans plusieurs domaines : l'approvisionnement en eau, l'irrigation,.... De nos jours avec le développement industriel et la croissance démographique, les eaux de barrage demeurent très polluées, il faut donc un traitement pour l'utiliser.

La microfiltration, la nano-filtration et l'ultrafiltration sont des meilleures techniques membranaires pour l'élimination de cette pollution. Elle assure à la fois la séparation physique des deux phases liquides et le contrôle du transfert sélectif [2]. Elles interviennent désormais dans des domaines très divers, tels que le traitement des surfaces métalliques, les industries agro-alimentaires, textiles, pharmaceutiques, les biotechnologies et surtout le traitement des effluents.

En l'absence de changement de phase, la membrane agit comme une barrière permsélective 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.

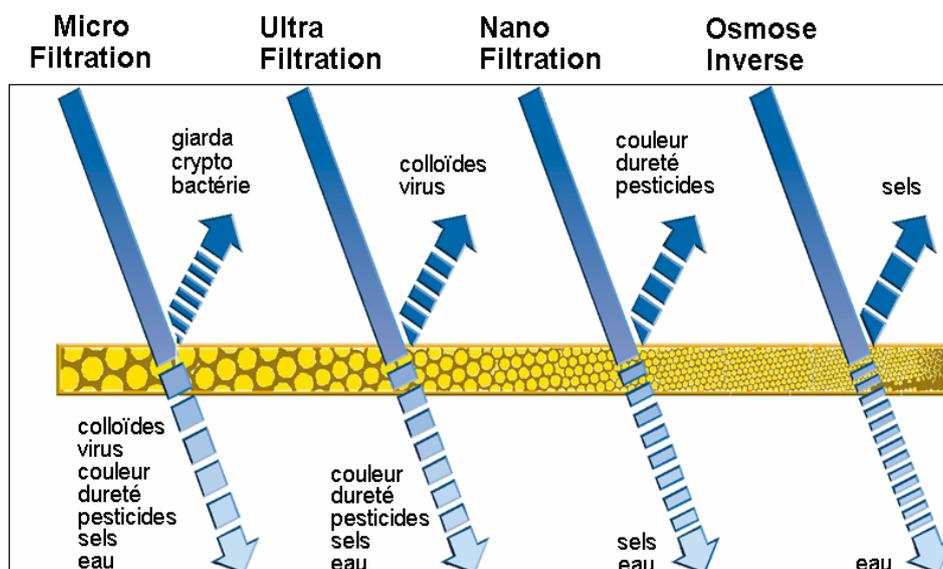


Figure VI.1 : les quatre techniques membranaires

## IV.2 Objectif de traitement des eaux de barrages

La pénurie de la ressource et les difficultés de sa mobilisation d'une part et les coûts importants de l'eau potable d'autre part, ont poussé les autorités locales à s'orienter vers une ressource alternative à savoir celle des eaux de barrages épurées. Cette solution allait non seulement régler le problème de la contamination en eau mais allait permettre également de :

- Economiser l'eau pour l'alimentation en eau potable de la ville et diminuer ainsi la pression sur la ressource en eau ;
- résoudre le conflit existant entre l'Office national de l'eau potable et les gestionnaires ;
- la diminution du coût de l'eau d'arrosage.

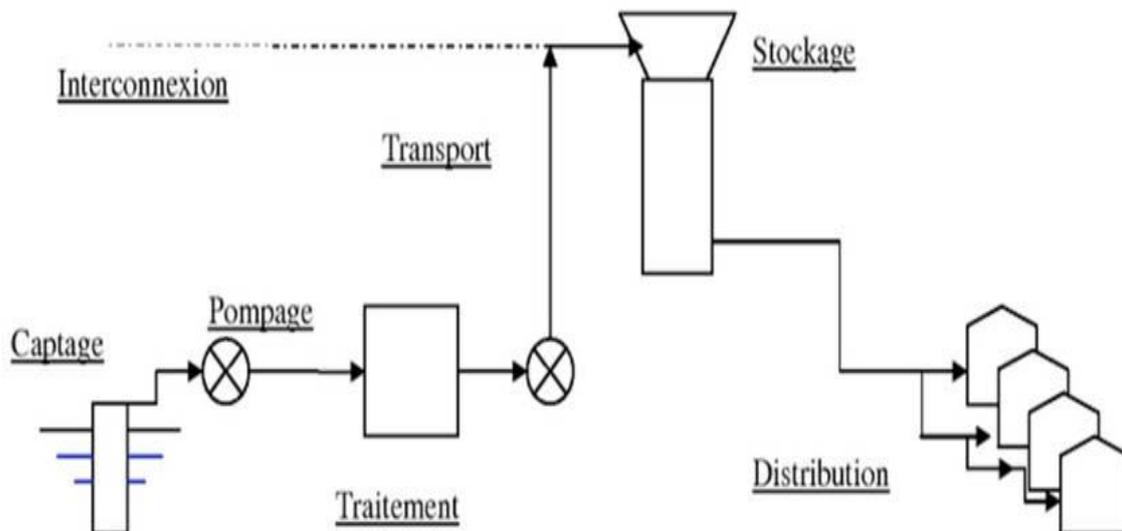
## IV.3 Traitement des eaux de barrages par des techniques membranaires

L'eau de barrage captée à la source contient des impuretés :

- Matières en suspension (sables fins, argile, limon) qui ont une taille de quelques microns.
- Germes pathogènes (parasites, bactéries, virus) parfois présents dans les eaux de sources ou de nappes phréatiques, qui ont une taille de quelques dixièmes de microns.
- Des substances chimiques comme les pesticides.

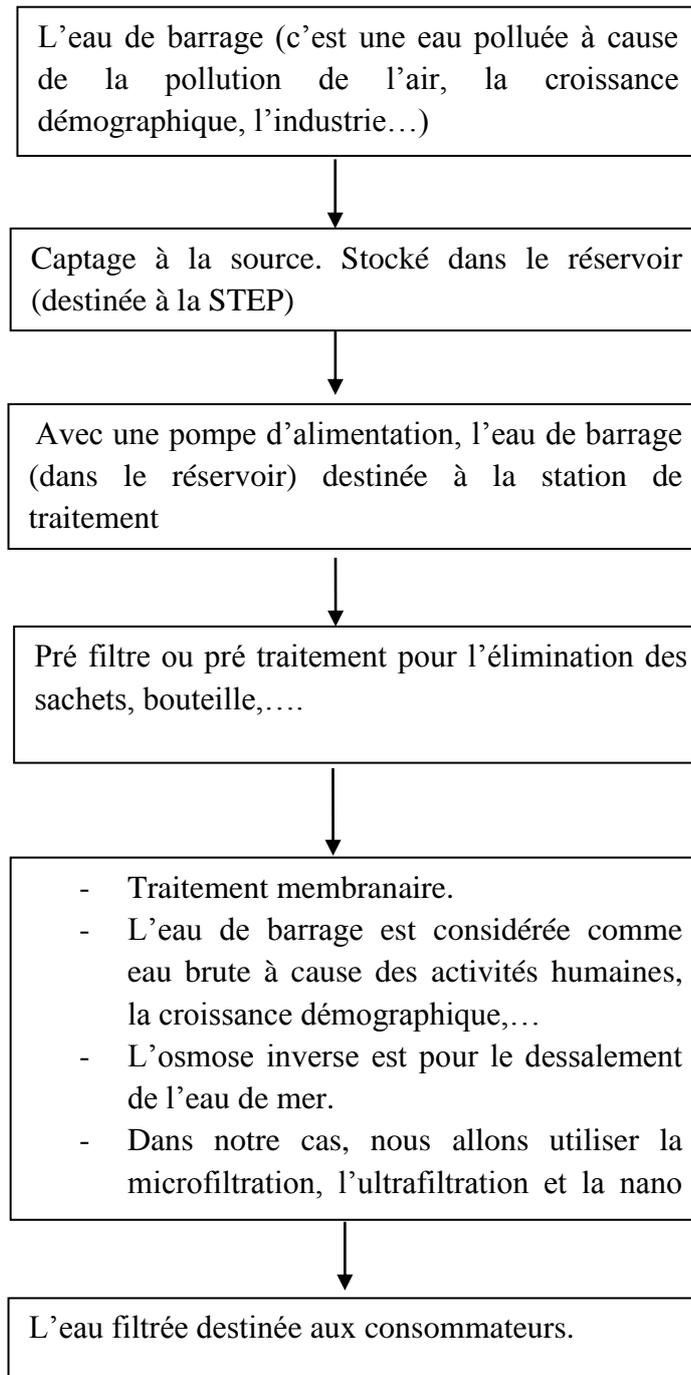
Ces impuretés sont responsables des fortes pointes de turbidité à la suite d'orages notamment.

La figure IV.2 explique la production de l'eau potable [3].



**Figure IV.2** : schéma explicatif de la production de l'eau potable

Les étapes de la production de l'eau potable par les techniques membranaires :



### **IV.3.1. La microfiltration**

La microfiltration est une technique de séparation physique des éléments. Elle utilise des membranes filtrantes dont le diamètre des pores est compris entre 0,1 et 10 micromètres.

La microfiltration élimine donc les matières en suspension, les micro-algues et les bactéries présentes dans un liquide.

#### **IV.3.1.1. Les domaines de la microfiltration**

La microfiltration est utilisée pour le prétraitement et le traitement des eaux, l'élimination des bactéries et particules solides dans les liquides alimentaires (lait, huile) et pour la dépollution des effluents.

Plusieurs étapes, avec la microfiltration, permettent d'assainir une eau potable du robinet : la microfiltration permet déjà d'obtenir un rétentat facilitant le travail de l'ultrafiltration ensuite.

### **IV.3.2. L'ultrafiltration**

#### **IV.3.2.1 Fonctionnement de l'ultrafiltration**

En utilisant la technologie de l'ultrafiltration, les matières en suspension, la turbidité, les pigments de couleur, et plus important encore les virus et les bactéries présents dans l'eau, sont totalement enlevés.

Cette méthode procure un grand avantage, particulièrement pour le traitement des eaux de source naturelle ou de l'eau potable. Le principe de fonctionnement du système peut être résumé comme suit : la structure de la membrane a la forme de tubes capillaires et elle fonctionne selon une méthode de courants croisés.

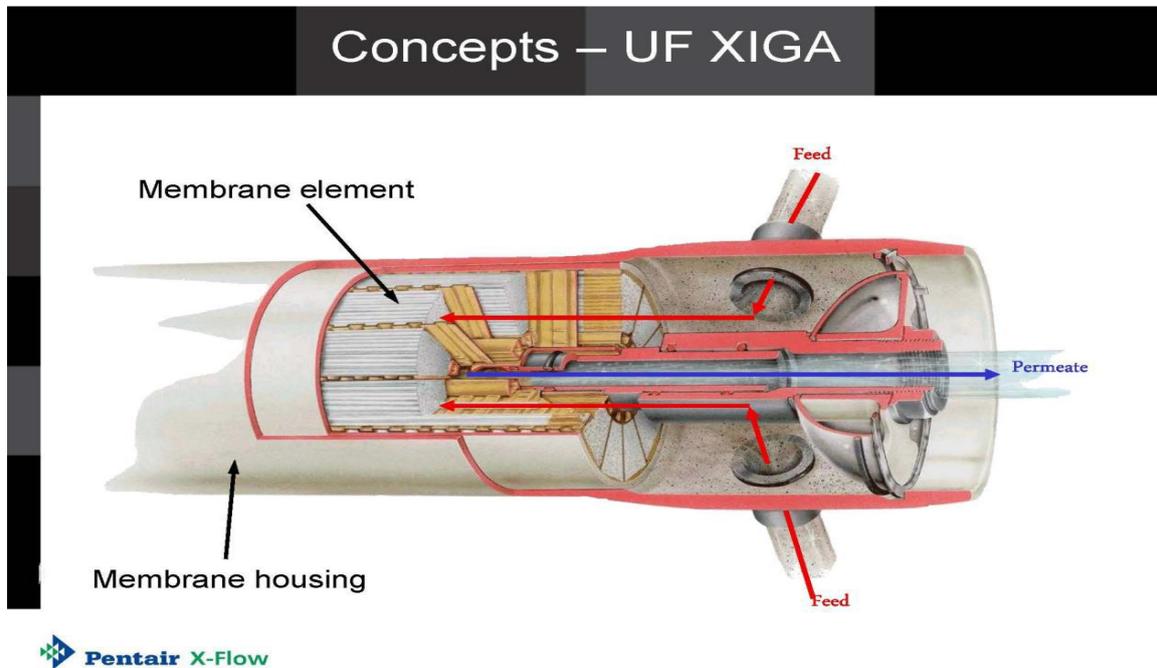
Lors du processus de traitement, l'eau de barrage qui s'écoule au travers des tubes capillaires traverse des pores d'une taille de 25 angströms sur la surface de la membrane, au moyen de pompes qui ne requièrent pas de haute pression [4].



**Figure IV.3 : 1<sup>ère</sup> installation d'ultrafiltration en Suisse, Thyon, Juillet 2000, 1500 m<sup>3</sup>/jour**  
**IV.3.2.2. Trajet de l'eau dans le module**

L'eau injectée sous pression est d'abord envoyée à l'intérieur des fibres creuses. Là, elle est ultrafiltrée au travers de leurs pores. Puis elle quitte le module par son tube central ; on lui donne alors le nom de perméat (**Figure IV.4**).

C'est donc la paroi des fibres du module qui va jouer le rôle de membrane ultra filtrante. Elle arrêtera systématiquement toutes les particules de taille supérieure à  $0,01 \mu\text{m}$  (seuil de coupure), c'est-à-dire les microbes, virus et bactéries.



**Figure IV.4** : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane [4]

#### IV.3.2.3. Entretien des modules

- Avec le temps, l'intérieur des fibres des modules s'encrasse ; un « gâteau » se forme ;
- A intervalles réguliers, on l'élimine par rétro lavage en inversant le flux de filtration ;
- De temps en temps aussi, on procède au nettoyage et à la désinfection des modules par lavage renforcé de même sens que le rétro lavage mais utilisant des solutions type lessive avec acides, soude, javel... ;
- Ces produits chimiques n'attaquent pas les fibres ; et leurs rejets se neutralisent mutuellement en formant des sels sans aucun danger pour l'environnement ;
- Après ultrafiltration, l'eau est potable et débarrassée de tous germes ;
- Les derniers traitements consisteront simplement à ajuster son pH et sa minéralité.

#### IV.3.2.4. Caractéristiques du système d'ultrafiltration

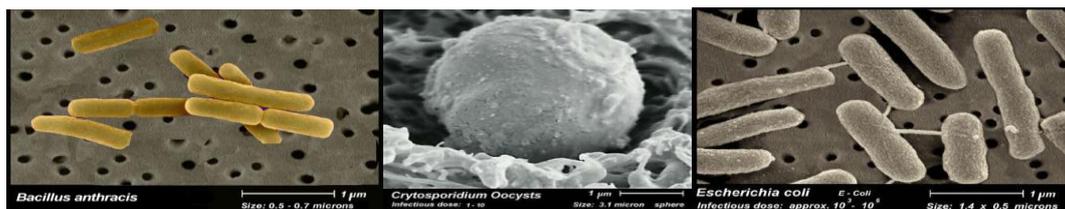
- Tuyauterie en PVC.
- Module membrane type vertical.

- Lavage et dé tassage chimique.
- Transmetteurs de pression pour le contrôle du différentiel de pression.
- Unité PLC et panneau de fonctionnement.
- Châssis en acier inoxydable 304.

#### IV.3.2.5.L'ultrafiltration appliquée aux eaux potables

- Elimination de la turbidité et de MES.
- Elimination des bactéries & virus.
- Elimination des parasites (Giardia, Cryptos).
- Elimination des germes fécaux.
- Appropriée aussi aux eaux de surface :
  - Sources sous influence (eaux karstiques,...)
  - Rivières, lacs, barrages

#### Quelques exemples :



Bacilliose anthracis

cryptosporidium Oocysts

Escherichia coli

#### IV.3.2.6.Stratégie de nettoyage des membranes

- Alternance frontal / tangentiel.
- Rétro-lavage à l'eau claire (1 fois par 40-60 mn).
- Désinfection avec Javel (1-3 fois par jour).
- Nettoyage chimique (0 à 4 fois par an, sur seuil).
- Test d'intégrité 100% automatique.
- Traitement des effluents (neutralisation).

#### IV.3.2.7.Performances et qualité de l'eau ultrafiltrée

- Turbidité < 0.03 FNU.
- Bactéries & Virus > -5 & -3 logs.
- Parasites 0.
- Pertes en eau 2 –6 %.

**IV.3.2.7. Les avantages de l'ultrafiltration**

- fiabilité des matériaux.
- moins de produits chimiques requis.
- suivi relativement simple, dès que l'installation est mise au point correctement.
- usage efficace de l'énergie.
- pas de changement d'état d'agrégation nécessaire.

**IV.3.2. La nano-filtration**

Une eau de barrage est considérée comme un peu difficile si elle présente plusieurs paramètres spécifiques à corriger afin de la rendre apte à la consommation humaine. Ainsi on trouve fréquemment dans les ressources, à la fois des pesticides et des nitrates provenant d'une pollution diffuse d'origine agricole (traitements phytosanitaires, pour le premier, engrais et élevages, pour le second). En plus des pesticides et des nitrates, l'eau peut également présenter une dureté importante. Il n'est donc pas rare d'être confronté à la nécessité de corriger ces trois paramètres pour une même ressource, la nano filtration est un procédé envisageable pour la production d'eau destinée à la consommation humaine [17].

**IV.3.2.1. Fonctionnement de la nano-filtration**

En utilisant la technologie de la nano-filtration, les matières en suspension, la turbidité, les pigments de couleur, et plus important encore les virus et les bactéries présents dans l'eau, et la dureté les pesticides sont totalement enlevés.

**IV.3.2.2. Description d'une installation de nano-filtration**

Une installation de nano-filtration comporte essentiellement :

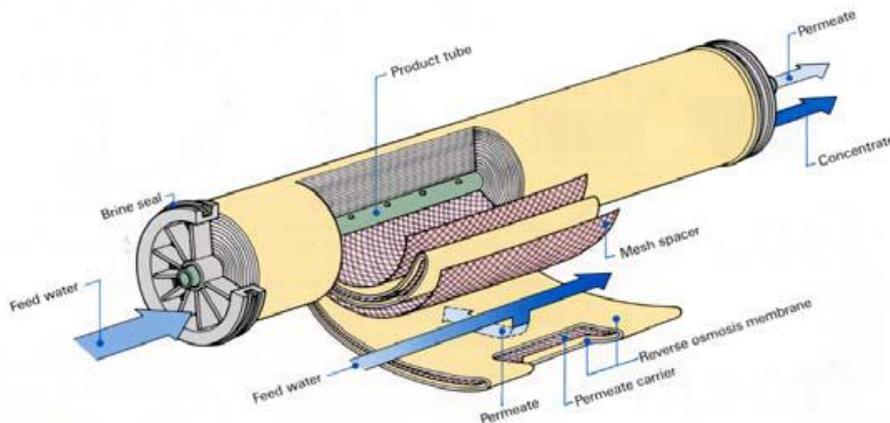
- des prétraitements physico-chimiques afin de protéger les membranes contre le colmatage par les matières en suspension et les matières biologiques, et l'entartrage par précipitation des sels de calcium ;
- une pompe d'alimentation pour la mise en pression de l'eau (pression d'alimentation comprise entre 5 et 10 bars) ;
- un ensemble de corps de pression contenant les éléments, arrangés en série rejet, et généralement disposés en trois étages afin d'obtenir des facteurs de conversion compris entre 80 et 90 % ;

- des post-traitements pour la mise à l'équilibre calco-carbonique, la reminéralisation et la désinfection du perméat ;
- un poste de nettoyage chimique des membranes [17].

#### IV.3.2.3. Trajet de l'eau dans le module

L'eau injectée sous pression est d'abord envoyée à l'intérieur des fibres creuses. Là, elle est filtrée au travers de leurs pores. Puis elle quitte le module par son tube central ; on lui donne alors le nom de perméat (**Figure IV.6**).

C'est donc la paroi des fibres du module qui va jouer le rôle de membrane. Elle arrêtera systématiquement toutes les particules sauf le sel, c'est-à-dire les microbes, virus et bactéries, pesticides,...



**Figure IV.5** : Schéma de principe du fonctionnement d'une membrane

#### IV.3.2.4. Performances des membranes de la nano-filtration

Les membranes NF se caractérisent par :

- un bon arrêt des ions bivalents : sulfates, calcium et magnésium, ces deux derniers formant la dureté de l'eau ;
- un passage important des ions monovalents qui contribuent le plus à la pression osmotique, ce qui entraîne une faible demande énergétique ;
- une purification vis-à-vis des polluants organiques et notamment la plupart des pesticides, des matières à l'origine de la coloration de l'eau, des précurseurs de THM.

**IV.3.2.5. La nano-filtration appliquée aux eaux potables**

Cette technique est principalement utilisée pour l'élimination des substances organiques, telles que les micropolluants, et les ions polyvalents. Les membranes de nano-filtration ont une rétention modérée des sels monovalents. Autres applications de la nano-filtration :

- La nano-filtration est une technique qui a prospéré au cours des dernières années. Aujourd'hui la nano-filtration est principalement utilisée dans les procédés de purification d'eau, tels que l'adoucissement, la décoloration, et l'élimination de micropolluants.
- Dans les procédés industriels la nano-filtration est utilisée pour éliminer des composants particuliers comme des agents colorants.
- Élimination des pesticides des eaux souterraines.
- Élimination des métaux lourds des eaux usées.
- Recyclage des eaux usées dans les laveries.
- Adoucissement.
- Élimination des nitrates.
- Traitement des effluents (neutralisation).

**IV.3.2.6. Performances et qualité de l'eau filtrée**

- Turbidité < 0.03 FNU.
- Bactéries & Virus > -5 & -3 logs
- Parasites 0.
- Pertes en eau 2 -6 %
- Pesticides 0.
- La dureté est bonne.

**IV.3.2.7. Les avantages de la nano filtration**

- fiabilité des matériaux
- suivi relativement simple, dès que l'installation est mise au point correctement
- usage efficace de l'énergie.
- pas de changement d'état d'agrégation nécessaire.
- Enlèvement totale des pesticides.
- Réglage de la dureté (eau douce 7 à 15°F).

# **Chapitre V**

Le traitement des eaux de  
barrages lors d'une catastrophe  
naturelle

### V.1. Traitement de l'eau de barrages (catastrophe naturelle)

Dans ce chapitre nous allons parler d'un cas particulier c'est le traitement des eaux de barrages lors d'une catastrophe naturelle (séisme, tsunami...). Elle va être mélangé avec les égouts, le sol pollué, les déchets, la poubelle.... Donc nous pouvons les considérés comme eaux usées et il faut un traitement pour le rendre potable.

Nous commençons d'abord par une petite définition : catastrophe naturelle.

Catastrophe :

- Les conditions normales d'existence sont détruites
- Le niveau de souffrance dépasse la capacité de réponse la communauté touchée
- Conséquences humaines

Naturelle :

- Origine atmosphérique, géologique ou hydrologique

Pas si naturelles...

Les catastrophes liées aux risques naturels comprennent des phénomènes tels que tremblements de terre et tsunamis ; activité volcanique ; glissements de terrain, cyclones tropicaux, tornades et autres tempêtes ; crues et inondations côtières, incendies (+ fumée dégagée), sécheresse, tempête de sable ; invasion d'insectes...

Conséquence sur l'eau :

Séisme :

- Rupture de canalisation
- Pollution chimique Inondations / Tsunamis
- Pollution des nappes et des puits
- Infectieuse

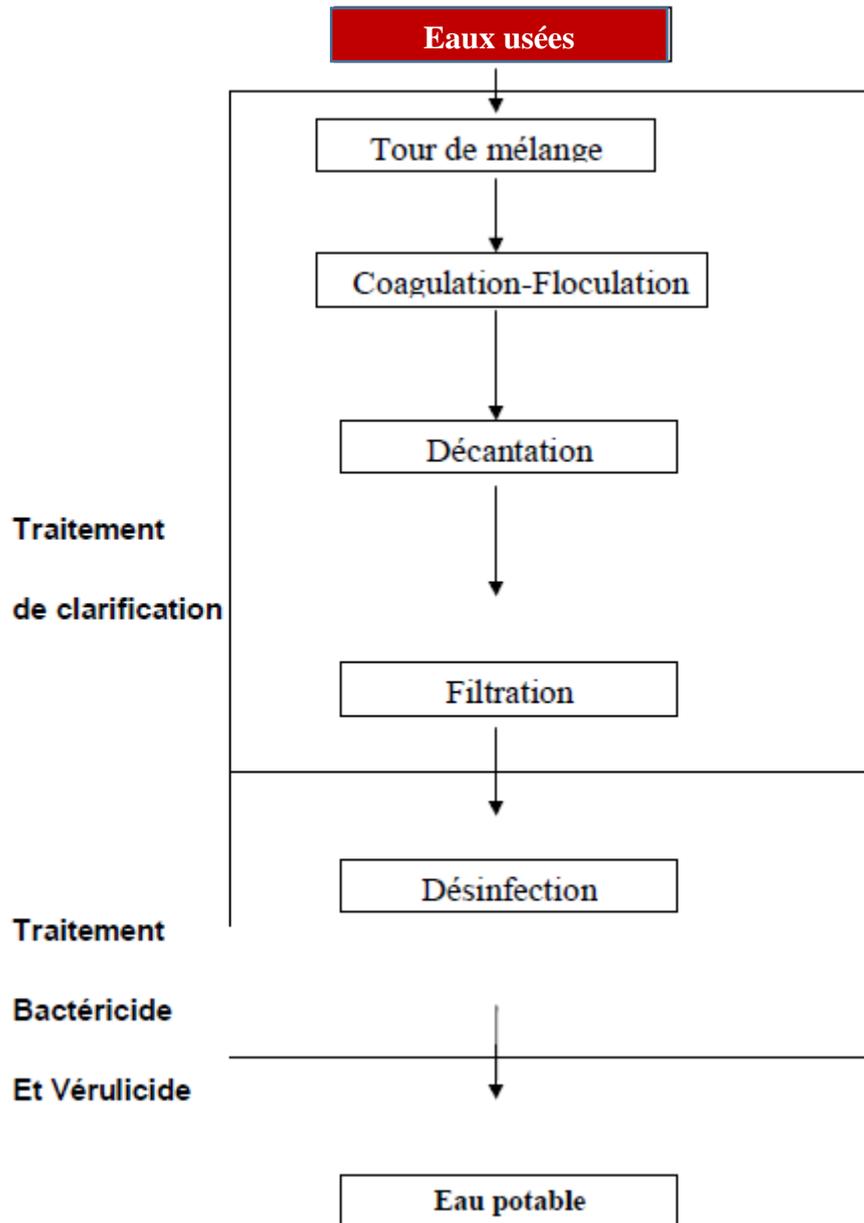
Sécheresse :

- Manque d'eau

Les technologies membranaires ont pris, au cours de cette dernière décennie, de plus en plus d'importance dans le domaine du traitement de l'eau et ce n'est pas sans raison qu'elles sont considérées aujourd'hui comme la technologie du futur. Les raisons en sont évidentes : elles assurent une épuration à la fois efficace et respectueuse de l'environnement, qui se fait quasiment sans aucune utilisation de produits chimiques

La même procédure que le chapitre IV pour le traitement des eaux de barrages lors d'une catastrophe naturel mais de préférence un pré traitement a été utilisé pour l'élimination des sachets et les bouteilles...pour éviter le colmatage des membranes.

Représentation schématique de la chaîne de traitement du barrage



# Conclusion générale

**Conclusion générale**

L'eau est indispensable à la vie. Elle constitue 70% du poids du corps humain.

Elle est utilisée pour de nombreux usages essentiels : la boisson, la préparation des repas, l'hygiène, l'entretien de l'habitation, les loisirs, l'industrie, l'agriculture...

L'eau que nous utilisons provient du réseau public de distribution des eaux. Celui-ci peut être alimenté par un cours d'eau, une nappe phréatique, une source, un barrage.

Les eaux de surface (cours d'eau, lacs, étangs), sont alimentées par le ruissellement des eaux de pluie.

L'eau brute captée en milieu naturel n'est pas toujours potable. Elle doit alors être acheminée par des canalisations jusqu'à une usine spécialisée dans le traitement de l'eau (barrage), qui la rend "potable" c'est à dire consommable sans risques.

Selon le type d'eau, différents types de traitement peuvent être préconisés. Dans notre cas nous avons choisis les techniques membranaires pour l'élimination des polluants présents dans l'eau de barrages.

# **Références bibliographiques**

**Références bibliographiques**

1. Maurel A. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. 2ème éd.. Paris: Tec & Doc, 2006, 286 p.
2. Shiklomanov I. A., Rodda J. C. World water resources at the beginning of the 21st century New York: Cambridge University Press, 2004, c2003, 435p.
3. Marsily G. de, sous la dir ., Académie des Sciences. Les eaux continentales. Rapport sur la Science et la Technologie n° 25. Paris : EDP sciences, 2006, 328 p.
4. CNES, Conseil national économique et social. L'eau en Algérie : Le grand défi de demain .commission de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Rapport et avis du CNES, 2000.
5. Les énergies : l'eau source et facteur de vie paris, agence de coopération culturelle et technique.1980.
6. La fabuleuse histoire de l'eau Paris, Casterman, 1985.
7. Planète eau Guy Leray. Presses Pocket, 1990.
8. Les eaux douces : abondances, sécheresses et conflits François Durand-Dastés. Paris, Rageot éditeur, 1992.
9. BANQUE MONDIALE, Food And Agriculture Organisation (FAO), Agence française de développement (AFD), 2003.
10. Agence nationale des barrages, 2016.
11. CEE, rapport de la CEE sur la situation des STEP en Algérie .Ministère des ressources en eau, Algérie, 2000.
12. MARQUIS, A. L'eau potable : une ressource à économiser. Horizon environnement .Vol.1, no.2,mai, 1994, p.1.
13. Ma santé, mon environnement .Sainte-Foy, Québec : Publications du Québec, 1995, p.21-25.
14. SAINT-LAURENT VISION 2000, VOLET SANTE .L'eau potable une histoire de gout .Supplément du magazine Envirotech,1996. **Références bibliographiques ENP 2017**

15. Etude et traitement de l'eau du barrage djorf-eltorba de la wilaya de Bechar par filtration sur sables. MEMOIRE DE MAGISTER. Spécialité : Eau et Environnement. Chlef. Université Hassiba Benbouali de chlef, année 57 p.
16. APTEL P. (2006). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Applications en traitement des eaux. Technologies de l'eau. Techniques de l'ingénieur. W 4 120.
17. Alfa Arzate. Procédés de séparation membranaire et leur Application dans L'industrie Alimentaire. Revue de littérature, 642-RVL-0508. Quebec : Saint-Norbert d'Arthabaska, 30 mai 2008, 56p.
18. l'agence nationale des ressources hydrauliques, 2016
19. El Khabaz Hatim (2008), traitement des solutions laitières par la nano-filtration et l'osmose inverse
20. office nationale de l'eau, développement des adductions d'eau, direction de l'espace rural et de la forêt N°14
21. Arzate, Ph.D. (30 mai 2008) .Procédés de séparation membranaire et Leur Application dans L'industrie Alimentaire . Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole Inc. Page (10,11)
22. AUDINOS R. (2000). Membranes sémi-perméables – Membranes d'ultrafiltration. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 364.
23. AUDINOS R. (2000). Membranes sémi-perméables – Membranes d'osmose inverse. Traité constantes physicochimiques. Techniques de l'ingénieur. K 362. , René et Aïmar, 1998.
24. REMIGY J-C. C. et DESCLAUX S. (2007). Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Présentation des membranes et modules. Génie des procédés. Techniques de l'ingénieur. W 4 090.
25. Daufin, René et Aïmar, 1998. Technique membranaire –présentation des membranes et modules
26. Karima KECILI(2006).Thèse de doctorat De l'université pierre et marie curie (paris vi), Etude et caractérisation de membranes synthétiques organiques immergées de microfiltration (MF) et d'ultrafiltration (UF) employées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine : Intensification des opérations de déconditionnement et de nettoyage
27. Mehdi METAICHE Juin 2014. Technologie membranaire, Maître de Conférences Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Université de Bouira.