الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département du second cycle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Filière

Génie des procédés

- Spécialité -

Traitement des eaux

- Thème -

L'utilisation des techniques membranaires pour le traitement des eaux usées

Réalisé par : **MEHDI Amine**

Mme ZEMMOURI Hassiba	Prof	**Présidente**
Mme CHEIKH Assira	MCB	**Examinatrice**
Mme BENHABILES Ouassila	MRA	**Promotrice**
Mme SMAIL Fatima	MAA	**Co-promotrice**

Alger, le 04/06/2024

Année universitaire 2023 – 2024

Dédicace

À mes chers parents ainsi que ma famille,

Qui m'ont appris que le véritable succès réside dans la persévérance et l'intégrité.

Vos histoires et vos leçons continuent de m'inspirer chaque jour.

Qui ont été ma source de réconfort, de rires et de ressourcement dans les moments de doute et de fatigue.

À mes chers amis, votre amitié a été le refuge précieux dans cette aventure.

Et enfin, dédié à tous ceux qui, dans l'ombre, ont souhaité mon succès, offert un mot d'encouragement ou simplement cru en moi.

C'est avec une profonde gratitude que je partage cette réalisation avec vous.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents, ma famille, pour leur soutien constant et leurs encouragements, et toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, l'encadrante de mon projet d'étude Mme O. Benhabiles, titulaire d'un doctorat en Ingénierie Environnementale de l'Ecole Polytechnique Nationale d'Alger (ENP)et actuellement chercheuse à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, je la remercie aussi pour avoir relu et corriger mon mémoire. Ses conseils de rédaction ont été très précieux

Je remercie également toute l'équipe pédagogique du centre de recherche l'UDES de leur disponibilité ainsi que leurs conseils qui m'ont aidé à bien mener les expériences.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Madame O.Benhabiles qui m'a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu, tout en m'accordant sa confiance et une large indépendance dans la manipulation des expériences.

Madame F.Smail, pour sa disponibilité et ses judicieux conseils qui m'ont aidé à une meilleure rédaction de ce mémoire master.

ملخص:

النفايات السائلة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي الصناعية والبلدية ومحطات معالجة مياه الصرف الصحي البلدية تحتوي على الملوثات العضوية وغير العضوية والميكروبية التي يتم إطلاقها في الملوثات الميكروبية، والتي يتم تصريفها في البيئة إما مباشرة، أو من خلال إعادة الاستخدام (الري أو الري، إلخ.) هذه المياه العادمة هي أحد المصادر الرئيسية لتلوث المياه السطحية والمياه الجوفية (زيادة الطلب على الأكسجين الكيميائي(COD) وتغير لون المجاري المائية وإغناء المجاري المائية بالمغذيات، إلخ) من أجل تعويض النقص المتزايد في الموارد المائية للاستهلاك البشري، فإن مياه الصرف الصحي هذه يتم إخضاعها بشكل متزايد إلى معالجة متقدمة بهدف إعادة استخدامها. وهذا يجب أن يتم بهدف توفير المياه ذات جودة عالية على أساس مستمر للاستخدام المقصود (مياه الإنتاج، مياه الغسيل، مياه التبريد) .

الكلمات المفتاحية: الملوثات العضوية، مياه الصرف الصحي، الملوثات غير العضوية، إعادة الاستخدام، مياه الصرف الصحي، التلوث

Abstract:

The effluent from industrial and municipal wastewater treatment plants and municipal wastewater treatment plants contains organic, inorganic and microbial pollutants, which are released into the microbial pollutants, which are discharged into the environment either directly, or through reuse (irrigation or watering, etc.). watering, etc.). This wastewater is one of the main sources of main sources of contamination of surface water and groundwater (increase in chemical oxygen demand (COD) discolouration and eutrophication of watercourses, etc.), In order to offset the growing shortage of water resources for human consumption, this wastewater is increasingly being subjected to advanced treatment with a view to reuse. This must always be carried out with the aim of providing water of a specific quality on a continuous basis the intended use (production water, washing water, cooling water irrigation or watering, etc.).

Key words: Organic pollutants, wastewater, inorganic pollutants, reuse, wastewater, contamination.

Résumé :

Les effluents issus des stations d'épuration des eaux usées industrielles et municipales contiennent des quantités non négligeables de polluants organiques, inorganiques et microbiens, qui sont rejetés dans l'environnement par voie directe, ou en suivant la filière de réutilisation (irrigation ou arrosage, etc.). Ces eaux résiduaires constituent l'une des principales sources de contamination des eaux de surface et souterraines (augmentation de la demande chimique en oxygène (DCO), coloration et eutrophisation des cours d'eau, etc.). Dans l'optique de pallier, le déficit croissant des ressources en eau destinées à la consommation humaine, ces eaux résiduaires sont de plus en plus soumises à des traitements poussés en vue d'une réutilisation. Cette réutilisation doit toujours être réalisée dans l'objectif de fournir une eau présentant, en continu, une qualité spécifique liée à l'usage attendu (eau de production, eau de lavage, eau de refroidissement, eau d'irrigation ou d'arrosage, etc.).

Mots clés : Polluants organiques, eaux usées, polluants inorganiques, réutilisation, eaux résiduaires, contamination.

Table des matières

Liste des figures et des tableaux : 1

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées 1

Chapitre II : Traitement des eaux usées par les techniques membranaires 1

Liste des abréviations : 2

Introduction générale 3

1. Introduction : 4
2. Historique des technologies membranaires : 5

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées 6

1. Définition des eaux usées : 7
2. Types des eaux usées : 7

2.1 Eaux usées domestiques : 8

2.2 Eaux usées industrielles : 8

2.3 Eaux de ruissellement : 8

3. Traitements des eaux usées : 9

Prétraitement physique : 9

Traitement physico chimique : 10

Traitement secondaire : 10

Traitement tertiaire : 11

Chapitre II : Traitement des eaux usées par les techniques membranaires 13

1. Technologies des membranes : 14
2. Opérations unitaires membranaires : 14
3. Couplage de membranes avec d'autres systèmes unitaires : 15

3.1 Bioréacteur à membrane à boucle externe : 16

3.2 Bioréacteur à membrane immergé : 16

4. Principe du BRM : 16

4.1 Les problèmes technologiques rencontrées chez les BRM : 17

4.2 Structure et composition des membranes : 17

5. Mise en œuvres et paramètres opératoires : 18

Pression transmembranaire : 18

Temps de rétention hydraulique (TRH) et de rétention de solide (TRS) : 19

Le Ph et la température : 19

Hydrophobicité et structure chimique des polluants : 19

6. Le colmatage et le nettoyage des membranes : 20

6.1 Le colmatage membranaire : 20
6.2 Nettoyage des membranes : 21
Conclusion générale 22
Références bibliographiques : 24

Liste des figures et des tableaux :

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

Figure I.1 : Les eaux usées dans le cycle de l'eau.

Figure I.2 : Consommation d'eau et production d'eaux usées par les municipaux secteur.

Figure I.3 : Schéma d'une STEP utilisant les différents types de traitement.

Chapitre II : Traitement des eaux usées par les techniques membranaires

Figure II.1 : Configuration des bioréacteurs à membranes BRM.

Tableau II.1 : Problèmes technologiques communs des BRM.

Figure II.2 : Phénomène de formation et d'élimination du colmatage détachable, non détachable et irréversible des membranes.

Liste des abréviations :

EUI : Eaux usées industrielles

EUM : Eaux usées municipales

EUD : Eaux usées domestiques

MF : Microfiltration

UF : Ultrafiltration

NF : Nanofiltration

OI : Osmose inverse

BRM : Bio réacteur à membranes

MES : Matières en suspension

DNF : Déplacement Nutritif Biologique

UV : Ultra-Violets

STEP : Station d'épuration

EU : Eaux usées

AnaBRM : Bio réacteur anaérobie

PTM : Pression transmembranaire

PTFE : Polytétrafluoroéthylène

PP : Polypropylène

PES : Polyéthersulfone

PS : Polysulfone

PAN : Polyacrylonitrilique

TRH : Temps de rétention hydraulique

TRS : Temps de rétention de solides

Ph : Potentiel hydrogène

PEC : Polymères extracellulaires

Introduction générale

1. Introduction :

L’eau est un partenaire quotidien indispensable pour l’homme, les animaux, les plantes, ainsi que pour les autres organismes vivants. Une substance incolore et inodore, utilisée pour satisfaire ses besoins quotidiens de consommation et d’hygiène, elle sert à la boisson, la cuisson, la production alimentaire, la transformation des différents produits, l’hygiène corporelle, l’assainissement du cadre de vie, la production d’électricité et l’usage récréatif. [1].

La dépendance à l’utilisation d’une eau propre est un facteur important pour la survie de chaque organisme vivant, mais ces dernières années, en raison de la croissance démographique et des besoins pour l’agriculture et de l’industrie, et des changements climatiques, la demande en eau propre, sûre et potable, dans son environnement, augmente. (Falizi et al., 2018; Quist-Jensen et al., 2015). L'élimination des contaminants et des polluants de l'eau est nécessaire pour éviter les effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine. [2, 3]

Cependant, ces sources de pollution contiennent des quantités remarquables d’impuretés. En effet, les différents types d’eau usées, telles que les eaux usées industrielles (EUI), municipales (EUM) et domestiques (EUD) contiennent des quantités non négligeables de polluants à base organique, inorganique et microbienne. Ces eaux résiduaires constituent l’une des principales sources de contamination des eaux de surface et souterraines.

Des stratégies de traitement efficaces devront être adoptées par les industries, les scientifiques et les gestionnaires pour atteindre, de manière optimale, les normes de rejets qui évoluent vers une sévérité croissante, aussi bien en ce qui concerne les concentrations en polluants que les débits. Par exemple, pour les rejets en milieu naturel des eaux domestiques, il a ainsi été défini des zones dites normales, pour lesquelles le traitement est principalement basé sur l’élimination des fractions particulaires et des pollutions carbonées, et des zones sensibles pour lesquelles une élimination complémentaire des fractions azotées et microbienne est nécessaire.

Pour les eaux usées domestiques, les procédés conventionnels, qu’ils soient de nature intensive (Boues activées) ou extensives telle que les systèmes d’infiltration, ou la combinaison entre eux, peuvent répondre aux exigences de rejets en présentant chacun des performances plus ou moins fiables, du fait de leur sensibilité à des variations brusques de charges à traiter, de l’état de floculation des populations épuratives. [3]

Pour faire face à cette problématique, différentes techniques ont été utilisées pour nettoyer et renouveler l'eau destinée à la consommation humaine et à l'agriculture, mais elles ont chacune leurs limites. Parmi ces techniques, la technologie des membranes est prometteuse pour résoudre les problèmes. Elles présentent un grand potentiel dans le traitement des eaux usées pour améliorer l'efficacité du traitement des stations d'épuration.

En outre, Ces techniques complètent l'approvisionnement en eau par une utilisation sûre des sources d'eau modernes. C'est pourquoi des techniques plus efficaces, telles que la technologie des membranes, sont nécessaires. [2]

Les opérations de séparation par membranes sont bien placées pour aider à résoudre ces problèmes. En effet, comme les membranes jouent le rôle de barrière physique, elles produisent avec une grande fiabilité une eau qui atteint des objectifs de qualité de rejet en assurant une eau de qualité et sont toujours plus concurrentielles par rapport aux traitements conventionnels. Non seulement les opérations unitaires qui comprennent la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI), mais aussi le couplage avec d'autres opérations unitaires, comme la combinaison des procédés biologiques avec filtration sur membrane (BRM) ou les procédés d'oxydation avancée, sont de plus en plus utilisées pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Le but de ce mémoire de master est de présenter l'état de l'art des technologies de membrane en fonction du type d'eau à traiter ainsi que leur avenir dans le traitement des eaux usées. [4]

2. Historique des technologies membranaires :

Les procédés membranaires connaissent un fort développement ces dernières années en Europe et en France pour le traitement des déchets municipaux et industriels. Cependant, la technologie membranaire n'est pas une technologie nouvelle. La technologie des bioréacteurs à membranes appliquée au traitement des eaux usées a été utilisée pour la première fois par Dorr-Olivier Inc, afin d'assurer le traitement des eaux usées à bord d'un navire. Durant les années 1970 et 1980, les premières installations commercialisées ont été mis en service aux USA et au Japon, mais limitées aux petites installations. En Europe, les premiers BRM ont été mis en service dans les années 1990 pour le traitement des eaux usées. Dès lors, l'intérêt croissant pour cette problématique a permis le développement de la cinquième génération de bioréacteurs. [4]

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

1. Définition des eaux usées :

Les eaux usées sont des eaux polluées, ou bien souillées par les différentes activités humaines qui englobent : Une production industrielle, un bain, une chasse d'eau etc… [5]

En d'autres termes, elles désignent les eaux rejetées après leurs utilisations pour les activités domestiques, agricoles et industrielles. Il est à noter que les eaux usées contiennent environ 99% d'eau et 1% de matières particulaires appelés les matières en suspension dissoutes dans l'eau. L'émission de ces eaux non ou mal traitées peut avoir des conséquences sur les écosystèmes [6]. On peut en citer quelques conséquences :

- Effets nocifs pour la santé humaine.
- Répercussions néfastes sur l'ensemble des activités économiques.
- Impacts négatifs sur le milieux extérieur (L'environnement)

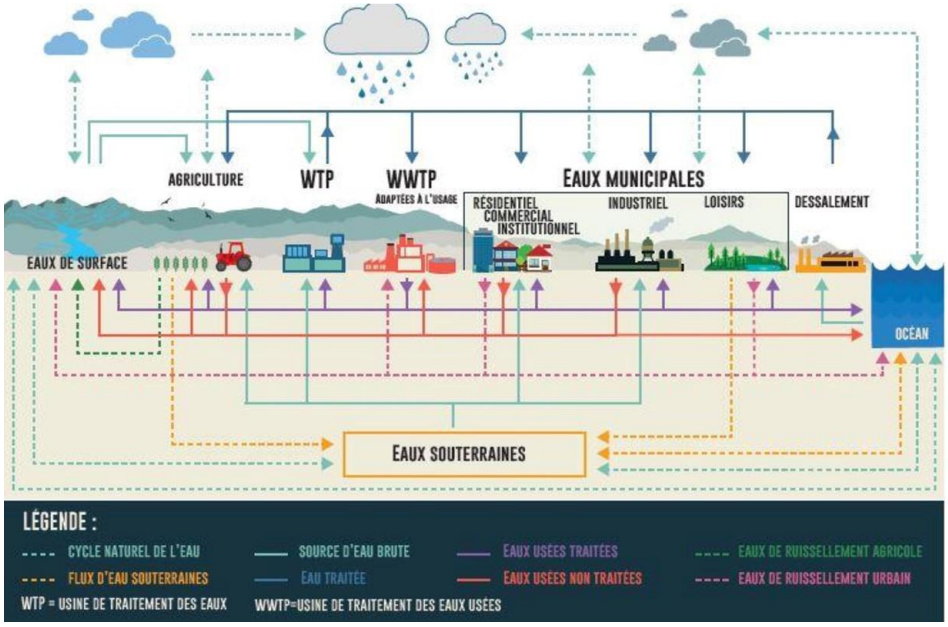


Figure I.1 : Les eaux usées dans le cycle de l'eau (UN WATER, 2017)

2. Types des eaux usées :

On peut classer les eaux usées selon 3 grandes catégories : [5]

- Eaux usées domestiques.
- Eaux usées industrielles.
- Eaux pluviales (De ruissellement)

2.1 Eaux usées domestiques :

Ce sont des eaux polluées par l'ensemble des activités humaines domestiques réalisées à domicile, c'est-à-dire réalisée à la maison. On peut classer ces eaux en 2 catégories :

- **Les eaux grises :** Il s'agit des eaux de douche et de cuisine, ce sont des eaux très chargées en termes de matière graisses, de restes alimentaires et de tensioactifs (Lessive, savons)
- **Les eaux noires :** Telles que les eaux des toilettes. Elles sont essentiellement composées de matières fécales, d'urine et de papiers. [5]

2.2 Eaux usées industrielles :

Ces eaux regroupent l'ensemble des eaux rejetées par l'usine vers l'extérieur de l'usine, après avoir contribué à des processus de fabrication, de transformation, de refroidissement et au nettoyage (Woodart,2001). Les eaux industrielles peuvent être distinguées selon plusieurs classes. On trouve :

- Eaux de lavages des sols et des machines.
- Eaux de fabrication.
- Eaux de circuits et de refroidissements.
- Eaux de rejets des services généraux.

2.3 Eaux de ruissellement :

Ou également appelées les eaux pluviales, ces eaux contiennent des impuretés et peuvent être polluées par la pollution de l'air : La pluie acide en fait l'exemple de cette pollution. En effet, une fois que ces eaux touchent le sol et les toits, elles commencent à ruisseler, et emportent avec elles tout ce qu'elles croisent dans son chemin de ruissellement, ce qui va entraîner la dégradation de la qualité de l'eau. [5]

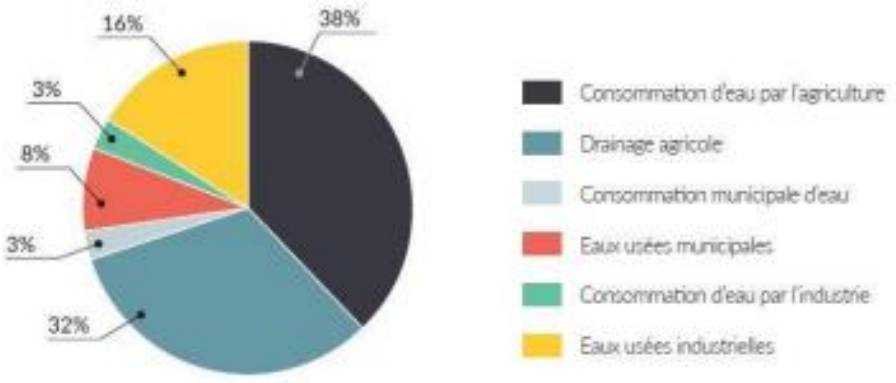


Figure I.2 : Consommation d'eau et production d'eaux usées par les municipaux secteur (UN WATER, 2017)

3. Traitements des eaux usées :

Méthodes de traitement :

Les méthodes de traitement des eaux usées sont diverses, et sont classées en 3 grandes catégories. On cite : Prétraitement physique, traitement primaire, secondaire et tertiaire.

On peut également tenter une classification physique et biologique qui permet de distinguer d'un côté les traitements primaires et de l'autre les traitements secondaires et tertiaires. [6]

Prétraitement physique :

Le prétraitement est défini comme étant une phase d'épuration grossière dans laquelle tous les éléments volumineux et grossiers (tels que le sable et les corps gras) sont retenus. En effet, ces éléments pourraient d'ailleurs endommager les installations, c'est pour cette raison qu'on procède à l'élimination de ces particules volumineuses (Environs 35% des éléments polluants sont retirés).

Ce prétraitement commence par le dégrillage dans lequel on fait passer l'eau à travers des grilles moins grossières pour empêcher le passage des éléments volumineux plus gros que les espacements des grilles. [7]

L'eau issue de ce premier traitement subit ensuite une étape nommée le dessablage et le déshuilage (Dégraissage). Durant cette étape, la vitesse d'écoulement de l'eau est en phase de ralentissement et les particules fines vont subir une sédimentation, d'où on obtient les « boues primaires », et les graisses moins denses vont remonter à la surface, qu'on pourra éliminer par la suite par des racleurs, et les sables sont retirés par pompage. [7]

Traitement physico chimique :

Cette étape consiste à ajouter dans l'eau des agents coagulants et floculants dans le but de récupérer un grand nombre de particules en suspension par décantation ou flottation, d'où on obtient ce qu'on appelle « boues physico-chimiques ».

L'étape de traitement physico-chimique permet d'éliminer 90% des MES et elle est commune pour la majorité des stations d'épuration. Les éléments qui restent dans l'eau à traiter, en d'autres termes les matières dissoutes (telles que les éléments azotés, phosphatés et les particules fines) vont subir un traitement plus poussé, on l'appelle le traitement secondaire voir même un traitement tertiaire. [7, 8]

Traitement secondaire :

Appelé également le traitement biologique, permet d'éliminer les polluants dissous dans l'eau. Pour cela, il est nécessaire d'introduire des populations de micro-organismes dans l'eau, capables de consommer les polluants organiques. Dans le cas étudié, il est nécessaire de favoriser la croissance et le développement de la communauté bactérienne aérobies (Qui prélève O_2 pour assurer le bon déroulement de leur activité métabolique). On en distingue plusieurs types :

- **Le lagunage naturel :**

Cette étape consiste à stocker les eaux usées dans des plans d'eau plus profonds : Les lagunes. Et l'activité microbienne se fait de manière naturelle, échange avec l'atmosphère, photosynthèse, etc…

Des aérateurs peuvent être utilisés durant cette étape pour brasser l'air et optimiser l'activité de la communauté bactérienne. Ce processus induit la formation des boues de lagunage au fond des bassins d'aération qui sont par la suite récupérées. [8]

- **Les boues activées :**

La réalisation de cette étape nécessite la présence du dioxygène O_2, des bactéries et des eaux usées dans des bassins d'aération. La sélection de ces espèces se fait selon les le type de polluant que l'on souhaite éliminer (Polluant à base de carbone, azote, phosphore).

Les bactéries et leur déchets issus du métabolisme bactérien, forment des « boues biologiques » dans un bassin appelé également un clarificateur, qui sont ensuite traitées et utilisées comme fertilisants pour les sols. Une partie de ces boues retournent dans les bassins pour éviter la perte d'une grande quantité de bactéries. [7]

Les biofiltres et les filtres bactériens : On peut également percoler l'eau à travers un matériau pour assurer le développement des bactéries. Cela peut être réalisé sur des supports (Lits bactériens) ou des argiles cuites, des sables, ou bien même des schistes. Cela représente un traitement plus avancé du processus des boues activées, permettant d'éliminer une quantité considérable et une grande diversité de polluants. [8]

Traitement tertiaire :

C'est un mélange de traitement physico-chimique et biologique, C'est une étape qui suit les deux premiers traitements qu'on vient de voir précédemment. Ce traitement a pour but d'éliminer les éléments nutritifs résiduels, ainsi que les polluants organiques. Par exemple, on peut utiliser un traitement biologique plus amélioré, afin d'éliminer les phosphores présents dans l'eau, par la technique de Déplacement Nutritif Biologique (DNF) dans laquelle dans des conditions environnementales différentes, on fait passer l'eau par différents réservoirs avec présence des bactéries, on récupère ensuite les boues lors d'un nouveau passage dans un clarificateur.

Il existe aussi un autre type de traitement, classé comme étant un traitement tertiaire, qui est le traitement par Ultra-Violets (UV) dans lequel on dénature alors des molécules telles que les œstrogènes, sensibles à ces rayons UV. [7]

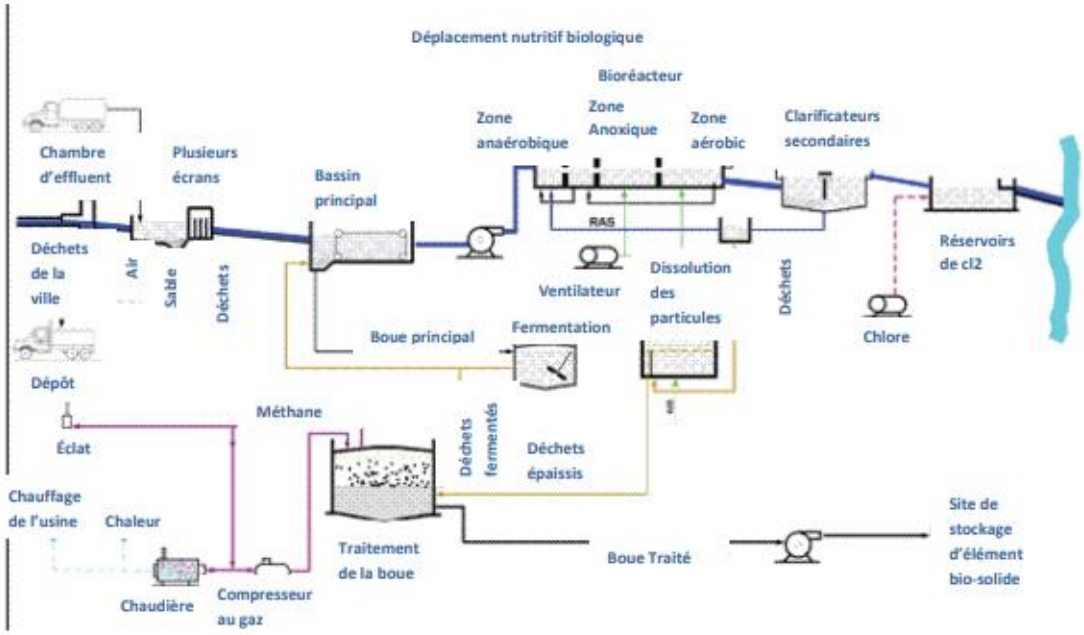


Figure I.3 : Schéma d'une STEP utilisant les différents types de traitement (Primaire, secondaire et tertiaire -DNF-)

-Exemple de traitement des EU de Saskatoon (Canada)-

Chapitre II : Traitement des eaux usées par les techniques membranaires

1. Technologies des membranes :

Aujourd'hui, divers procédés de séparation membranaire sont connus et utilisés par la majorité des stations de traitement des eaux usées. Parmi ces techniques, il existe la filtration membranaire basée sur l'utilisation d'un gradient de pression qui permet le transfert de la matière à travers la membrane. Il existe aussi d'autres techniques telles que la pervaporation qui se base sur un gradient de potentiel chimique, et l'électrodialyse basée sur un gradient de potentiel électrique (Arzate, 2008). [4]

2. Opérations unitaires membranaires :

La filtration membranaire se définit comme l'ensemble des procédés de séparation membranaires en phase liquide, par perméation à travers des membranes permsélectives en appliquant un gradient de pression. Ces techniques sont classées en fonction de la nature de la force motrice, ainsi que la taille de pores de la membrane d'étude. Par exemple, la micro filtration (MF) permet de retenir les particules de taille qui varie entre 0,1 et 1 μm sous des pressions entre 0,1 et 3 bars, et elle assure le passage des espèces dissoutes.

L'ultrafiltration (UF), quant à elle, assure le passage des éléments de tailles inférieures au diamètre des pores compris entre 0,01 et 0,1 μm. Les valeurs de pressions appliquées se situent entre 0,1 et 5 bars. Cette technique consiste à stopper le passage les macromolécules. Cependant, les sels minéraux et les matières organiques passent à travers la membrane.

Pour le cas de la nanofiltration (NF), les ions multivalents et les solutés organiques de petites tailles sont retenus par cette membrane pour des pressions de travail comprises entre 3 et 20 bars.

Dans le cas de l'Osmose Inverse (OI), la séparation des particules antérieures et les composés de faible poids moléculaire s'ajoutent, comme les ions monovalents. Le travail s'effectue sous l'action d'une pression comprise entre 5 et 120 bars. [4]

3. Couplage de membranes avec d'autres systèmes unitaires :

Les membranes peuvent être associées à différentes opérations unitaires de natures différentes :

- **Biologiques :** BRM et AnaBRM
- **Physico-chimiques :** Ozonation, adsorption, cristallisation etc… [4]

Bioréacteurs à membranes (BRM) :

Le BRM est définit comme un procédé continue qui associe un réacteur biologique avec une unité de séparation liquide et solide constituée de membranes poreuses. [9]

Cette technologie représente une amélioration du système de traitement biologique des boues activées. Elle est caractérisée par le remplacement du décanteur secondaire traditionnel par une unité de filtration membranaire (XING et al., 2000) dont laquelle la sélectivité représente une barrière infranchissable par les espèces d'épuration. [3]

Le processus de métabolisation (Catabolisme et anabolisme) observé dans un système à boues activées est similaire à celui mis en jeu dans un BRM [3]. En effet, la rétention des micro-organismes favorise une augmentation de la concentration des boues et permet d'obtenir une séparation complète des temps de rétention hydraulique, et du temps de rétention des boues (Gander et al., 2000; Ozgun et al., 2013; Skouteris et al., 2012; Wei et al., 2014; Zheng et al., 2015). Ainsi, l'élimination de ces matières dissoutes permet d'obtenir une eau traitée de bonne qualité, utilisable dans diverses applications telles que l'arrosage des terraines et des espaces verts.

La première apparition de la technologie du bioréacteur à membrane a été introduite dans les années 1960, mais l'intérêt de son utilisation pour le traitement des eaux usées est réellement apparu quelques années plus tard. Les premières installations commercialisées ont été réalisées dans les années 1970 et 1980 pour des marchés atypiques (STEPHENSON et al., 2000). Puis, en Europe par exemple, dans les années 1990 les premiers systèmes de BRM ont été mis en opération pour le traitement des eaux usées municipales (EUM) (LE-CLECH et al., 2006; LESJEAN et HUISJES, 2008; MELIN et al., 2006). [3]

Le développement de ces bioréacteurs a fait apparaître deux types de configurations : le **BRM à boucle externe** et le **BRM immergé**.

3.1 Bioréacteur à membrane à boucle externe :

Ce type de bioréacteur constitue la première génération (LESJEAN et HUISJES, 2008). Un bioréacteur caractérisé par un module membranaire en positionnement externe par rapport au bioréacteur des boues activées [3]. Les membranes sont installées à l'extérieur du bassin d'aération. Il s'agit de membranes tubulaires ou planes qui sont installées soit en série ou bien en parallèle. La technique de filtration s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur, et elle est tangentielle. [4].

3.2 Bioréacteur à membrane immergé :

L'installation des membranes est effectuée directement au niveau du bassin d'aération. Les membranes peuvent être soit fibres creuses ou bien planes et la filtration s'effectue de l'extérieur vers l'intérieur. [4]

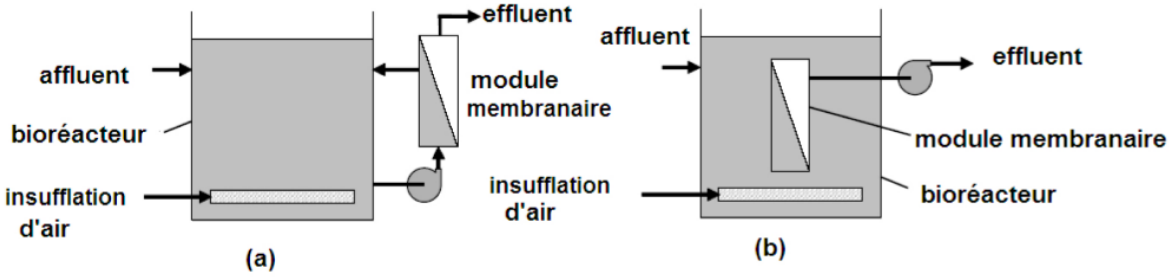


Figure II.1 : Configuration des bioréacteurs à membranes BRM

(a) BRM à boucle externe.
(b) BRM immergé

4. Principe du BRM :

Le bioréacteur à membranes correspond à un couplage d'un procédé biologique avec un procédé de nature physique de filtration membranaire afin d'épurer les eaux usées. Généralement, on utilise les membranes UF ou MF. La force motrice représente la différence de pression entre les deux extrémités de la membrane. Il est à noter que seulement l'eau et les composés de tailles moléculaire inférieures au seuil de coupure de la membrane peuvent y traverser. La biomasse retenue est maintenue au sein du réacteur biologique indépendamment de ses propriétés (Âge, taille des flocs, décantation). [10]

4.1 Les problèmes technologiques rencontrées chez les BRM :

BRM	Problèmes
BRM immergé et BRM à boucle externe	• **Apparition de mousses dans le bioréacteur.** • **Colmatage des membranes.** • **Faible transfert d'oxygène.** • **Impacts de solides en suspension issus des effluents bruts.**
BRM à boucle externe	• **Impact de la température du BRM sur ses performances.** • **Impact de l'air entraîné sur le fonctionnement de la pompe de succion.**
BRM immergé	• **Nettoyage membranaire très rigoureux.** • **Colmatage des membranes pendant le backpulsing du perméat.** • **Faible perméabilité membranaire contrairement à la perméabilité espérée.** • **Colmatage de la membrane par recouvrement d'huiles et des graisses au niveau du bioréacteur.**

Tableau II.1 : Problèmes technologiques communs des BRM (YANG et al., 2006). [3]

4.2 Structure et composition des membranes :

Dans le but de retenir totalement les impuretés présentes dans l'eau à traiter (Microbiens, organique et inorganique) au niveau du bioréacteur, le seuil de coupure est choisi dans le domaine de microfiltration ou dans le domaine d'ultra filtration pour assurer la rétention des virus (GRASMICK et al., 2009).

Ces membranes peuvent être de type organique et inorganique, fabriquées de matériau polymérique hydrophobe PTFE/PP ou hydrophile PES/ PS / PAN. (BERLAND et JUERY, 2002 ; CARDOT, 1999).

Ces membranes sont souvent composées de fibres creuses sous forme de minces tubes poreux. Les fibres poreuses peuvent être regroupées dans un cylindre, le tout constituant un module tubulaire, soit regroupées en faisceau sous forme d'un module en fibres creuses.

Pour le module tubulaire, l'eau à traiter entre à un bout des tubes et l'excès d'eau polluée sort à l'autre bout, tandis que l'eau filtrée est récupérée sur les côtés. La partie active de la membrane se trouve à l'intérieur de ces tubes et l'eau à traiter circule à l'intérieur. [3]

5. Mise en œuvres et paramètres opératoires :

La mise en œuvre d'un BRM nécessite la prise en considération de certains facteurs responsables du dimensionnement du bioréacteur, tels que les conditions hydrodynamiques de fonctionnement, la configuration du module membranaire, ainsi que sa structure.

Le TRH (Temps de rétention hydraulique), quant à lui, désigne le temps nécessaire pour dégrader les composés solubles, par contre, le TRS (Temps de rétention de solides) permet de déterminer le temps nécessaire pour dégrader les composés de nature particulaires et permettre ainsi le renouvellement de la biomasse épuratoire, ce qui va influencer de manière directe sur la teneur en MES.

Pour assurer un bon fonctionnement biologique, il faudra s'assurer de ne pas être en oxygène limitant [3]. Les paramètres suivis en cours d'opération sont :

- La pression transmembranaire (PTM).
- Les concentrations en MES dans l'eau à traiter.
- Le temps de rétention hydraulique.
- La concentration d'oxygène dissous.
- La consommation spécifique d'oxygène.

Pression transmembranaire :

Elle se définit comme la pression de filtration membranaire qui s'exerce sur la membrane. Dans le BRM à boucle externe. Le BRM doit être opéré en dessous de la valeur de la pression critique PTM. La valeur de la pression critique dépend de la nature chimique de la membrane et elle est souvent donnée par le fournisseur. La pression transmembranaire est obtenue en appliquant la formule suivante (CARDOT, 1999) : $PTM = \frac{P_a + P_c}{2} - P_P$

Pa, **Pc** et **Pp** désignent respectivement la pression d'alimentation, la pression du concentrat, et la pression du perméat. [3]

Temps de rétention hydraulique (TRH) et de rétention de solide (TRS) :

Ce sont des paramètres importants dans les processus biologiques. La présence de la membrane permet au BRM de fonctionner avec des valeurs fortes de concentrations de biomasse.

Le TRS varie généralement entre 25 et 80 jours tandis que la concentration de la biomasse se situe entre 8 et 25 g/L (CIRJA et al., 2008). Quant au TRH, il a une influence mitigée sur l'élimination des micropolluants contenus dans le BRM. Certaines études montrent que le TRH n'a aucune influence sur la dégradation et l'élimination des composés hydrophobes en raison de la capacité de ces derniers à se maintenir dans le BRM par adsorption sur la biomasse. Par contre, le TRH a une influence sur les composés moyennement hydrophobes et hydrophiles. [3]

Le Ph et la température :

Le PH dans le BRM a une influence sur les propriétés du polluant contenu dans le bioréacteur. En effet, les études ont montré que les PH élevés >10 ou les PH faibles <4 conduisent à une baisse de l'hydrophobicité de certains composés tels que norfloxacine qu'on le trouve très hydrophobes à des PH neutres aux alentours de 7. (MCBRIEN et al., 2004). Le pH agit sur l'état protonique des différents composés.

La température influence quant à elle la solubilité des polluants et certaines de leurs propriétés physico-chimiques telles que l'hydrophobicité et la solubilité. [3]

Hydrophobicité et structure chimique des polluants :

Les conséquences de dégradation du polluant dans le BRM sont influencées par différents facteurs tels que les propriétés chimiques et physico-chimiques des divers polluants (Structure chimique etc…).

Un composé hydrophile difficilement biodégradable peut se retrouver à la sortie du BRM sans la moindre dégradation. En revanche, un composé hydrophobe difficilement biodégradable peut s'adsorber sur la biomasse et peut être maintenu dans le bioréacteur (GARCIA et al.,2002, GIGER et al.,2003, ILANI et al., 2005, LINDBERG et al., 2006, YU et HUANG, 2005).

Le temps de contact de ce dernier contenu dans le bioréacteur sera alors égal au TRS, ce qui augmentera et facilitera sa biodégradation. [3]

6. Le colmatage et le nettoyage des membranes :

6.1 Le colmatage membranaire :

Le colmatage membranaire est un phénomène très complexe qui met en jeu différents facteurs et mécanismes. La taille des flocs, des particules, la présence de colloïdes, de solutés et de polymères extra cellulaires sont autant d'éléments impliqués dans le colmatage de la membrane.

En effet, si les particules ont des dimensions similaires aux pores de la membrane tels que les colloïdes ou plus petites comme les solutés, les phénomènes d'adsorption sur les parois des pores et d'obstruction se produisent préférentiellement. Cependant, dans le cas où les particules polluantes ont des dimensions supérieures à celles des pores, un gâteau va se former à la surface de la membrane.

Le colmatage détachable qui peut être facilement retiré par nettoyage physique tel que le rétro lavage. Il est généralement attribué aux phénomènes d'obstruction des pores à la formation d'un gâteau., très souvent considéré comme ayant la contribution importante dans le colmatage membranaire.

Le colmatage non détachable qui nécessite le recours à un traitement chimique pour être éliminé. Pendant la filtration initiale, les cellules microbiennes, les colloïdes les solutés pénètrent dans la membrane et précipitent dans les pores.

Ensuite, pour des fonctionnements de BRM plus longs, les cellules déposées se multiplient et produisent des PEC qui bouchent les pores et forment une couche solidement reliée aux pores de la membrane.

Le colmatage irréversible qui est permanent et donc peut être détaché de la membrane. Il est attribué aux mécanismes d'adsorption et de concentration de polarisation. [10]

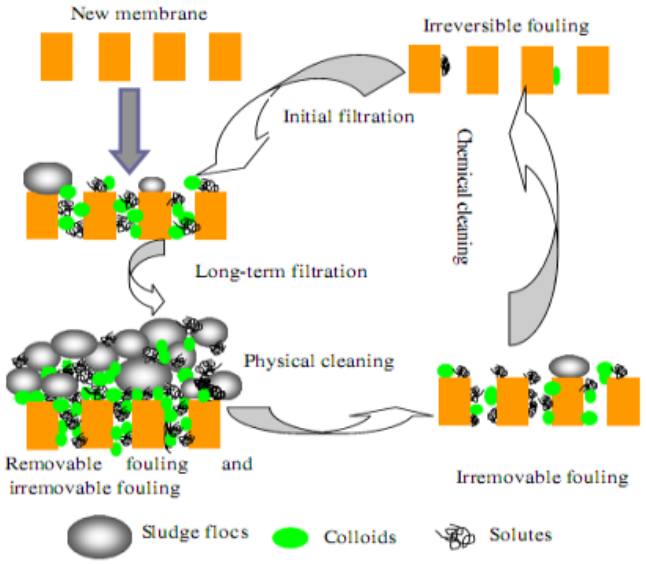


Figure II.2 : Phénomène de formation et d'élimination du colmatage détachable, non détachable et irréversible des membranes.

6.2 Nettoyage des membranes :

Le nettoyage des membranes est un moyen qui permet d'éliminer le phénomène de colmatage et prolonge ainsi la durée de vie des membranes. Il existe plusieurs techniques de nettoyage des membranes. Les plus utilisées sont **le rétro lavage** et **le lavage chimique**.

Le **rétro lavage** se fait à l'eau ou à l'air. Plus les pores de la membrane sont larges, moins le rétro lavage est efficace. Plusieurs paramètres influencent l'efficacité du rétro lavage, notamment le débit du rétro lavage, la fréquence et la durée du rétro lavage.

Le **nettoyage chimique** peut être fait avec différents types de produits chimiques. On utilise des solutions acides afin d'éliminer les dépôts inorganiques, des solutions basiques et des agents tensioactifs pour éliminer les matières organiques et des désinfectants pour prévenir la croissance de micro-organismes dans le système membranaire (BOUCHARD et al., 2000). [3]

Conclusion générale

Les avancées technologiques connues dans ce domaine sont nombreuses et diverses, leurs applications au domaine de l'assainissement augmentent régulièrement et rapidement. Les développements visent de meilleures résistances chimiques ou une moindre propension au colmatage.

Les technologies membranaires représentent actuellement et moyen et une alternative efficace reconnue dans différents procédés classiques pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Elles sont de plus en plus compétitives l'une par rapport aux autres traitements conventionnels.

L'emploi de ces technologies est pertinent quand la qualité de l'eau traitée est essentielle (soit pour atteindre des normes de rejet qui sont de plus en plus strictes soit pour protéger les milieux sensibles) ou encore quand la disponibilité de l'eau est limitée et, dans ce cas, le recyclage et la réutilisation des eaux usées jouent un rôle important.

Plusieurs principes sont envisageables, le choix est fonction de la qualité et de la composition de l'effluent à traiter et de l'objectif de séparation sur membrane, de la microfiltration à l'osmose inverse.

Références bibliographiques :

[1] Falizi, N. J., Hacıfazlıoğlu, M. C., Parlar, I., Kabay, N., Pek, T. Ö., & Yüksel, M. (2018). Evaluation of MBR treated industrial wastewater quality before and after desalination by NF and RO processes for agricultural reuse. Journal of water process engineering, 22, 103-108

[2] Belhadef, A. (2020). Traitement des eaux usées par les techniques membranaires techniques membranaires (Doctoral dissertation).

[3] Seyhi, B., Droguil, P., Buelna, G., Blais, J. F., & Heran, M. (2011). État actuel des connaissances des procédés de bioréacteur à membrane pour le traitement et la réutilisation des eaux usées industrielles et urbaines. Revue des Sciences de l'Eau, 24(3), 283-310.

[4] GOMEZ, P. G. (2016). L'utilisation des membranes en assainissement.

[5] Les types d'eaux usées : définitions et caractéristiques : https://maji-solutions.com/fr/les-eaux-usees-definition/

[6] MOULIN, S., RECHELS, D. R., & STANKOVIC, M. (2013). Traitement des eaux usées. Atelier Lõeau qualité vs quantité. CERES: Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société. ERTI: Environmental Research and Teaching Institute.

[7] Fondation de l'Eau Potable Sûre. Traitement des eaux usées. safewater.org.

[8] ADEME. Organisation et fonctionnement d'une station d'épuration. ademe.fr.

[9] Seyhi, B., Droguil, P., Buelna, G., Blais, J. F., & Heran, M. (2011). État actuel des connaissances des procédés de bioréacteur à membrane pour le traitement et la réutilisation des eaux usées industrielles et urbaines. Revue des Sciences de l'Eau, 24(3), 283-310.

[10] Villain, M. (2012). Bioréacteur à membranes pour le traitement d'eaux usées domestiques: influence des conditions environnementales et opératoires sur l'activité des biomasses et le transfert de matière (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).