

LES SYNTHÈSES

de l'Office International de l'Eau

L'utilisation des membranes en assainissement

Patricia GARCIA GOMEZ

Janvier 2016



*Office
International
de l'Eau*

En partenariat avec des organismes d'enseignement supérieur, l'OIEau propose des états de l'art synthétiques sur différents sujets liés à l'eau. Ces synthèses sont rédigées par des élèves dans le cadre de leur cursus de formation.

Cette synthèse documentaire « **L'utilisation des membranes en assainissement** » a été effectuée par **Patricia Garcia Gómez**, élève post-master (bac+6/7) d'AgroParisTech-ENGREF en voie d'approfondissement et mastère spécialisé « Gestion de l'eau » à Montpellier.

Le contenu de ce document n'engage la responsabilité que de son auteur, il ne reflète pas nécessairement les opinions ou la politique de l'OIEau.

Toute utilisation, diffusion, citation ou reproduction, en totalité ou en partie, de ce document ne peut se faire sans la mention expresse du rédacteur, de l'Etablissement d'origine et de l'OIEau.

SYNTHESE

L'utilisation des membranes en assainissement

Patricia García Gómez

patriciagargo@gmail.com

Février 2016

AgroParisTech

Centre de Montpellier
648 rue Jean-François Breton – BP 44494
34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. : (33) 4 67 04 71 00
Fax : (33) 4 67 04 71 01
www.agroparistech.fr

Office International de l'Eau

Service gestion et valorisation
de l'information et des données
15 rue Edouard Chamberland
87 065 LIMOGES CEDEX
Tél : (33) 5 55 11 47 47
www.oieau.org

RESUME

En Europe et dans de nombreux pays à travers le monde, le problème du stress hydrique n'a cessé de croître au cours des dernières décennies, à la fois en termes de pénurie d'eau et de détérioration de la qualité. En réponse à ce problème, il y a eu un intérêt croissant au cours des dernières années pour le développement et l'amélioration des technologies de traitement des eaux usées afin de respecter les limites de rejet de plus en plus contraignantes ou d'ajuster la qualité de l'eau pour les pratiques de réutilisation ou de recyclage des eaux usées. Dans ce contexte, les technologies membranaires jouent un rôle décisif 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 et anBRM) ou les procédés d'oxydation avancée, sont de plus en plus utilisées pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Le but de cette synthèse 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.

Mots clés : technologies de membranes, bioréacteur à membranes, eaux usées urbaines, eaux usées industrielles, eaux pluviales, recyclage, réutilisation.

ABSTRACT

In Europe and in many countries all around the world, the problem of water stress has been growing during the last decades, both in terms of water scarcity and quality deterioration. In response to this problem, there has been an increasing interest in recent years in developing and improving wastewater treatment technologies in order to meet the restrictive discharge limits or adjust the quality of water for reclaim or reuse practices. In this context, membrane technologies play a decisive role by assuring high quality water and they are becoming more and more competitive compared with conventional treatment processes. Not only the unitary operations which include microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO), but also the coupling of biological methods with membrane filtration (MBR, AnMBR) or combined process with ozone or adsorption are on the rise in urban and industrial wastewater treatment. The purpose of this synthesis is to present the state of the art of membrane treatments depending on the type of water treated, as well as the prospective.

Keywords: membrane technologies, membrane bioreactor, municipal wastewater, industrial wastewater, rainwater, wastewater reclamation, water reuse.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
TECHNOLOGIES DE MEMBRANES.....	4
OPERATIONS UNITAIRES MEMBRANAIRES.....	4
COUPLAGES DE MEMBRANES AVEC D'AUTRES OPÉRATIONS UNITAIRES.....	4
Couplages biologiques bioréacteurs à membranes (BRM et anBRM)	4
Autres couplages	5
APPLICATION DES MEMBRANES EN ASSAINISSEMENT	6
EAUX USÉES URBAINES.....	6
Bioréacteur à membranes comme traitement secondaire	7
Bioréacteur anaérobie à membranes.....	8
Traitement tertiaire / quaternaire	8
EAUX USÉES INDUSTRIELLES.....	9
EAUX PLUVIALES	12
LES COÛTS DES PROCÉDÉS À MEMBRANE	14
CONCLUSION	16
BIBLIOGRAPHIE.....	17
ANNEXE A	20
ANNEXE B.....	23

LISTE DES FIGURES

Figure 1.- Projets de réutilisation des eaux usées en Europe	2
Figure 2.- Configurations des BRM : a) BRM à membranes externes, b) BRM immergée.....	5
Figure 3.- Schéma des principales filières de traitement membranaire.	6
Figure 4.- Comparaison des CFS annuels d'un BA+ Affinage et d'un BRM de la bibliographie	15

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.- Procédés applicables en traitement tertiaire (Degremont, 2005).	10
Tableau 2.- Exemples des objectifs visés selon le type d'industrie utilisant des technologies de membrane dans leurs filières de traitement.....	10
Tableau 3.- Evaluation des coûts d'investissement des boues activées et BRM en Adour Garonne	14
Tableau 4.- Coûts de fonctionnement simplifiés d'après Brepols et al., (2010).. ..	14

GLOSSAIRE

AnBRM	Bioréacteur anaérobie à membranes
BRM	Bioréacteur à membranes
CFS	Coûts de fonctionnement simplifiés
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
EH	Equivalent - Habitant
MES	Matières en suspension
MF	Microfiltration
NF	Nanofiltration
NGL	Azote global
OI	Osmose Inverse
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
POA	Procédé d'oxydation avancée
P_t	Phosphore total
STEP	Station de traitement des eaux polluées
UF	Ultrafiltration
UV	Ultraviolet

INTRODUCTION

La surexploitation des ressources en eau à laquelle s'ajoutent, entre autres, des périodes de sécheresse plus fréquentes, des zones en très fort stress hydrique, une pollution des ressources et la salinisation des nappes, font que la réglementation en matière d'eau est de plus en plus stricte. Les restrictions croissantes des autorisations contraignent de plus en plus les prélèvements et les normes de rejet dans les milieux naturels. Dans ce contexte, des efforts complémentaires en termes de traitement et de recyclage des eaux usées paraissent indispensables pour atteindre l'objectif de bon état écologique des milieux naturels en 2015 décrit par la Directive Cadre Européenne (2000/60/CE) (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2013).

Qualité de l'eau et quantité suffisante sont donc les mots clés à considérer pour le traitement des eaux. 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. Introduites dans le traitement des eaux usées, ces opérations de séparation permettent un recyclage ou/et une réutilisation de l'eau réglant ainsi, en partie, le problème de la quantité.

HISTORIQUE

Les procédés membranaires connaissent ces dernières années une forte croissance en Europe et en France pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Néanmoins, la technologie membranaire n'est pas une technologie nouvelle.

La technologie de bioréacteur à membranes (BRM) appliquée au traitement des eaux usées est utilisée pour la première fois en 1969 par Dorr-Olivier Inc, pour assurer le traitement des eaux usées à bord d'un navire (Kraume et Drews, 2010; Le-Clech et al., 2006; Judd, 2010). Les premières installations commercialisées voient le jour dans les années 1970 et 1980, notamment aux USA et au Japon, mais limitées aux installations de petite taille. En Europe, les premiers BRM sont mis en opération dans les années 1990 pour le traitement des eaux usées urbaines (Yang et al., 2006; Gresle et al., 2007; Seyhi et al., 2011; Yang et al., 2006; Judd, 2010; Drogui et al., 2012; Irstea, 2014). À partir de ce moment, l'intérêt croissant pour cette technologie permet le développement d'une cinquième génération de bioréacteurs à membranes. Les capacités de traitement sont augmentées, les coûts d'investissement et d'opération diminués. Actuellement, la technologie de BRM est adaptée parfaitement à toutes les capacités de traitement, jusqu'à 150 000 m³/j (Gresle et al., 2007; Kraemer et al., 2012).

RÉUTILISATION ET RECYCLAGE DES EAUX – CONTEXTE EUROPÉEN

L'idée de réutiliser les eaux usées est ancienne et s'opérait à l'origine sans traitement. En 1971, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) élabore des lignes directrices concernant l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture. Les réglementations en matière de qualité des eaux restent toutefois trop strictes. Au cours de ces dix dernières années les procédés de réutilisations et les technologies disponibles se sont significativement améliorés, et un nombre croissant de pays adoptent un cadre réglementaire pour la réutilisation. Afin de développer cette pratique en Europe, le projet de recherche AQUAREC "Integrated Concepts for Reuse of Upgraded Water" voit le jour en 2002 ; il souhaite développer certains concepts et méthodologies en faveur de la réutilisation des eaux usées traitées. Les membranes se présentent comme une des options les plus récurrentes (voir Annexe A).

Les termes « réutilisation » et « recyclage » sont souvent employés de façon arbitraire ; il est cependant indispensable d'en remarquer la différence de sens. La « réutilisation » de l'eau se définit comme l'utilisation d'eaux usées traitées répondant à certains critères de qualité selon l'usage désiré. Le terme « recyclage » désigne la réutilisation des effluents au sein de l'usine elle-même.

Une fois les eaux usées traitées, elles sont vouées à différentes utilisations (Monchalín et Aviron-Violet, 2002; Paquet et Rotbardt, 2011).

- Utilisations urbaines : l'arrosage des espaces verts et des golfs, le nettoyage des espaces urbains et marchés, fontaines, le recyclage des eaux grises d'un immeuble pour ses chasses d'eau de WC (pratique généralisée au Japon), la lutte contre l'incendie,
- Utilisations agricoles : l'irrigation.
- Utilisations industrielles : le recyclage des eaux de process et de refroidissement, lavage,
- Amélioration des ressources en eau et de sa qualité : recharge des nappes, souterraines (éventuellement utilisées ensuite pour l'irrigation, le soutien d'étiage des rivières ou des zones humides), protection contre l'intrusion du biseau salé en bord de mer par recharge de nappes.

Comparé à la production d'eau potable, peu de cas d'utilisation directe après traitement des eaux usées sont connus, mais l'utilisation indirecte est aujourd'hui très répandue, aux USA et en Australie par exemple (Monchalín et Aviron-Violet, 2002; Paquet et Rotbardt, 2011).

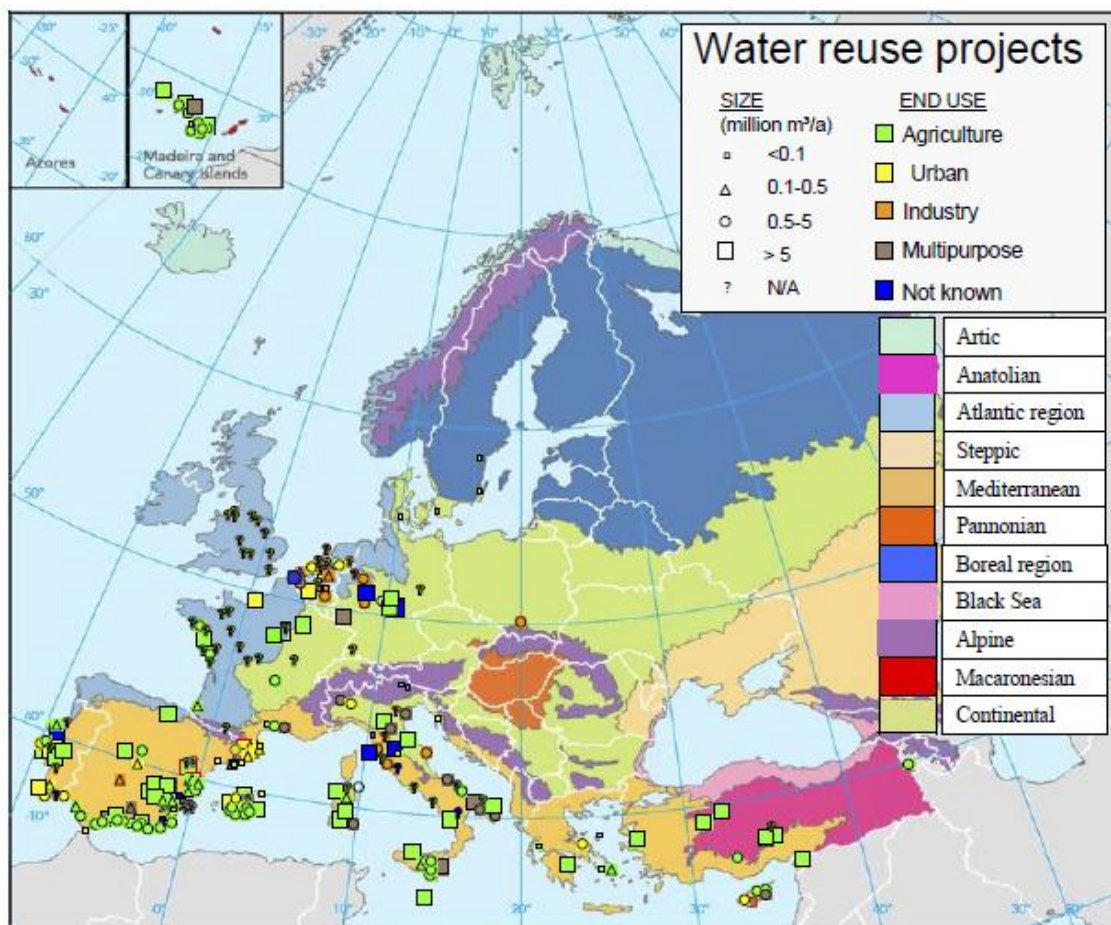


Figure 1.- Projets de réutilisation des eaux usées en Europe : répartition par usage (agriculture, industrie, urbain y compris l'arrosage et la recharge d'aquifères, combinaisons de différents usages). La taille des projets est répertoriée dans quatre rubriques : très petit (0,1 Mm³/a), petit (0,1-0,5 Mm³/a), moyen (0,5-5 Mm³/a) et grand (> 5 Mm³/a) (Bixio et al., 2008).

En Europe, plus de 200 projets de réutilisation des eaux sont actuellement en cours. La Figure 1 illustre la répartition géographique de ces projets, leur taille et les usages principaux des eaux traitées. Malgré ses nombreux avantages et son potentiel de développement, la réutilisation des eaux traitées n'est pas mise en œuvre à grande échelle dans beaucoup d'États membres. L'absence d'une législation adaptée constitue l'un des freins principaux à la mise en œuvre de ces projets. Des écarts de prix insuffisants entre les eaux recyclées réutilisées et l'eau douce, les normes établies parfois très strictes (similaires à celles pour l'eau potable même pour les usages non potables) ou bien quelques obstacles techniques, limitent l'attractivité économique des projets de réutilisation des eaux usées (BIO by Deloitte, 2015).

RAISONS DE CHOIX D'UNE ALTERNATIVE AUX TRAITEMENTS CONVENTIONNELS

Les techniques conventionnelles sont capables d'éliminer, dans les proportions variables, les matières en suspension et les matières organiques. Mais aucune d'entre elles ne garantit l'élimination des risques sanitaires ou de certains polluants émergents (médicaments, produits cosmétiques, compléments alimentaires et métabolites dérivés). Les membranes, en revanche, peuvent réussir à atteindre des objectifs de **qualité** de l'eau qui vont de l'élimination de contaminants microbiologiques (désinfection) à l'élimination de polluants organiques résiduels (Monchalín et Aviron-Violet, 2002; Gresle et al., 2007; Drogui et al., 2012).

Pour un même objectif de qualité de l'eau, les membranes permettent de remplacer plusieurs étapes du traitement conventionnel. La **compacité** des procédés membranaires permet la réalisation de stations avec une faible emprise au sol et les procédés modulaires peuvent être installés sur un très large éventail de tailles de stations.

Lors de **réutilisation ou recyclage** des eaux usées traitées, l'objectif de qualité des eaux diffère selon l'usage final, afin que l'économie du système reste viable et le risque sanitaire maîtrisé, notamment sur les aspects microbiologiques. Dans un tel contexte, les technologies membranaires constituent des étapes-clés en recyclage des eaux usées car elles assurent une eau d'excellente qualité et désinfectée, seules ou en combinaison avec des procédés de désinfection aux ultraviolets (UV) (Gresle et al., 2007).

TECHNOLOGIES DE MEMBRANES

Divers procédés de séparation membranaires sont aujourd'hui connus et utilisés. Parmi ces derniers, la filtration membranaire, basée sur l'utilisation d'un gradient de pression, permet le transfert de matière à travers la membrane ; ils seront développés tout au long de ce rapport. Il existe cependant d'autres techniques telles que la pervaporation (basée sur un gradient de potentiel chimique) ou l'électrodialyse (basées sur un gradient de potentiel électrique) (Arzate, 2008),

OPERATIONS UNITAIRES MEMBRANAIRES

La filtration membranaire se définit comme le procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes perméselectives sous l'action d'un gradient de pression. Les techniques de filtration membranaire sont classées en fonction de la nature de la force motrice ou la taille de leurs pores. Le graphe en Annexe B schématise les différents types de filtration sur membrane et leurs caractéristiques. Il n'existe pas un critère unifié sur la taille des pores et il peut y avoir quelques différences selon la source consultée.

La **microfiltration (MF)** permet la séparation des particules entre 0.1 et 1 μm sous des pressions entre 0.1 et 3 bars. Ces membranes assurent le passage de toutes les espèces dissoutes ; seules les particules solides sont retenues. Les pores des membranes d'**ultrafiltration (UF)** ont une taille comprise entre 0.01 et 0.1 μm ; les pressions d'opération se situent entre 0.1 et 5 bars. Les sels minéraux et les molécules organiques passent à travers de la membrane alors que les macromolécules sont stoppées. Les ions multivalents et les solutés organiques de plus petites tailles sont parfaitement retenus sur les membranes de **nanofiltration (NF)** pour des pressions de travail sont entre 3 et 20 bars. Dans le cas de l'**osmose inverse (OI)**, à la séparation des tous les particules antérieures s'ajoutent celle des compounds de bas poids moléculaire, comme des ions monovalents ou des sucres. Le travail s'effectue pour des pressions comprises entre 5 et 120 bars.

COUPLAGES DE MEMBRANES AVEC D'AUTRES OPÉRATIONS UNITAIRES

Les membranes peuvent être associées à des opérations unitaires de nature différente : biologiques (BRM, AnaBRM) ou physico-chimiques (traitement avec ozone, adsorption, cristallisation, etc).

Couplages biologiques bioréacteurs à membranes (BRM et anBRM)

Le **bioréacteur à membranes BRM** (Membrane Bioreactors en anglais – MBR) est une technologie hybride qui couple une séparation physique par membranes (micro- ou ultrafiltration) et un procédé de boues activées dans le réacteur biologique. Cette technologie est une amélioration du système biologique à boues activés ; le traditionnel décanteur secondaire y est remplacé par une unité de filtration membranaire (Seyhi et al., 2011). Deux types de configurations existent, comme schématisé sur la Figure 2 (Degrémont, 2005) :

- Bioréacteurs à membranes externes : les membranes sont installées à l'extérieur du bassin d'aération. Il s'agit de membranes tubulaires, ou planes, installées en série et/ou en parallèle. La filtration s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur ; elle est dite « tangentielle ».
- Bioréacteurs à membranes immergées : les membranes sont installées directement dans le bassin d'aération. Les membranes sont en fibres creuses ou planes et la filtration s'effectue de l'extérieur vers l'intérieur.

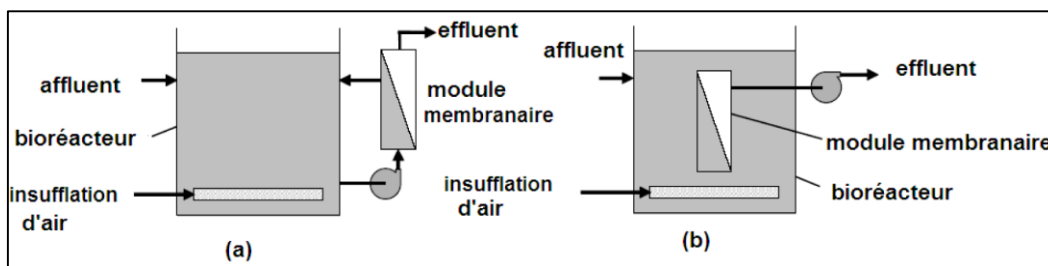


Figure 2.- Configurations des BRM : a) BRM à membranes externes, b) BRM immergée. (Seyhi et al., 2011).

Le BRM externe s'adapte mieux aux eaux usées de type industriel, grâce aux membranes organiques ou céramiques, caractérisées par des températures relativement élevées (ex. :40°C), des concentrations élevées de charge organique et des pH élevés (Yang et al., 2006). D'une part, cet équipement est peu compatible avec le traitement de débits importants et d'eaux peu concentrées comme le sont les eaux usées municipales. D'autre part, les BRM immergés sont largement utilisés pour traiter les effluents domestiques et municipaux (Boutin et al., 2008).

Le **Bioréacteur Anaérobie à Membranes anBRM** (Anaerobic Membrane Bioreactors en anglais – AnMBR) constitue une alternative technologique pour le traitement des eaux résiduaires, grâce à une consommation d'énergie et une production de boue inférieures. De plus, la dégradation anaérobie de la matière organique entraîne la production de biogaz, sous-produit valorisable. Les modules de AnBRM, les membranes peuvent être aussi installés à l'extérieur du bassin ou bien à l'intérieur du réacteur.

Autres couplages

Le progrès en termes de traitement de l'eau par technologies à membranes est également lié aux couplages avec différentes opérations de séparation et/ou de réactions. Ces associations permettent l'optimisation des performances globales au regard des critères d'intensification et de minimisation de l'impact environnemental. C'est le cas, par exemple, du couplage entre un procédé de séparation membranaire et des procédé d'oxydation avancée, d'adsorption ou de cristallisation.

APPLICATION DES MEMBRANES EN ASSAINISSEMENT

Les différentes techniques membranaires existantes sont étudiées au cours de ce chapitre. Elles sont présentées selon la nature de l'eau à traiter : les eaux usées urbaines, industrielles et pluviales.

EAUX USÉES URBAINES

Les eaux usées urbaines ou résiduaires (ERU) sont composées principalement des eaux usées domestiques, qui comprennent les eaux usées ménagères (provenant des lessives, des cuisines et des salles de bain) et les eaux vannes (contenant des urines et matières fécales). Cependant, les eaux industrielles rejoignent également les ERU lorsque leurs caractéristiques sont similaires à ces dernières (Degremont, 2005; Conseil Général Hauts-de-Seine, 2012).

En fonction des objectifs de traitement et de l'emplacement des membranes dans les filières des stations de traitement des eaux usées urbaines, trois grands groupes de procédés à membranes sont distingués sur la Figure 3 :

- Le traitement par bioréacteur à membranes.
- Le traitement tertiaire est placé à la suite d'une filière conventionnelle à boues activées par membranes de MF ou UF, travaillant sous faible pression et mettant en œuvre des membranes immergées ou à circulation externe
- Le traitement d'affinage (ou quaternaire) permet le dessalement et une élimination efficace des micropolluants organiques par OI, NF ou par électrodialyse.

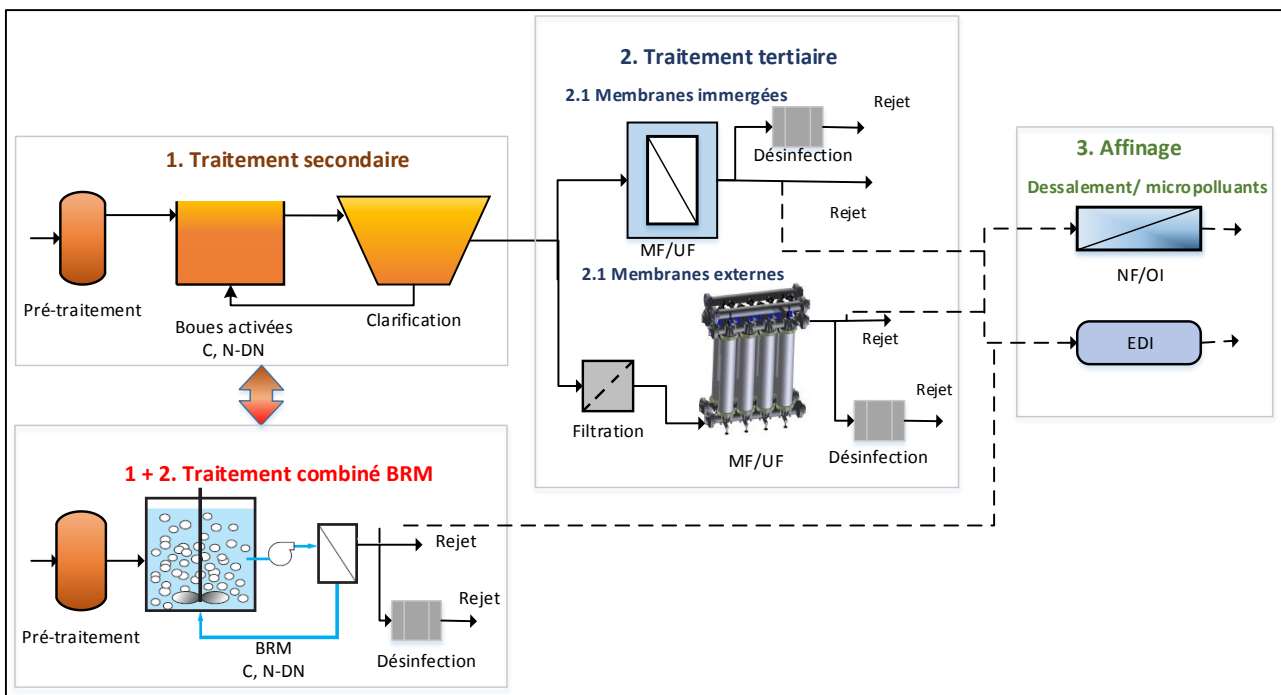


Figure 3.- Schéma des principales filières de traitement membranaire. Adapté de Gresle et al., 2007.

Bioréacteur à membranes comme traitement secondaire

Les bioréacteurs à membranes combinent le traitement secondaire par boues activées avec la filtration membranaire poreuse (MF ou UF) : les membranes assurent ainsi le rôle de clarificateur conventionnel auquel s'ajoutent une désinfection performante.

Pour des raisons financières, et dans une configuration des modules adaptée, seuls les bioréacteurs à membranes immergées sont utilisés pour traiter les eaux usées urbaines (Stephenson et al., 2000). Cependant, dans le but d'améliorer les performances épuratoires, une nouvelle configuration est développée : les bioréacteurs à membranes immergées externes. Les membranes sont immergées dans un module externe au réacteur biologique ; cette structure permet de découpler l'aération dédiée au cisaillement et celle dédiée au traitement biologique. Elle facilite également les phases de nettoyage chimiques, tout en améliorant les performances épuratoires (Gagnaire et al., 2008; Léna, 2007).

Le remplacement du décanteur secondaire supprime toute difficulté apportée par la décantation des boues (foisonnement filamenteux, moussage, voile de boue trop important). La production de boues est également réduite (Pronost, 2002). Ce système entraîne également un gain de place : il est possible d'augmenter la concentration de biomasse épuratrice, les dimensions de l'aérateur peuvent alors être réduites (jusqu'à 75% en comparaison avec les traitements conventionnels). L'adaptation des BRM à toutes les géométries de bassins permet une réhabilitation de stations tout en améliorant les performances avec très peu de travaux de génie civil supplémentaires (Degrémont, 2005).

Dans les cas où une eau de qualité est requise (lors de rejet dans un milieu sensible notamment) les BRM représentent une solution économiquement intéressante. L'effluent produit est de meilleure qualité qu'une boue activée, notamment pour les concentrations en MES, les matières organiques (DCO, DBO, P_T , NGL, etc.) et les paramètres bactériologiques (bactéries, virus, parasites). Si un traitement complémentaire aux UV est nécessaire, la bonne performance de cette dernière sera assurée grâce aux très faibles concentrations en MES (Stricker et al., 2013). De plus, l'élimination quasi complète des micropolluants organiques (pesticides, hydrocarbures, substances pharmaceutiques, cosmétiques, etc.) est bien démontrée à grande échelle.

Le colmatage inévitable des membranes est la principale limite de cette technologie. La gestion des lavages est une contrainte d'exploitation essentielle même si des progrès importants ont été réalisés dans ce domaine. De solides compétences techniques pour les opérateurs, en automatisation notamment, sont nécessaires (Stricker et al., 2013).

La généralisation de cette technique reste confrontée à des coûts d'investissement et d'exploitation (énergie, maintenance, réactifs, le remplacement des membranes) élevés. Toutefois, ces coûts ont été considérablement réduits au cours des dix dernières années (Gresle et al., 2007).

Les bioréacteurs à membranes jouent aussi un rôle important par rapport aux systèmes décentralisés d'assainissement. Les BRM étaient au départ utilisés pour le recyclage des eaux dans les bâtiments ; les eaux usées issues des cuisines, des salles de bains et des toilettes des très grands immeubles se déversent dans un bioréacteur, l'eau ultrafiltrée est ensuite stockée sous hypochlorite de sodium. Des centaines d'installations similaires existent actuellement au Japon et en Corée (Aptel, 2006). En Europe, le nombre d'hôtels et de bâtiments qui utilisent des membranes pour gérer leurs eaux usées est en nette augmentation. Cette technologie permet en effet d'obtenir un effluent d'une qualité telle qu'il puisse être recyclé pour les usages non potables. Les bateaux, les paquebots ou les installations mobiles pour l'usage militaire sont également équipés de BRM. Pour citer un exemple : les eaux usées du Queen Mary 2 (cuisine, entretien, sanitaires) sont traitées à bord via un équipement BRM avant d'être rejetée en mer parfaitement propres (Pinnekamp et Friedrich, 2006; Gagnaire et al., 2008).

Bioréacteur anaérobie à membranes

Au cours de la dernière décennie, les processus de digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées ont gagné en popularité en raison de leur capacité à obtenir de l'énergie (biogaz), de récupérer les nutriments puis à produire de petits volumes de boues (Smith et al., 2012). Cependant, la forte rétention des matières solides nécessaire pour favoriser la croissance lente de micro-organismes méthanogènes augmente les volumes des réacteurs nécessaires pour assurer une performance appropriée, ce qui limite leur application à grande échelle. En outre, le procédé, sensible aux changements de température, produit un effluent dont la qualité n'est pas toujours conforme à la réglementation ; l'utilisation de post-traitements est nécessaire pour respecter les normes de qualité (Vera et al., 2014).

Les traitements anaérobies sont en général efficaces à température modérée. Les AnBRM peuvent être envisagés dans des endroits au climat tempéré ou tropical, au Brésil, en Inde, ou aux Iles Canaries par exemple. Certains macronutriments tels que l'ammonium et les ortho-phosphates ne sont pas éliminés par la dégradation anaérobie et les membranes permettent la rétention des pathogènes ; l'eau traitée riche en nutriments est d'un intérêt certain pour l'usage agricole (Ozgun et al., 2013).

Même si les AnBRM présentent un grand potentiel pour le traitement des eaux usées, la mise en place de cette technique reste confrontée notamment au colmatage des membranes mais aussi à des problèmes associés aux procédés anaérobies. Les études académiques et les installations à échelle pilote sont nombreuses mais, à ce jour, aucune application à grande échelle n'est connue (Skouteris et al., 2012).

Traitement tertiaire / quaternaire

Les usages non potables (comme l'irrigation des espaces verts, le lavage des rues ou des sanitaires, la lutte contre l'incendie...) exigent une désinfection poussée, garantie par un simple étage de traitement membranaire : les bioréacteurs à membranes ou le traitement tertiaire par micro- ou ultrafiltration. Dans certains cas, une chloration finale à faible dose ajoutée assure le maintien d'une concentration en chlore résiduel suffisante pour éviter la re-croissance bactérienne ou la re-contamination de l'eau traitée dans les systèmes de distribution.

Certains usages à fort risque sanitaire, comme la recharge directe de nappe ou des retenues pour la production ultérieure d'eau potable, ainsi que pour certains usages industriels comme les eaux de chaudière ou de refroidissement, nécessitent la mise en place de filières plus complexes avec deux étages de traitement à membranes de micro- ou ultrafiltration combinés à l'osmose inverse et des procédés complémentaires comme la filtration sur charbon actif ou l'oxydation avancée des micropolluants organiques (Gresle et al., 2007).

En Espagne, par exemple, l'usage des eaux recyclées pour l'irrigation des parcours de golf est déjà une réalité. Dans ce contexte, des installations de traitement tertiaire sont construites, normalement consistant en un premier étage de traitement de MF combinée à un affinage complémentaire de l'effluent par OI pour assurer une désinfection complète (Gresle et al., 2007; Léna, 2007).

Dans les zones côtières, de nombreuses communes ont adopté les membranes pour protéger le milieu naturel et les eaux de baignade. C'est le cas, par exemple, des stations françaises de Guéthary et de Guilvinec: elles sont équipées de BRM à plaques et à fibres creuses respectivement, suivies d'une désinfection finale par UV (Gresle et al., 2007; Léna, 2007).

Un autre exemple de traitement d'une eau usée urbaine par une séquence d'affinage avec une MF/UF suivi d'une OI concerne les usages industriels, exigeant une très bonne qualité des effluents,

y compris l'intégralité de leur dessalement. La STEP Arroyo Culebro à Madrid, Espagne, inclut un traitement tertiaire avancé à la suite du clarificateur secondaire pour obtenir une eau de qualité similaire à l'eau potable. Elle est ensuite réutilisée comme eau de processus d'une usine de l'industrie papier. Pour arriver à ce point, la ligne compte des filtres de charbon actif, UF, UV, OI et reminéralisation de l'eau avec la chaux et le CO₂, puis une dernière désinfection avec hypochlorite de sodium (Pernaute et al., 2012).

La réglementation européenne actuelle n'autorise pas de telles filières pour la production directe d'eau potable. Mais la ville de Windhoek en Namibie, en situation de stress hydrique, est alimentée en eau potable par une usine de recyclage des eaux usées. La filière de traitement se compose des étapes successives suivantes : clarification, oxydation/désinfection, traitement biologique, absorption sur charbon actif en grain, filtration membranaire de UF et post-désinfection au chlore (Gresle et al., 2007). L'eau produite est mélangé avec de l'eau provenant du milieu naturel pour produire de l'eau potable.

EAUX USÉES INDUSTRIELLES

Dans l'industrie, les membranes sont présentes dans les chaînes de production, avec de nombreuses références dans l'industrie des boissons, l'industrie pharmaceutique et dans la production d'eau ultra-pure. Les eaux résiduelles industrielles sont générées parfois de façon discontinue et la variabilité de la composition de l'effluent à traiter est propre à chaque type d'industrie. Ces derniers peuvent être rejetés soit directement dans le milieu naturel soit dans des égouts urbains ; ils aboutissent alors dans des stations biologiques dont ils ne doivent pas perturber le fonctionnement.

Face à l'augmentation du prix de l'eau potable, utilisée en industrie comme eau de process, et une préoccupation environnementale croissante, les membranes sont aujourd'hui de plus en plus fréquemment utilisées. D'une façon générale, lorsque les eaux résiduelles industrielles subissent un traitement par cette technologie, l'un ou l'autre des objectifs suivants est visé pour les eaux traitées (Truc, 2007) :

- **Réduction des effluents produits** : soit leur réutilisation dans un usage industriel (lavage de sols ou de produits, systèmes d'incendie, circuits de refroidissement, eau de procédé, voire alimentation de chaudières), agricole (irrigation) ou municipal (arrosage de golfs, de pelouses ou de terrains de jeu) ou leur recyclage (partiel ou total) vers les usines d'où elles proviennent.
- **Amélioration de leur qualité** pour respecter des normes de rejet en perpétuelle évolution et de plus en plus sévères (surtout dans les zones sensibles).
- **Récupération éventuelle des matières premières**, soit pour leur réutilisation dans le processus soit leur valorisation (récupération de protéines, latex, etc.).
- **Réduction de l'espace occupé par la station de traitement.**

Pour les usages aux réglementations les plus exigeantes, l'effluent nécessite un traitement tertiaire complet, incluant une étape de traitement sur membrane qui peut s'avérer indispensable comme l'illustre le Tableau 1.

Tableau 1.- Procédés applicables en traitement tertiaire (Degrémont, 2005).

Paramètres éliminés	Traitement biologique	Techniques utilisées						
		Oxydation		Membranes (1)		Charbon actif	Résines ou absorbants spécifiques (1)	Précipitation Coagulation Floculation Séparation (2)
		O ₃ , H ₂ O ₂ , UV	O ₃ + biologie	UF	NF/OI			
DBO résiduelle	x							
Phosphore					x			x
Azote	x				x			
MES et DCO colloïdales				x	x			x
DCO dure soluble		x	x		x	x		x
AOX		x	x		x	x		
Décoloration		x	x		x	x		x
Composés spécifiques		x			x	x	x	
Anions, cations					x		x	x
Métaux					x			x
(1) L'utilisation de membranes ou de résines présente l'avantage de produire une eau traitée de parfaite qualité mais impose des prétraitements adaptés et, surtout, produit des concentrats salins qu'il faut gérer (évacuation pour traitement extérieur ou retraitement sur site).								
(2) Décantation, flottation à l'air dissous et filtration sur matériau granulaire, après tout ou partie des étapes de neutralisation, coagulation, floculation.								

Le tableau 2 suivant récapitule des exemples d'industries équipées des technologies de membranes pour traiter les eaux résiduaires tout en répondant aux contraintes réglementaires, et même souvent au-delà, quand des systèmes de recyclage partiel ou même total sont utilisés.

Tableau 2.- Exemples des objectifs visés selon le type d'industrie utilisant des technologies de membrane dans leurs filières de traitement (Pinnekamp et Friedrich, 2006).

Type d'industrie	Exemple d'objectifs
Industrie agroalimentaire	• Réutilisation des eaux usées comme eau de process
	• Récupération de protéines
Industrie du papier	• Respect des normes de rejet
	• Réutilisation des eaux usées comme eau de process
Industrie textile	• Récupération de colorants
	• Séparation des pigments de couleur
	• Réutilisation des eaux usées comme eau de process
Industrie chimique	• Traitement des micropolluants (solvants, sels, catalyseurs, hormones)
Industrie métallurgique	• Séparation d'huile et des émulsions
	• Récupération des bains de décapage
	• Traitement des eaux de rinçage
Industrie du pétrole	• Traitement de l'eau de réaction et de l'eau de lavage
Centrale thermique	• Traitement de l'eau d'alimentation des chaudières
Industrie minière	• Traitement de l'eau des mines et de l'eau de surface

Industrie agroalimentaire (IAA)

Les caractéristiques communes à toutes les eaux résiduaires de l'industrie alimentaire sont une pollution essentiellement organique et biodégradable et une tendance générale à l'acidification et à la fermentation rapides.

Les membranes sont utilisées dans cette industrie pour le recyclage des eaux de nettoyage et la récupération de matière. Les BRM sont utilisées pour le traitement des effluents produits par le traitement de la récolte (la choucroute, le sucre, le blé, le maïs, le soja, l'huile), les fruits de mer, l'industrie laitière et l'industrie viticole (Skouteris et al., 2012). À titre d'exemple, la laiterie de Unigate en France, utilise la technique du bioréacteur à membranes après un simple prétraitement ; la qualité de l'eau issue du traitement est telle que des recyclages en usine sont possibles (Pinnekamp et Friedrich, 2006).

Le traitement membranaire, à la suite d'un traitement secondaire, s'avère de plus en plus utile pour atteindre les normes de rejet imposées. Pour citer un exemple, l'usine de BEECK Feinkost GmbH en Allemagne produit des plates cuisines et de sauces. Son effluent étant trop chargé en DCO, une étape d'ultrafiltration est placée après le traitement biologique afin de produire un effluent aux normes (Pinnekamp et Friedrich, 2006).

Industrie chimique

L'industrie chimique est extrêmement diversifiée, puisque l'on y distingue usuellement les grandes familles suivantes : pétrochimie, chimie inorganique, chimie de spécialités, chimie fine et pharmacie. La variabilité de la composition de l'effluent à traiter est y notable : les effluents sont de plus en plus concentrés et de plus en plus complexes (présence de polluants toxiques et réfractaires).

Ces contaminants échappent pour la plupart au traitement classique des eaux usées et, de ce point de vue, les procédés membranaires sont particulièrement intéressants. Des études effectuées sur l'élimination des produits pharmaceutiques et produits dérivés (médicaments, métabolites dérivés, produits cosmétiques, etc.) démontrent que ces micropolluants sont éliminés à des taux très élevés par traitement avec bioréacteurs à membranes, seuls ou combinés avec un prétraitement ou une dernière étape de polissage (Clara et al., 2005; Drogué et al., 2012; Lin et al., 2012). Les procédés d'oxydation avancée tels que l'ozonation, peroxone (O_3 / H_2O_2), UV / H_2O_2 , photo-Fenton, photocatalyse et les procédés d'oxydation avancée électrochimiques en couplage avec la technologie de membranes sont testés avec succès pour l'élimination des produits pharmaceutiques (Seyhi et al., 2011). Cependant, malgré les activités de recherche croissantes dans ce domaine, il n'existe pas encore de nombreuses applications à grande échelle.

Industrie textile

L'industrie textile est également un grand consommateur d'eau. Les volumes rejetés et les charges polluantes sont très variables. La technologie de bioréacteur à membranes appliquée au traitement des eaux usées de l'industrie textile a été introduite pour la première fois en 1992 pour le traitement des eaux usées du récurage de la laine avec un AnBRM. Les dernières années, plusieurs cas d'application de BRM ont été répertoriés (Lin et al., 2012).

Pour les industries utilisant des décolorants textiles, présents ensuite dans les effluents, des études récentes montrent que le couplage entre les BRM et les procédés d'oxydation avancée (POA) est une technologie prometteuse. Après traitement tertiaire par membrane, le recyclage de certains effluents est possible. À titre d'illustration, la station de traitement des eaux usées de l'usine d'ennoblissement du textile de Gerhar vam Clewe en Allemagne comprend deux installations de membranes : l'une avec un module de MF et l'autre avec des étapes en série de UF, NF et OI. En plus de rejeter des effluents répondant aux normes de rejet, cette installation permet d'épargner

jusqu'à 50% du coût de traitement des effluents grâce au fonctionnement en circuit fermé (Pinnekamp et Friedrich, 2006).

Industrie du papier

Les industries de la pâte à papier et papeteries consomment une grande quantité d'eau et d'énergie, et utilisent une matière première coûteuse; les recyclages internes s'avèrent alors indispensables, tels que (Degrémont, 2005):

- La récupération des fibres sur la machine à papier et parfois la récupération des sauces de couchage par ultrafiltration ;
- Recyclage de l'eau en divers points de la machine à papier ou du procédé de fabrication, les taux de qualité de cette eau dépendant du type de papier fabriqué.

D'une façon générale, les eaux usées issues de cette industrie présentent une charge organique élevée et les traitements tertiaires sont requis pour atteindre les normes de rejet. Les modules de UF sont généralement utilisés (Judd et Jefferson, 2003). Les performances épuratoires des BRM dans le traitement de certains effluents sont plus que satisfaisantes. L'usage de cette technologie est cependant limité par le colmatage (présence de fibres ou de calcium dans les eaux à traiter) et la température des effluents (normalement entre 50-70°C).

En outre, les AnBRM sont employés depuis 1990, puisqu'ils permettent produire un effluent de bonne qualité à des températures modérées et dans le même temps l'énergie. Bien que le colmatage puisse être un frein à leur installation, le futur des AnBRM dans les usines de fabrication du papier semble assuré (Lin et al., 2012).

Energie

Comme vu précédemment, il est préférable que les industries limitent et même évitent tout prélèvement d'eau douce dans le milieu naturel. L'industrie du pétrole et les centrales thermiques ne font pas figure d'exception. Il leur faut donc réutiliser les eaux résiduaires et selon le type d'usage les technologies de membranes peuvent s'avérer nécessaires.

Un exemple typique dans ce type d'industrie est le recyclage de l'eau pour l'alimentation des circuits de refroidissement et des chaudières des centrales. L'eau déminéralisée est nécessaire lors de l'utilisation de ces équipements et, dans le schéma de traitement, une étape par osmose inverse paraît indispensable. Les membranes d'ultrafiltration sont également employées lors du nettoyage des circuits de refroidissement des eaux huileuses ; cette technologie présente de bonnes performances (Pinnekamp et Friedrich, 2006).

Lors de la conception d'une nouvelle ligne de traitement des eaux usées, les BRM se posent comme l'alternative en vue de leur recyclage (Lin et al., 2012).

EAUX PLUVIALES

Les deux systèmes de collecte utilisés en assainissement sont :

- Le système unitaire qui reçoit dans les mêmes canalisations les eaux usées et les eaux pluviales. Ces dernières sont traitées dans les stations d'épurations des eaux urbaines qui peuvent inclure ou non des technologies de membranes.
- Le système séparatif comporte deux réseaux de canalisations différents ; l'un pour les eaux pluviales et l'autre pour les eaux usées. Aucun cas de traitement des eaux pluviales avec des technologies de membranes pour leur rejet n'est connu : normalement, un traitement physico-chimique simple est suffisant pour dépolluer l'eau de pluie.

Dans les immeubles où le recyclage des eaux grises est prévu, la récolte des eaux pluviales peut être aussi incluse dans le système de gestion. Cette solution qui a fait l'objet de très nombreuses applications au Japon consiste le plus souvent à alimenter les chasses de toilette, des eaux de lavage des sols, etc. En prenant en compte les contacts potentiels avec les usagers, des traitements membranaires éventuellement complétés par une désinfection chimique, sont à préconiser pour éviter tout risque de contamination. A titre d'exemple, dans le Dôme du Millénaire en Angleterre, les eaux grises produites par les lavabos, l'eau de pluie collecté du toit et les eaux souterraines de l'aquifère situé en dessous du site, sont récupérées, traitées et réutilisées dans les chasses d'eau. La ligne de traitement comprend un prétraitement selon l'origine de l'eau, une étape d'ultrafiltration, une étape d'osmose inverse et une dernière étape de désinfection pour atténuer les risques sanitaires (Smith et al., 2000). Les bioréacteurs à membranes proposent ainsi un traitement plus efficace pour alimenter des douches des hôtels par exemple.

Dans certaines régions semi-arides du monde où le stress hydrique est fort, la collecte des eaux pluviales est développée depuis des siècles. Dans le cadre de la réutilisation des eaux de pluie, des traitements poussés sont nécessaires pour respecter les normes de qualité et sécurité. Les techniques de filtration par membrane ne sont utilisées que pour un usage potable. Dans le cadre de la recherche, de nouveaux matériaux sont testés pour le traitement des eaux pluviales, comme des membranes métalliques et céramiques (Kim et al., 2005; Kim et al., 2007; Helmreich et Horn, 2009).

LES COÛTS DES PROCÉDÉS À MEMBRANE

Le coût d'investissement et d'exploitation de ces procédés se sont considérablement réduits depuis ces dix dernières années. Il faut souligner que les coûts d'investissement et d'exploitation des procédés à membranes, tout comme les autres procédés de traitement des eaux usées, dépendent en grande partie de la taille des installations, mais également des charges polluantes et des conditions locales.

Les coûts des modules membranaires en BRM ont diminué d'un facteur de 7 en sept ans. Le Tableau 3 reprend les valeurs récapitulatifs d'une étude fait sur des installations du bassin Adour Garonne, permettant de situer les coûts d'investissement des BRM par rapport aux boues activées en fonction de la capacité en équivalent habitant (Husson et al., 2013). Pour des capacités supérieures à 8 000 EH, les coûts d'investissements relatifs à une boue activée avec séparation membranaire sont proches de ceux d'une boue activée classique (aération prolongée) (Savary, 2014).

Tableau 3.- Evaluation des coûts d'investissement des boues activées et BRM en Adour Garonne (Husson et al., 2013).

EH	Coûts d'investissement (€)		Coûts d'investissement (€/ EH)	
	Boues activées	BRM	Boues activées	BRM
2 000	1 024 696 €	1 600 902 €	505 €	707 €
5 000	2 041 575 €	2 517 193 €	408 €	478 €
10 000	3 438 984 €	3 210 340 €	347 €	355 €

Bien qu'ils aient été considérablement réduits ces dernières années, les coûts globaux d'exploitation (énergie, maintenance, réactifs, remplacement des membranes, dégrillage, traitement des boues) sont plus élevés que ceux des boues activées (Gresle et al., 2007).

Des données de la bibliographie permettent d'apporter des éléments quantitatifs de comparaison entre BRM et boues activées ; ce dernier procédé est associé à une étape d'affinage (filtre à sable + désinfection) pour obtenir une qualité de traitement équivalente à celle d'un BRM et que la comparaison soit équitable. A cause de la grande difficulté à obtenir des données, en simplifiant les coûts de fonctionnement sont réduits à 4 postes : l'évacuation des déchets, les réactifs, le personnel et l'énergie. Le Tableau 4 compare les valeurs estimées des coûts de fonctionnement simplifiés (CFS) entre un procédé boues activées classique avec traitement tertiaire et un BRM.

Tableau 4.- Coûts de fonctionnement simplifiés d'après Brepols et al., (2010). Adapté de Husson et al. (2013).

	BA + Affinage				BRM			
	Coût annuel	%	€/m³	€/EH	Coût annuel	%	€/m³	€/EH
Evacuation des déchets	25 664 €	17%	0,05	0,007	25 664 €	13%	0,05	0,007
Réactifs	11 008 €	7%	0,02	0,003	12 860 €	7%	0,02	0,004
Personnel	70 000 €	46%	0,13	0,019	70 000 €	37%	0,13	0,019
Energie	45 990 €	30%	0,08	0,013	82 782 €	43%	0,15	0,023
CF Simplifié	152 662 €		0,28 €	0,04 €	191 306 €		0,35 €	0,05 €
Maintenance et renouvellement	96 411 €	63%	0,18 €		96 420 €	50%	0,18 €	
CF TOTAL	249 073 €		0,45 €		287 726 €		0,53 €	

D'après les simulations de Brepols et al. (2010), réalisées à partir de cas réels et à charge nominale, les coûts d'exploitation d'un BRM sont majorés de 25 % par rapport à une boue activée avec traitement tertiaire.

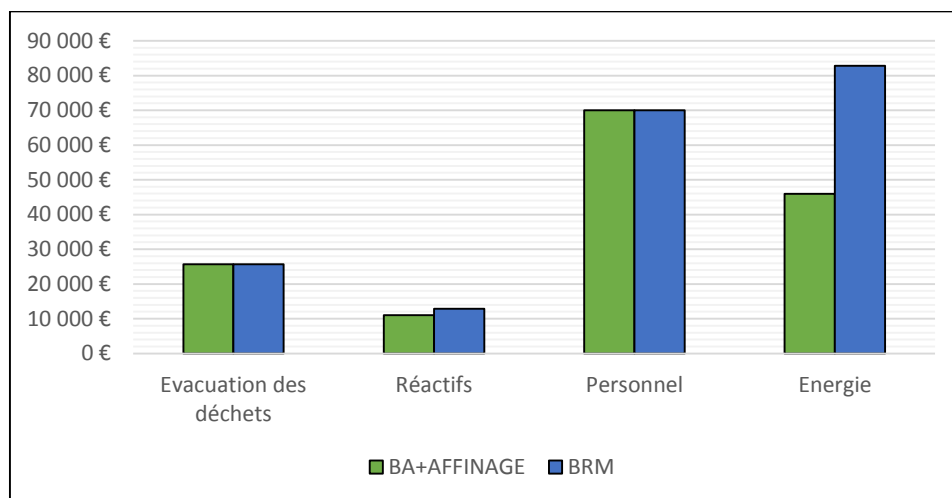


Figure 4.- Comparaison des CFS annuels d'un BA+ Affinage et d'un BRM de la bibliographie (Husson et al., 2013).

Dans le détail, la répartition par poste en Figure 4 permet de mettre en évidence les éléments qui différencient les deux procédés : les coûts d'exploitation du BRM sont plus élevés en ce qui concerne le poste réactifs (réactifs de nettoyage des membranes), mais surtout en termes de consommation énergétique soit de 30 à 40% supérieure à celle d'une boue activée en aération prolongée classique.

Dans le cas de membranes de MF ou d'UF en traitement tertiaire, le coût opératoire et de maintenance du système membranaire (pour une durée de vie des membranes moyenne de 7 ans) se situent autour 0,3 €/m³. Lorsqu'un traitement tertiaire par combinaison UF/OI ou MF/UF est nécessaire, les coûts d'investissement et d'exploitation sont les plus élevés et peuvent représenter le double par rapport à une simple MF ou UF, surtout en terme de consommation d'énergie (Gresle et al., 2007).

CONCLUSION

Les technologies de membrane représentent actuellement une alternative efficace et reconnue aux procédés classiques pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Trente ans après leur première mise en œuvre, leur avenir est désormais assuré : elles sont de plus en plus compétitives par rapport aux traitements conventionnels.

L'emploi de ce type de 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.

Les avancées technologiques dans ce domaine sont nombreuses et leurs applications au domaine de l'assainissement augmentent régulièrement et rapidement. Les développements visent de meilleures résistances chimiques ou une moindre propension au colmatage. Le coût d'investissement a une tendance à la baisse. En revanche, le coût énergétique, le risque de colmatage ou de précipitation et le coût des membranes elles-mêmes restent des freins importants mais qui sont progressivement levés.

BIBLIOGRAPHIE

- Aptel P., 2006. Filtration membranaire (OI, NF, UF) : Applications en traitement des eaux. *Techniques de l'ingénieur*, base documentaire : TIB318DUO. (w4120), p. 16.
- Arzate A., 2008. *Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire*. Revue de littérature, projet 642. Québec, ACER, p. 56.
- BIO by Deloitte, 2015. *Optimising water reuse in the EU*. Final report prepared for the European Commission (DG ENV), Part I. In collaboration with ICF and Cranfield University. p. 204.
- Bixio D., Thoeve C., Wintgens T., Ravazzini A., Miska V., Muston M., Chikurel H., Aharoni A., Joksimovic D., Melin T., 2008. Water reclamation and reuse: implementation and management issues. *Desalination*, 218 (1–3), pp. 13– 23.
- Boutin C., Héduit A., Helmer J.-M., 2008. *Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)*. Rapport. Convention de partenariat ONEMA-Cemagref, p. 100.
- Brepols C., Schäfer H., Engelhardt N., 2010. Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications. *Water Science & Technology*, 61 (10), p. 2461.
- Clara M., Strenn B., Gans O., Martinez E., Kreuzinger N., Kroiss H., 2005. Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. *Water Research*, 39 (19), pp. 4797– 4807.
- Conseil Général Hauts-de-Seine, 2012. *Règlement du Service Départemental d'assainissement des Hauts-de-Seine*.
- Degrémont, 2005. *Mémento technique de l'eau*. 10^e éd. Rueil-Malmaison, Degrémont, 1718 p.
- Drogui P., Seyhi B., Buelna G., 2012. Biotraitement à membrane : la technologie du futur pour l'épuration des eaux résiduaires. *Environnement et technique*, pp. 58– 63.
- Gagnaire J., Moulin P., Marrot B., 2008. Bioréacteurs à membranes : un intérêt grandissant. *L'Eau, l'Industrie, les Nuissances*, 314 , pp. 64– 74.
- Gresle A., Lazarova V., Suty H., 2007. Intérêts techniques et économiques du traitement membranaire en vue du recyclage. *TSM*, (12), pp. 111– 136.
- Helmreich B., Horn H., 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248 (1–3), pp. 118 – 124.
- Husson A., Stricker A., Senechal M., Racault, AEAG, IRSTEA, 2013. *Bioreacteurs a membrane pour le traitement des eaux résiduaires urbaines : retours d'expérience*. Disponible sur Internet: <http://www.documentation.eaufrance.fr/notice/bioreacteurs-a-membrane-pour-le-traitement-des-eaux-residuaires-urbaines-retours-d-experience0>.
- Irstea, 2014. *Les bioréacteurs à membranes pour le traitement des effluents urbains*. IRSTEA. Disponible sur Internet: <http://www.irstea.fr/lespace-jeunesse/approfondir/lepuration-des-eaux-usees-les-avancees/les-bioreacteurs-membranes-pour> [Consulté le 05/12/2015].
- Judd S., 2010. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. 2^e éd. Elsevier, 537 p.

- Judd S., Jefferson B. (Éd.), 2003. *Membranes for industrial wastewater recovery and re-use*. Kidlington, Oxford, UK ; New York, NY, USA, Elsevier Science, 291 p.
- Kim R.-H., Lee S., Jeong J., Lee J.-H., Kim Y.-K., 2007. Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, 202 (1–3), pp. 326 – 332.
- Kim R.-H., Lee S., Kim J.-O., 2005. Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling. *Desalination*, 177 (1–3), pp. 121 – 132.
- Kraemer J.T., Menniti A.L., Erdal Z.K., Constantine T.A., Johnson B.R., Daigger G.T., Crawford G.V., 2012. A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 122 , pp. 2– 10.
- Kraume M., Drews A., 2010. Membrane Bioreactors in Waste Water Treatment – Status and Trends. *Chemical Engineering & Technology*, 33 (8), pp. 1251–1259.
- Le-Clech P., Chen V., Fane T.A.G., 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284 (1–2), pp. 17– 53.
- Léna P., 2007. Assainissement : Le débarquement des membranes. *Hydroplus*, pp. 30 – 35.
- Lin H., Gao W., Meng F., Liao B.-Q., Leung K.-T., Zhao L., Chen J., Hong H., 2012. Membrane Bioreactors for Industrial Wastewater Treatment: A Critical Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (7), pp. 677– 740.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2013. *La Directive cadre européenne sur l'eau*. Disponible sur Internet: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-objectifs.html> [Consulté le 05/12/2015].
- Monchalain G., Aviron-Violet J., 2002. *La réutilisation des eaux usées après traitement*. Paris, Conseil général du génie rural, des eaux et des forêts (CGGREF), 39 p.
- Ozgun H., Dereli R.K., Ersahin M.E., Kinaci C., Spanjers H., van Lier J.B., 2013. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations. *Separation and Purification Technology*, 118 , pp. 89– 104.
- Paquet C., Rotbardt A., 2011. *La réutilisation des eaux usées traitées (REUT). Eléments de méthodologie pour l'instruction de projets*. Rapport. Paris, Agence Française de Développement, p. 29.
- Pernaute C., Suárez J., Ontañón N., 2012. *Tratamiento Terciario Avanzado. EDAR de la Cuenca Media-Alta del Arroyo-Culebro (Madrid)*. Reportage. Madrid, RETEMA, p. 13.
- Pinnekamp J., Friedrich H., 2006. *Membrane technology for waste water treatment*. 2^e éd. Aachen, FiW-Verl, 346 p. Municipal water and waste management.
- Pronost J., 2002. Les réacteurs biologiques à membranes pour l'épuration des eaux usées urbaines. *Environnement et technique*, (216), pp. 27– 30.
- Remigy J.C., Desclaux S., 2007. Filtration membranaire (OI, NF, UF) Présentation des membranes et modules. *Techniques de l'ingénieur*, (j2791), p. 24.
- Savary P., 2014. *Conception des Stations d'Épuration*. Montpellier, AgroParisTech Engref, p. 72.
- 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), pp. 283– 310.

- Skouteris G., Hermosilla D., López P., Negro C., Blanco Á., 2012. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 198–199 , pp. 138- 148.
- Smith A., Khoo J., Hills S., Donn A., 2000. Water reuse at the UK's Millennium Dome. *Membrane Technology*, (118), pp. 5 - 8.
- Smith A.L., Stadler L.B., Love N.G., Skerlos S.J., Raskin L., 2012. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review. *Bioresource Technology*, 122 , pp. 149- 159.
- Stephenson T., Judd S., Jefferson B., Brindle K., 2000. *Membrane bioreactors for wastewater treatment*. London, IWA Publ, 179 p.
- Stricker A.E., Husson A., Philippe N., Racault Y., 2013. *Procédés Bioréacteurs à Membranes: Conception dimensionnement, performances et coûts - Retour d'expérience sur la technologie BRM appliquée aux ERU (3 000 - 60 000 EH)*. Journées de l'OIEau. Paris, p. 43.
- Truc A., 2007. Traitements tertiaires des effluents industriels. *Techniques de l'ingénieur Gestion de l'eau par les industriels*, base documentaire : TIB447DUO (ref. article : g1310),. Disponible sur Internet: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-de-l-eau-par-les-industriels-42447210/traitements-tertiaires-des-effluents-industriels-g1310/>.
- Vera L., Ruigómez I., González E., Bodelón P., Rodríguez-Sevilla J., 2014. Biorreactores de membrana anaerobios para tratamiento de aguas residuales domésticas. Estudio Preliminar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5 (4), pp. 1- 15.
- Yang W., Cicek N., Ilg J., 2006. State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Science*, 270 (1–2), pp. 201- 211.

ANNEXE A

Modèle proposé par AQUAREC

L'une des préconisations issues du programme de recherche d'AQUAREC consiste en l'élaboration d'une chaîne logique de constituants en fonction de la nature des eaux usées à traiter (Tableaux A.1 à A.1). D'après Boutin et al., 2008.

Tableau A .1.- Différentes technologies en REUT proposées par AQUAREC.

Prétraitement		Traitement tertiaire	
001	Dégrillage grossier	301	Filtration sur milieu fin poreux
002	Dessablage	302	Filtration en surface
003	Dégrillage moyen	303	Microfiltration
Traitement primaire		304	Ultrafiltration
101	Tamissage	305	Nanofiltration
102	Décantation avec/ou coagulation	306	Osmose Inverse
103	Décantation avec coagulation	307	Charbon Actif en Grains
104	Flottation à l'air dissous avec coagulant	308	Charbon Actif en Poudre
105	Filtration membranaire	309	Echange d'ion
106	Actiflo®	310	Oxydation avancée : UV/Ozone
107	Lagunes anaérobies	311	Oxydation avancée : UV/H ₂ O ₂
Traitement secondaire		312	Traitement par le sol
201	Boues activées haute charge + décantation secondaire	313	Lagunes de maturation
202	Boues activées faible charge avec ou sans élimination de l'azote + décantation secondaire	314	Bassin artificiel : finition
203	Boues activées faible charge avec élimination de l'azote + décantation secondaire	315	Floculation
204	Lit bactérien + décantation secondaire	Désinfection	
205	Disques biologiques	401	Ozone
206	Filtre aéré immergé	402	Acide peracétique
207	Lagunes aérobies	403	Bioxyde de chlore
208	Lagunes aérées	404	Chlore gazeux
209	Lagunes facultatives	405	UV
210	Bassin artificiel : écoulement de surface		
211	Bassin artificiel : écoulement souterrain		
212	Bioréacteur à membranes		
213	Élimination biologique du phosphore		
214	Précipitation chimique du phosphore		

Tableau A.2.- Combinaisons possibles à partir d'un effluent brut.

Depuis un effluent brut	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	001/003,002,101,212(,304),305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206(,315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 001/003,002,102/103/104/106,203+214(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,213(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,101/102,105,(315+304,305/306,401/405
Potable	001/003,002,101,212(,304),305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206(,315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 001/003,002,102/103/104/106,203+214(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,213(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,101/102,105,(315+304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : 001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213(,401/402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212(,401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+207(,401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211(,401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212(,304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212(,315+301/302),(316+303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Recharge de nappe	1 : 001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213(,401/402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212(,401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+207(,401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211(,401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212(,304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212(,316,301/302),(316+303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213(,312/313/314)(,401+402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212(,401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+207(,312/313/314)(,401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211 ou tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou 001/003 ou 001/003,002 ou 001/003,002,101 ou 001/003,002,102/103/104/106/107 ou 001/003,002,101/102,105 ou tous ceux précités

Tableau A.3.- Combinaisons possibles à partir d'un effluent primaire

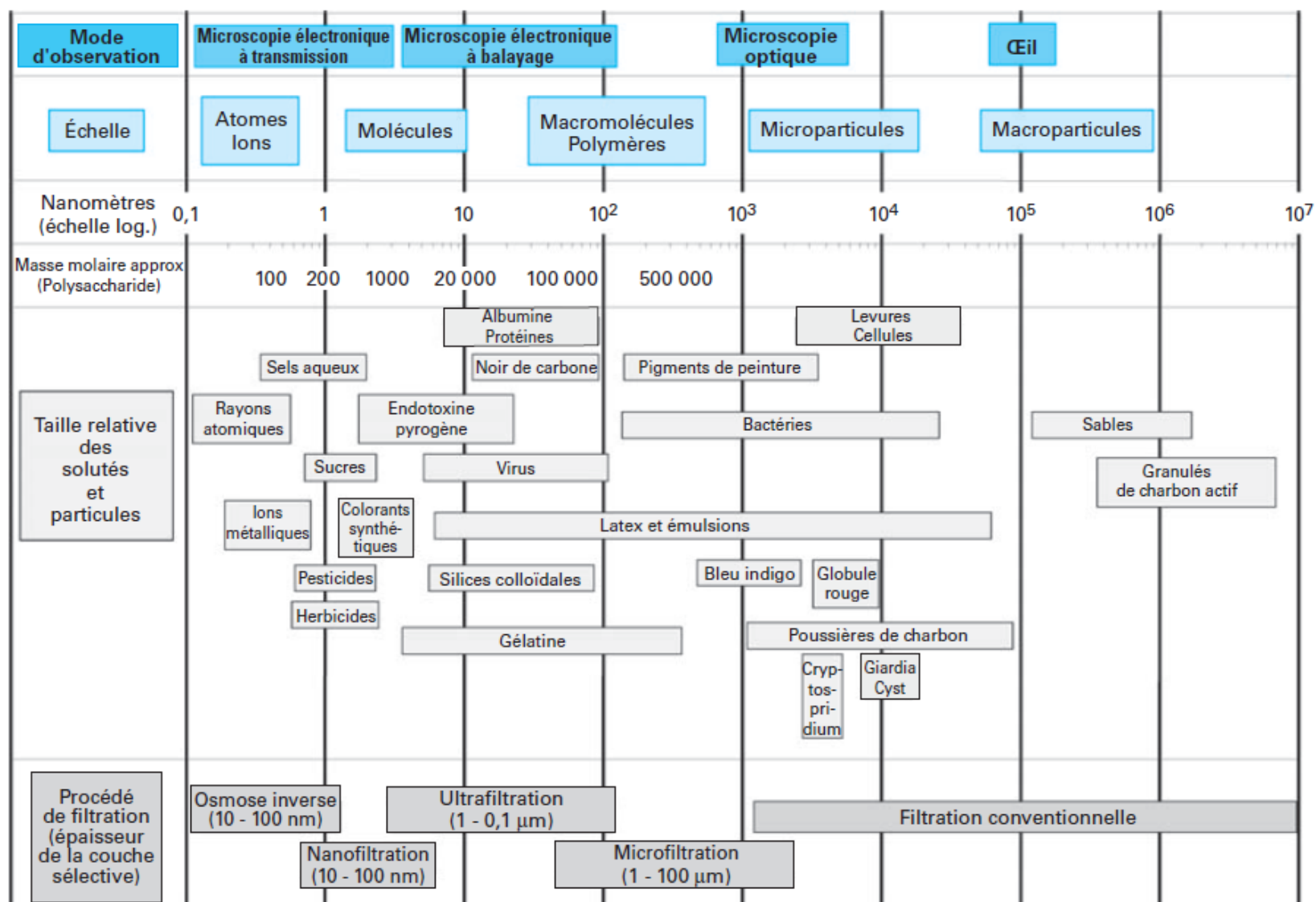
Depuis un effluent primaire	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	212(,304),305/306,401/405 ou 202/204/205/206(,315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 202/204/205/206,316+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 203+214(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 213(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 105,(315+304,305/306,401/405
Potable	212(,304),305/306,401/405 ou 202/204/205/206(,315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 203+214(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 213(,315+301/302),(315+303/304,305/306,401/405 ou 105,(315+304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : 202/203(+214)/204/205/206/213(,401/402/403/404/405) ou 212(,401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+207(,401/402/403/404/405) ou 210/211(,401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212(,304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212(,315+301/302),(316+303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Recharge de nappe	1 : 202/203(+214)/204/205/206/213(,401/402/403/404/405) ou 212(,401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+207(,401/402/403/404/405) ou 210/211(,401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212(,304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212(,315,301/302),(316+303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	202/203(+214)/204/205/206/213(,312/313/314)(,401/402/403/404/405) ou 212(,401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+207(,313/313/314)(,401/402/403/404/405) ou 210/211 ou tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou 107 ou 105 ou tous ceux précités

Tableau A.4.- Combinaisons possibles à partir d'un effluent secondaire.

Depuis un effluent primaire	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	(304),305/306,401/405 ou (316+301/302),316+303/304,305/306,401/405 ou 316+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+)304,305/306,401/405
Potable	(304),305/306,401/405 ou (316+301/302),316+303/304,305/306,401/405 ou 316+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+)304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : (304),305/306,401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités 2 : (401/402/403/404/405) ou tous ceux précités
Recharge de nappe	Directe : (304),305/306, 401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités Indirecte : (401/402/403/404/405) ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	(313/314/315)(,401/402/403/404/405) ou (401/402/403/404/405) ou (313/314/315)(,401/402/403/404/405)tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou tous ceux précités

ANNEXE B

Figure B.1.- Types de filtration sur membranes (Remigy et Desclaux, 2007).



Autres synthèses disponibles

Titre	Année de parution
Adaptation technique des villes méditerranéennes au risque inondation en contexte de changement climatique	2015
Retour d'expériences sur les mesures d'adaptation liées à la gestion de la ressource en eau aux changements climatiques au travers des SRCAE et des PCET des grandes collectivités	2015
Les énergies renouvelables : une alternative pour la production et l'économie d'énergie dans le domaine de l'eau et de l'assainissement	2015
Agroforesterie et ressources en eau : les pratiques anciennes en réponse aux problématiques modernes	2015
La compétence communale « gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations » Quel dispositif de création pour quelle mise en œuvre ?	2015
Caractérisation et évaluation des dommages environnementaux liés à l'eau en France	2015
La loi Oudin-Santini, dix ans après	2015
Vers une économie circulaire dans le domaine de l'eau	2015
Changement de mode de gestion des services d'eau : les transferts de personnels et de moyens techniques entre DSP et régie	2014
Eau et économie verte : enjeux, risques et opportunités autour de la Méditerranée	2014
L'accès au financement pour les acteurs locaux africains pour investir dans les services d'eau et d'assainissement	2014
Prix de l'eau et recouvrements des coûts : quelles pratiques et retours d'expérience en Europe ?	2014
La mise en place d'un contrat d'objectifs entre autorité et exploitant publics comme outil pour améliorer les performances des services d'eau	2014
Réutilisation des eaux usées et des excréta	2014
Nouvelles pollutions médicamenteuses : Quels risques ? Quelles solutions ?	2014
La place de l'hydromorphologie dans l'atteinte du « bon état »	2013
Analyse critique des stratégies de gestion et de mobilisation de la ressource en eau pour s'adapter au changement climatique	2013
La gestion intégrée des eaux littorales : Quelle stratégie française ?	2013
Villes durables. Eau, énergie et urbanisme	2013

Retour d'expérience sur la valorisation du biogaz : Contraintes techniques et réglementaires	2013
La réforme de la Politique Agricole Commune pour 2014-2020 et la Gestion de l'eau»	2013
Les marchés publics dans la gestion des services d'eau et d'assainissement collectif en France	2013
Les stratégies socio-économiques d'adaptation à la sécheresse en agriculture en Méditerranée	2012
Les conséquences hydrologiques et hydrogéologiques de l'exploitation des gaz de schiste	2012
Quelles structures locales de gestion de l'eau pour la mise en oeuvre de la DCE ? Application au bassin Rhône Méditerranée à partir d'expériences acquises et d'innovations proposées en France	2012
Application de la DCE à la gestion quantitative des ressources en eau	2012
Les effluents liquides hospitaliers	2012
Capacité d'acceptation de la pollution domestique résiduelle par des zones naturelles	2012
Les Normes de Qualité Environnementale de la Directive Cadre sur l'Eau Historique, définition et Modalités de mise en oeuvre en France	2012
Les impacts de l'application française de la politique agricole commune et de la fiscalité française sur les zones humides	2011
La gestion durable du risque inondation. Cas des polders de la vallée du Rhin	2011
Irrigation - Les marchés de l'eau : quels impacts ?	2011
Les techniques alternatives d'assainissement : quelle efficacité en termes de lutte contre les inondations ?	2011
Nouvelles sources d'appoint en eau potable Etude de trois prototypes	2011
Retours d'expérience européens sur l'application de la Directive Cadre sur l'Eau : Quelles difficultés ? Quels enseignements ?	2011
Les impacts de l'application française de la politique agricole commune et de la fiscalité française sur les zones humides	2011
Gestion quantitative conjointe des eaux souterraines et des eaux de surface	2010

Retrouvez tous les titres disponibles :
<http://documentation.oieau.fr/publications/syntheses-techniques>



648 rue Jean-François Breton – BP 44494
34093 MONPELLIER CEDEX 5

Tél. : (33) 4 67 04 71 00

Fax. : (33) 4 67 04 71 01

www.agroparistech.fr



*Office
International
de l'Eau*

15 rue Edouard Chamberland
87065 Limoges Cedex

Tél. (33) 5 55 11 47 80

Fax. (33) 5 55 11 47 48

www.oieau.org