

Bioréacteurs à Membrane

pour le traitement des eaux résiduaires urbaines

retours d'expérience

DOCUMENT DE SYNTHÈSE



JUIN 2013

HUSSON Alain
STRICKER Anne-Emmanuelle
SENECHAL Mathieu
RACAULT Yvan

Irstea centre de Bordeaux
50, avenue de Verdun
33612 Cestas cedex

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE
DU DEVELOPPEMENT DURABLE

LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES TABLEAUX.....	4
Synthese	5
Introduction.....	6
1. Méthodologie générale.....	7
2. Procédure générale de dimensionnement des BRM	7
3. Préconisations générales	9
3.1. Définition des niveaux de rejet	9
3.2. Adaptation du cahier des charges.....	9
3.2.1. Eaux parasites	9
3.2.2. Caractérisation des eaux usées à traiter.....	10
3.2.3. Bassin tampon	10
3.2.4. Prétraitement	11
3.2.5. Bassin biologique.....	11
3.2.6. Production de boues	13
3.2.7. Aération membranes	13
3.2.8. Surface de filtration membranaire.....	13
3.2.9. Gestion des membranes	14
3.2.10. Recirculation	15
3.2.11. Bâche de stockage eau traitée (eau industrielle)	16
3.2.12. File boues	16
3.2.13. Qualité des matériels installés.....	16
3.2.14. Capteurs	16
3.2.15. Supervision.....	17
3.2.16. Qualité de traitement.....	17
3.2.17. Coûts prévisionnels de fonctionnement	18
4. Exploitation.....	18
4.1. Mise en route.....	18
4.2. Exploitant.....	18
5. Coûts d'investissements et de fonctionnement	18
5.1. Investissement.....	18
5.1.1. Boues activées.....	19
5.1.2. BRM.....	20
5.1.3. Comparaison boues activées avec ou sans traitement tertiaire et BRM	22
5.2. Fonctionnement.....	24
5.2.1. Fonctionnement BRM.....	25
5.2.2. Comparaison BA et BRM (bibliographie)	27
6. Conclusion	29
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31
ANNEXE	32
Annexe : Méthodologie de l'analyse des coûts.....	33
1. Coûts d'investissement	33
1.1. Sources de données	33
1.2. Actualisation des coûts.....	34
1.3. Décomposition du coût d'investissement.	36
1.4. Calcul des coûts spécifiques	37
2. Coûts de fonctionnement.	37
2.1. Sources de données.	37
2.2. Calcul et décomposition des coûts.	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma type des BRM avec membranes intégrées et avec membranes séparées	7
Figure 2 : Exemples membranes planes.....	8
Figure 3 : Exemples membranes fibres creuses	9
Figure 4 : Evolution du facteur alpha en fonction des MES - aération fines bulles (FB) et grosses bulles (GB).....	12
Figure 5 : Exemples d'évolution des perméabilités sur le long terme sur 3 BRM	15
Figure 6 : Technique de filtration en fonction du seuil de coupure	17
Figure 7 : Coût d'investissement total de boue activée classique et boue activée + affinage sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale	19
Figure 8 : Coûts d'investissement spécifiques de BA classiques et BA + aff sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale, comparés aux coûts des BA + aff de la biblio.....	20
Figure 9 : Coût d'investissement total des BRM présents sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale.....	21
Figure 10 : Coût d'investissement spécifique des BRM présents sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale.....	21
Figure 11 : Comparaison coût d'investissement spécifique de BRM sur le territoire de l'AEAG et BRM de la biblio.....	22
Figure 12 : Comparaison des coûts d'investissement des BRM avec les boues activées sur le territoire de l'AEAG	23
Figure 13 : Comparaison des coûts d'investissement spécifiques des BRM et des boues activées sur le territoire de l'AEAG	23
Figure 14 : Comparaison du coût d'investissement spécifique des BA AEAG aux BA+Aff biblio et BRM biblio	24
Figure 15 : CFS annuel en fonction du débit traité	25
Figure 16 : Répartition relative des CFS annuels du BRM1 par année et prévisionnel	26
Figure 17 : CFS annuel en fonction de la DCO éliminée	26
Figure 18 : CFS spécifique en fonction du volume traité et de la DCO éliminée	27
Figure 19 : Comparaison des CFS annuels d'un BA et d'un BRM de la bibliographie	28
Figure 20 : Comparaison des CFS annuels des deux BRM étudiés sur Adour Garonne avec les données biblio	28
Figure 21 : Evolution des différentes formules d'actualisation des coûts d'investissement à partir d'une valeur unitaire en janvier 2007.....	35

ABREVIATIONS

AEAG :	Agence de l'eau Adour Garonne
Aff :	traitement d'affinage tertiaire
BA :	bassin aéré
BRM :	bioréacteur à membrane
CI :	
CF :	coût simplifié
CFS :	coût de fonctionnement simplifié
GC :	génie civile
Irstea :	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
SNITER :	Syndicat national des industries des eaux résiduaires

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evaluation des coûts d'investissement (CI) des boues activées et BRM en Adour Garonne	24
Tableau 2 : CFS calculés à partir de données de la bibliographie	27
Tableau 3 : Nombre de valeurs dans les bases de données	33
Tableau 4 : Tableau de répartition Génie Civil/Equipements.....	36
Tableau 5 : Indicateurs Coûts d'investissement	37
Tableau 6 : Coûts unitaires unifiés.....	38
Tableau 7 : Indicateurs Coûts de Fonctionnement (CF)	39
Tableau 8 : Coûts de Fonctionnement des BRM	40
Tableau 9 : Estimation des coûts de maintenance et de renouvellement	40

SYNTHESE

L'agence de l'eau Adour-Garonne a confié à Irstea la réalisation d'une étude de synthèse sur le procédé bioréacteur à membranes. L'objectif de ce retour d'expérience est d'analyser les méthodes de dimensionnement, les paramètres spécifiques des BRM, dégager les points de repères essentiels à prendre en compte pour la réalisation d'un projet, que l'on soit maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou partenaire (Etat, établissement public, etc...).

Les points essentiels sur lesquels on ne peut transiger pour garantir un bon fonctionnement du dispositif sont :

- la maîtrise des eaux parasites ;
- la qualité des prétraitements (tamisage fins avec secours) ;
- la présence d'un bassin tampon d'une taille adaptée (facteur de sécurité) ;
- la modularité des installations pour prendre en compte les variations de charge du nominal et participer à l'optimisation énergétique.

Le procédé bioréacteur à membrane permet l'obtention de rejets de haute qualité mais demeure un procédé complexe exigeant une bonne formation des exploitants et une capacité d'intervention rapide sur les automatismes. L'usage de cette technique nécessite une bonne connaissance préalable des volumes à traiter et une réduction des eaux parasites pour maintenir son intérêt économique et les avantages de son traitement poussé pour les milieux sensibles.

Des éléments de coûts sont développés à la fois en termes d'investissements et de fonctionnement sur des installations du bassin Adour Garonne. Si en matière d'investissement, la différence est faible entre bioréacteurs à membranes et boues activées, les coûts de fonctionnement sont plus élevés, notamment en raison du surcoût énergétique liés à la gestion des membranes.

INTRODUCTION

Le procédé bioréacteur à membranes (BRM) connaît ces dernières années une forte croissance en Europe et en France pour le traitement des eaux usées urbaines (Lesjean et al., 2009). Il présente l'avantage d'atteindre une haute qualité de traitement en une seule étape avec une faible emprise au sol du fait notamment de l'absence de clarificateur. Il est particulièrement adapté pour répondre à des exigences de qualité élevées demandées pour des milieux très sensibles. Les technologies disponibles diffèrent par le type de membrane utilisé et la configuration des bassins ainsi que par les conditions de fonctionnement imposées : concentration des boues, débit d'air appliqué sous les membranes, densité surfacique, débit de filtration, ...). Parmi les principaux facteurs limitants du développement des BRM on trouve la durée de vie attribuée aux membranes et la demande énergétique qui agissent directement sur le coût d'exploitation. L'énergie dépensée pour l'aération dans les BRM est en effet notablement plus élevée que dans une boue activée conventionnelle du fait de l'air nécessaire pour la maîtrise du colmatage des membranes (grosses bulles) et d'une limitation du transfert d'oxygène consécutive à une concentration des boues plus élevée (fines bulles pour le traitement biologique).

L'Irstea a eu l'opportunité de réaliser depuis 2005 des suivis sur le long terme de huit installations dont trois dans le bassin Adour Garonne. Les capacités nominales s'étalent de 7 000 EH à 66 000 EH et les techniques utilisées diffèrent soit dans la conception de la filière de traitement soit dans les membranes utilisées. L'objectif de ce retour d'expérience est d'analyser les méthodes de dimensionnement et de mettre en évidence les paramètres spécifiques des BRM. L'analyse du fonctionnement de telles installations requiert des données sur le long terme pour mieux comprendre l'influence de paramètres essentiels comme la concentration de boue et l'âge de boue sur la filtration et sur les transferts d'oxygène par les deux sources d'aération. Le fait de disposer de l'ensemble des données des supervisions et de capteurs complémentaires permettant de mesurer en ligne la charge polluante et les concentrations de boue dans les bassins a permis d'établir des bilans massiques journaliers sur de longues périodes renforçant la qualité des données recueillies.

1. METHODOLOGIE GENERALE

Le bilan comparatif des installations suivies a été réalisé dans une première phase en analysant les dossiers techniques de dimensionnement et en décrivant la démarche de calcul des principaux ouvrages et équipements des BRM. Les bioréacteurs à membrane exigent en effet une procédure particulière de dimensionnement et il nous a paru utile de la présenter. Dans une seconde phase l'objectif est de donner les points de repères essentiels pour la réalisation d'un projet de bioréacteur à membranes, que l'on soit maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou responsable de la police de l'eau. Enfin quelques éléments sont développés concernant l'exploitation de ces installations, les coûts d'investissements et de fonctionnement.

2. PROCEDURE GENERALE DE DIMENSIONNEMENT DES BRM

Les installations BRM françaises traitant des eaux usées urbaines sont dimensionnées suivant différentes procédures qui vont dépendre du constructeur, mais qui résultent aussi fortement du type de membrane utilisé. La démarche générale présentée ci-après résulte de l'étude des mémoires justificatifs des marchés.

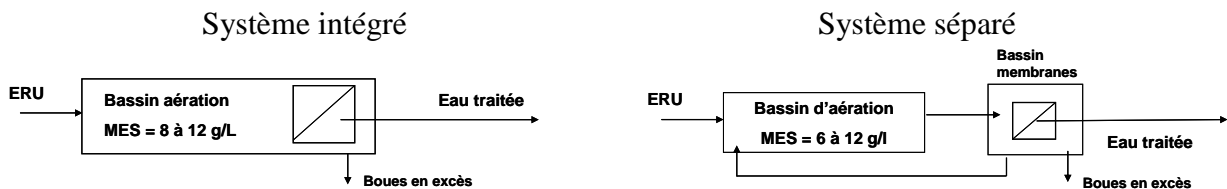


Figure 1: Schéma type des BRM avec membranes intégrées et avec membranes séparées

Les paramètres principaux nécessaires au dimensionnement de la filtration sont liés principalement au débit à traiter et au type de membrane. La surface de membrane est alors déterminée avec les spécifications flux-durée du fournisseur. Concernant le traitement biologique, la démarche appliquée est très proche de celle utilisée pour dimensionner une boue activée en intégrant ou pas les cellules membranaires dans les réacteurs. Examinons les cas les plus classiques où les membranes (MB) sont dans des cellules externes au bassin d'aération (système séparé, Figure 1).

- (i) Si les membranes utilisées sont des **membranes planes** (Figure 2), leur densité ($m^2_{MB}/m^3_{cellules}$) est nettement plus faible que celle des membranes à fibres creuses et donc le volume des cellules membranaires est sensiblement plus important. Il peut représenter 35 à 40% du volume total des réacteurs biologiques. Du fait de la présence de l'aération grosses bulles nécessaire à la maîtrise du colmatage des membranes, ces cellules contribuent alors de façon relativement importante à l'oxygénation du système biologique. Avec des membranes planes on commence donc par déterminer la surface totale de filtration pour traiter le volume journalier maximal à la température la plus faible, ces conditions correspondent le plus souvent au débit journalier de temps de pluie (Qmtp). Pour absorber le débit de pointe horaire on appliquera un flux de filtration exceptionnel limité à quelques heures (inférieur à 6 heures par exemple pour les membranes Kubota).

On en déduira le volume des cellules membranaires, le débit d'air maximal nécessaire pour le décolmatage des membranes au flux de filtration maximal et la quantité d'oxygène transférée. Cette dernière valeur est souvent considérée peu dépendante de la concentration de boue¹ et l'oxygène

¹ En réalité la concentration de boue a un impact sur le transfert d'oxygène des grosses bulles et des études sont en cours pour préciser cette relation dans le cas de concentrations élevées de boues comme celles rencontrées dans les BRM.

transféré est calculé à partir d'un rendement d'oxygénation (%/m). La hauteur des cellules membranaires intervient donc dans le calcul du transfert d'oxygène. Ainsi, des modules de filtration installés sur 2 étages avec injection de l'air à la base du module inférieur permettent une meilleure efficacité énergétique de l'air pour le nettoyage des plaques et apportent de meilleures performances en oxygénation.

Partant de ces données, on revient vers le dimensionnement de la boue activée qui s'effectuera généralement sur une charge massique au flux polluant journalier maximal. Compte tenu des niveaux de qualité requis pour le traitement et de la concentration de boue moyenne retenue pour le bassin d'aération, on pourra déduire la masse de boue totale et les volumes des bassins biologiques (bassin d'aération, bassins anaérobie et d'anoxie éventuels). A partir de la demande totale en oxygène exigée par le processus biologique et de l'apport d'oxygène des grosses bulles dans les cellules membranaires on en déduira le complément d'apport horaire en oxygène nécessaire (à la concentration de boue nominale et au flux polluant de pointe) et donc finalement le dimensionnement des surpresseurs pour l'aération process.



Figure 2 : Exemples membranes planes

- (ii) Si les membranes utilisées sont des **fibres creuses** (Figure 3), leur densité étant plus élevée, le volume des cellules membranaires est faible par rapport à la totalité des bassins biologiques et ces réacteurs ont un rôle très mineur dans le processus de dégradation biologique. Le dimensionnement peut s'effectuer comme sur une boue activée, directement sur la base du flux polluant maximal à traiter. Les exigences de qualité du traitement seront utilisées pour fixer une charge massique ou un âge de boue conduisant à une masse de boue totale. La surface de filtration requise est calculée pour les différentes situations de pointe hydraulique en fonction des limites données par le fournisseur de membranes, qui sont exprimées en termes de couple "flux maximal de filtration-durée". Par exemple le flux maximal (en $L/m^2.h$ ou LMH) admissible pendant quelques heures est supérieur à celui admissible en routine pendant 24h. Il est donc important de spécifier dans le cahier des charges les durées associées aux pointes hydrauliques. De ces différentes caractéristiques hydrauliques et des flux de filtration admissibles, on déduit la surface de membrane, le volume des cellules membranaires et le débit d'air maximum nécessaire pour le décolmatage.

La différence importante avec les membranes planes est que le volume des cellules membranaires est ici relativement faible et que leur profondeur est de l'ordre de la hauteur des cassettes de membranes (environ 2,5m) ce qui limite les performances de transfert d'oxygène. L'apport d'oxygène provenant des grosses bulles a donc été souvent négligé pour les calculs de dimensionnement des BRM avec des fibres creuses. Il représente cependant 10 à 20% du total journalier de l'oxygène apporté (Racault et al., 2011). La suite du dimensionnement fait appel à la concentration de boue retenue dans le bassin d'aération du BRM et dans les cellules membranaires (concentration liée au taux de recirculation) qui permettront de calculer le volume des différents bassins. Le débit d'air maximum nécessaire aux processus biologiques est calculé à partir des performances d'oxygénation correspondant à la concentration de boue retenue en fonctionnement nominal, soit des conditions de transfert moins favorables que dans une boue activée

conventionnelle du fait d'une concentration de boue plus élevée (6 à 9 g/L pour un BRM vs 2 à 4 g/l pour une boue activée).



Figure 3 : Exemples membranes fibres creuses

Dans les deux cas, un bassin tampon sera le plus souvent nécessaire pour éviter un surdimensionnement des membranes.

3. PRECONISATIONS GENERALES

3.1. Définition des niveaux de rejet

En préalable aux préconisations qui devraient sinon figurer dans le cahier des charges, mais au moins être intégrées lors de la phase d'analyse des offres, quelques remarques sont à apporter sur la définition des niveaux de rejet :

- Il est étonnant de relever assez souvent des niveaux de rejet calés sur les garanties du constructeur. Le niveau de rejet est censé être établi avant le projet par rapport aux exigences du milieu récepteur et non après par rapport au procédé retenu. C'est en effet le procédé qui doit être adapté aux préconisations de l'arrêté et non l'inverse. Cette pratique a des effets pervers, car dans certains cas (sous charge organique par exemple), il peut être difficile de respecter les niveaux de rejets garantis ;
- Des incohérences peuvent être relevées entre les paramètres bactériologiques et physicochimiques. On ne peut pas par exemple imposer un maximum de seulement 150 mg/L de concentration en MES en sortie de station et être exigeant sur la qualité bactériologique du rejet.

3.2. Adaptation du cahier des charges

Un BRM est proche d'une boue activée pour la partie biologique du traitement, cependant, les contraintes liées à la séparation physique des floccs par les membranes nécessitent l'adaptation du cahier des charges d'appel d'offres.

3.2.1. Eaux parasites

Il faut d'abord rappeler des notions de bon sens. Il est inutile d'envisager la construction d'un BRM sur un réseau unitaire. De même, un BRM est déconseillé sur un réseau séparatif où la maîtrise du volume d'eaux parasites n'est pas assurée. Pour la collectivité, cela suppose de pouvoir s'appuyer sur un diagnostic de réseau existant et s'engager dans un projet réaliste de réhabilitation de son réseau afin de minimiser les coûts d'exploitation futurs d'un BRM.

En effet, les coûts d'investissement en m^2 de membranes et de fonctionnement pour l'air de décolmatage ($0,4$ à $0,8 \text{ Nm}^3$ d'air/ m^2 de membranes) sont directement liés au volume filtré. Il faut donc réduire au maximum le volume des eaux parasites.

3.2.2. Caractérisation des eaux usées à traiter

Quel que soit le type de traitement, il est bon de rappeler que le cahier des charges doit fixer les caractéristiques complètes des eaux usées à traiter : débit, DCO, DBO, MES, N, P, température et TAC (important en cas de faible valeur, facteur limitant pour nitrification) sur des bases mesurées et non sur des ratios standard (par équivalent habitant) qui sont parfois obsolètes (exemple du phosphore).

Les débits de pointe journalière ou horaire usuels ne suffisent pas. Pour un BRM, on parle de débits de pointe horaire, débit maximum jour, débit maximum semaine, débit maximum mois et débit moyen annuel.

Charge actuelle et charge nominale

Les charges doivent être estimées en situation actuelle et au nominal. Le dimensionnement de la station doit impérativement tenir compte des évolutions prévisionnelles. L'adaptabilité du process et son éventuel phasage doit être un critère de jugement des offres. La plupart des stations construites actuellement sont chargées à moins de 50% du nominal, or pour un BRM, des postes fixes indépendants de la charge peuvent pénaliser les coûts de fonctionnement **pendant un grand nombre d'années.**

Charge variable

Le projet doit prendre en compte l'adaptation saisonnière du procédé (by-pass de bassin pendant les périodes de faible charge), **mais également** la gestion des phases transitoires (apport éventuel de boues extérieures, ...), et la gestion des membranes lors des périodes à très faible débit.

3.2.3. Bassin tampon

Un bassin tampon est indispensable sur un BRM. Son rôle consiste principalement à écrêter les débits de pointe pour ne pas surdimensionner la surface de membrane à installer, mais il donne également de la souplesse d'exploitation pour la gestion de la station (lavage membranes, pannes, ...).

La capacité de stockage doit bien sûr être adaptée au débit à écrêter, voir plus pour les petites installations où les temps d'intervention en cas d'incidents doivent être pris en compte. Le volume tampon est couramment installé à l'amont de la station (après dégrillage ou avant tamis), mais il est parfois intégré aux bassins biologiques par variation de niveau. L'intérêt de cette dernière solution est la compacité des installations et l'économie d'un relevage du débit entrant sur la station.

Le bassin tampon doit être agité et aéré surtout dans le cas de stockage prolongé (en général les bassins tampons sont équipés d'hydroéjecteur). Un trop plein doit être prévu sur l'entrée station, soit sur le poste de relèvement, soit sur le bassin tampon pour by-passer la station en cas de problème.

Pour chaque BRM on peut donc calculer un temps de stockage au débit de pointe avec un débit de filtration maximum [$\text{Volume BT} / (Q_{\text{pointe}} - Q_{\text{maxi_filtration}})$].

Une autre valeur intéressante à prendre en compte est le temps de stockage au débit moyen de temps sec (Q_{mts}) qui fournit le temps d'arrêt total de la filtration possible avant by-pass en cas d'incident d'exploitation.

3.2.4. Prétraitement

Il est **impératif** pour la longévité des membranes de s'assurer de l'absence de sable et de filasses dans la station. En effet, le sable par son action mécanique abrase la surface des membranes et dégrade ses propriétés physiques. Les filasses se fixent dans les faisceaux de fibres creuses ou à la base des plaques diminuant la surface de filtration et l'efficacité du décolmatage à l'air. Elles compliquent également les lavages membranes (enlèvement manuel des filasses).

Un tamisage fin en entrée station est primordial. Il faut impérativement prévoir un secours capable d'assurer 100% du débit entrée station (au minimum 1 tamis + 1 secours).

Les tamis sont à maille ronde en raison d'une meilleure efficacité pour arrêter les fibres. Le diamètre des mailles est en général inférieur ou égal à :

- 1 mm pour les fibres creuses;
- 1, 2 ou 3 mm suivant procédé pour les plaques (mais en général 1 mm).

Une attention particulière doit être portée sur la quantité d'eau utilisée pour nettoyer les tamis. On utilise en général de l'eau industrielle (eau de sortie station), qui peut représenter plus de 10% du débit filtré ! Le rendement de la filtration (ratio flux net/flux brut) en sera d'autant réduit.

Il ne faut **absolument** pas accepter l'entrée d'effluents non tamisés dans la station pour éviter d'endommager les membranes. Un dégrillage grossier en secours d'un tamis n'est pas une solution acceptable. En cas de colmatage des tamis (secours compris), il est préférable de by-passer la station.

Il faut noter que le volume tampon, quand il est inclus dans les bassins biologiques, n'est alors plus disponible (d'où la nécessité d'un tamisage en secours pour 100% du débit nominal).

En cas d'arrivée de sable sur le réseau, il faut prévoir un dessableur pour protéger les membranes (ainsi que les équipements électromécaniques).

3.2.5. Bassin biologique

Les premiers BRM étaient conçus pour fonctionner à des concentrations en boue supérieures à 10 gMES/L dans le bassin d'aération.

A ces concentrations, les transferts en oxygène sont nettement réduits par rapport aux boues activées conventionnelles ; la recherche d'économie d'énergie a conduit les exploitants et les constructeurs à travailler à des valeurs inférieures, comprises désormais entre **6 et 9 gMES/L**.

En effet, l'amplitude de la réduction du transfert d'oxygène avec l'augmentation de la concentration des boues s'est avérée plus marquée que ce qui est annoncé généralement par la littérature avec un facteur α^2 s'abaissant à environ 0,4 à une concentration en boue de 10g/L (Figure 4).

² Ratio du transfert en boue par rapport au transfert en eau claire

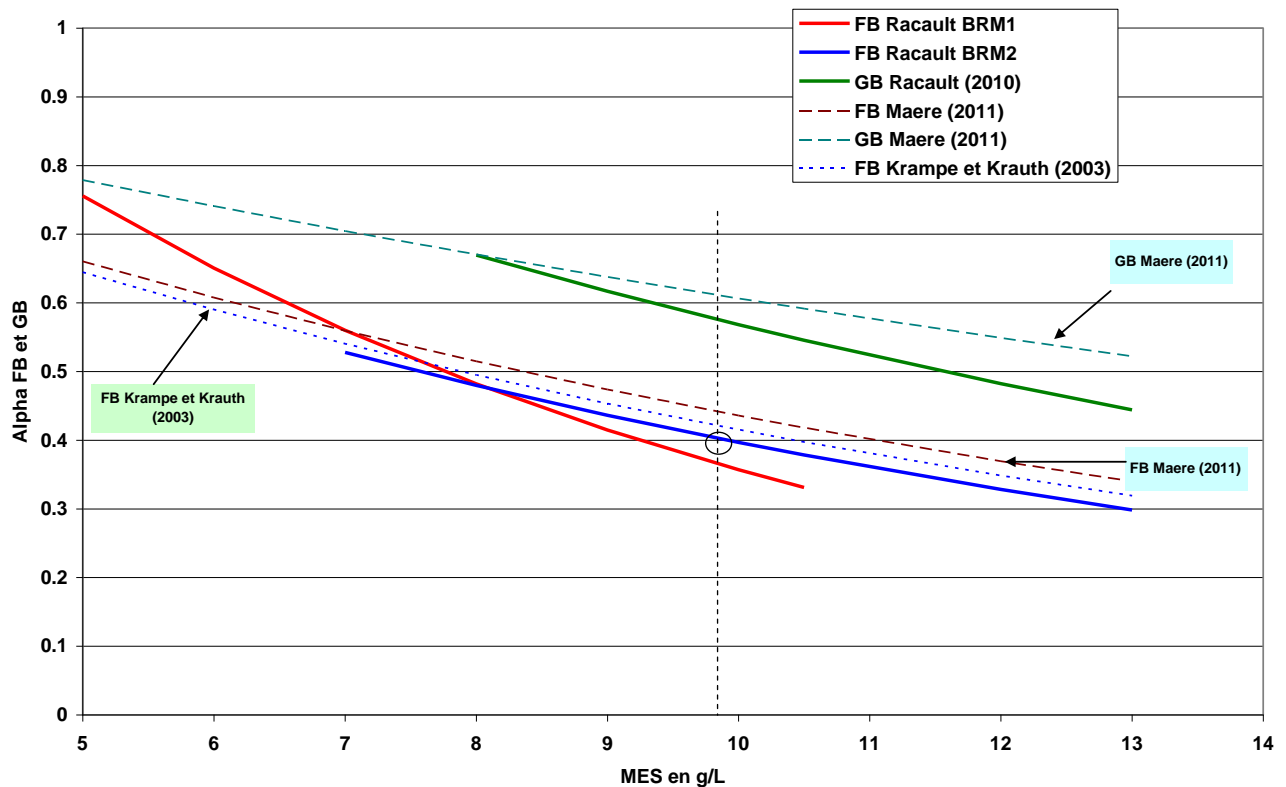


Figure 4 : Evolution du facteur alpha en fonction des MES - aération fines bulles (FB) et grosses bulles (GB)

Il faut cependant remarquer que la réduction de la concentration en boues diminue les gains de volume de réacteur et d'emprise au sol recherchés dans les BRM par rapport à des solutions conventionnelles.

Au niveau du cahier des charges, il faut absolument prendre des précautions pour limiter l'effet du surdimensionnement. La plupart des installations récentes fonctionnent en effet à moins de 50% de la charge nominale. Il en résulte un surdimensionnement des ouvrages et des équipements électromécaniques qui conduit à un surcoût énergétique important.

Il est impératif que l'évolution de la charge soit prise en compte dans les projets (dimensionnement des ouvrages, présence de plusieurs files, interconnexion des bassins, adaptation des équipements, ...). Il faut par exemple, privilégier les surpresseurs à fréquence variable ajustée sur seuil d'O₂ et/ou redox, voire sur la concentration en NH₄.

Dans la mesure du possible, les bassins doivent être maillés de façon à pouvoir ;

- isoler un bassin (suppression d'une zone d'anoxie, d'un réacteur membranaire,...) ;
- dans le cas de deux files en parallèle, il doit être possible par exemple de faire travailler le bassin d'aération de la file A avec les membranes de la file B et la centrifugeuse de la file A.

Les phases de nitrification/dénitrification sont possibles dans un bassin unique par aération syncopée, mais le retour de boues aérées provenant des cellules membranaires peut entraver la dénitrification. En cas d'objectif de traitement sur l'azote global, il est donc préférable d'avoir une zone anoxie séparée en amont du bassin d'aération. Toutefois du fait de la sous-charge hydraulique, cette zone peut se comporter comme une zone anaérobie. Non maîtrisée, l'anaérobiose peut entraîner une dégradation de la biologie avec notamment l'augmentation de la DCO interstitielle impactant le pouvoir colmatant des boues.

Si les objectifs de traitement sur le paramètre Pt sont en moyenne annuelle supérieur ou égal à 2mg/L, une déphosphatation biologique est possible par adjonction d'un bassin d'anaérobie.

Par contre si les objectifs de traitement sont plus strictes, (contraintes sur une moyenne journalière ou $Pt < 2\text{mg/L}$), une déphosphatation physico-chimique est nécessaire.

La biologie des boues des BRM étudiés présente peu de spécificités comparée à celle de boues activées du même âge ; elles sont néanmoins plus riches en bactéries filamenteuses qui du fait des membranes restent piégées dans les bassins sans pour autant poser de problèmes particuliers.

3.2.6. Production de boues

Dans un BRM, les pertes de boues avec l'effluent traité sont pratiquement nulles sauf incident sur une membrane. Les productions obtenues sont donc facilement mesurables. Elles sont conformes à celles des boues activées ayant des âges de boue identiques. Elles sont concordantes également avec les masses de boue calculées à partir des relations développées par Dold (2007) basées sur les caractéristiques des eaux usées à traiter et les âges de boue.

3.2.7. Aération membranes

Dans les BRM, plus de la moitié du volume d'air total injecté dans l'installation est dédié aux grosses bulles qui assurent le nettoyage permanent des membranes. On comprend l'intérêt de réduire au maximum ces apports et l'énergie correspondante, notamment en limitant les arrivées d'eaux parasites et donc les temps de filtration.

Là encore, le surdimensionnement des installations a des conséquences sur les coûts de fonctionnement :

- Pour les membranes aérées uniquement pendant les phases de filtration, l'impact est essentiellement sur les surcoûts d'investissement et de renouvellement ;
- Pour les membranes aérées en fonction du temps (aération continue ou cyclique), les surcoûts sont à la fois sur l'investissement, le renouvellement et le fonctionnement.

L'air introduit à la base des membranes a pour rôle essentiel d'assurer un effet mécanique de cisaillement pour éliminer le gâteau de boues qui se forme à la surface des membranes, mais il contribue aussi à l'oxygénation de la boue dans des proportions significatives, notamment sur les systèmes à membranes planes où le volume et la hauteur d'eau plus importante des cellules membranaires favorisent le transfert (contribution à l'apport en oxygène de l'ordre de 50% contre environ 10 % pour les fibres creuses).

3.2.8. Surface de filtration membranaire

Une caractéristique importante des BRM comparés à des boues activées conventionnelles est que l'on ne peut pas traiter au-delà du débit maximum de filtration. Ceci est un point crucial qui est souvent cause de dysfonctionnement des BRM. Lorsque le débit maximal de filtration est atteint, la station est by-passée. La surface membranaire et les flux maxima de filtration (valeurs données en $\text{l/m}^2.\text{h}$ ou LMH) déterminent le volume maximum admissible en entrée station (corrigé du volume du bassin tampon).

Flux net, flux brut

Il convient de distinguer flux net (débit sortie station) et flux brut (débit réellement filtré).

Quel que soit le procédé, une fraction de l'eau traitée est réutilisée dans le process comme 'eau industrielle' (nettoyage des tamis, de la centrifugeuse, ...).

En complément, pour les BRM à membranes fibres creuses, de fréquents rétrolavages sont réalisés avec de l'eau traitée (1mn par cycle de filtration de 10-12 mn, à un débit de 1 à 1,5 fois celui de filtration) pour assurer le décolmatage.

Ce volume supplémentaire d'eau traitée recyclée dans l'installation doit être ajouté au volume de sortie pour obtenir le flux brut qui représente la quantité réelle filtrée (5 à 15% de volume supplémentaire).

Flux maximum

Le flux maximum est un flux brut calculé à partir des débits entrée station et de la température des boues.

Il faut prendre en compte le fait que les flux maxima ne sont disponibles que sur la base de crédit temps (cf paragraphe 3.2.2). En effet, les vitesses de colmatage s'accroissent avec l'augmentation des flux de filtration ; pour protéger les membranes, le flux maximum n'est donc disponible que pendant une période définie. Au-delà, le flux maximum est automatiquement dégradé. Suivant le procédé et les contraintes retenues, on disposera par exemple des flux maxima suivants :

- 50 LMH 1j/mois ;
- 40 LMH 1sem/mois ;
- ...

Le dimensionnement de la surface membranaire doit être réalisé pour les conditions extrêmes et donc à la température minimale de la boue. En effet, la température de l'eau influe directement sur la viscosité du perméat et la perméabilité des membranes, or les flux hydrauliques maxima sont en général atteints pendant la période hivernale. La température retenue est classiquement de 12°C (à titre d'exemple, 20 % de perte de perméabilité entre 20 et 12 °C), mais en zone de montagne des valeurs plus faibles peuvent être constatées (8°C voire moins).

Les basses températures impacte le traitement de l'azote comme pour une boue activées classique ; la compacité des installations BRM autorise cependant la couverture de la station limitant ainsi le refroidissement des boues (gain attendu de 1,5 à 5 °C).

On recherchera des flux de filtration moyens de l'ordre de 20 à 25 LMH pour limiter le temps de fonctionnement des surpresseurs aération de décolmatage et maintenir de faibles évolutions de perméabilité.

La modularité des systèmes doit être privilégiée. Chaque réacteur membranaire doit pouvoir être isolé, vidangé et laissé en eau claire si nécessaire.

Pour la sécurité de la filtration, il vaut mieux disposer de plusieurs réacteurs membranaires. En cas d'indisponibilité d'une file (lavage, maintenance, panne surpresseur), les autres prennent le relai.

Commentaire : Surdimensionner la surface membranaire implique une augmentation des consommations énergétique pour l'aération de décolmatage.

Attention cependant, sur de nombreuses stations, la charge hydraulique a été sous-estimée au départ du fait d'une méconnaissance des débits entrant sur la station ou d'une mauvaise rédaction du cahier des charges. Dans ces cas, le surdimensionnement permet d'assurer au moins en partie le traitement pendant les épisodes de fortes pluies.

3.2.9. Gestion des membranes

Grâce aux rétrolavages réguliers et aux lavages de maintenance (environ 1 à 2 par semaine, eau de javel puis acide injecté à contrecourant) la perméabilité reste stable sur de longues périodes pour les

procédés à membranes à fibres creuses. Un lavage de régénération est réalisé une à deux fois par an (javel puis acide en lavage à contre courant et trempage).

Avec les membranes planes, le comportement sur le long terme est différent. Les perméabilités diminuent régulièrement entre deux lavages de régénération. Ces derniers, qui permettent de retrouver une perméabilité maximale proche de la valeur initiale, sont généralement espacés de 4 à 8 mois (sur l'exemple présenté en Figure 5 : 6 mois et demi) et sont réalisés par injection d'eau de javel puis d'acide à contre courant (bassins maintenus en boues).

On y distingue clairement la différence de comportement et de gestion des deux types de membranes

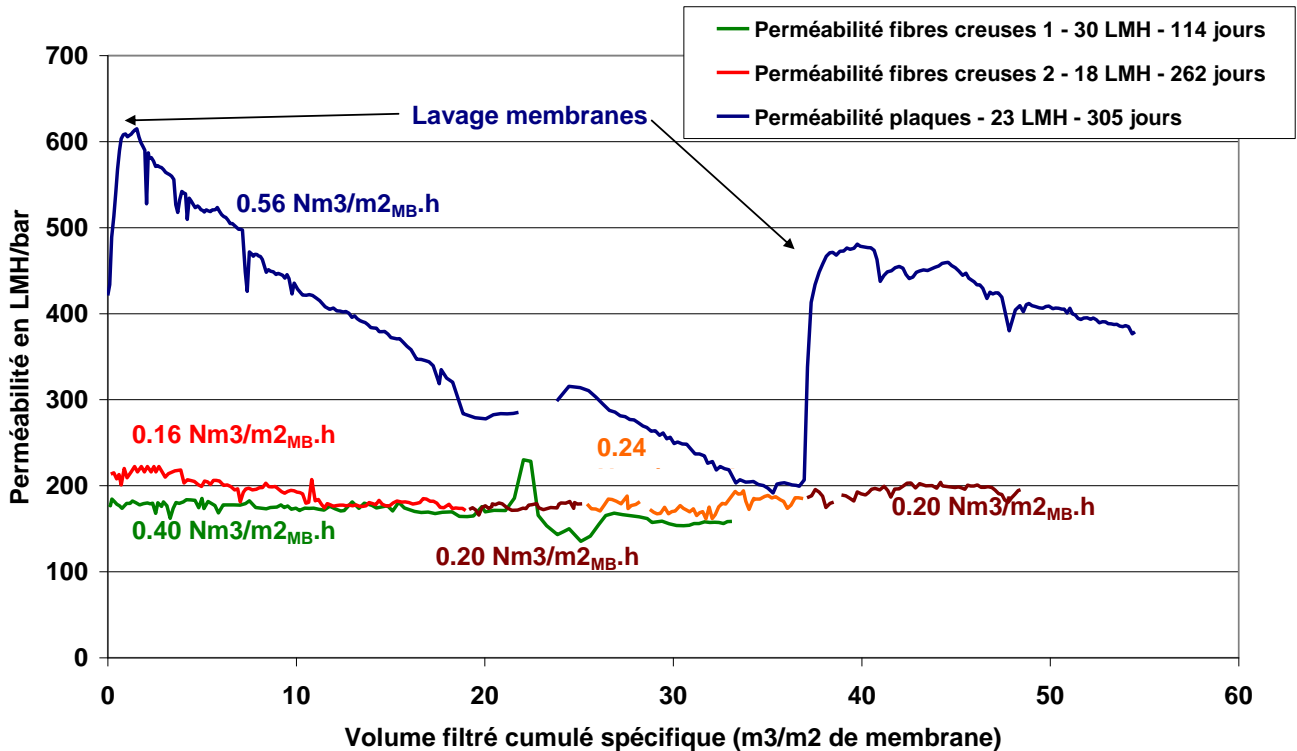


Figure 5 : Exemples d'évolution des perméabilités sur le long terme sur 3 BRM

Il est souhaitable de pouvoir isoler chaque rack de membranes (cassette ou module suivant fournisseur) pour conduire des tests d'intégrité.

3.2.10. Recirculation

Lors des phases de filtration, la concentration en boues augmente dans les réacteurs membranaires. Une recirculation entre les membranes et le bassin d'aération (en général préférée à la recirculation vers la zone anoxie pour un meilleur contrôle de la dénitrification), permet de déconcentrer les boues. Elle représente en général de l'ordre de 400% du débit entrée station.

Dans le cas d'une configuration avec zone anoxie en tête, une recirculation interne entre le bassin d'aération et la zone anoxie, de l'ordre de 400 à 600% du débit entrée station, permet d'assurer la dénitrification.

Des variateurs de fréquence équipent en général ces groupes de pompes pour s'adapter au débit entrée station.

3.2.11. *Bâche de stockage eau traitée (eau industrielle)*

L'eau industrielle est prélevée dans une bâche de stockage d'eau traitée avant rejet vers le milieu récepteur. Son volume doit être suffisant pour fournir à la fois l'eau industrielle de la station et le cas échéant les rétrolavages membranes, au volume journalier minimal. Il faudra cependant éviter des temps de séjour trop longs pour ne pas risquer un éventuel développement biologique préjudiciable à la qualité de l'eau de sortie voire de l'eau industrielle (volume équivalent à moins d'une journée).

3.2.12. *File boues*

Dans les BRM, la boue est extraite soit du bassin d'aération, dans lequel la concentration est relativement stable, soit plus généralement des réacteurs membranaires pour bénéficier de l'effet de concentration du à la filtration. Dans ce cas la concentration des boues peut varier rapidement au cours du temps et nécessiter des ajustements des doses de polymères en entrée de centrifugeuse. Il peut être utile de prévoir les deux possibilités à la conception.

Une attention particulière doit être portée sur les retours en tête des centrats de boues de silos de stockage qui sont très chargés en DCO interstitielle potentiellement préjudiciable à la filtration membranaire, avec des risques de colmatage accrus. Il faut s'efforcer de limiter le stockage des boues en silos pour éviter des désordres biologiques dans la file eau ayant des conséquences sur la séparation des boues (par décantation ou filtration).

Par ailleurs, les conséquences du tamisage fin sont une moins bonne siccité obtenue par centrifugation (autour de 20%) en raison d'un moins bon effet « structurant » en l'absence de filasses.

3.2.13. *Qualité des matériels installés*

Une attention particulière doit être portée à la qualité des matériels installés et notamment :

- Les sondes de niveau ;
- Les vannes pneumatiques, sollicitées avec une fréquence élevée (membranes à fibres creuses) ;
- Le réseau d'air de service, compresseur à doubler (1 en secours) ;
- L'étanchéité des canalisations d'extraction du perméat (réseau conçu pour éviter toute introduction accidentelle de boue).

3.2.14. *Capteurs*

L'exploitation dans de bonnes conditions d'un BRM nécessite l'installation d'un minimum de capteurs :

- Niveaux bassins membranaires ;
- Redox sur zone d'anoxie ;
- O₂ sur bassin d'aération pour régulation (éventuellement redox et O₂, voir O₂ et NH₄ pour régulation sur N) ;
- MES membranes et/ou bassin d'aération pour contrôle de la concentration en boues dans la station, optimiser l'extraction des boues et maîtriser les transferts d'oxygène ;
- pH bassin d'aération pour prévenir d'éventuelles inhibitions de la nitrification (surtout pour les eaux très peu minéralisées à faible pouvoir tampon, et en cas d'injection de chlorure ferrique) ;
- Température bassin d'aération pour calcul de la perméabilité ;
- Pression transmembranaire, au minimum une mesure par réacteur membranaire ;
- Flux transmembranaire, au minimum une mesure par réacteur pour le suivi de la perméabilité et mieux analyser un éventuel colmatage, et pour détecter un besoin de nettoyage des membranes.

Des débitmètres sont à prévoir en entrée et sortie de station, sur les recirculations, les extractions de boues, les eaux industrielles et les éventuels by-pass. Toutes ces données doivent être reprises par une supervision et archivées.

3.2.15. Supervision

Il est indispensable de disposer d'une supervision pour l'exploitation d'un BRM. L'objectif est à la fois l'analyse quotidienne de la station, l'étude de l'origine d'éventuels dysfonctionnements, l'optimisation du procédé, le suivi et la gestion du colmatage membrane, la gestion des alarmes.

Pour les membranes, le suivi de la perméabilité intégrant une correction par rapport à la température et la pression transmembranaire à flux nul est essentiel.

Une historisation doit être prévue pour tous les capteurs, compteurs et événements, les marche-arrêt à minima des surpresseurs, les temps de marche journaliers des moteurs (suivi des consommations énergétiques et des maintenances préventives).

La gestion des flux transmembranaires et de l'air de décolmatage des membranes (débit d'air pendant les phases de filtration, aération séquencée ou non, aération pendant les phases de relaxation, flux transmembranaire,...) résultent des préconisations des fournisseurs de membranes. L'exploitant ne dispose que de peu de marge d'intervention. Le pilotage des membranes est directement pris en charge par les systèmes de supervision afin de maintenir les conditions de fonctionnement préconisées pour garantir une durée de vie minimum des membranes (7 à 10 ans pour les dernières générations).

3.2.16. Qualité de traitement

De part les caractéristiques des membranes, les eaux de sortie station sont exemptes de MES (à la limite du mesurable) ; la plupart des bactéries et une partie des virus sont éliminés (Figure 6).

La porosité nominale des membranes usuelles est de :

- membranes plaques : Kubota 0,4 μm , Toray 0,08 μm , Alpha Laval 0,2 μm
- membranes fibres creuses : Zénon 0,04 μm , Puron 0,05 μm

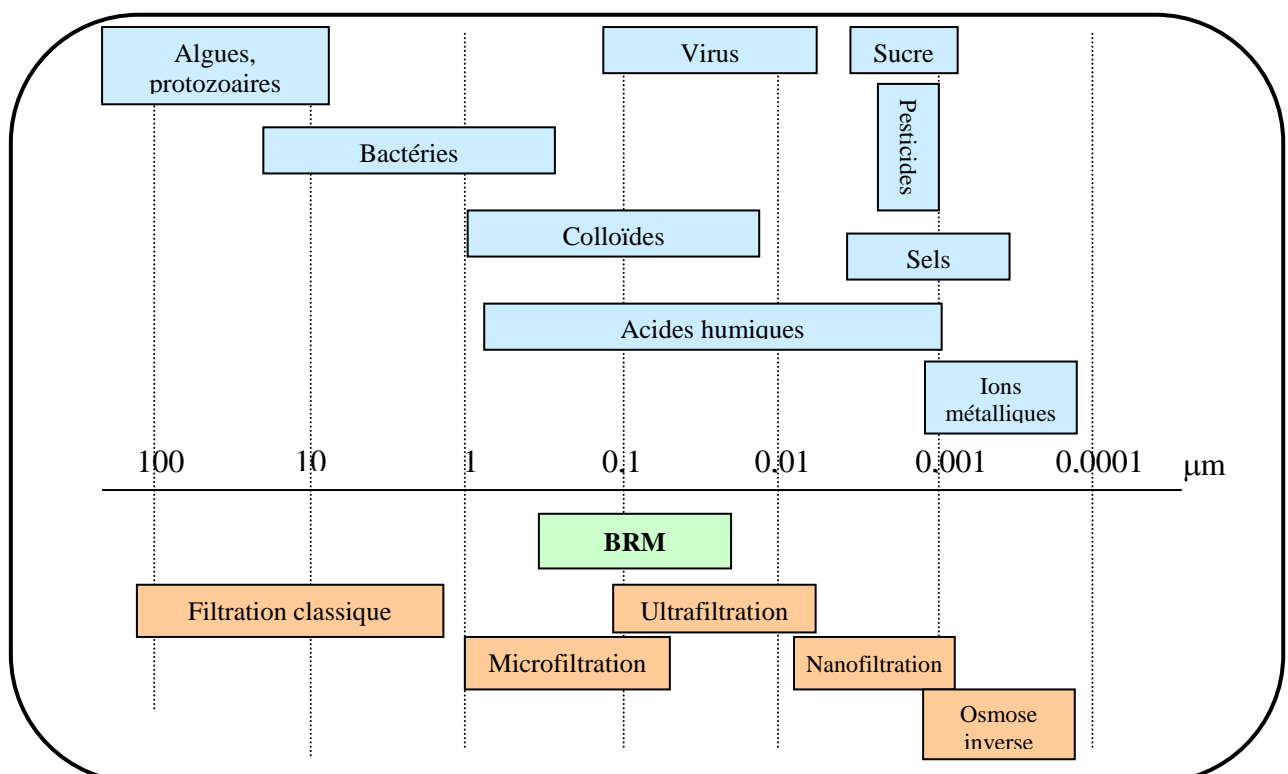


Figure 6 : Technique de filtration en fonction du seuil de coupure

La qualité de traitement est comparable à celle d'un procédé de type boue activée auquel il faut ajouter une étape de traitement tertiaire (par exemple filtre à sable avec désinfection).

3.2.17. Coûts prévisionnels de fonctionnement

Les coûts prévisionnels doivent être évalués **impérativement** en situation actuelle et dans les conditions nominales.

Dans le cas de variation de charge, quatre cas sont à évaluer :

- situation actuelle, saison creuse/saison pointe ;
- charge nominale, saison creuse/saison pointe.

4. EXPLOITATION

4.1. Mise en route

Phase longue et très importante pour tests, réglages et optimisation du fonctionnement de la station, et la formation indispensable de l'exploitant. Elle est l'occasion de l'élaboration d'une notice d'exploitation.

4.2. Exploitant

L'exploitant doit être capable d'analyser l'état de colmatage des membranes (pression transmembranaire, perméabilité, ...) et maîtriser les procédures de lavage.

Un arrêt de la filtration est synonyme de by-pass de la station dans de brefs délais. Cela nécessite des interventions d'urgence, avec un délai en rapport avec la capacité de stockage tampon (en général moins d'une demi-journée).

Cela suppose une gestion d'astreinte et également la possibilité pour l'exploitant de pouvoir s'appuyer sur une capacité d'expertise (automaticien, spécialiste membrane, ...).

Concernant les résultats des analyses d'autosurveillance, quelle que soit la taille de l'installation, le décalage entre le prélèvement et la réception des résultats d'analyses ne permet pas le pilotage de la station. Il est nécessaire de réaliser des analyses sur site en sortie de station à une fréquence au moins hebdomadaire sur les principaux paramètres : NH₄, NO₃, et au besoin PO₄, DCO et pH.

5. COÛTS D'INVESTISSEMENTS ET DE FONCTIONNEMENT

L'objectif est d'évaluer l'impact financier du choix d'une filière de traitement BRM par rapport à une filière boue activée (BA), tant en termes d'investissement que de fonctionnement sur le bassin Adour Garonne.

Une BA classique doit être associée à une étape d'affinage (filtre à sable + désinfection) pour obtenir une qualité de traitement équivalente à celle d'un BRM. Quand les données sont suffisantes, ces deux filières sont comparées (Sénéchal, 2012).

5.1. Investissement

Les coûts d'investissement considérés ici sont limités aux travaux de construction de la station d'épuration. Sont exclus les coûts des études préliminaires ainsi que l'achat du terrain. Les montants

sont actualisés à l'année 2012 et sont exprimés en HT (méthodologie exposée en annexe). Les données analysées proviennent de la bibliographie et de la base de données de l'agence de l'eau Adour Garonne (AEAG), limitées à la gamme 0-20 000 équivalent-habitant (EH) pour permettre la comparaison entre BA et BRM.

5.1.1. Boues activées

Les figures suivantes présentent les coûts d'investissements des boues activées (BA) et des boues activées avec traitement tertiaire (BA+Aff). L'étape d'affinage est constituée d'une filtration sur sable, d'une désinfection UV ou d'une chloration.

Les coûts d'investissement sont exprimés en fonction de la charge organique nominale en équivalent habitant (EH). On constate sur les deux figures suivantes (Figure 7 et Figure 8) le peu de différence entre les boues activées avec ou sans affinage pour les stations construites sur le bassin Adour Garonne.

On constate la décroissance rapide du coût d'investissement spécifique en € par équivalent habitant jusqu'à 8 000 EH puis une stabilisation autour de 200-400 € HT/EH.

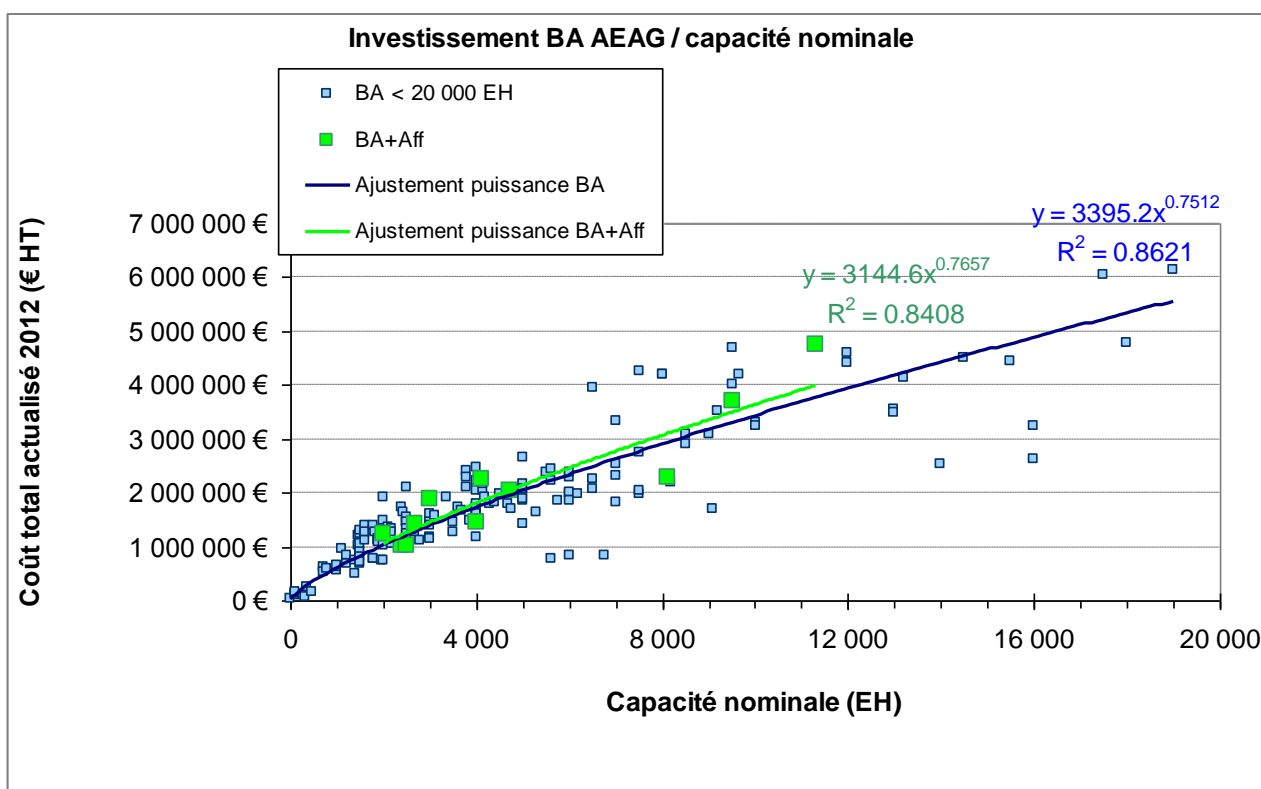


Figure 7 : Coût d'investissement total de boue activée classique et boue activée + affinage sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale

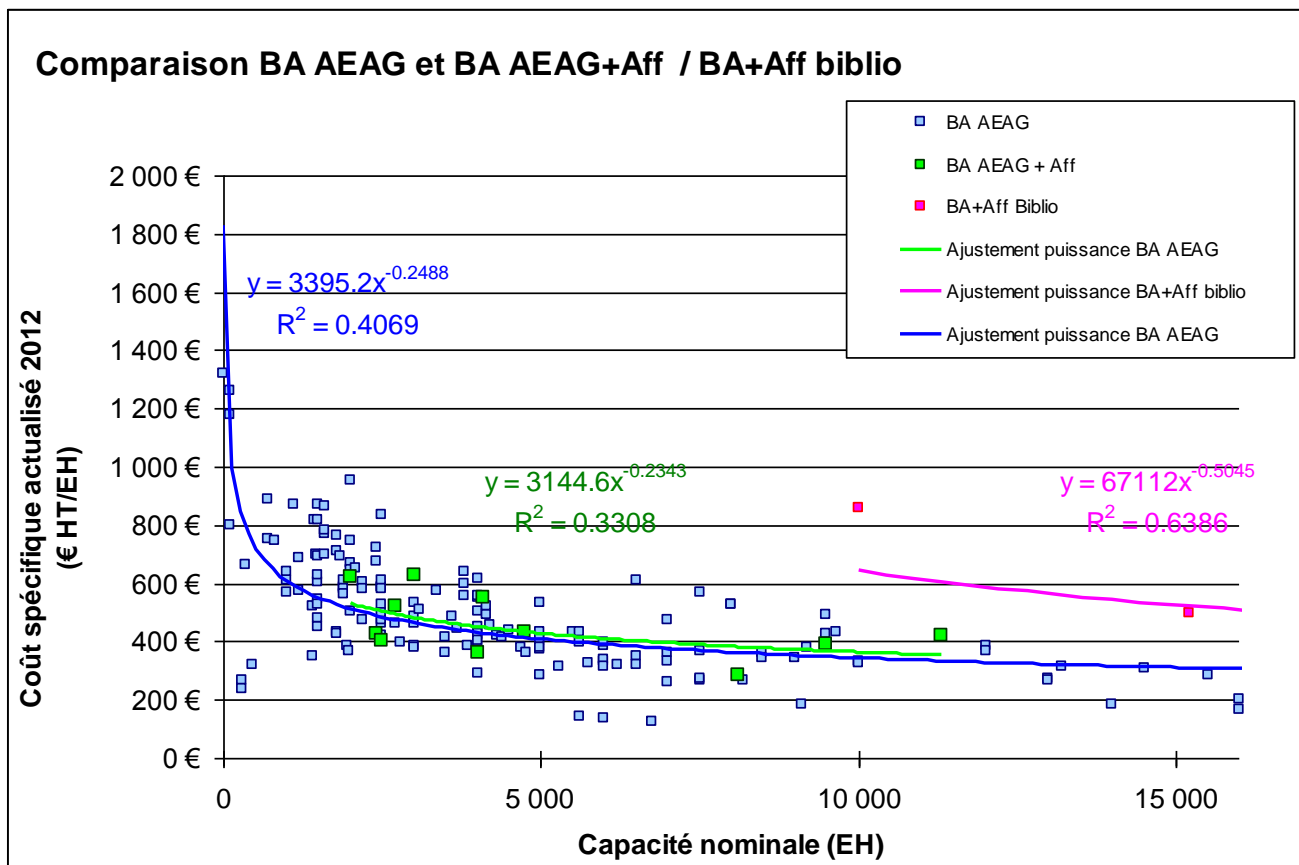


Figure 8 : Coûts d'investissement spécifiques de BA classiques et BA + aff sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale, comparés aux coûts des BA + aff de la biblio

Remarque importante : En fait, la mise en place d'un traitement tertiaire est souvent réalisée lors d'une extension ou d'une réhabilitation de station, avec récupération d'ouvrages existants. Le coût annoncé, légèrement supérieur à celui d'une boue activée classique ne comprend donc en général pas la totalité des ouvrages. Les deux procédés devraient logiquement se démarquer plus fortement comme on peut le constater en comparant les boues activées d'Adour Garonne avec les boues activées et traitement tertiaire de la biblio (cf Figure 8).

5.1.2. BRM

En s'appuyant à nouveau sur la base de données de l'AEAG et en complément sur les dossiers de réponses aux appels d'offre, le coût d'investissement des BRM a été évalué en fonction de la capacité nominale (Figure 9 et Figure 10).

Constructions et réhabilitations de station ont été distinguées sans constater d'écart significatif de coût d'investissement. En fait les réhabilitations de station concernées sont des constructions neuves avec réutilisation d'anciens ouvrages en bassin tampon. L'économie générée en termes de génie civil est compensée par la nécessité de détruire et évacuer le reste de l'ancienne station.

La Figure 10 met en évidence la relation entre la capacité nominale en EH et le coût spécifique en € HT/EH de chaque installation étudiée. Comme pour les boues activées, le coût d'investissement spécifique décroît rapidement pour les faibles capacités, puis se stabilise quand la capacité augmente au-delà de 8 000 EH, entre 200 et 400 € HT/EH.

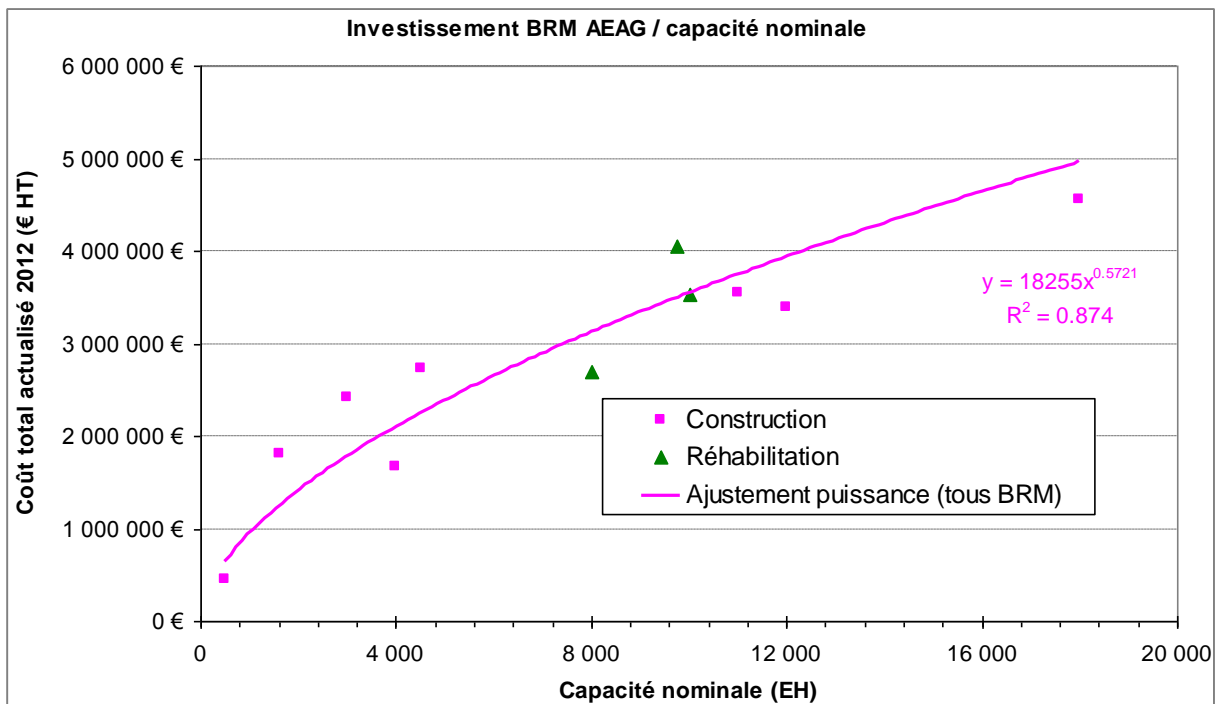


Figure 9 : Coût d'investissement total des BRM présents sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale

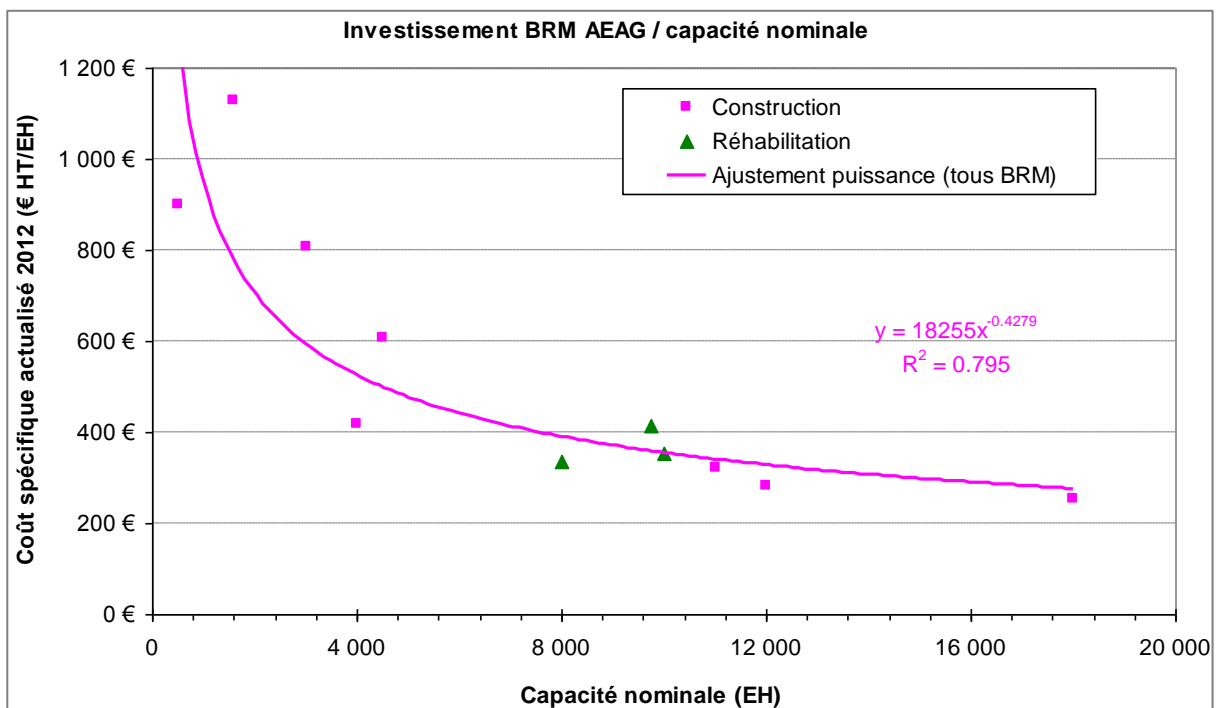


Figure 10 : Coût d'investissement spécifique des BRM présents sur le territoire de l'AEAG en fonction de la capacité nominale

Le coût d'investissement des BRM sur le bassin Adour Garonne est moins élevé que les données relevées dans la biblio (Figure 11) avec un écart de prix de l'ordre de 30 %.

Quelques remarques peuvent être apportées pour expliquer une telle différence :

1. Avec l'arrivée à maturité d'une technologie récente, une forte diminution des coûts d'investissements a accompagné le développement du marché des BRM.
2. Pour s'implanter dans un secteur, les constructeurs peuvent être amenés à diminuer leurs marges pour s'aligner sur des procédés concurrents.

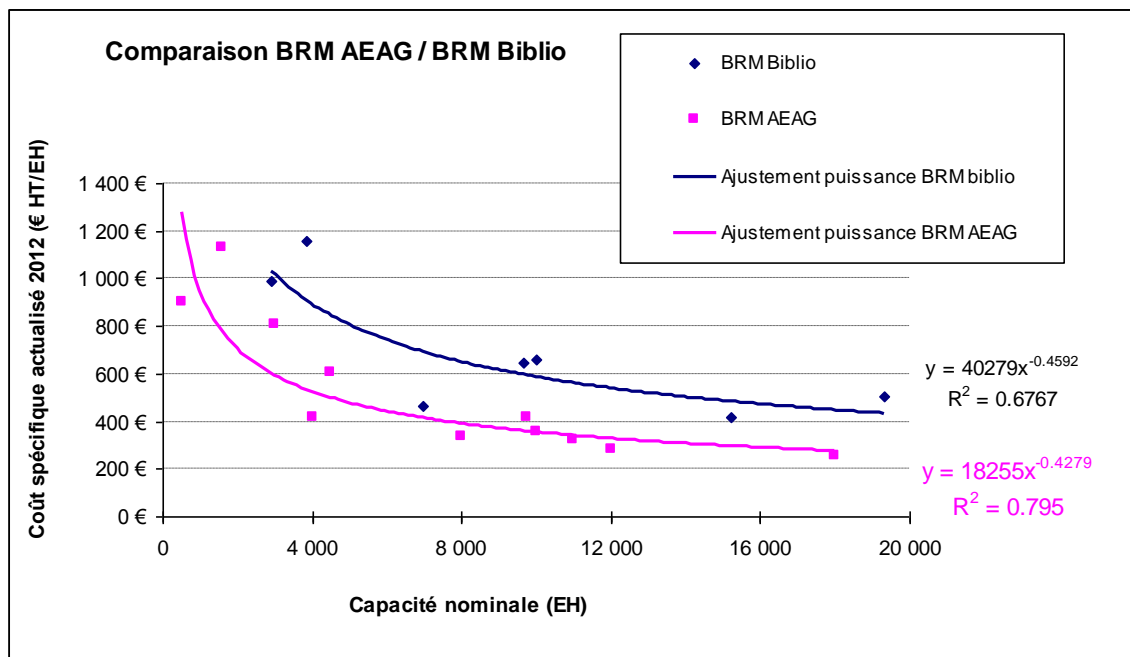


Figure 11 : Comparaison coût d'investissement spécifique de BRM sur le territoire de l'AEAG et BRM de la biblio

5.1.3. Comparaison boues activées avec ou sans traitement tertiaire et BRM

Comme on a pu le voir précédemment, les boues activées avec ou sans traitement tertiaire ont des coûts d'investissement similaires (paragraphe 5.1.1). Pour alléger les représentations graphiques, seul l'ajustement sur les boues activées classiques a été retenu.

Les figures suivantes (Figure 12 et Figure 13) présentent la comparaison entre les BA et BRM de l'agence de l'eau Adour Garonne en termes de coût total et de coût spécifique en fonction de la capacité nominale en EH.

Sur les deux figures il faut souligner le faible écart entre les BA et les BRM. En effet les BRM sont plus coûteux que les BA surtout pour les petites installations, inférieures à 8000 EH avec un écart qui se creuse plus l'installation est petite. Au-delà il n'y a plus de différence significative.

Le Tableau 1 reprend des valeurs récapitulatives permettant de situer les coûts d'investissement des BRM par rapport aux boues activées en fonction de la capacité en équivalent habitant.

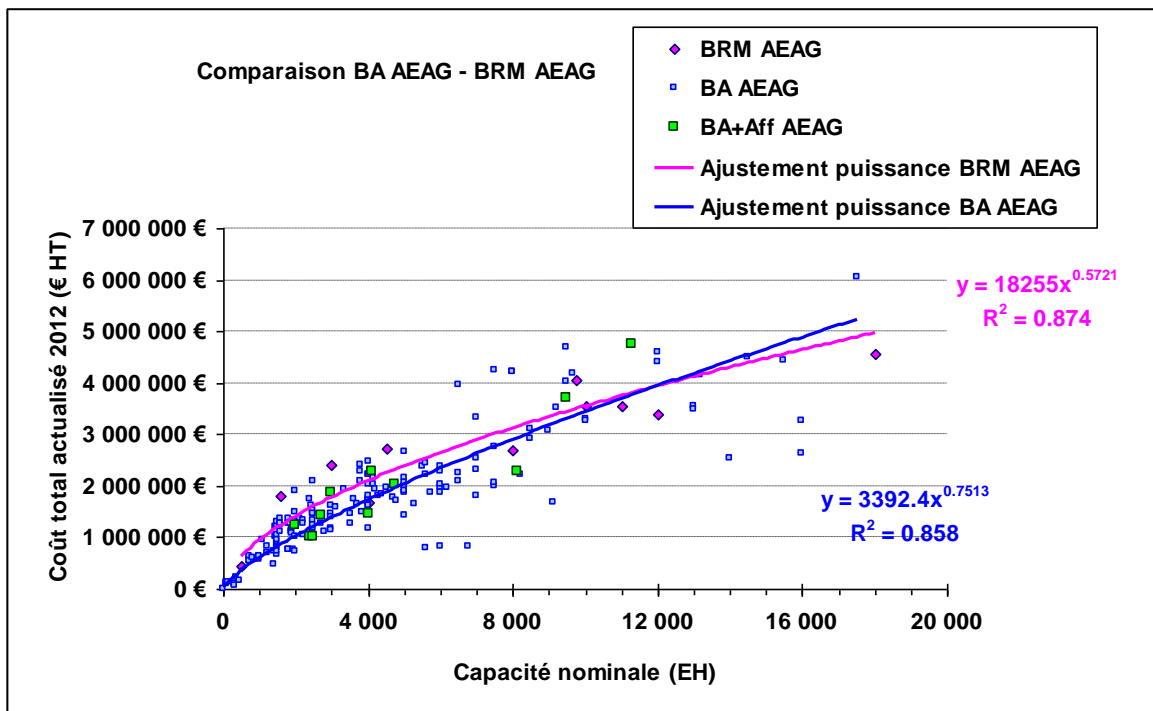


Figure 12 : Comparaison des coûts d'investissement des BRM avec les boues activées sur le territoire de l'AEAG

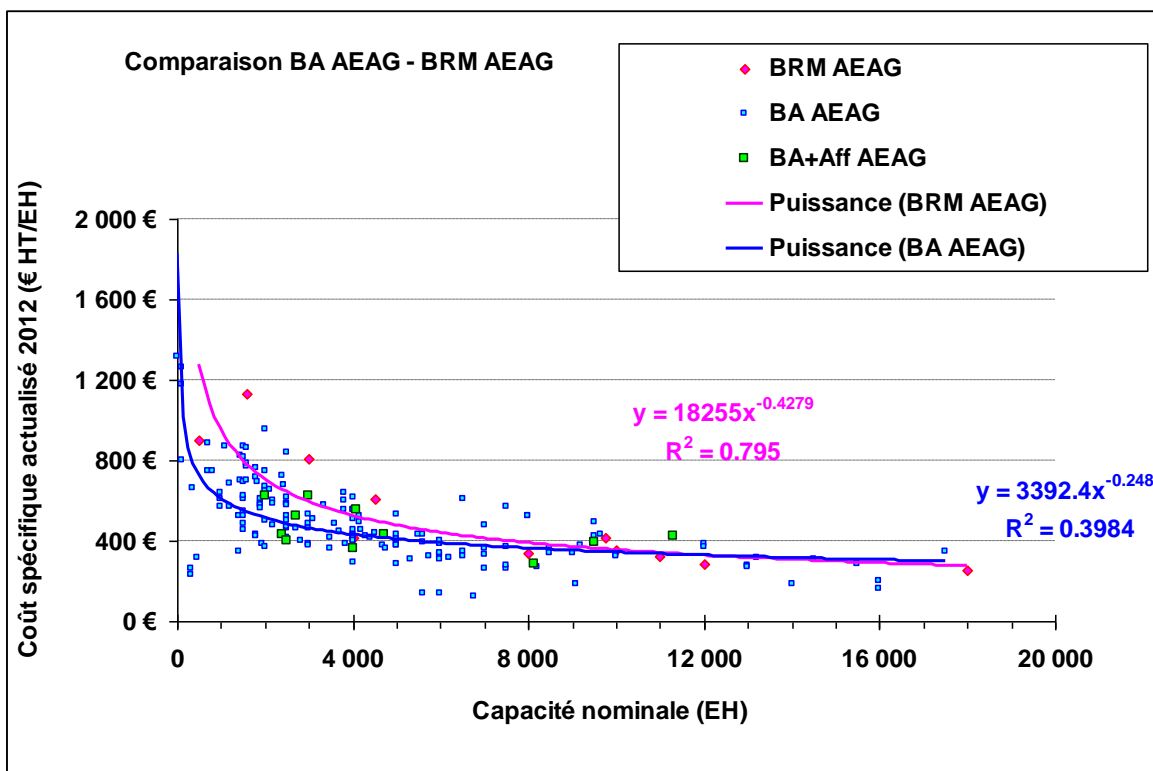


Figure 13 : Comparaison des coûts d'investissement spécifiques des BRM et des boues activées sur le territoire de l'AEAG

Tableau 1 : Evaluation des coûts d'investissement (CI) des boues activées et BRM en Adour Garonne

EH	Boues activées	BRM	Boues activées	BRM
	CI	CI	CI / EH	CI / EH
2000	1 024 696 €	1 600 902 €	505 €	707 €
5000	2 041 575 €	2 517 193 €	408 €	478 €
10000	3 438 984 €	3 210 340 €	347 €	355 €

Des comparaisons ont également été effectuées entre les BA avec une étape d'affinage et les BRM de la bibliographie (DeCarolis, 2004 ; Brepols et al., 2010 ; Coté et al., 2004 ; Adham et al., 2001). On note Figure 14 que les différences de coûts d'investissement des deux procédés BRM et BA+Aff données par la bibliographie sont très faibles. L'écart avec les boues activées du bassin Adour Garonne est lui important pour les faibles capacités de traitement et devient négligeable au-delà de 60 000EH.

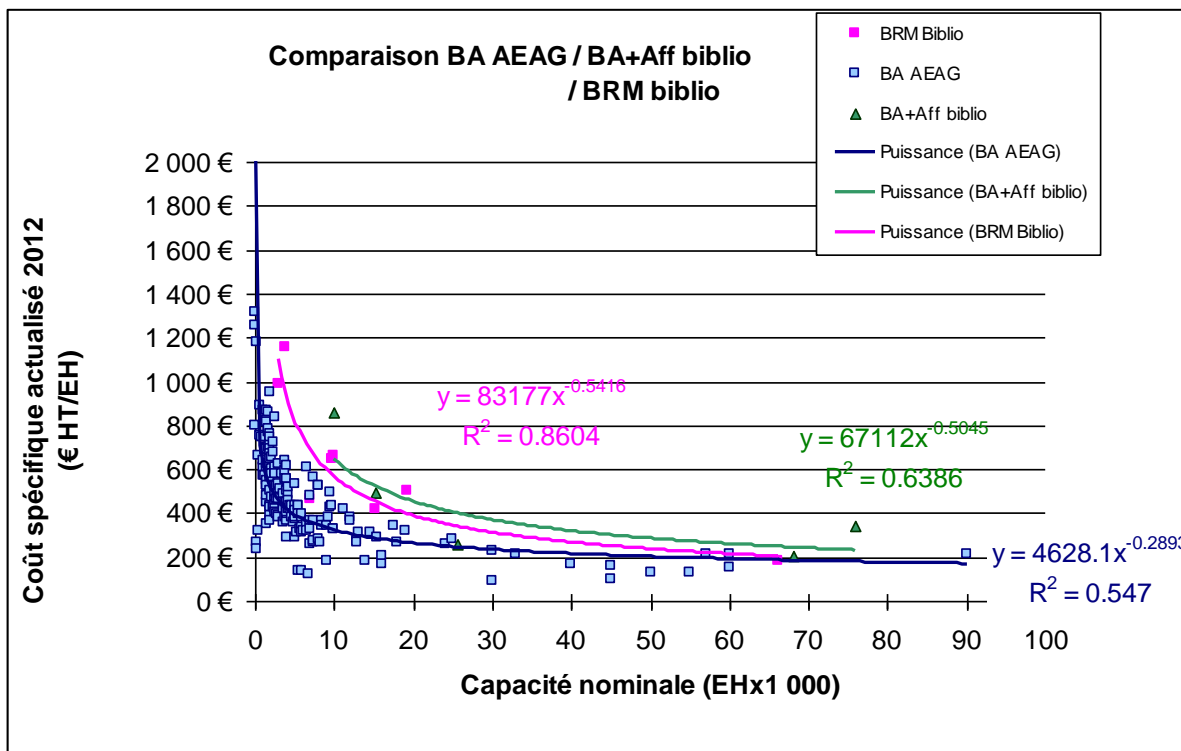


Figure 14 : Comparaison du coût d'investissement spécifique des BA AEAG aux BA+Aff biblio et BRM biblio

5.2. Fonctionnement

Les coûts de fonctionnement ont été calculés à partir des données récupérées auprès des exploitants et maîtres d'ouvrages des sites étudiés. Il faut noter la grande difficulté à obtenir des données, seuls deux sites ont pu être étudiés sur le bassin Adour Garonne. Afin de pouvoir comparer les données reçues entre elles et ne pas être influencés par les coûts propres à chaque exploitant, nous avons déterminé un coût unique unitaire pour chaque fourniture. Ce coût unitaire a été déterminé à partir de devis de fournisseurs, des tarifs EDF et de données fournies par les exploitants.

Afin de pouvoir comparer les sites entre eux nous avons choisi d'exclure dans notre décomposition des coûts de fonctionnement (CF), les postes de maintenance, de renouvellement et de dépenses

diverses. En effet ces données sont souvent incomplètes. Ainsi nos calculs sont basés sur un sous total que nous avons appelé Coûts de Fonctionnement Simplifié (CFS) qui comprend 4 postes :

- Evacuation des déchets ;
- Réactifs ;
- Personnel ;
- Energie.

Les bilans d'exploitation présents dans les réponses aux appels d'offres fournies par les maîtres d'ouvrages, ont également été utilisés à des fins de comparaison, ainsi que les données de la bibliographie (Brepols et al., 2010).

5.2.1. Fonctionnement BRM

Les résultats obtenus ont été transposés en graphique pour une meilleure compréhension. Ainsi la Figure 15 montre le CFS annuel en fonction du débit traité pour les deux sites étudiés en situation réelle en 2010/2011 et prévisionnelle (valeur prévisionnelle marché). Il faut remarquer que le CFS annuel augmente logiquement avec le débit d'eau traitée. Sur la base des données réelles, le m³ d'eau traitée supplémentaire revient à 30 centimes d'euros. Le suivi de l'évolution des CFS sur plusieurs années pourrait permettre une extrapolation pour la pleine charge qui reste très hypothétique avec les données actuelles. Il semble que l'estimation pour l'un des deux sites soit correcte (BRM2), alors que les prévisions pour l'autre (BRM1) apparaissent sous estimées notamment sur le poste personnel (Figure 16). Le prévisionnel est en effet basé sur un mi-temps alors que l'exploitant exerce à plein temps sur la station.

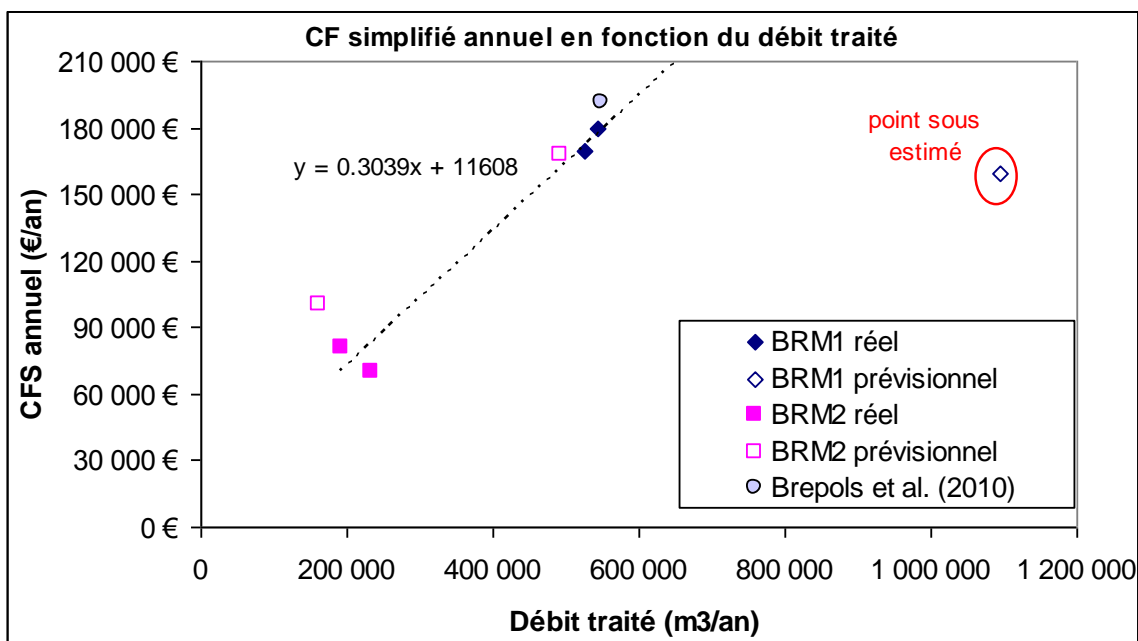


Figure 15 : CFS annuel en fonction du débit traité

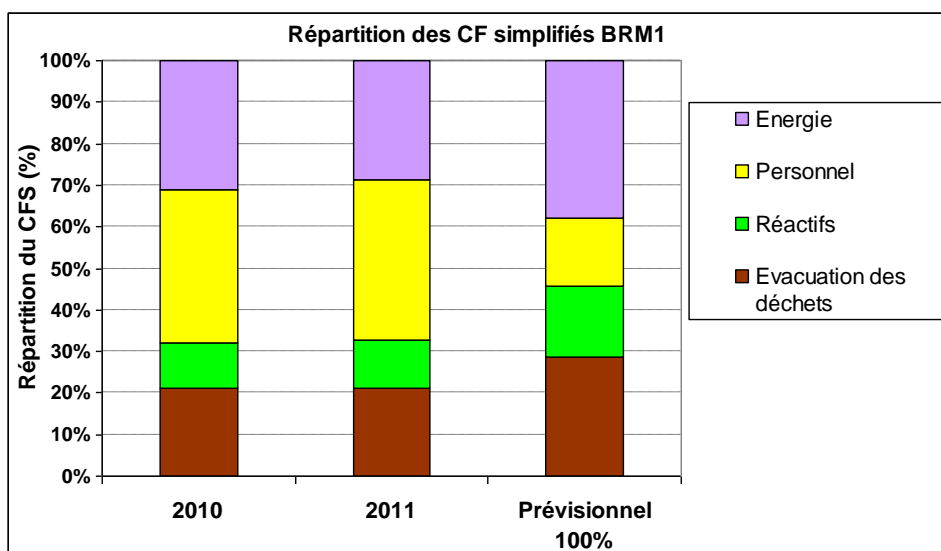


Figure 16 : Répartition relative des CFS annuels du BRM1 par année et prévisionnel

Le même graphique a été réalisé en fonction de la DCO éliminée. Les CFS annuels augmentent avec la charge éliminée, et le kg de DCO supplémentaire à traiter revient à 27 centimes d'euros.

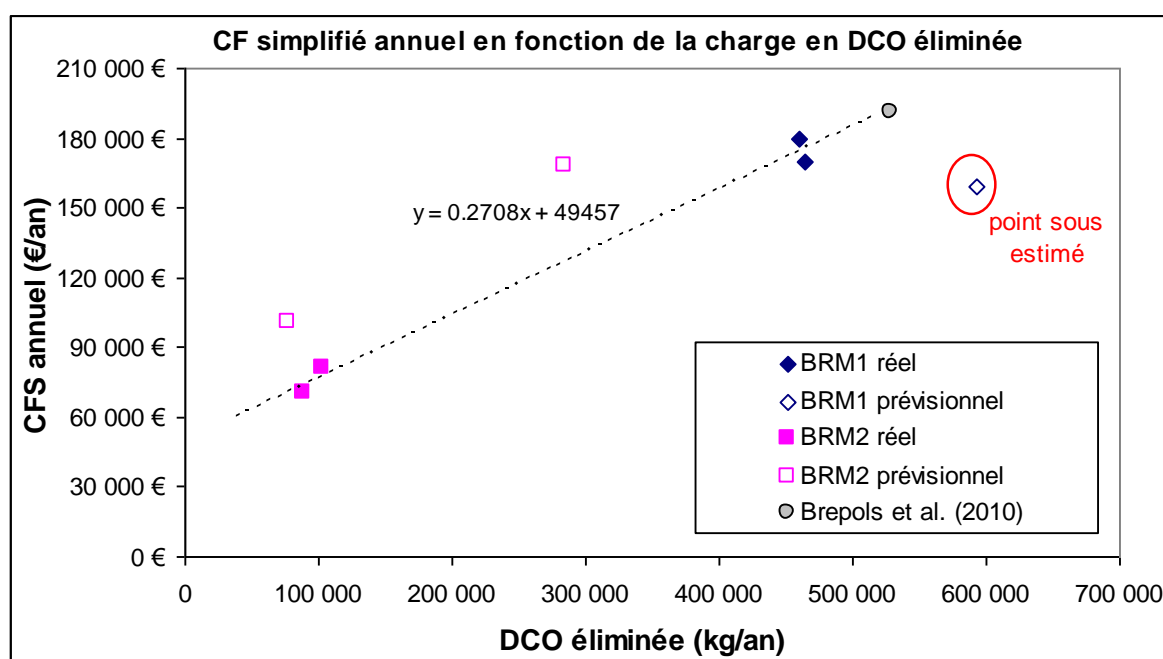


Figure 17 : CFS annuel en fonction de la DCO éliminée

Remarque : Pour un BRM, le taux de charge est une donnée très importante. Si le projet a été conçu dans l'objectif d'un fonctionnement aux capacités nominales, la part des coûts fixes peut être importante, notamment pour l'énergie de l'air membrane.

Dans le cas d'une aération membrane en fonctionnement continue, plus on se rapproche du débit nominal, plus le temps de filtration est grand et plus le ratio kWh/m³ traité sera faible. L'impact des charges fixe diminue. Sur la Figure 18, on constate l'évolution des CFS spécifiques, qui diminuent lorsque le taux de charge augmente.

Attention à prendre en compte les deux ratios coûts **par m³ d'eau traitée** et **par kg de DCO éliminée**. Une station en surcharge hydraulique aura un coût de fonctionnement spécifique

hydraulique faible, mais un CFS spécifique en €/kg de DCO éliminée fonction de la charge organique traitée et donc potentiellement élevé si la station traite beaucoup d'eau parasite.

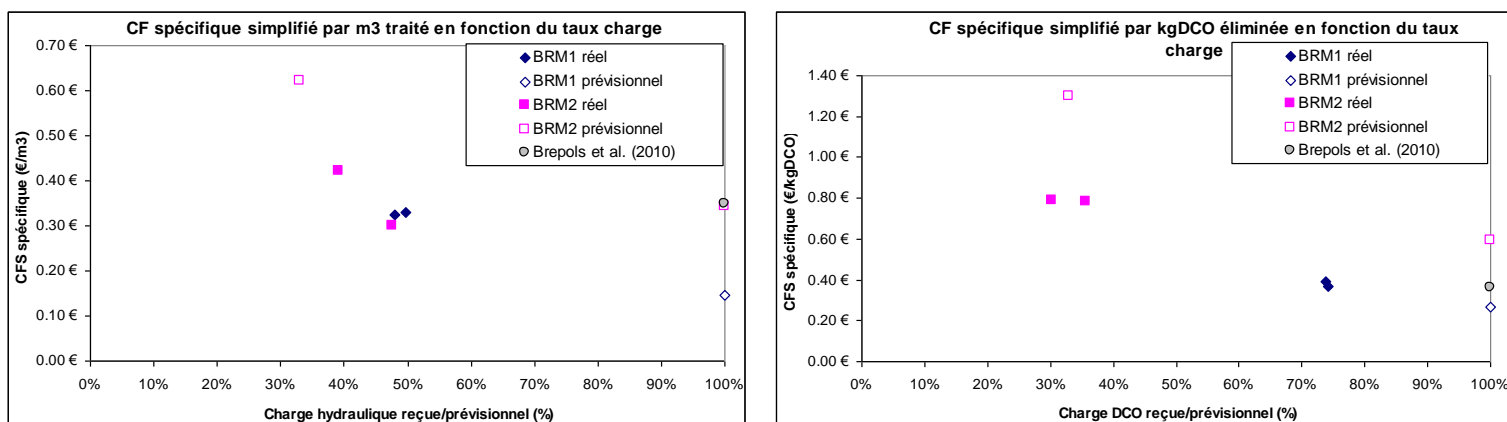


Figure 18 : CFS spécifique en fonction du volume traité et de la DCO éliminée

Quand le BRM1 fonctionne à environ 30-40% de charge organique, le BRM2 fonctionne environ à 75% de charge avec un CFS divisé par deux.

La tendance décroissante n'est cependant probablement pas linéaire mais plutôt de type exponentiel. Un ajustement n'a pas été effectué sur ces deux seuls groupes de points. Ainsi il est difficile d'extrapoler les CFS spécifiques à une charge de 100% et de les comparer aux valeurs prévisionnelles. La seule valeur de la bibliographie se situe cependant entre les valeurs prévisionnelles des deux installations étudiées.

5.2.2. Comparaison BA et BRM (bibliographie)

En l'absence de données exploitables sur les CFS de BA sur le bassin Adour Garonne, les données de la bibliographie permettent d'apporter des éléments de comparaison entre BRM et boues activées avec traitement tertiaire.

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 (cf Tableau 2).

Tableau 2 : CFS calculés à partir de données de la bibliographie

Brepols et al. (2010)	BA+Affinage						BRM					
	Euros	%	€/m3	€/kg DCO	€/kgDB05	€/EH	Euros	%	€/m3	€/kg DCO	€/kgDB05	€/EH
Evacuation des déchets	25 664 €	17%	0,05 €	0,05 €	0,12 €	0,007 €	25 664 €	13%	0,05 €	0,05 €	0,12 €	0,007 €
Réactifs	11 008 €	7%	0,02 €	0,02 €	0,05 €	0,003 €	12 860 €	7%	0,02 €	0,02 €	0,06 €	0,004 €
Personnel	70 000 €	46%	0,13 €	0,13 €	0,32 €	0,019 €	70 000 €	37%	0,13 €	0,13 €	0,32 €	0,019 €
Energie	45 990 €	30%	0,08 €	0,09 €	0,21 €	0,013 €	82 782 €	43%	0,15 €	0,16 €	0,38 €	0,023 €
CF simplifié	152 662 €		0,28 €	0,29 €	0,70 €	0,042 €	191 306 €		0,35 €	0,36 €	0,87 €	0,052 €
Maintenance et renouvellement	96 411 €	63%	0,18 €	0,18 €	0,44 €		96 420 €	50%	0,18 €	0,18 €	0,44 €	
CF total	249 073 €		0,45 €	0,47 €	1,14 €		287 726 €		0,53 €	0,54 €	1,31 €	

Dans le détail, la répartition par poste en Figure 19 permet de mettre en évidence les éléments qui différencient les deux procédés : les coûts d'exploitation du BRM sont plus élevés de 17% en ce qui concerne le poste réactifs (réactifs de nettoyage des membranes) et de 80% pour le poste énergie (aération de décolmatage).

Pour un BRM, l'énergie est le premier poste de dépenses lorsque la station fonctionne à 100% de sa charge nominale. Ensuite vient le poste personnel, puis évacuation des déchets et réactifs.

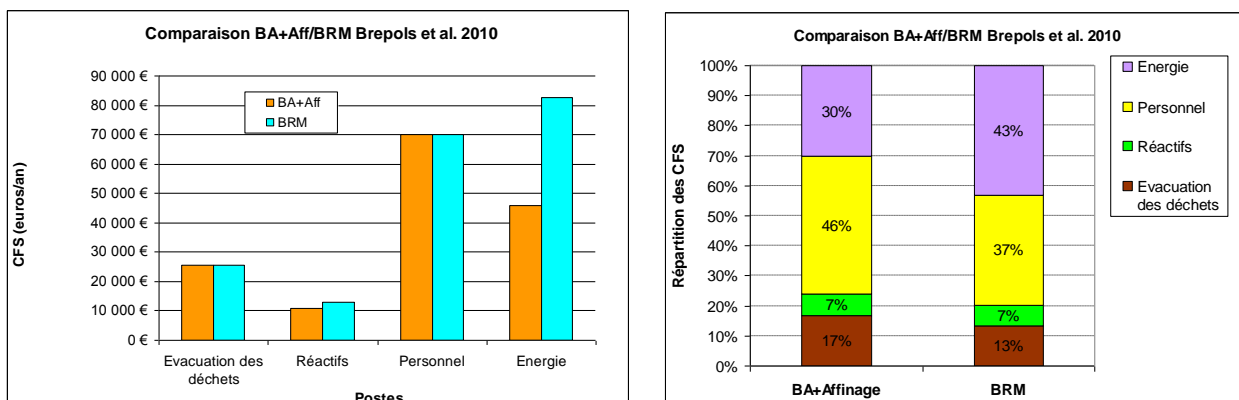


Figure 19 : Comparaison des CFS annuels d'un BA et d'un BRM de la bibliographie

Au final, les deux BRM étudiés en Adour Garonne sont comparés avec les données de la biblio dans la Figure 20. Ces deux stations sont actuellement sous chargées ; avec l'augmentation de la charge, on peut s'attendre à une augmentation de la consommation énergétique et une diminution en proportion de la part personnel. Les différences constatées sur le poste évacuation des déchets sont liées à la file boues et à la destination retenue pour l'élimination des boues.

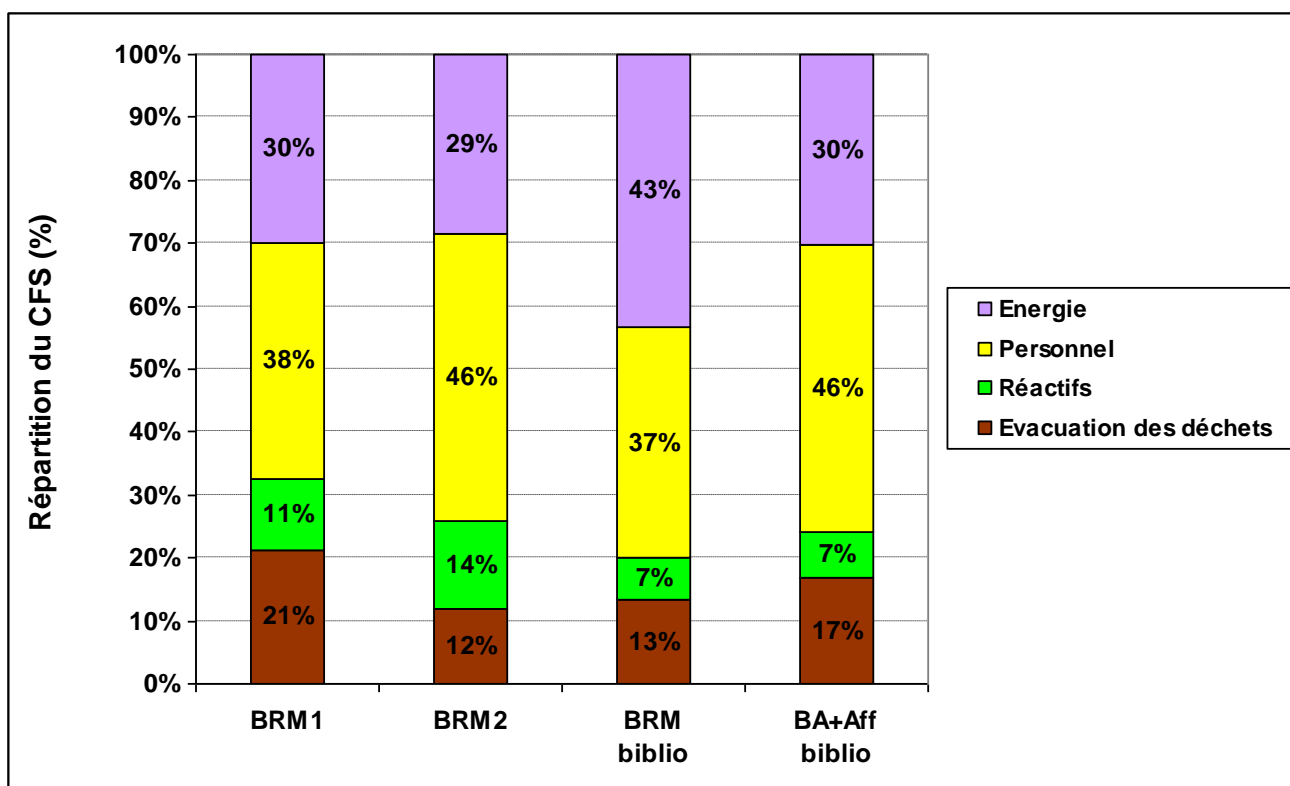


Figure 20 : Comparaison des CFS annuels des deux BRM étudiés sur Adour Garonne avec les données biblio

6. CONCLUSION

L'analyse détaillée ces dernières années du fonctionnement de plusieurs bioréacteurs à membranes (BRM) traitant des eaux usées urbaines a permis de dresser un premier bilan du dimensionnement et du fonctionnement réel de ce type d'installations.

Le développement en France de cette technologie pour le traitement des eaux résiduaires urbaines est encore relativement récent, moins de 10 ans, et les installations ont été largement dimensionnées pour prendre en compte le développement futur des collectivités.

Les BRM étudiés ont un taux de charge organique assez faible, 50 % voire moins, qui couplé à des concentrations de boue assez élevées, a pour conséquence d'entraîner des âges de boues importants. Cette situation est représentative du parc de BRM français traitant des eaux usées urbaines. Les concentrations de boue appliquées en fonctionnement ont cependant été réduites par rapport aux valeurs de dimensionnement, notamment pour limiter la baisse de transfert d'oxygène aux concentrations de boue élevées. Les concentrations d'exploitation sont désormais dans la gamme 6 à 9 g/L dans le bassin d'aération soit environ 7,5 à 11 g/L dans les cellules membranaires compte tenu de la recirculation.

Les productions de boue sont conformes à celles d'une boue activée fonctionnant au même âge de boue.

Les procédés dominants en traitement des eaux usées urbaines sont les systèmes à membranes immergées dans des cellules séparées. Le type de membranes utilisé est déterminant dans l'approche du dimensionnement et conduit à des ratios différents dans la répartition des volumes de réacteurs. La densité des membranes étant très différente entre les fibres et les plaques, le volume des cellules membranaires est plus important dans le dernier cas, donnant à ces bassins un rôle notable dans le traitement biologique global. Les volumes d'air par surface de membrane (SADm) sont plus importants avec les systèmes à plaques mais la contribution à l'oxygénation totale y est aussi plus importante du fait d'une hauteur d'eau supérieure, avec plus de 50% de l'apport d'oxygène global.

Les BRM fournissent des eaux traitées de très bonne qualité ne comportant aucune matière en suspension et des DCO en moyenne inférieures à 30 mg/L. L'aération des cellules membranaires, d'autant plus importante que le volume à filtrer est élevé, peut rendre la dénitrification plus difficile à conduire que sur une boue activée conventionnelle.

La qualité et la fiabilité du tamisage reste un élément essentiel du bon fonctionnement des BRM sur le long terme et les dispositifs à maille ronde sont recommandés car plus efficaces pour arrêter les fibres. Le doublement de ce prétraitement est essentiel pour la sécurité des membranes.

Il est impératif de maîtriser la charge hydraulique admise sur un BRM pour éviter des erreurs de dimensionnement de la surface membranaires. Si les eaux traitées par un BRM sont d'excellente qualité, il est en effet difficilement acceptable que l'installation soit by-passée en cas de fortes pluies. Un diagnostic réseau et si nécessaire un programme de réhabilitation du réseau devraient impérativement appuyer le choix d'un BRM.

La filtration est gérée avec des marges de sécurité importantes. Avec les fibres, les rétrolavages et les lavages de maintenance apportent une assez grande stabilité des valeurs de perméabilité sur le long terme. Dans le cas des plaques où les rétrolavages sont absents et remplacés par des phases de relaxation, la perméabilité décroît régulièrement et c'est le lavage de régénération qui permettra de retrouver la perméabilité initiale. Pour les deux technologies membranaires la bonne réalisation par l'exploitant de cette opération de lavage de régénération est particulièrement importante.

L'aération est un point clef dans les BRM et la concentration en boue choisie pour le fonctionnement reste une question essentielle dans l'optimisation énergétique du procédé. En effet 50 à 60% de l'énergie consommée provient de l'aération dont environ la moitié pour l'aération des membranes. La sous-charge des installations devrait tendre à faire réduire les concentrations de boue en exploitation de façon à optimiser le transfert d'oxygène. Cette orientation semble clairement prise pour les BRM à fibres creuses mais ne paraît pas envisagée dans les mêmes proportions avec des plaques.

Les tendances actuelles vont vers une réduction de l'air membrane en jouant sur la durée des cycles d'aération et la régulation du débit d'air (membranes à fibres). Pour les membranes planes les constructeurs tendent à augmenter la densité des éléments de filtration de façon à réduire les débits d'air par unité de surface et obtenir ainsi un effet de cisaillement par les grosses bulles à moindre coût énergétique.

En zone de montagne, le traitement de l'azote et la filtration sont impactés par les basses températures, qui doivent être prises en compte pour le dimensionnement du BRM. Cependant, la compacité des installations autorise la couverture de la station limitant ainsi le refroidissement des boues.

Au dessus de 8 000 EH, les coûts d'investissement du procédé BRM sont très proches des stations à boues activées classiques ; les coûts d'exploitation restent quant à eux plus élevés en grande partie en raison d'une consommation énergétique plus importante.

En conclusion, le procédé bioréacteur à membrane permet l'obtention de rejets de haute qualité mais demeure un procédé complexe exigeant une bonne formation des exploitants et une capacité d'intervention rapide sur les automatismes. L'usage de cette technique nécessite une bonne connaissance, préalable à la construction, des volumes à traiter et une réduction des eaux parasites pour maintenir son intérêt économique et les avantages de son traitement poussé pour les milieux sensibles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADHAM S., GAGLIARDO P., BOULOS L., OPPENHEIMER J. & TRUSSELL R. (2001). Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation, *Water Science and Technology*, vol. 43, p. 203-209.
- ALEXANDRE O. (2006). Stations d'épuration des petites collectivités : Méthodologie et analyse des coûts d'investissement et d'exploitation par unité fonctionnelle, Cemagref.
- BREPOLS, C., SCHAEFER, H. & ENGELHARDT, N. (2010). Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications. *Water Science and Technology*, vol. 61, p. 2461-2468.
- CÔTÉ P., MASINI M. & MOURATO D. (2004). Comparison of membrane options for water reuse and reclamation, *Desalination and Water Treatment*, vol. 167, p. 1-11.
- DECAROLIS, J. (2004). Cost analysis of MBR systems for water reclamation, WEFTEC® 2004. Canada.
- DOLD P. (2007) Quantifying sludge production in municipal treatment plants, In: Proceedings of the 80th Annual Technical Exhibition and Conference (WEFTEC.07), San Diego, CA, USA, 13-17 October 2007.
- LESJEAN B., FERRE V., VONGHIA E., MOESLANG H. (2009). Market and design considerations of the 37 larger MBR plants in Europe, *Desalination and Water Treatment*, vol. 6, Issue 1-3, p. 227-233.
- RACAULT Y., STRICKER A-E., HUSSON. A., AND GILLOT S. (2011) Monitoring the variations of OTR in a full scale membrane bioreactor using daily mass balances, *Water Science and Technology*, vol. 63, n° 11, p. 2651-2657.
- SENECHAL M. (2012). Analyse technico-économique comparative des procédés de traitement poussé des eaux usées : bioréacteurs à membranes/procédés tertiaires. Rapport de stage de Master 2 Mention Ingénierie chimique et agro-alimentaire spécialité : Bioprocédés et Biotechnologies Marines, Université de Nantes, 54 p.

ANNEXE

ANNEXE : METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DES COUTS

La méthodologie utilisée dans cette étude est celle d'une analyse de coûts financiers. C'est-à-dire qu'elle ne prend pas en compte de plan de financement (amortissement...), ni les impacts environnementaux ou sociaux liés au procédé étudié. Elle consiste à comparer des CI et CF entre plusieurs installations à l'aide d'indicateurs (coûts spécifiques...)

1. COUTS D'INVESTISSEMENT

L'investissement correspond au montant dont le maître d'ouvrage doit s'acquitter afin de financer les travaux de construction ou de réhabilitation d'une station d'épuration. Nous avons choisi d'inclure dans le CI, les coûts de génie civil (GC), les coûts liés à l'équipement de la filière de traitement mis en place, les coûts liés à préparation du chantier ainsi qu'au démarrage de la station. A l'inverse nous avons décidé de ne pas prendre en compte dans notre estimation, les coûts des études réalisées par le maître d'ouvrage ainsi que les coûts liés à l'achat du terrain.

Les coûts d'investissement fournis par les dossiers de réponse aux marchés publics ne comprennent pas de TVA ni d'autre taxes, ils sont tous exprimés HT.

1.1. Sources de données

Les différentes sources de données peuvent être réparties en fonction des approches utilisées :

- Approche statistique :

La première et la plus importante provient de la base de données de l'AEAG. Dans cette base l'Agence répertorie toutes les installations qu'elle a financées. Un tri a été réalisé par l'AEAG afin que nous ayons accès aux installations comprenant des procédés de boues activées classiques et des BRM sur une période de 6 ans (2007-2012).

Cette base de données contient les informations suivantes (Localisation, type de procédé, équipement, capacité hydraulique, capacité organique, investissement, le type de travaux, et la date de session). Nous avons donc eu accès à deux bases de données de l'agence, « BA AEAG » et « BRM AEAG ». (cf Tableau 3)

Tableau 3 : Nombre de valeurs dans les bases de données

	Nombre d'installations
BA AEAG	289
BA BRM	11

Par la suite un second tri a eu lieu sur ce que nous avons appelé les types de construction. Cela comprend trois catégories :

- Constructions,
- Réhabilitations,
- Autres.

Les données entrant dans la catégorie Autres ont été exclues. Enfin les valeurs extrêmes ont été supprimées afin de limiter leur influence sur le jeu de données.

Une sélection a été effectuée sur la base de données BA AEAG. En effet afin de comparer les BA et les BRM présents sur le territoire de l'AEAG, la base de données BA AEAG a été réduite. Nous avons limité l'amplitude de la base en la limitant à 20000 EH, ce qui correspond à la capacité nominale maximum des BRM étudiés.

La base de données « BA AEAG » compte, au final, 174 données. 115 boues activées ont été écartées afin de pouvoir comparer les bases « BA AEAG » et « BRM AEAG ».

- Approche « entreprise » :

Une autre source de données est les dossiers de réponses aux marchés publics. Les maîtres d'ouvrages nous ont permis d'étudier ces dossiers pour certains BRM existant sur le bassin Adour Garonne. Nous avons ainsi eu accès aux données de six BRM du bassin Adour Garonne

- Approche bibliographique :

Le reste des données exploitées provient de la bibliographie. En effet des études similaires ont été réalisées dans d'autres régions françaises et dans d'autres pays d'Europe, ce qui nous permet de comparer les méthodologies et les données récoltées entre les différentes études.

1.2. Actualisation des coûts.

Les CI étudiés lors de cette étude ont été actualisés au 1^{er} janvier 2012, afin de pouvoir être comparés entre eux et ainsi garder une homogénéité et une cohérence dans notre étude technico-économique. Le SNITER (Syndicat National des Industries des Eaux Résiduaires) propose des formules d'actualisation des CI. En effet il faut distinguer deux formules :

Une première formule concerne l'actualisation des coûts de la partie génie civil :

$$CIn = CIo \left[0.125 + 0.875 \left(0.20 \left(\frac{BT01n}{BT01o} \right) + 0.080 \left(\frac{TP02n}{TP02o} \right) \right) \right]$$

Avec :

CIn : Le coût d'investissement actualisé à l'année n.

CIo : Le coût d'investissement initial.

Cette formule se base sur des index BT01 et TP02, qui sont respectivement :

- L'indice « tous corps d'état » (index nationaux de prix du bâtiment, série 100 en janvier 1974); cet indice composite, reflète l'évolution des prix de bâtiments (second œuvre).
- Et l'index « Ouvrages d'art en site terrestre, fluvial ou maritime et fondations spéciales ».

La seconde formule concerne l'actualisation des coûts de la partie équipement et réalisation des travaux (hors génie civil) :

$$CIn = CIo \left[0.125 + 0.875 \left(0.20 \left(\frac{ICHT - IMEn}{ICHT - IMEo} \right) + 0.35 \left(\frac{BT47n}{BT47o} \right) + 0.15 \left(\frac{F241001n}{F241001o} \right) + 0.10 \left(\frac{244200n}{244200o} \right) + 0.20 \left(\frac{281200n}{281200o} \right) \right) \right]$$

Elle s'appuie sur plusieurs indices :

- ICHT-IME : Indice de coût horaire du travail, Industries Mécaniques et Electriques,
- BT47 : Indice Bâtiment électricité,
- F241001 : Indice Produits en acier inoxydable,
- 244200 : Indice Aluminium et demi-produits en Aluminium,
- 281200 : Indice équipements hydrauliques et pneumatiques.

Alexandre (2006) a utilisé dans son étude une formule d'actualisation des coûts d'investissement fondée sur l'indice TP 01 seul.

$$CIn = CIo \left[0.125 + 0.875 \left(\frac{TP01n}{TP01o} \right) \right]$$

Cependant cette étude était limitée aux petites stations de capacité inférieure à 3000 équivalents-habitants. Cela comprend essentiellement des procédés extensifs avec peu d'équipements.

Afin de déterminer quelle formule est la plus pertinente pour actualiser les coûts qui seront utilisés dans cette étude, nous avons comparé leur évolution sur une période de cinq ans, qui correspond à la période de la base de données de l'AEAG. De plus certains indices utilisés dans les formules d'actualisation ne sont pas définis avant 2007.

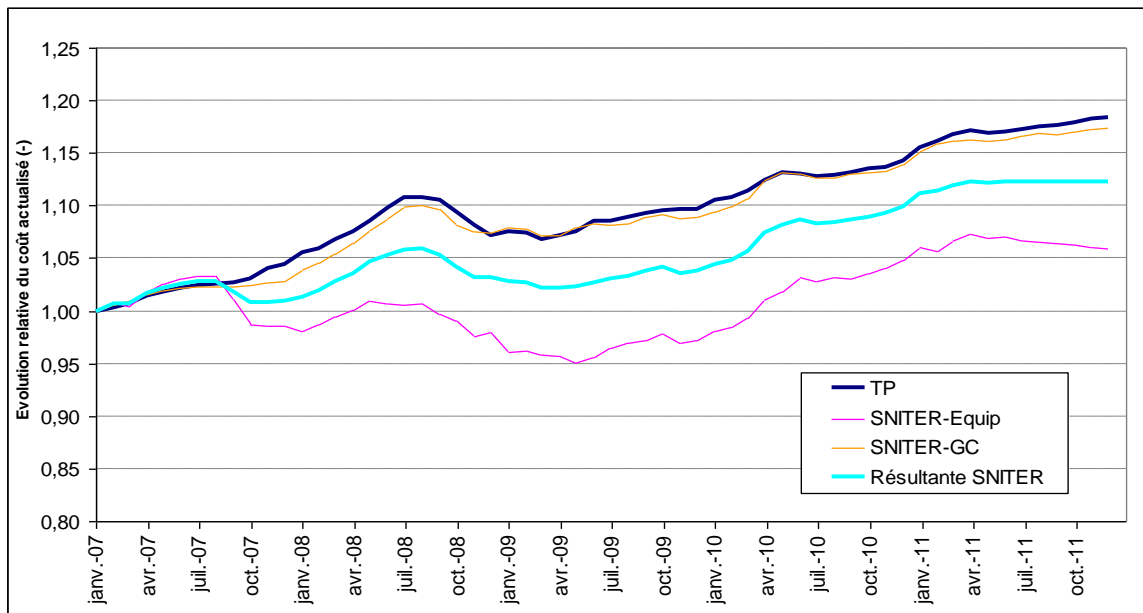


Figure 21 : Evolution des différentes formules d'actualisation des coûts d'investissement à partir d'une valeur unitaire en janvier 2007

Les deux formules SNITER ont été réunies pour former la résultante SNITER qui prend en compte les coûts de génie civil et d'équipements. Un facteur de pondération a été appliqué à chacune des deux formules SNITER et ce dans le but d'estimer au mieux l'actualisation des coûts liée aux procédés étudiés (BRM, SBR et boues activées classiques).

Afin d'actualiser les CI des différentes bases de données (AEAG, dossiers de marché, bibliographie...), la formule « résultante SNITER » a été utilisée. Il faut cependant distinguer deux cas :

- Lors de l'approche « entreprise » nous avons eu accès aux dossiers de marché et ainsi à la répartition entre le génie civil et l'équipement. Dans ce cas, les coûts ont été actualisés avec cette répartition.
- Lors de l'approche statistique nous avons eu à notre disposition seulement le coût global des installations. Nous avons alors estimé une répartition moyenne par poste sur chaque procédé à partir des données des dossiers de marché (cf Tableau 4).

1.3. Décomposition du coût d'investissement.

Les coûts d'investissement ont été découpés de deux façons différentes : par types de travaux (génie civil et équipements) et par grands postes (file eau, file boue, postes généraux). Cela permet de calculer et comparer la répartition des coûts spécifiques en fonction de ces postes pour chaque cas étudiés.

Tableau 4 : Tableau de répartition Génie Civil/Equipements

	BRM		SBR		BA		Tous procédés	
	GC	Equip	GC	Equip	GC	Equip	GC	Equip
BRM1	54%	46%			66%	34%		
					58%	42%		
					59%	41%		
					61%	39%		
					50%	50%		
<i>BRM2</i>	40%	60%						
BRM3	55%	45%	57%	43%				
			56%	44%				
<i>BRM4</i>	35%	65%			44%	56%		
BRM5	49%	51%						
BRM6	42%	58%						
Moyenne globale	46%	54%	57%	44%	56%	44%	52%	48%
Moyenne retenue	50%	50%	57%	44%	61%	39%	56%	44%

Le tableau ci-dessus expose la répartition de chaque site étudié. Certains sites ont reçu plusieurs propositions lors des réponses aux appels d'offres c'est pour cela que plusieurs répartitions sont indiquées. Les cas en italique sont considérés sont des réhabilitations. Certains ouvrages hydrauliques ont été conservés pour être réutilisés comme bassin tampon, ce qui a permis de faire des économies sur la partie génie civil. Ces cas ont été exclus de la « moyenne retenue ».

Le Tableau 4 montre que la répartition GC/Equip n'est pas similaire pour les deux procédés de traitement BA et BRM. En effet pour une BA il faut plus de GC que pour un BRM, cela est dû à la configuration des BRM immergés intégrés. De plus la membrane remplace physiquement le clarificateur d'une BA, cela fait économiser la construction d'un ouvrage hydraulique. Cependant les BRM demandent plus d'équipement que les BA, en raison de la présence des membranes et des équipements auxiliaires à la filtration (surpresseurs, vannes, pompes, tuyauterie, ...).

1.4. Calcul des coûts spécifiques

Nous avons calculé des coûts spécifiques à partir des CI et des caractéristiques nominales des installations. Ces coûts sont des indicateurs permettant de comparer les différents sites étudiés entre eux. Cette étape est importante car elle permet par exemple d'éliminer l'influence de la capacité de l'installation sachant que les CI sont fortement influencés par cette dernière. Nous avons donc calculé pour chaque cas étudié les indicateurs suivants (à partir des coûts actualisés en 2012) :

Tableau 5 : Indicateurs Coûts d'investissement

<i>Indicateurs CI</i>
€/EH
€/m ³ /j débit moyen
€/m ³ /h débit de pointe

2. COUTS DE FONCTIONNEMENT.

2.1. Sources de données.

Récolter des données sur le fonctionnement des installations d'épuration n'est pas une chose aisée. Il faut en effet passer par les exploitants pour obtenir des informations sur le fonctionnement des stations.

Pour récolter efficacement ces données et pouvoir comparer les sites entre eux, nous nous sommes inspirés du modèle SNITER pour créer un bilan d'exploitation. Le fichier vierge ainsi créé a été envoyé aux exploitants des sites étudiés.

Les bilans d'exploitation présents dans les réponses aux appels d'offres fournies par les maîtres d'ouvrages ont également été utilisés à des fins de comparaison.

Ainsi nous avons obtenu les données de fonctionnement de deux sites réels du bassin Adour Garonne (noté BRM1 et BRM2), sur une période de deux années (2010 et 2011). A cela nous avons ajouté les bilans prévisionnels de ces deux sites qui étaient disponibles dans les dossiers de réponses d'appels d'offres.

2.2. Calcul et décomposition des coûts.

Nous avons identifié les grands postes correspondant aux coûts d'exploitation les plus importants. Ainsi il faut distinguer les postes suivants :

- L'évacuation des sous-produits (refus de tamisage, boues...),
- Les réactifs (consommation de sels métalliques, polymères...),
- Le personnel (agent d'exploitation...),
- Les utilités (eau, électricité...),
- La maintenance,
- Le renouvellement,
- Les autres dépenses (analyses...).

Les coûts de fonctionnement ont été calculés à partir des données récupérées auprès des exploitants et maîtres d'ouvrages des sites étudiés. Afin de pouvoir comparer les données reçues entre elles et ne pas être influencé par les coûts propres à chaque exploitant, nous avons déterminé un coût unique unitaire pour chaque fourniture. Ce coût unitaire a été déterminé à partir de devis de fournisseurs, des tarifs EDF et de données fournies par les exploitants (cf Tableau 6).

Tableau 6 : Coûts unitaires unifiés

	Coût unifié
	2012
<i>Personnel (€ chargé/h)</i>	
Chef d'exploitation	
Agent d'exploitation	32
Electricien	35
Mécanicien	32
Chimiste	
<i>Utilités</i>	
Electricité (€/kWh) HT	0,0664
Eau (€/m ³) HT	
<i>Réactifs (€ HT/t)</i>	
FeCl ₃	150
Hypochlorite de sodium (47/50°, 12,5% Cl actif)	270
Acide chlorhydrique (33-35%)	220
Acide citrique	1310
Polymère	2000
Chaux	120
Charbon Actif (€/m ³)	
<i>Evacuation des déchets (€/t)HT</i>	
Refus de tamisage	35
Boues	40

Après avoir recalculé le bilan de fonctionnement de chaque site sur les deux années avec ces coûts unitaires uniques, nous avons créé et calculé des indicateurs de CF. Cela nous a permis de comparer les sites entre eux malgré leurs différences (charge hydraulique ou organique, capacité...). Ces indicateurs sont illustrés par le Tableau 7.

Tableau 7 : Indicateurs Coûts de Fonctionnement (CF)

<i>Indicateurs CF</i>
<i>Indicateurs financiers</i>
€/m ³ d'eau traitée
€/KgDCO éliminée
€/KgDBO5 éliminée
€/EH reçu
<i>Indicateurs énergie</i>
kWh/m ³ d'eau traitée
kWh/KgDCO éliminée
kWh/KgDBO5 éliminée
kWh/EH reçu
<i>Indicateurs de production de boue</i>
KgMS/m ³ d'eau traitée
KgMS/KgDCO éliminée
KgMS/KgDBO5 éliminée
KgMS/EH reçu
<i>Indicateurs réactifs</i>
Kg/m ³ d'eau traitée
Kg/KgDCO éliminée
Kg/KgDBO5 éliminée
Kg/EH reçu

En s'appuyant sur les données que nous avons récupérées auprès des exploitants et des maîtres d'ouvrages nous avons préparé des graphiques montrant l'évolution des deux BRM. Afin de pouvoir comparer les sites entre eux nous avons choisi d'exclure dans notre décomposition des CF les postes de maintenance, de renouvellement et de dépenses diverses. En, effet ces données sont souvent incomplètes. Ainsi nos calculs sont basés sur un sous total que nous avons appelé Coûts de Fonctionnement Simplifié (CFS).

Tableau 8 : Coûts de Fonctionnement des BRM

	BRM1				BRM2				
	2010	2011	Delta 2011/2010	Prévisionnel 100%	2010	2011	Delta 2011/2010	Prévisionnel 33%	Prévisionnel 100%
Evacuation des déchets	38 018 €	36 032 €	-5%	45 527 €	7 020 €	10 980 €	56%	6 571 €	27 234 €
Réactifs	19 794 €	19 599 €	-1%	27 494 €	7 017 €	14 020 €	100%	8 644 €	18 824 €
Personnel	65 766 €	65 294 €	-1%	25 953 €	34 403 €	34 403 €	0%	51 344 €	59 057 €
Energie	56 048 €	48 840 €	-13%	60 491 €	21 762 €	21 490 €	-1%	34 072 €	62 861 €
CF simplifié	179 625 €	169 766 €	-5%	159 465 €	70 201 €	80 893 €	15%	100 630 €	167 976 €
Maintenance	0 €	0 €			0 €	0 €		4 000 €	4 000 €
Renouvellement	5 826 €	0 €			0 €	0 €		22 481 €	44 962 €
Autres dépenses	0 €	3 268 €						2 700 €	2 700 €
Cf total	185 451 €	173 033 €	-7%	159 465 €	70 201 €	80 893 €	15%	129 811 €	219 638 €

Le Tableau 8 montre le manque de données disponibles pour ces trois postes. Les valeurs nulles représentent une absence de dépense. Les cases grisées marquent l'absence de données. L'absence de dépenses de renouvellement est lié au fait que les deux sites étudiés sont récents et encore couverts par les périodes de garanties du constructeur ou des fournisseurs. La ligne du tableau surlignée en vert montre le sous total sur lequel nos calculs sont basés.

Tableau 9 : Estimation des coûts de maintenance et de renouvellement

Taux	Maintenance et renouvellement théoriques							
	Valeur Equipements selon marché	1 627 606 €				1 474 369 €		
1,5%	Maintenance selon SNITER	24 414 €	24 414 €	24 414 €	22 116 €	22 116 €	22 116 €	22 116 €
3,5%	Renouvellement selon SNITER	56 966 €	56 966 €	56 966 €	51 603 €	51 603 €	51 603 €	51 603 €
5,0%	Total maintenance+renouvellement théorique	81 380 €	81 380 €	81 380 €	73 718 €	73 718 €	73 718 €	73 718 €
	% coût ignoré (par rapport à coût simplifié)	45%	48%	63%	105%	91%	73%	44%

Il est néanmoins possible d'estimer les coûts des postes de maintenances et de renouvellement grâce à un modèle de bilan d'exploitation crée par le SNITER. Ainsi le SNITER estime que le coût annuel de la maintenance d'une installation d'épuration correspond à 1,5% du coût d'investissement des équipements du procédé. Concernant le renouvellement, la même méthode est préconisée par le SNITER à la différence que le coût annuel de ce poste revient à 3,5% de l'équipement (cf Tableau 9).

Ainsi il est possible de faire le total de ces deux postes et estimer la proportion que nous négligeons dans notre étude (cf Tableau 9). Cela représente 50 à 100% du coût de fonctionnement simplifié. Cependant il s'agit là de coûts théoriques lissés sur la durée de vie de l'installation. En réalité, ces coûts sont distribués de manière aléatoire selon les pannes. Ils sont globalement faibles pour une installation récente et ont tendance à augmenter avec son âge.

Titre : Bioréacteurs à membrane pour le traitement des eaux résiduaires urbaines, retours d'expérience

Résumé : Le procédé bioréacteur à membranes (BRM) connaît ces dernières années une forte croissance en Europe et en France pour le traitement des eaux usées urbaines. Irstea a eu l'opportunité de réaliser depuis 2005 des suivis sur le long terme de différents types de BRM, à fibres creuses et membranes planes. De cette expérience sont synthétisés les points clés du dimensionnement et de l'exploitation des BRM par rapport à une boue activée classique (BA).

Des éléments de comparaison des coûts d'investissement et de fonctionnement entre BRM et BA sont donnés sur la base à la fois de données du bassin Adour Garonne et de la bibliographie.

Mots clés : Bioréacteur à membranes, BRM, eau résiduaire urbaine, conception, exploitation, coûts, recommandations

Title : Membrane bioreactor for the treatment of municipal wastewater, feedback from the field

Abstract : The membrane bioreactor process (MBR) has been expanding significantly in Europe and in France in the last years for the treatment of municipal wastewater. Irstea has had the opportunity to monitor MBR plants with hollow fibre and flat sheet membranes for several months each since 2005. Based on this experience, the key points in MBR design and operation as well as data on capital and operational expenses are summarized, and the main differences with the activated sludge process are highlighted.

Keywords: Membrane bioreactor, MBR, municipal wastewater, design, operation, cost, technical advice

Irstea – centre de Bordeaux
Unité de recherche Réseaux, Epuration et Qualité des eaux
50, Avenue de Verdun
33612 Cestas Cedex
tél. +33 (0)557890800
fax +33 (0)557890801
www.irstea.fr