

Techniques à membranes appliquées à l'élimination des matières en suspension dans un circuit semi-fermé d'aquaculture

Membrane filtration of suspended solids in
a semi-closed aquafarming system

F. QUEMENEUR *¹, P. JAOUEN¹, J.-P. MALERLAT¹, J.-P. SCHLUMPF¹,
L. BON², E. LEBEGUE²

Reçu le 10 décembre 1999, accepté le 24 janvier 2001**.

SUMMARY

A problem confronting semi-closed circuit aquaculture is the need for continuous elimination of suspended matter (SM) and nitrogenous substances. Conventional processes used to retain SM (settling tanks, hydrocyclones, rotating-drum mechanical filters, gravity filtration) are not entirely satisfactory. However, membrane filtration has recently been shown to allow removal of suspended particles and bacteria. The present study evaluates the performance of different ultrafiltration and microfiltration membranes for water processing in a semi-closed aquaculture system. A brief economic analysis of treatment costs is proposed based on the results.

The marine aquafarm studied produces about 5 tons of turbot per year with a plant volume of about 100 m³. The water processing line is fitted with a rotating-drum mechanical filter that stops the largest particles and ejects 1 m³·h⁻¹ of loaded water into the surrounding environment. Another 2 m³·h⁻¹ are cleared out by overflowing the pumping pit. These volumes are renewed at a rate of 3% per hour by pumping saltwater from an underground source. Crossflow filtration was performed on rejections from both the mechanical filter and pumping pit overflow. SM contents and granulometric distributions determined by laser diffractometry were found to vary with sample source and withdrawal time, and size of fish in the ponds. A comparison of granulometric distributions in volume percent and numerical percent underscores the presence of a great number (> 98%) of submicron particles.

To limit the risk of mechanical-pore fouling due to blockage by particles, organic membranes in the form of internal-skin capillaries (pore diameters of about 10 to 20 nm) were initially employed. These membranes, used in

1. Laboratoire de génie des procédés (LGP) - Isomer, Centre de recherche et de transfert de technologie, boulevard de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire cedex, France.
2. Noirmoutier Aquaculture Techniques Avancées (NATA), Le bon port, BP 305, 85330 Noirmoutier, France.

* Correspondance. E-mail : francis.quemeneur@lgp.univ-nantes.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 janvier 2002.

drinking water production, are relatively inexpensive. The experimental device was fitted with an interchangeable volumetric pump (with gears or monoscrew). Adjustable parameters were transmembrane pressure and circulation velocity within the module. Analysis of the influence of these hydrodynamic parameters revealed that pressures higher than 1 bar were unnecessary, as beyond this point permeate flux no longer increased. Optimal flux did not exceed $100 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ with the gear pump. Replacing the latter with a monoscrew pump improved permeate flux up to 70%.

Tests were also performed with flat microfiltration organic membranes of polyvinylidene fluoride (PVDF) with pore diameters ranging from 0.1 to $8 \mu\text{m}$. The flux obtained with these membranes was roughly $250 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ and presented little variation with varying pore diameter. Comparative tests carried out on tubular membranes showed lower fluxes than those obtained with organic membranes which, considering their much higher cost, makes them less attractive in this context.

The use of membranes in aquafarming is without precedent. An economic analysis of the practice was carried out based on financial assessments of processing of surface waters into drinking water, for which outputs to be treated and SM contents were of the same order of magnitude. With operating costs from 0.35 to 0.95 FF per cubic meter of filtered water, expected investment for a fishfarm producing 100 tons of fish a year is currently 3 to 4 times too great to consider economically profitable the use of membranes for water treatment in closed-circuit aquafarming.

Key-words: *aquafarming, aquaculture, semi-closed circuit, suspended solid, membrane processes, ultrafiltration, microfiltration.*

RÉSUMÉ

Les piscicultures en circuits semi-fermés sont confrontées au problème de l'élimination permanente des matières en suspension (MES) et des substances azotées. Les procédés conventionnels utilisés pour retenir les MES (décantation, hydrocyclones, filtres mécaniques à tambour rotatif, filtration gravitaire) ne donnent par entière satisfaction. En revanche, la filtration sur membranes permet d'arrêter en totalité les particules en suspension et les bactéries.

On montre d'abord que les teneurs en MES et leurs répartitions granulométriques mesurées sur des échantillons prélevés en bassins d'aquaculture varient avec la taille des poissons et l'heure du prélèvement et on met en évidence la présence en nombre important de particules submicroniques.

Différents essais de filtration sur membranes sont ensuite présentés :

- d'une part, avec des membranes d'ultrafiltration capillaires à peau interne utilisées en potabilisation des eaux : on examine l'influence des paramètres hydrodynamiques (pression transmembranaire, vitesse de recirculation) afin de rechercher les conditions optimales de fonctionnement. Le flux de perméat ne dépasse pas dans le meilleur des cas $100 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$;
- d'autre part, avec des membranes de microfiltration organiques planes en fluorure de polyvinylidène (PVDF) et tubulaires en céramique. Les flux obtenus avec les membranes organiques sont de l'ordre de $250 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Dans tous les cas, la rétention des MES est totale.

Cependant l'estimation de l'investissement et des coûts de fonctionnement pour une pisciculture en circuit fermé de taille industrielle conduit à des prix trop élevés pour que l'utilisation des membranes dans ce domaine soit à ce jour économiquement envisageable.

Mots clefs : *aquaculture, circuits semi-fermés, matières en suspension, procédés à membrane, ultrafiltration, microfiltration.*

1 – INTRODUCTION

Les piscicultures en circuit semi-fermé connaissent depuis une vingtaine d'années un essor important. Elles présentent par rapport aux systèmes en circuit ouvert plusieurs avantages :

- une meilleure productivité grâce à un contrôle plus rigoureux des conditions d'élevage ;
- la possibilité, d'une part, de s'affranchir de nombreuses contraintes liées à l'espace (site, encombrement...) et à l'impact sur l'environnement (réduction des prélèvements d'eau dans le milieu) et, d'autre part, de minimiser les rejets (aliments non ingérés, fécès...) pouvant sédimenter dans le milieu récepteur et nuire à la faune avoisinante (COLLET, 1992) et d'économiser de l'énergie.

Cependant, avant d'être recyclée l'eau doit être traitée en permanence pour maintenir un niveau de qualité (teneur en matières en suspension – MES – et en matières azotées notamment) compatible avec une bonne croissance des poissons. Les procédés conventionnels d'élimination des matières en suspension (décantation, hydrocyclones, microtamisage rotatif, dégrillage sur tamis courbe, filtration gravitaire...) ne donnent pas entière satisfaction car ils ne permettent qu'une rétention partielle des matières en suspension (MAUREL, 1982 ; HENDERSON et BROMAGE, 1998 ; BLANCHETON et COVES, 1995) ou sont sujets à un colmatage en profondeur (LAMOTTE, 1992).

En revanche, des études préliminaires ont montré que les procédés de filtration sur membranes (microfiltration et ultrafiltration tangentielle) sont capables de retenir les MES et les bactéries (HUBICHE, 1994 ; VAN DEN BROUCKE, 1995). La rétention des matières azotées n'a pas été prise en compte dans ces études.

La présente étude a pour objectif de confirmer les premiers résultats obtenus et de rechercher les conditions opératoires (types de membranes, paramètres hydrodynamiques) conduisant aux meilleures performances possibles sur des eaux prélevées dans la ferme aquacole expérimentale du groupe ADRIEN à Noirmoutier (Vendée) qui produit de l'ordre de 5 tonnes/an de turbots. Les besoins en traitement d'eau de ce type de circuit augmentent évidemment avec la taille des installations. Signalons à ce propos la mise en route très récente (octobre 1999) dans les Côtes d'Armor par le Groupe ADRIEN de l'élevage Marinove d'une capacité de production de 100 tonnes/an.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1 Origine des eaux étudiées

L'installation de Noirmoutier, dont le schéma de principe est illustré par la *figure 1*, comporte 6 bassins d'élevage correspondant aux diverses étapes de la croissance du turbot et une chaîne de traitement de l'eau. Le volume total de l'eau dans l'installation est de 100 m³ environ, dont 72 m³ pour les bassins et 28 m³ dans la chaîne de traitement.

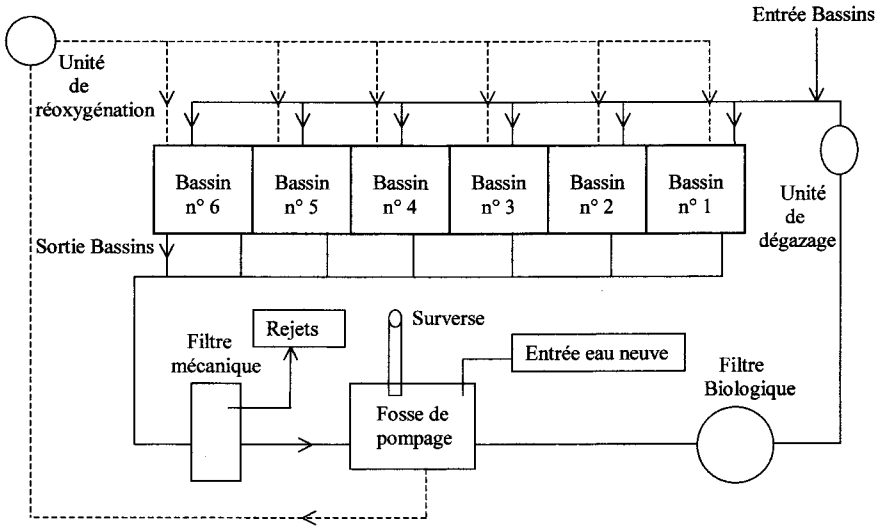


Figure 1 Schéma de principe du circuit semi-fermé de France-Turbot (Noirmoutier). Le circuit de réoxygénation est en pointillé.

Flowchart of semi-closed circuit of France-Turbot (Noirmoutier - France).

La chaîne de traitement de l'eau comporte un filtre mécanique à tambour rotatif qui arrête les particules les plus grosses et rejette $1 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau chargée dans le milieu naturel. $2 \text{ m}^3/\text{h}$ sont également évacués par surverse au-dessus de la fosse de pompage.

Ces rejets sont remplacés par de l'eau de forage en provenance d'une nappe souterraine salée avec un taux de renouvellement horaire de 3 %.

Le filtre biologique à lit fixé a pour but de réduire la teneur en matières azotées dans le circuit, mais il arrête également une partie des MES et son fonctionnement sera d'autant meilleur que la teneur en MES à l'entrée sera préalablement abaissée.

Les essais de filtration ont porté, d'une part, sur les rejets du filtre mécanique et, d'autre part, sur la surverse de la fosse de pompage dont la composition est proche de celle de l'eau arrivant au filtre biologique.

1.2 Analyses effectuées

- Les teneurs en matières en suspension (MES) ont été déterminées par filtration, dessiccation et pesées selon la norme Afnor NFT 90-105-1 (EN 872).
- Les répartitions granulométriques ont été obtenues par un granulomètre laser Mastersizer X (MALVERN, Orsay, France).

1.3 Membranes

Plusieurs types de membranes de nature, de géométrie et de dimensions de pore (ou de seuil de coupure) différents ont été mis en œuvre.

Le choix s'est d'abord porté sur des membranes organiques sous forme de capillaires à peau interne dont les caractéristiques sont regroupées dans le *tableau 1*. Ces membranes, utilisées pour la production d'eau potable, sont parmi les moins onéreuses du marché.

Tableau 1 Caractéristiques des membranes capillaires utilisées.

Table 1 Characteristics of capillary membranes.

Fabricant	AQUASOURCE	ENKA
Matériau	Acétate de cellulose	Polypropylène
Géométrie	Capillaires à peau interne	Capillaires à peau interne
Module	Nombre de fibres : 20	Nombre de fibres : 40
	Longueur : 25 cm	Longueur : 50 cm
	Aire filtrante : 150 cm ²	Aire filtrante : 0,1 m ²
	Diamètre interne : 0,93 mm	Diamètre interne : 1,8 mm
Perméabilité (eau à 20 °C)	Constructeur : 260 l·h ⁻¹ ·m ⁻² ·bar ⁻¹	Constructeur : 360 l·h ⁻¹ ·m ⁻² ·bar ⁻¹
	Mesurée : 220 l·h ⁻¹ ·m ⁻² ·bar ⁻¹	
Taille des pores	10 à 20 nanomètres	0,2 micromètre

Afin de pouvoir disposer d'une large gamme de seuils de coupure dans le domaine de la microfiltration (0,1 à 0,8 µm) et de l'ultrafiltration, des membranes organiques planes IRIS (RHODIA-ORELIS, 01 Miribel, France), montées dans le module PLEIADE Rayflow, ont été utilisées ainsi que des membranes minérales de microfiltration tubulaires de la série CERAM - Trèfle (TAMI-Industries, 26 Nyons, France) (*tableau 2*).

Tableau 2 Caractéristiques des membranes organiques planes et minérales tubulaires.

Table 2 Characteristics of PVDF flat organic membranes and tubular membranes.

Référence	Seuil de coupure ou diamètre de pores	Perméabilités à l'eau à 20 °C (l·h ⁻¹ ·m ⁻² ·bar ⁻¹)
IRIS 3065	40 kD	210
IRIS 6501	0,1 µm	1 100
IRIS 6502	0,2 µm	890
IRIS 6504	0,4 µm	1 700
IRIS 6508	0,8 µm	1 300
CERAM	0,14 µm	2 650
CERAM	0,20 µm	4 600
CERAM	0,45 µm	5 900
CERAM	0,80 µm	4 700

Le dispositif expérimental comporte une pompe volumétrique (à engrenages ou à vis selon les essais) qui assure la recirculation de l'eau à filtrer dans le module de filtration. Les paramètres réglables sont la pression transmembranaire et la vitesse tangentielle de circulation dans le module.

L'eau est préfiltrée à travers une crépine de mailles 450 μm avant l'étude sur pilote. Le système de rétrolavage mis en place lors des premiers essais sur fibres creuses s'étant révélé inefficace, le décolmatage des membranes a été assuré par nettoyage chimique : solution de soude à 4 g/l à 30 °C pendant 20 minutes pour les membranes organiques et acide nitrique à 1 % à 60 °C pendant 20 minutes puis soude à 2 % à 60 °C pendant 20 minutes pour les membranes minérales.

2 - RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1 Caractérisation des eaux à filtrer

Nous avons regroupé sur le *tableau 3* les taux de MES mesurés sur la surverse de la fosse de reprise et sur le rejet du filtre mécanique pour une série de prélèvements réalisés sur une période de 4 mois.

Tableau 3 Teneurs en matières en suspension dans les eaux étudiées (MES en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), circuit semi-fermé de Noirmoutier (Vendée) : valeurs moyennes sur 3 mesures.

Table 3 *Suspended matter in water studied (SM in $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in semi-closed circuit aquafarming in Noirmoutier (Vendée - France) : mean values (3 experiments).*

Période de prélèvement	Janvier	Février	Mars	Avril
Surverse	55 \pm 3	40 \pm 2	10 \pm 1	5 \pm 1
Rejet du filtre mécanique	240 \pm 30	155 \pm 5	77 \pm 3	98 \pm 6

Les teneurs en MES des rejets du filtre mécanique sont naturellement plus élevées que celles de l'eau de surverse. Elles varient considérablement dans le temps. Cette variation est liée, entre autres facteurs, à la biomasse présente dans les bassins. Ainsi les taux de MES élevés observés en janvier et février correspondent à une charge maximale en poissons de 6 tonnes environ ; un nouveau cycle de production étant mis en place en mars. Ces premières mesures ont permis de situer l'ordre de grandeur des taux de MES : quelques $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ à quelques dizaines de $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en surverse et entre 50 et 250 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ au niveau du rejet du filtre mécanique.

Les teneurs en MES dans les bassins d'élevage varient également au cours d'une période de 24 heures, du fait de l'introduction de l'aliment et des temps de repos (*figure 2*).

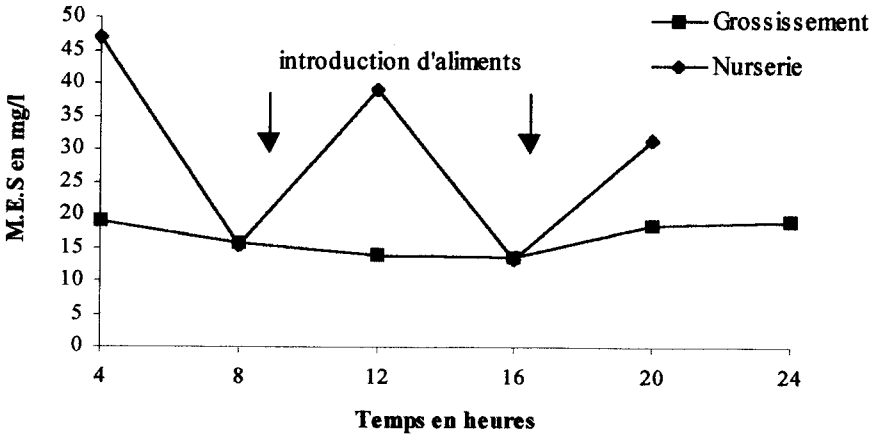


Figure 2 Variation au cours du temps du taux de MES circulant pour différents circuits fermés (Prélèvements réalisés sur le site de Marida – Côtes d’Armor en novembre 1996). La référence zéro pour l’échelle des temps est minuit.

Temporal variation in circulating SM ratios in different closed circuits.

En effet les prélèvements effectués dans deux circuits contenant des poissons à des stades de croissance différents (*tableau 4*) font apparaître en nurserie des teneurs en MES plus fluctuantes et globalement plus élevées qu’en bassin de grossissement. Cette évolution peut s’expliquer par le fait que les petits poissons mettent plus de temps à ingérer les aliments. La *figure 3* (répartition granulométrique des MES sur un échantillon prélevé à 12 heures dans les mêmes circuits) fournit un élément allant dans le même sens : en nurserie on note la présence d’une quantité importante de particules de taille supérieure à 200 µm, difficiles à avaler par les petits poissons. On peut noter par ailleurs qu’en proportion la quantité d’aliments est plus grande en nurserie qu’en bassin de grossissement (*tableau 4*).

Tableau 4 Charges en poisson et quantités d’aliment fournies dans deux circuits semi-fermés de Marida (Côtes d’Armor). Volume de chaque circuit : 50 m³.

Table 4 *Fish loads and feed amounts for two semi-closed circuits in Marida (Côtes d’Armor - France) (volume of each circuit: 50 m³).*

Type de circuit	Nurserie	Grossissement
Biomasse totale (kg)	780	2 091
Poids moyen par poisson (g)	22	63
Poids d’aliment introduit par repas (kg)	12	17

La répartition granulométrique en nombre montre que les petites particules (inférieures à 1,5 µm) sont beaucoup plus nombreuses que les particules de taille plus importante (*figure 4*) : environ 99 % des particules ont une dimension

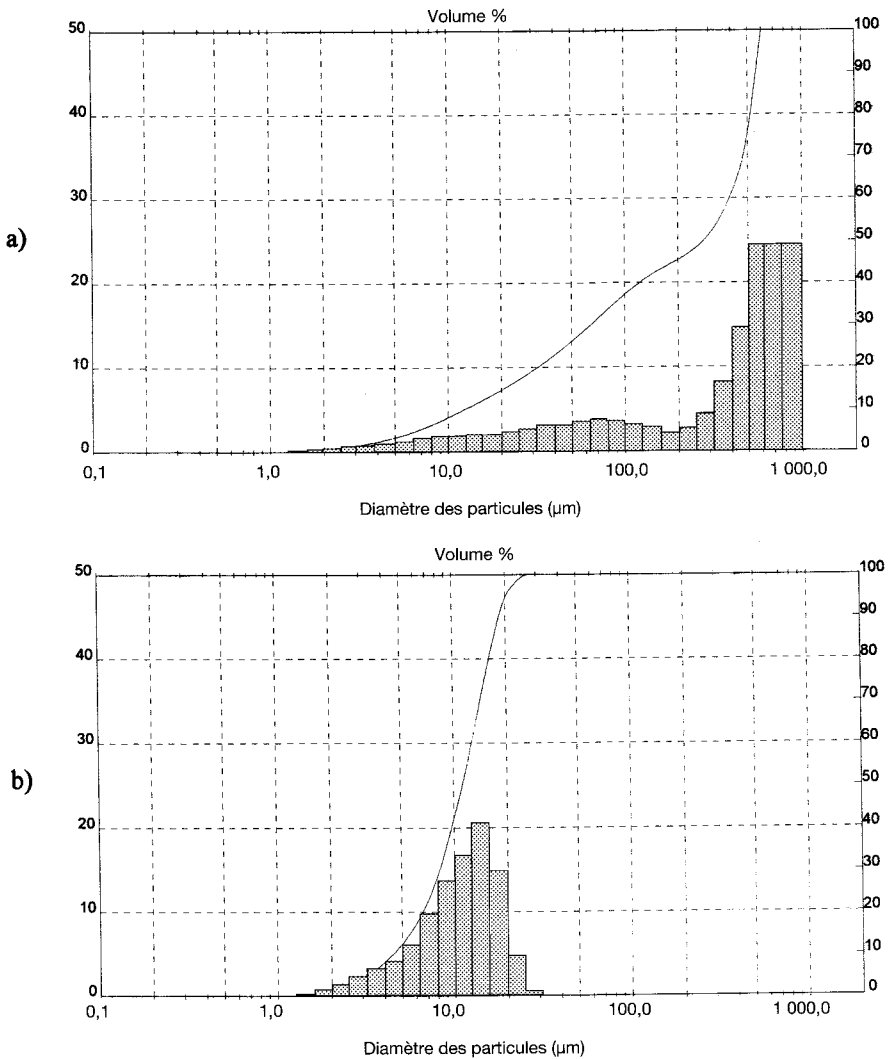


Figure 3 Répartitions granulométriques des MES, en % volume, dans deux échantillons d'eau prélevés dans deux bassins (a : nurserie ; b : grosissement) le 24 novembre 1997 à Marida (Côtes d'Armor). Teneurs globales en MES non déterminées.

SM granulometric distribution in two water samples from two basins (a: nursery, b: enlargement).

inférieure à $1,5 \mu\text{m}$ et n'occupent que 7 % du volume. La présence de particules de taille $\leq 1 \mu\text{m}$, de dimensions voisines de celles des pores des membranes de microfiltration, étant de nature à favoriser un colmatage interne rapide, il peut alors être préférable d'utiliser des membranes d'ultrafiltration qui permettent d'éviter la superposition des courbes de répartition des diamètres des pores de la membrane et des diamètres des particules.

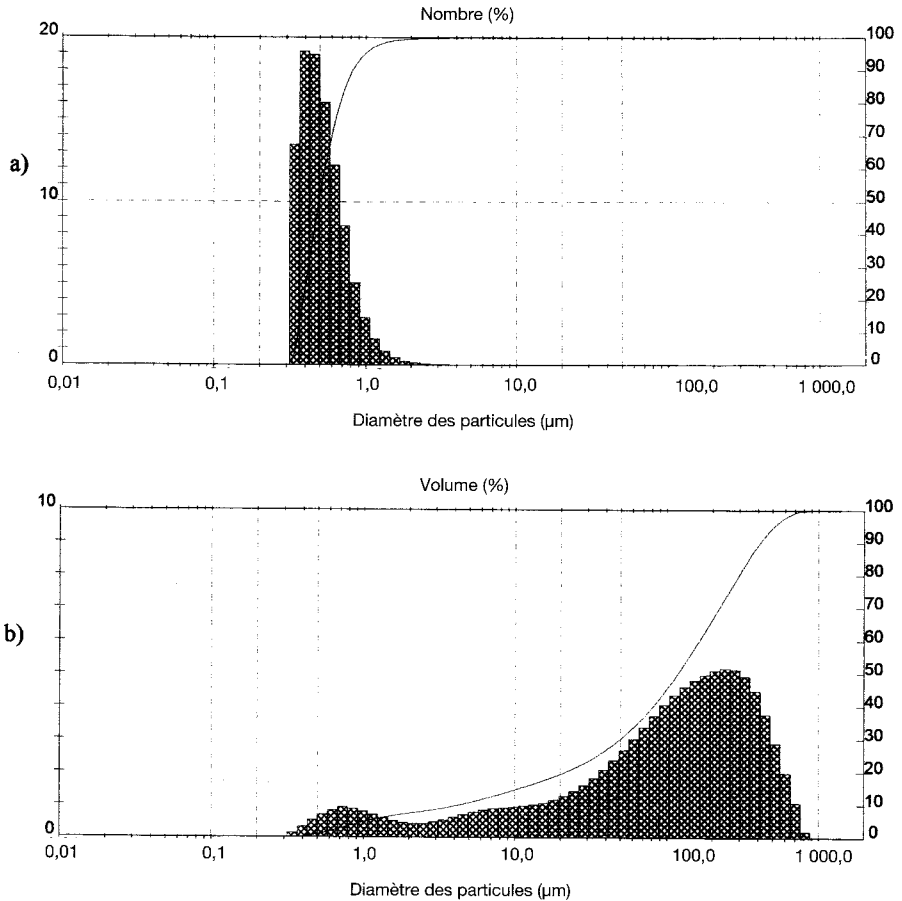


Figure 4 Répartitions granulométriques en % nombre (a) et en % volume (b) pour une eau en sortie de bassin de prégrossissement à Noirmoutier (Prélèvement du 24 juin 1997, taux de MES = $16 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Granulometric distribution (a: numeric %, b: volume %) in water leaving pre-enlargement basin (SM ratio = $16 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

2.2 Ultrafiltration avec des membranes organiques capillaires « AQUASOURCE »

2.2.1 Influence des paramètres hydrodynamiques (pression et vitesse de circulation dans les capillaires) sur le flux de perméat

On utilise dans un premier temps la pompe à engrenages et on opère à concentration constante (avec recyclage intégral du rétentat et du perméat dans le bac de charge).

On note une décroissance très rapide du flux de perméat durant les premières minutes de la filtration (de $220 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ à $80 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ en 30 minutes) vraisemblablement due à la présence dans l'eau de substances colloïdales ou de

matière organique dissoute. Un état quasi-stationnaire aux alentours de $50 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ est atteint au bout de 2 heures. Pour les mesures ultérieures les flux sont mesurés après un temps de filtration de 2 heures.

La *figure 5* donne la variation du flux-limite en fonction de la pression entre $0,5$ et $2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et de la vitesse entre $0,5$ et $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le réseau de courbes obtenues, classique, montre qu'il n'est pas nécessaire de travailler à des pressions supérieures à $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. On obtient au mieux avec la vitesse la plus élevée un flux de perméat légèrement inférieur à $100 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, du même ordre de grandeur que les flux obtenus par ce type de membrane en potabilisation des eaux.

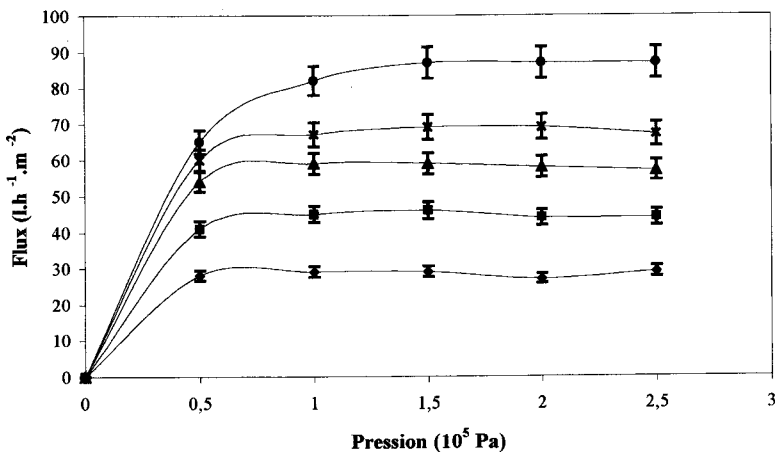


Figure 5 Variation du flux-limite avec la pression transmembranaire et la vitesse tangentielle (Eau de rejet du filtre mécanique, teneur en MES = $67 \pm 17 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, membrane capillaire Aquasource, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, pompe à engrenages).

◆ $u = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ■ $u = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ▲ $u = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ × $u = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ● $u = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Variation of maximal flux with transmembrane pressure and velocity.

◆ $u = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ■ $u = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ▲ $u = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ × $u = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ● $u = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

2.2.2 Incidence du type de pompe sur les performances de la filtration

La *figure 6* permet de comparer les flux obtenus par les deux types de pompes utilisées. La pompe à vis donne, dans des conditions de vitesses tangentielles et de pression identiques, de meilleures performances (jusqu'à 70 % supérieures). Cela pourrait s'expliquer par un cisaillement des particules constituant les MES, plus important avec la pompe à engrenages qu'avec la pompe à vis, ce qui conduirait à un colmatage en surface dû à un dépôt plus compact, (WISNIEWSKI et GRASMICK, 1998 ; VANDANJON *et al.*, 1999).

2.3 Microfiltration sur membrane capillaire ENKA Microdyn

Plusieurs essais ont été réalisés avec ce type de membrane sous des pressions de $1 \cdot 10^5$ à $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ avec une vitesse de recirculation de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et des taux de MES de l'ordre de $45 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Les flux de perméat se stabilisent en général autour de $170 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

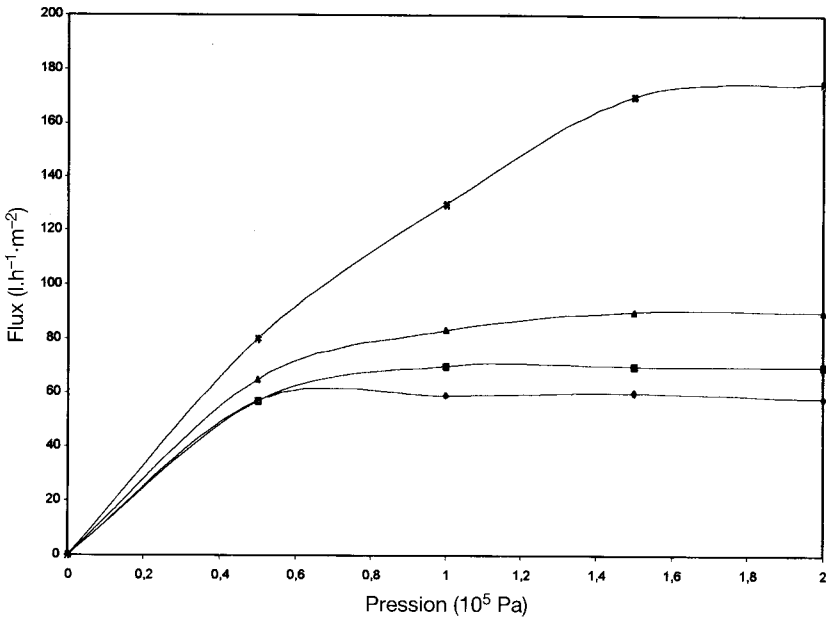


Figure 6 Influence du type de pompe sur le flux-limite de perméation (Eau de rejet du filtre mécanique, teneur en MES = $67 \pm 17 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, membrane capillaire Aquasource, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).
 Pompe à engrenages : ◆ $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; ▲ $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Pompe à vis : ■ $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; × $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Influence of pump type on permeation flux.
Gear pump: ◆ $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; ▲ $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Monoscrew pump: ■ $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; × $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Le *tableau 5* récapitule les flux stabilisés obtenus sur une eau contenant $12 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de MES.

Le flux de perméat de la membrane d'ultrafiltration est du même ordre de grandeur que celui obtenu avec la membrane capillaire AQUASOURCE. Avec les membranes de microfiltration il est plus élevé mais se stabilise autour d'une valeur moyenne de $260 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les diamètres des pores compris entre $0,1$ et $0,8 \text{ }\mu\text{m}$.

2.4 Microfiltration sur membranes minérales tubulaires CERAM Trèfle

Les résultats obtenus lors d'une campagne de mesures réalisée sur site avec des membranes TAMI de diamètres de pores compris entre $0,14$ et $0,8 \text{ }\mu\text{m}$ dans les mêmes conditions de pression et de vitesse de recirculation qu'avec les membranes planes IRIS sont également reportés dans le *tableau 5*.

Dans les conditions opératoires choisies, les flux de perméat sont dans l'ensemble inférieurs à ceux obtenus avec les membranes organiques. Ainsi, compte tenu du coût nettement plus élevé de ces membranes par rapport aux membranes organiques, il ne paraît pas intéressant de retenir ce type de membranes dans le contexte de cette étude.

Tableau 5 Flux de perméat obtenus avec les membranes organiques planes et minérales tubulaires ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u = 2,75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Delta P = 10^5\text{ Pa}$, Teneur en MES : $12,0\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Table 5 *Permeate flux obtained with flat organic membranes and tubular mineral membranes ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $u = 2,75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Delta P = 10^5\text{ Pa}$, SM content: $12,0\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).*

Référence membrane	IRIS					CERAM			
	3065	6501	6502	6504	6508				
Diamètre de pores (μm) ou seuil de coupure (kD)	40 kD	0,1	0,2	0,4	0,8	0,14	0,20	0,45	0,80
Flux-limite de perméat ($\text{l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	100	280	240	260	260	156	180	168	258

2.5 Aspect économique

Il n'existe pas de données économiques chiffrées sur l'utilisation des membranes, à cette échelle, dans l'aquaculture (en eau de mer ou en eau douce).

On peut cependant se baser sur les applications développées en potabilisation des eaux, domaine qui présente avec la pisciculture des similitudes évidentes tant au niveau des débits à traiter (de quelques dizaines à quelques centaines de $\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$) qu'au niveau des teneurs en MES (de l'ordre de 20 à $80\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Deux leaders mondiaux dans ce domaine : la Lyonnaise des Eaux (membranes AQUASOURCE) et la Compagnie Générale des Eaux (membranes MEMCOR) fournissent des chiffres comparables (ANSELME, 1991 ; TAZI-PAIN et al., 1994).

Les coûts d'exploitation, rapportés au volume d'eau filtrée, se répartissent comme suit :

- consommation électrique ($0,2$ à $0,7\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) :	$0,10$ à $0,35\text{ FF}\cdot\text{m}^{-3}$;
- main-d'œuvre :	$0,10$ à $0,30\text{ FF}\cdot\text{m}^{-3}$;
- consommables :	$0,05$ à $0,10\text{ FF}\cdot\text{m}^{-3}$;
- renouvellement des membranes :	$0,10$ à $0,20\text{ FF}\cdot\text{m}^{-3}$;
Coût total :	$0,35$ à $0,95\text{ FF}\cdot\text{m}^{-3}$

L'investissement à prévoir est estimé, selon la taille de l'usine, entre 1 200 et 2 000 FF. par $\text{m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$ d'eau produite.

Dans le cas d'une pisciculture en circuit semi-fermé produisant 100 tonnes de poissons par an et dans l'hypothèse où l'on ferait passer sur les membranes la totalité de l'eau en circulation, soit plus de $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ($24\,000\text{ m}^3\cdot\text{j}^{-1}$) le coût de l'investissement serait de $1\,200 \times 24\,000 = 24\,800\,000\text{ FF}$.

L'investissement nécessité par la construction en 1999 de la pisciculture évoquée dans l'introduction a été de $12\,000\,000\text{ FF}$. En admettant que le dispositif conventionnel de traitement de l'eau recyclée mis en place représente

50 % de cet investissement, soit 6 000 000 FF, l'équipement par un système de filtration par membrane coûterait donc 4 à 5 fois plus cher.

3 – CONCLUSION

Les mesures des teneurs en MES et les analyses granulométriques effectuées sur les échantillons d'eaux prélevés en bassins d'aquaculture en circuit semi-fermé montrent que ces paramètres varient beaucoup avec, d'une part, la quantité de biomasse présente dans les bassins (et donc avec la taille des poissons) et, d'autre part, l'heure de prélèvement par rapport à l'introduction de l'aliment. En nurserie on observe notamment une grande quantité de particules avoisinant 1 mm, correspondant vraisemblablement à des aliments non ingérés. Les plus petites particules détectées (entre 0,3 et 1,5 μm) représentent plus de 99 % du nombre total des particules présentes mais seulement 7 % en volume. Cette observation a orienté dans un premier temps le choix vers des membranes capillaires d'ultrafiltration à peau interne utilisées en potabilisation des eaux. Les performances de ces membranes sont insuffisantes (flux de perméat $\leq 100 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) au regard des besoins du domaine concerné. Les membranes de microfiltration testées par ailleurs donnent des flux de perméat meilleurs (jusqu'à $250 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Mais dans tous les cas, l'estimation de l'investissement et des coûts de fonctionnement pour une pisciculture en circuit semi-fermé de taille industrielle conduit à des prix trop élevés pour que l'utilisation des membranes dans ce domaine soit, à ce jour, économiquement envisageable.

Différentes considérations permettent cependant de penser que la position des membranes peut évoluer favorablement dans ce domaine :

- le coût des membranes tend à baisser régulièrement et le prix du m^2 diminue en fonction de la surface installée ;
- les dépenses de fonctionnement peuvent encore être réduites notamment par une optimisation de la consommation d'énergie liée à la pression de travail et à la vitesse de recirculation. Le meilleur compromis entre surface installée et énergie requise doit être recherché.

Enfin la filtration sur membranes constitue un bon moyen de protection contre le développement de certaines pathologies pouvant affecter les piscicultures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. Guibert, H. Héliche et M. Ouchkire pour leur contribution à l'étude expérimentale.

Cette étude a bénéficié du soutien du SMIDAP (Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture en Pays de la Loire).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR NFT, 1997. Qualité de l'eau, recueil des normes françaises, tomes 1 à 4, 2^e édition.
- ANSELME C., 1991. Clarification des eaux par ultrafiltration. Actes de la journée internationale sur les procédés à membranes dans le traitement de l'eau. Ed. GEPS Toulouse, 31-38.
- BLANCHETON J.P., COVES D., 1995. Filtration mécanique d'effluents aquacoles, Rapport IFREMER, Palavas, 4 p.
- COLLET M., 1992. L'aquaculture et l'environnement. *La Pisciculture Française*, 110, 6-8.
- HENDERSON J.P., BROMAGE N.R., 1998. Optimising the removal of suspended solid from aquacultural effluents in settlement lakes. *Aquacultural Engineering*, 7, 167-181.
- HUBICHE C., 1994. Traitement aquacole par microfiltration. *Rapport de stage de fin d'études*, ISI Montpellier, 30 p.
- LAMOTTE J., 1992. Évaluation comparée de trois techniques de clarification des effluents de piscicultures à salmonidés. *La Pisciculture Française*, 110, 9-15.
- MAUREL P. 1983. Les circuits fermés en aquaculture : Technologie et domaines d'application. *La Pisciculture Française*, 71, 5-18.
- TAZI-PAIN A., FAIVRE M., BARRAUD V., MORINEAU Y.C., 1994. Production d'eau potable par microfiltration sur la ressource karstique de Bernay-Ouest. *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, 172, 37-40.
- VANDANJON L., ROSSIGNOL N., JAOUEN P., ROBERT J.M., QUEMENEUR F., 1999. Effects of shear on two microalgae species. Contribution of pumps and valves in tangential flow filtration systems. *Biotechnol. Bioeng*, 63,1-9.
- VAN DEN BROUCKE M., 1995. Étude de la réduction du taux de M.E.S. dans une pisciculture en circuit semi-fermé. *Rapport de stage de DEA*. Université de Nantes, 43 p.
- WISNIEWSKI C., GRASMICK A., 1998. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling. Colloids and surfaces. *A, Physicochemical and engineering aspects*, 138, 403-411.