



*Potentiel et perspectives de la technologie du  
circuit recyclé au Québec : emphase sur  
l'utilisation en mariculture*

*Rapport final*

---

*Dossier n° 710.17*

*Rapport commandité par la SODIM*

*18 mai 2003*



## **Potentiel et perspectives de la technologie du circuit recyclé au Québec : emphasis sur l'utilisation en mariculture.**

### **Réalisé par :**

**Aqu@Nova SP**  
Consultants en R&D  
Aquaculture-transfert technologique  
Grande-Rivière, Québec  
[aquanova@globetrotter.net](mailto:aquanova@globetrotter.net)

### **Experts consultés:**

J.-P. Blancheton, Ph.D. (Ifremer-France)\*  
B. Blanchard (Scotian Halibut inc.)  
G. Gagnon, Ph.D. (Dalhousie University-Aquanet)  
M. C. Couturier, Ph.D. (UNB-Frédéricton-Aquanet)  
S. Parent Ph.D. (Biodôme Montréal)  
L.-O. Sparboe (Akvaplan-niva, Norvège)  
P.V. Pedersen (Danish Institute for Fisheries and Aquaculture, Danemark)  
H. Drouin (Aquabiotech inc. Coaticook, Qc)

\*Incluant une révision du document avant dépôt final

### **Pour**

**La Société de développement de l'industrie maricole**  
Gaspé, Québec, Canada

**Le 18 mai 2003**

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

1.0 INTRODUCTION .....	3
2.0 MÉTHODOLOGIE.....	6
3.0 ASPECTS GÉNÉRAUX DE LA RECIRCULATION.....	6
4.0 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN RECIRCULATION SELON LES COMPOSANTES SPÉCIFIQUE DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DE L'EAU .....	9
Filtration .....	9
Nitrification .....	10
Dénitrification.....	11
Aération et dégazage .....	12
Conception intégrée de systèmes.....	12
5.0 AUTRES SECTEURS EN DÉVELOPPEMENT .....	14
Activité bactérienne.....	14
Nutrition.....	14
Qualité de l'eau et densité d'élevage.....	14
Hydroponique.....	15
Semi-recirculation et production intégrée (mollusques, algues).....	15
Traitement thérapeutique.....	15
Traitement des rejets concentrés.....	16
6.0 BILAN DE LA PRODUCTION MONDIALE.....	16
Production commerciales ou pré-commerciales en eau salée (non exhaustif).....	17
Espèces marines en développement (non exhaustif).....	18
7.0 MISSION DANS LES MARITIMES (NOUVEAU-BRUNSWICK, NOUVELLE- ÉCOSSE) .....	19
8.0 LE TRANSFERT TECHNOLOGIQUE AU QUÉBEC .....	20
Conclusion.....	21
Recommandations .....	21
9.0 BIBLIOGRAPHIE.....	24

## 1.0 INTRODUCTION

On s'accorde généralement sur le fait que les débarquements de produits marins issus des pêcheries commerciales traditionnelles sont peu susceptibles d'augmenter significativement et que l'aquaculture procure une alternative viable pour combler au déficit d'approvisionnement appréhendé (Olin 2001; McGinn 1998; Chamberlain et Rosenthal 1995). La production aquacole est le secteur alimentaire qui affiche le taux de croissance le plus élevé à l'échelle mondiale (10% de 1984-1995 comparativement à 3% pour le bétail et 1.6% pour les pêcheries traditionnelles)(FAO, 1997). Il existe un document récent qui dresse l'état de la production aquacole en Amérique du Nord (Olin 2001). Les technologies de production commerciales les plus courantes sont : l'élevage en cages en zones côtières et l'élevage terrestre en circuit ouvert. Les pressions environnementales et l'intérêt croissant pour la diversification de l'aquaculture sont des incitatifs puissants pour le développement de technologies de production plus écologiques et plus flexibles d'utilisation afin de permettre à cette industrie de poursuivre sa croissance de façon durable selon des critères élevés en matière économique, sociale et environnementale (Bardach 1997). Ces défis majeurs s'appliquent également à l'industrie aquacole québécoise et ne peuvent être ignorés ni évités mais d'un autre côté ne peuvent être pris en charge uniquement par cette industrie émergente.

L'industrie aquacole oeuvrant en milieu terrestre fonctionne actuellement majoritairement en système ouvert ce qui donne lieu aux problèmes suivants : 1) des besoins énergétiques élevés pour le pompage, le réchauffement et/ou le refroidissement de l'eau; 2) un important besoin en eau (utilisation de la ressource eau) et 3) le rejet de déchets organiques (ammoniaque, nitrite, nitrate, phosphate) à des concentrations diluées dans l'environnement (Bengston et Oiestad 2002; Pedersen 1998; Sauthier et al. 1998). L'élevage en cages marine, quoique représentant un moindre coût d'exploitation que l'élevage terrestre est 1) soumis à l'effet négatif sur la productivité des opérations, des fluctuations de températures et de salinités caractérisant le milieu côtier (Blancheton 2000; ICES 2002a); 2) au partage des eaux côtières (autres utilisateurs : pêcheries, navigations etc.); et finalement 3) aux préoccupations environnementales croissantes exprimé par l'opinion publique face à ce type d'exploitation (risques d'échappées, pollution etc.)(Le François et Archer, 2001).

Ainsi, on s'accorde généralement sur le fait que les systèmes en technologies de la recirculation (ou circuit recyclé, car ils ne sont jamais fermés totalement) sont la prochaine révolution à l'échelle mondiale dans les techniques de productions aquacoles (rapport ICES 2002a; Yang et coll. 2001; Pedersen 1998). Cette technologie est employée sur une base commerciale depuis plusieurs années à l'échelle mondiale (Asie, Europe, Scandinavie, Danemark, Amérique du Nord, Australie). Il existe deux pôles de compétence en Europe : les pays du Nord (Danemark et Hollande) qui ont développé au départ dans les années 70-80 des productions de poissons en grossissement (anguille, poisson chat, bar, turbot essentiellement); la France qui a développé à la même époque un savoir faire et une production de larves et alevins d'eau de mer (bar, daurade, turbot) et développe maintenant des systèmes pour le grossissement. Actuellement, la France (Ifremer) et la Hollande (Wageningen, RIVO) poursuivent leurs efforts pour l'amélioration

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

des connaissances et contribuent au développement. Israël s'intéresse plus particulièrement aux systèmes intégrés (polyculture). La tendance actuelle va dans le sens d'une recherche de plus en plus concertée et complémentaire (Blancheton comm. pers.). Cependant, considérer l'implantation de cette technologie en constante évolution comme un simple exercice de transfert technologique, que ce soit en eau douce ou en eau de mer peut représenter un risque élevé pour l'entreprise privée.

Aux États-Unis, l'effondrement de certains stocks et les incitations des autorités gouvernementales pour le passage en mode recirculation ont causé un effet « running-before-walking » du développement de l'aquaculture. Ce développement anarchique de l'aquaculture a causé plus de mal que de bien, tant au niveau économique qu'environnemental. Le gouvernement américain a donc été contraint de réévaluer les axes de développement de son industrie piscicole en promouvant plus d'efforts de recherche ciblant les technologies de la recirculation.

Les systèmes en circuit fermé sont de par le nombre de composantes, relativement coûteux à l'achat et à l'opération. Cependant, les avantages nombreux reliés à cette technologie d'élevage représentent une opportunité pour l'avènement d'une aquaculture durable et responsable car 1) limite les échappées et les pertes imputables aux prédateurs; 2) les poissons sont moins susceptibles de contracter des maladies ou des parasites présents normalement en milieu ouvert (diminution des traitements préventifs ou curatifs); 3) les impacts environnementaux sont minimisés (rejets en quantités plus faibles mais plus concentrés et pouvant être traités); 4) les fluctuations environnementales (température, salinité, turbidité) sont considérablement réduites (fluctuations plus faibles et plus lentes) ce qui permet d'améliorer les performances des organismes en élevage (Blancheton 2000; Skjoldstrup et coll. 2000); 5) les coûts énergétiques sont réduits de l'ordre de 50% comparativement à un système en circuit ouvert nécessitant un chauffage de l'eau d'approvisionnement et des volumes de pompage plus importants (Blancheton 2000); 6) permet l'exploitation de zones inhospitalières pour l'élevage en cages (hydrodynamisme inadéquat, fluctuations thermiques, présence de glace, sites exposés) ou terrestre conventionnels (besoins en eau élevés, normes environnementales élevées); 7) permet un rapprochement vers les marchés; 8) permet l'étalement et l'accroissement de la production (plusieurs températures et approvisionnement des marchés sur 52 semaines)(Forsythe et Hosler 2002).

Dans l'optique d'un développement constant d'ici les 10-15 prochaines années dans ce secteur (ICES 2002a) et devant les coûts relativement élevés associés à la construction d'unités de production en circuit fermé, il serait particulièrement intéressant de prendre en considération lors de comparaisons de premier niveau, l'évaluation de tous les coûts et bénéfices, incluant les avantages environnementaux sur la productivité. On situe la réduction des coûts de production d'alevins de bar (*Dicentrarchus labrax*), suite à l'introduction de cette technologie en France, à 60% (Blancheton 2000). L'augmentation par un facteur de 15 de la production d'alevins selon cette technologie est imputable à la fois par l'amélioration de la composition et de la gestion nutritionnelle qu'à l'utilisation de la technologie en circuit fermé. Pour le bar européen (*Dicentrarchus labrax*) et la dorade (*Sparus aurata*), la perte de chaleur minimale d'un système en circuit fermé permet des économies correspondant à 50% des coûts de production

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

comparativement à un système en circuit ouvert. Afin d'évaluer les contraintes et défis que son introduction en mode commercial suggère nous proposons la rédaction d'un document de travail faisant le point sur la recirculation et les besoins en transfert technologique et de R&D au Québec avec une emphase particulière sur son utilisation en mariculture.

Au Québec plus particulièrement, les pressions environnementales actuelles, exposées dans le cadre de la nouvelle Politique Nationale de l'Eau (novembre 2002, Ministère de l'environnement du Québec) incitent à l'application d'efforts importants de la part des producteurs piscicoles, pour une réduction significative de la consommation d'eau et des teneurs en phosphore des rejets piscicoles. D'un autre côté, le développement de l'élevage de poissons en cages marines est limité à cause de la présence de glaces et de la rareté de zones abritées près des centres urbains et son développement sera vraisemblablement touché par des mesures de restrictions environnementales ciblant le milieu marin. La technologie du circuit fermé en eau douce ou en eau salée est en mesure de consolider la croissance de l'industrie aquacole québécoise, en permettant aux productions existantes ou émergentes d'être en conformité avec les normes auxquelles elle est dorénavant assujettie concernant l'utilisation de l'eau (Politique de l'eau MEQ 2002; Schuenhoff et coll., sous presse; Yang et coll. 2001). De plus, cette technologie en contexte québécois favorise la diversification de la production aquacole et l'optimisation de la productivité.

Les systèmes en circuit fermé ont principalement été développés pour l'élevage en eau douce (anguille, tilapia, carpe, poisson chat, bar rayé, salmonidés) mais l'intérêt pour leur utilisation en eau salée a considérablement augmenté au cours des dernières années (turbot, flétan, morue, sole, bar européen, dorade, loup de mer etc.). De façon générale, l'emphase en terme de R&D pour leur utilisation devrait porter sur le raffinement des systèmes en eau salée, la mise à l'échelle (niveau expérimental à commercial) et la réduction des coûts de production (Bengston et Oiestad, 2002; Blancheton 2000). Selon le constat d'experts européens et nord-américains, l'accessibilité à des sites pour l'élevage en cages et les conditions variables de salinité et de températures rencontrées en milieu côtier limiteront vraisemblablement l'essor d'activités d'élevage rentables en zones côtières. De façon générale, un consensus selon lequel les productions futures seront terrestres (land-based) et en mode hyper-intensif (ICES, 2002a) apparaît, pour des raisons écologiques et d'efficacité apparentes. Les espèces gagnantes seront celles qui pourront être produites à hautes densités par l'utilisation de systèmes automatisés dans des conditions environnementales stables tout en générant un bon prix de vente.

Les principaux questionnements soulevés par les intervenants du secteur aquacole québécois à l'origine de ce document, portent essentiellement sur 1) les coûts d'exploitation et d'entretien, 2) les particularités de l'eau salée lors des différentes étapes de traitement de l'eau, et 3) l'importance des efforts de R&D à être anticipés préalablement à des activités de transfert technologique. Une section identifiant les actions à être priorisées, les besoins particuliers du Québec et l'identification des ressources crédibles du secteur terminent ce document de synthèse.

## **2.0 MÉTHODOLOGIE**

Dans un premier temps, une revue de littérature a été réalisée sur les bases de données électroniques. Les articles sélectionnés ont par la suite été analysés et l'information pertinente de plusieurs a été extraite et incorporée dans le document (tous les documents consultés se retrouvent toutefois dans la section Bibliographie). Cette revue a été complétée par des recherches sur Internet et des échanges avec des spécialistes reconnus dans le secteur de la recirculation. Au cours de la semaine du 13 avril, une mission de 3 jours dans les maritimes a été réalisée au cours de laquelle des membres universitaires et du secteur privé de l'équipe Aquanet sur la recirculation en eau froide (EI 13 : Development of cold-water recirculation systems) ont été rencontrés (Dr Gagnon Université Dalhousie, Halifax, Nouvelle-Écosse Dept. Civil Engineering, Dr Couturier Université du Nouveau-Brunswick, Frédéricton, Nouveau-Brunswick, Dept. Chemical Engineering et B. Blanchard, Scotian Halibut). Les installations de Scotian Halibut inc. de Clark's Harbour et de Wood's Cove ont été visitées le 15 avril (écloserie et site de grossissement de juvéniles). Le document final a fait l'objet d'une évaluation critique d'un chercheur de renommée internationale, le Dr. Jean-Paul Blancheton (Ifremer, France) avant son dépôt à la Société de développement de l'industrie maricole.

## **3.0 ASPECTS GÉNÉRAUX DE LA RECIRCULATION**

Une description des composantes et des procédures d'opération des systèmes en circuit fermé est bien documenté dans les travaux de Timmons et coll (2002). Le design des systèmes en recirculation requière la considération des conditions et des procédés physique mais également biologiques et chimiques. Le design des systèmes en recirculation repose essentiellement sur un estimé des la production d'ammoniaque par les organismes en élevage (qui tient compte de la température, de la biomasse, du taux de conversion, de la gestion alimentaire etc.) et de la teneur en solides en suspension pour la mise en œuvre des traitements nécessaires pour les retirer efficacement du milieu aquatique (ICES 2002a).

Les systèmes en circuit fermé ont été développés initialement afin de réduire les quantités d'eau utilisées en élevage et facilité la modulation de la température pour l'atteinte de température optimale pour la croissance (Blancheton et Coves 1992). Ils nécessitent un système de traitement de l'eau approprié qui utilise des procédés physiques, biologiques et chimiques afin de retirer ou transformer les sous-produits tels que l'ammoniaque, les fèces et les particules alimentaires non-ingérées (Losordo et coll., 1992; Kaushik, 1990) et de maintenir leur concentrations à des seuils acceptables dans les unités d'élevage. La réutilisation de l'eau peut permettre une réduction de l'ordre de 90% des déchets organiques et azotés retournés dans l'environnement par les élevages (Losordo et coll. 1992). De façon générale, les particules solides sont retirées par sédimentation et/ou filtration mécanique. Les niveaux bactériens sont contrôlés par des systèmes ultra violets et/ou d'ozonation et l'ammoniaque toxique oxydée en azote nitrate par le biofiltre. La nitrification (conversion de l'ammoniaque en nitrites et finalement en nitrates) s'effectue par l'utilisation de filtres biologiques qui supportent une population de bactéries

nitrifiantes. Cette opération génère une élévation constante de la concentration des nitrates qui pourrait éventuellement être toxique pour les organismes d'élevage (Ng et al., 1993). Le contrôle des nitrates se fait par le remplacement constant d'une faible partie de l'eau ou lorsque c'est impossible, par l'utilisation de filtres dénitrifiants (Sauthier et al. 1998; Blancheton 2000).

L'ozonation a initialement été utilisé pour le retrait des particules en suspension mais est également un agent très efficace pour la destruction des bactéries et des virus. Il semble que les inquiétudes rapportées quant à son utilisation en eau salée (production de bromates toxiques) ne soit pas fondées. En effet, l'ozonation des eaux marines usées ne semblent pas provoquer d'accumulation de bromates car l'ozone attaquerait préférentiellement les composés organiques présents dans l'eau. L'accumulation de bromates ne se produirait que lorsque l'eau traitée est déficiente en matière organique ce qui est rarement le cas en situation d'élevage intensif (M. Couturier, G. Gagnon et B. Blanchard comm. pers. voir également [www.aquanet.mun.ca](http://www.aquanet.mun.ca) pour un résumé de la recherche). Les problèmes rapportés dans la littérature sont surtout reliés à l'ozonation des eaux destinées à la consommation humaine et donc préalablement pauvres en composés organiques. Scotian Halibut et le Biodôme de Montréal utilisent l'ozonation pour enlever la couleur brunâtre de leurs eaux. L'ozone résiduelle peut être toxique pour les organismes en élevage (Wedemeyer et al., 1979) et une unité de dé-ozonation doit être incluse dans le système soit par une rétention de quelques minutes après ozonation ou l'application de petites doses d'agents réducteurs (Liltved 2001).

Un problème potentiel dans le traitement des eaux dans l'hémisphère nord est la basse température de l'eau (Welanders et Mattiasson, sous presse). Les microorganismes à la base des procédés de traitement de l'eau devront être préférentiellement des psychrotolerants. Ces microorganismes démontrent des croissances optimales à des températures au-dessus de 20°C, mais sont toujours capables de croissance à plus faibles températures (Madigan et al., 1997). Les organismes psychrotolerants peuvent donc être utilisés sur une gamme plus large de température contrairement aux organismes psychrophiles, qui cessent d'être actifs à des températures inférieures à 20°C. Une utilisation de ce type de bactéries adaptées au froid pour la nitrification en circuits fermés est particulièrement intéressante pour le développement de l'aquaculture intensive dulcicole et/ou marine en eau froide. Cependant, la capacité de traitement des biofiltres nitrifiants en eau froide ne semble pas être un agent limitant en contexte aquacole. Une conception adéquate des systèmes de traitement des eaux usées en fonction de la productivité des élevages semble être suffisante (M. Couturier et B. Blanchard, comm. pers.). Une pratique relativement courante est l'inoculation des biofiltres avec des souches de microorganismes indigènes (eau douce et salée) et donc déjà bien adaptées aux conditions régionales.

En prévision de l'instauration de normes environnementales régissant les rejets en phosphore, certains systèmes commerciaux comportent l'utilisation d'unités de captage du phosphore au sein de leur composantes (Pedersen 1998; Parent, comm pers). Au Québec, des travaux prometteurs sur ces unités utilisant des scories d'aciérie comme matériaux adsorbants sont en cours en contexte piscicole ouvert pour le traitement des effluents afin



de rencontrer les normes environnementales sévères instaurées par le ministère de l'Environnement (VRQ-RAQ, Dr. Y. Comeau). Ce type de système est également en utilisation au Biodôme et d'autres aquariums touristiques où le remplacement de l'eau est limité.

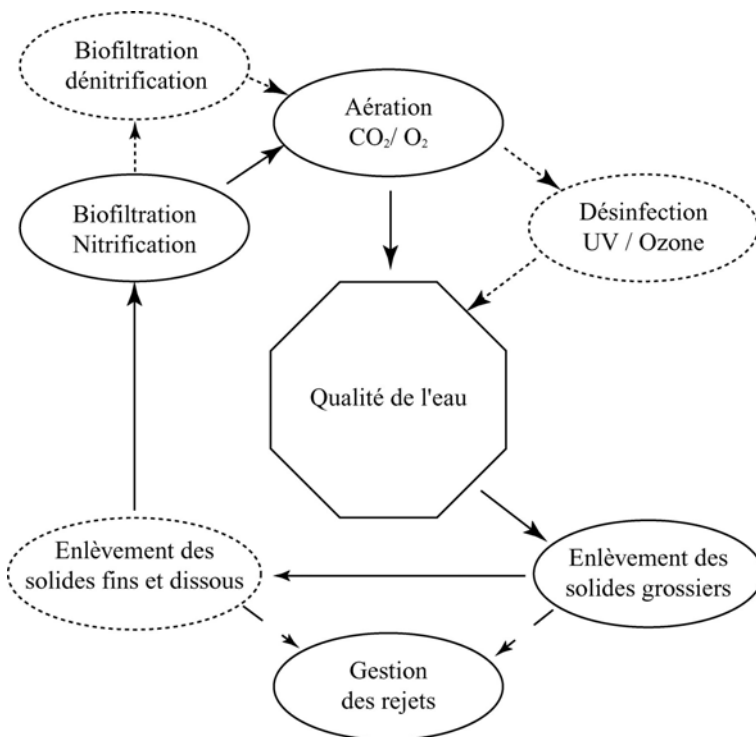


Figure 1. Schéma présentant les différentes opérations réalisées par les composantes des systèmes recyclés. Les pointillés représentent les fonctions qui sont considérées facultatives.

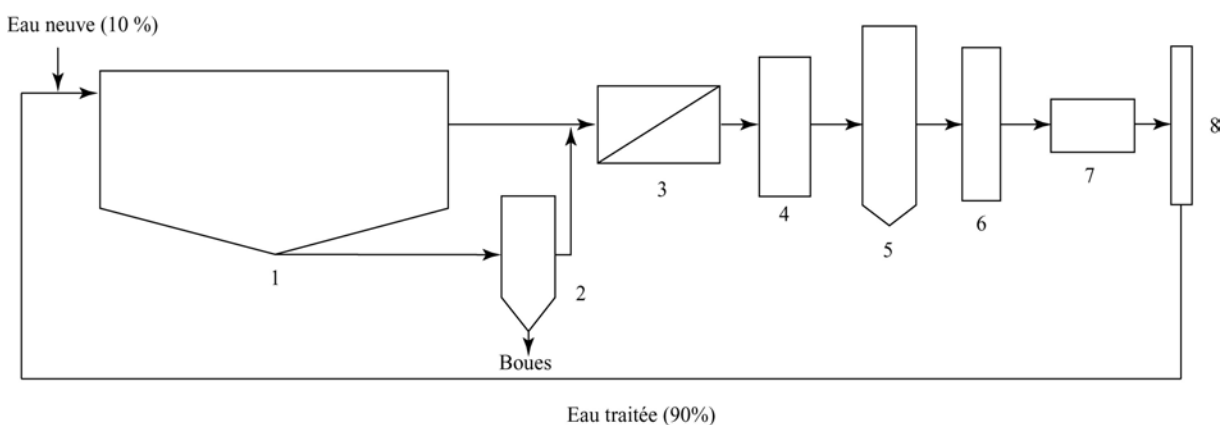


Figure 2 Schéma présentant un système de traitement d'eau typique tel qu'utilisé au LARSA (U. Laval). Qr: débit de recirculation, 1. bassin d'élevage, 2. vortex, 3. filtre à tambour ou filtre à sable, 4. Écumeur, 5. Filtre biologique, 6. Colonne de dégazage, 7. Oxygénéateur, 8. Photoréacteur UV

#### **4.0 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN RECIRCULATION SELON LES COMPOSANTES SPÉCIFIQUE DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DE L'EAU**

##### *Filtration*

La filtration mécanique doit être réalisée le plus près possible de la sortie des bassins pour éviter le bris des grosses particules facilement captées par les filtres mécaniques conventionnels, particulièrement en eau froide (Timmons et coll, 2002). Dans les systèmes en recirculation, les solides fins (< 20-25µm) échappent souvent aux traitements conventionnels et s'accumulent ainsi dans les zones mortes (Chen et coll. 1993; Heinen et coll. 1996). Seulement 50-60% de ces particules sont efficacement filtrées. Ces particules non captées sont partiellement brisées et dissoutes lors du passage dans les pompes et leur décomposition dans les filtres biologiques augmente la production d'ammoniaque et la demande en oxygène du système (Golz et coll. 1999). Des méthodes alternatives doivent alors être déployées pour retirer ces particules de façon à améliorer la qualité de l'eau et la santé des poissons. Le développement de filtres ayant une plus grande porosité et de plus petits pores permet d'optimiser leur captage. La porosité détermine la capacité hydraulique du filtre, la fréquence de nettoyage et la quantité d'eau de rejets (Kelly et coll. 1997). Actuellement, les filtres conventionnels de 60µm disposent d'une surface libre de 60% alors que les filtres de 5µm 1%. Des études ont été effectuées et sont toujours en cours pour le développement de nouveaux types de filtres mécaniques. Il existe déjà des filtres plus performants que ceux actuellement utilisés mais ils coûtent plus cher à l'utilisation (Viadero et Noblet, 2002). Les méthodes de filtration très fines ne devraient être utilisées qu'en cas de réelle nécessité et dans le cas d'élevage d'espèces à haute valeur commerciale. En eau salée, l'utilisation des filtres à tambour est facultative et peut être avantageusement remplacée par des technologies de captage améliorées tel que les hydro-cyclones et écumeurs (B. Blanchard et H. Drouin, comm. pers.). Cela ne correspond toutefois pas à l'expérience française en eau de mer : selon le Dr. Blancheton, ils préconisent toujours un filtre mécanique à mailles lavées (tambour ou disque)... par contre les hydrocyclones ont été abandonnés (nécessitent un pompage qui (1) est coûteux en énergie et (2) fractionne les particules et les rend donc d'autant plus difficile à éliminer. Le mousser écumeur est adapté à l'élimination des fines particules : celles qui ne sont pas capturées par filtration mécanique.

L'eau salée a une densité spécifique plus élevée que celle de l'eau douce ce qui a comme conséquence d'augmenter la flottabilité des particules notamment des fécès (communément appelé fluffy shit). Cette caractéristique demande une modification des méthodes de captage des solides qui devra se faire par séparateur à mousse (foam fractionator) et l'utilisation d'un écumeur (protein skimmer). Ces dernières étapes sont facilitées par la force de cohésion plus élevée de l'eau salée, facilitant la formation d'une écume riche et relativement stable.

Dans une production aquacole en circuit fermé, il faut s'attarder au traitement des solides concentrés produits par les différents systèmes de clarification. Une concentration beaucoup plus élevée des solides en suspension dans les eaux de rejets est générée lors du nettoyage des filtres (backwash). Il existe des technologies pour concentrer ces déchets afin d'en faciliter le stockage en vue de s'en départir. Les solides sont envoyés dans des

bassins de sédimentation pour être éventuellement retirés sous forme de boue contenant entre 3 et 10% de solides (Westers, 1991; Chen et coll., 1997). Se départir de ces boues sera à court termes une problématique devant être adressée (Summerfelt et coll., 1999). Ces boues peuvent être classées comme industrielles ou agricoles selon les lois en vigueur. Si elles sont considérées agricoles, il sera plus facile de s'en départir parce qu'on suppose qu'on peut les utiliser pour d'autres productions agricoles (fruits, composte organique, gazon, etc.). L'épandage et le compostage en sont les plus populaires (Chen et coll., 1997). Si les boues sont considérées comme industrielles, elles devront être traitées et décontaminées au frais du producteur. Dans les deux cas, le transport de ces boues est associé à des coûts élevés puisqu'elles sont composées d'eau à 70-90% (Reed et coll. 1995). Si les boues ont à être traitées sur place, une unité de traitement efficace, abordable et simple d'opération devra être envisagée (ex : marais artificiel) (Outwater, 1994). En contexte de production en milieu marin, l'utilisation de marais artificiels serait envisageable a courts/moyens termes mais devra faire l'objet de plus d'études. Une attention particulière devra être portée aux opportunités offertes aux producteurs afin de se débarrasser des boues.

### Nitrification

L'efficacité des filtres à percolation (trickling filter) varie en fonction des types de médiums de colonisation bactérienne. Les efforts de recherche semblent se diriger vers l'identification et/ou la conception de médiums plus performants et moins dispendieux (Lekang et Kleppe 2000). Kim et coll. (2000) travaillent sur le développement de nouveaux médiums à base d'alginate, de carragénine et d'agar sur lit immobilisé afin de réduire le temps de démarrage (période de conditionnement du biofiltre écourté) tout en améliorant leur efficacité. L'alginate a donné les meilleurs résultats. D'autres auteurs (Sandu et coll. 2002) travaillent le ratio hauteur/diamètre des lits fluidisés afin de réduire la hauteur de la colonne et ainsi réduire les coûts énergétiques. Ils ont utilisé des billes de plastique de gravité spécifique 1.06 ce qui permet 1) de faciliter leur mise en suspension 2) d'abaisser le ratio H/D et par conséquent 3) diminuer les coûts de pompage. En eau salée, la densité spécifique des billes devra être ajustée.

Yang et coll. (2001) réalisent une analyse portant sur différentes combinaisons de biofiltres avec trois types de médiums afin d'évaluer leur efficacité de traitement pour un élevage en étang d'anguille japonaise (*Anguilla japonica*). Ils en évaluent également les coûts-bénéfices afin d'identifier le montage séquentiel le plus efficace. En bout de ligne, les subtilités opérationnelles (problème de colmatage) du modèle jugé a priori moins coûteux (1 biofiltre) dirige le choix des auteurs vers une solution de compromis qui procure un traitement de l'eau adéquat (2 biofiltres) comparativement à un modèle à trois biofiltres en série. Les auteurs terminent leur analyse en discutant du coûts d'opération liés à l'achat de l'eau (US\$0.06/m<sup>3</sup>) en système conventionnel, qui se révèlent être plus coûteux que le coûts d'opération des 4 types d'équipements de filtration biologique mis à l'essai. Dans le processus de sélection, les caractéristique du médium de support bactérien est apparu comme le facteur le plus critique pour l'efficacité du biofiltre par rapport à l'ensemble du circuit de traitement (1,2 ou 3 traitement de biofiltration en série). Un premier traitement avec un médium de support plus poreux (87%) suivi d'un

biofiltre avec un médium de support moins poreux (35%) a permis la rétention de la majorité des particules en suspension lors de la première biofiltration sans épisode de colmatage et le second biofiltre utilisé comme unité de finition capturait la matière en suspension non-captée à de plus forte charge hydraulique.

Le Cyclo-biofilter (Marine Biotech, É.-U.) est un biofiltre sur lit fluidisant dans lequel l'eau est introduite tangentiellement, il permet une opération à des pressions réduites ce qui réduit considérablement les coûts énergétiques. De plus ce système produit des patrons de courant qui semblent moins susceptibles à l'établissement de canaux, qui permettrait le passage de l'eau sans traitement et contribue donc à une réduction de l'efficacité du traitement (ICES 2002a).

Un nouveau composé capable de transformer l'ammoniaque en nitrate sans l'utilisation de filtres biologiques est en développement et serait une avancée majeure si son utilisation s'avérait efficace (Van der Meeren comm.pers., ICES 2002a).

### Dénitrification

L'accumulation de nitrates devient toxique pour les organismes marins à des concentrations trop élevées (Labbé et coll. 2003) et pose des problèmes de prolifération d'algues. Pour contrer ces problèmes, le Biodôme a installé un système de dénitrification fonctionnant à l'alcool (EcoMat inc. Hayward, CA, USA) similaire à celui retrouvé au New Jersey State Aquarium (Grguric et coll, 2000b). Ce système s'est avéré moins efficace que prévu. Contrairement à l'azote et au phosphore, les concentrations de métaux traces comme le fer et le manganèse ont tendance à diminuer dans de tels systèmes. Cette diminution est tout à fait normale et est due au fait que ces métaux, lorsque oxydés, deviennent insolubles. Cette baisse normale de fer et manganèse est accéléré au Biodôme par le fait qu'ils utilisent l'ozone, un puissant agent oxydant. Cette baisse de fer et manganèse a eu pour effet de rendre le système de dénitrification moins performant que ce qui avait initialement été prévu. La situation est revenue à la normale après que des tests aient démontrés que l'addition de fer, manganèse et de cuivre (ce dernier servant à maintenir le ratio naturel Fe:Mn:Cu) était nécessaire aux bactéries dénitrifiantes (Labbé, 2003). Ce système fonctionne maintenant relativement bien quoi qu'ils éprouvent des difficultés surtout causées par l'accumulation de biofilm à la sortie du système. Ce problème fait présentement l'objet de recherche (étudiants gradués), leur hypothèse est que l'entrée d'air au sommet de la deuxième tour est responsable d'un développement trop important des microorganismes. Ils tenteront de développer un système n'utilisant qu'une seule tour. Il est évident que de tels systèmes sont conçus plus spécifiquement pour les aquariums marins recyclant la totalité de l'eau, donc éprouvant des problèmes de nitrates, il faut par contre se rappeler que les densités d'élevage sont autrement plus faibles et ces systèmes pourraient avoir quand même leur place en aquaculture commerciale.

Le filtre dénitrifiant fait appel à des bactéries anaérobies facultatives qui transforment les nitrates en azote atmosphérique en condition anoxiques. Ce type de filtres est généralement composé de deux colonnes, la première servant à rendre l'eau anoxique en offrant aux bactéries un substrat organique à oxyder (en général alcool ou méthanol). Lors de l'entrée de l'eau anoxique dans la deuxième colonne, une autre dose de substrat

(alcool ou autre) est injectée, les bactéries de cette deuxième colonne utilisent les nitrates comme accepteur d'électron, libérant de l'azote gazeux au sommet de la colonne (Parent, comm pers). La dénitrification s'accompagne de deux effets secondaires bénéfiques, elle a tendance à augmenter légèrement le pH réduisant les besoins en bicarbonates en plus de capter une partie significative du phosphore dissout.

#### Aération et dégazage

Tous les systèmes servant à l'élevage plus ou moins intensif d'organismes marins ont une alimentation en oxygène. Il existe deux sources d'oxygène généralement utilisées. La première est l'achat et le stockage d'oxygène liquide dans un réservoir. L'oxygène est ensuite distribué dans les bassins. Il existe également des générateurs d'oxygène pur qui concentrent l'oxygène atmosphérique et le stock sous forme gazeuse avant d'être distribué dans les bassins. Le choix d'un système ou l'autre devra être fait à la suite d'une analyse coûts/besoins rigoureuse. Il existe aussi plusieurs types de systèmes de distribution d'O<sub>2</sub>, des plus simples comme les simples diffuseurs aux plus complexes comme les systèmes venturi et low-head oxygenator (LHO). Ces derniers sont plus coûteux mais assurent une oxygénation adéquate de l'eau tout en minimisant les pertes de gaz associées aux diffuseurs.

L'Ifremer utilise des systèmes de suroxygénation sous pression du type bicône pour fournir l'O<sub>2</sub> nécessaire. Pour info, un élevage de bar à 100 Kg/m<sup>3</sup> nécessite de faire rentrer dans le bassin d'élevage une eau entre 200 et 300% de saturation en O<sub>2</sub> pour fournir les besoins des poissons, sur une base d'un renouvellement du bassin de 100% par heure. (J.-P. Blancheton, comm. Pers.)

Les systèmes faisant appel à des filtres percolateurs ont l'avantage d'aérer l'eau permettant ainsi au CO<sub>2</sub> d'en sortir. Ces systèmes peuvent ne pas être accompagnés d'une colonne de dégazage. Pour ce qui est des systèmes utilisant les lits fluidisés et filtres pressurisés, une colonne de dégazage devra être prévue (Drouin, comm pers; Timmons, 2002)

#### Conception intégrée de systèmes

Durant les années 90, de nombreuses fermes françaises qui utilisaient la technologie des cages marines ont éprouvé le besoin d'augmenter leur niveau de production pour satisfaire à la demande du marché. L'agrandissement de leur structures en mer et de leur aires d'élevage étant impossible ils ont choisi d'augmenter la productivité de leurs installations déjà existantes en passant à la technologie du circuit fermé pour l'engraissement de larves et de juvéniles (alevins). L'introduction de poissons plus gros dans les cages a significativement augmenté leur productivité par unité de volume. La plupart des fermes d'engraissement en circuit fermé ont éprouvées de sérieux problèmes de rentabilité s'expliquant par des erreurs de design ou de gestion (niveau de production sous optimal). Cependant, les résultats obtenus en laboratoire ont permis l'obtention de financement (en grande partie de l'UE) pour la construction de plusieurs unités pilotes de taille commerciale (2 pour le bar et 1 pour le turbot) qui devrait fournir des informations pratiques sur le design, la gestion et les coûts d'exploitation (Blancheton 2000).

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Les opérations de recirculation pour l'élevage des poissons marins en Méditerranée sont à un stade intermédiaire de développement. Pour rencontrer les coûts opérationnels compatibles avec la rentabilité financière, les systèmes doivent être adaptés à l'espèce, à la localisation et à la situation économique. Le développement d'un modèle permettant de déterminer le fonctionnement des diverses composantes va permettre la prédiction de la taille optimale d'une ferme est en cours. Ces systèmes efficaces pourront alors être adaptés à d'autres espèces et d'autres conditions. Les espèces à croissance rapide et ce à haute densité devraient être privilégiées (Blancheton 2000).

Au début de 2001, une station piscicole de la Pennsylvanie s'est vue retirer son permis d'exploitation à cause des rejets trop concentrés dans la rivière qu'elle borde. Une étude complète sur la possibilité de les coûts associés au passage à un passage à la technologie de la recirculation a été commandée (Fishpro 2001). Au cours de cette étude, une vingtaine de stations en recirculation réparties au É-U et au Canada ont été sondées (50 demandes mais seulement 19 ont répondu). Le questionnaire portait sur sept thèmes spécifiques, 1) Informations générales, 2) le programme de production, 3) l'efficacité du système de recirculation, 4) les composantes du système, 5) les permis détenus, 6) la gestion des effluents et 7) des statistiques de gestion et d'opération du système. Les coûts d'opération et de construction ont également été abordés. 56% des répondants ont affirmé être en phase de tests préalables à l'opération à pleine capacité. 47% ont affirmé avoir eu certaine forme de problèmes associés au design du système, certains problèmes ont été réglés, d'autres non. 60% des répondants ont affirmé avoir eu des coûts de construction supérieurs à 1,000,000 US\$. Le taux de recirculation est très variable d'un producteur à l'autre mais 69% ont un taux de 90% ou plus, il n'y a cependant que 31% des producteurs re-circulant plus de 90% de l'eau. Les espèces les plus populaires sont dans l'ordre, la truite arc-en-ciel (5), le saumon Atlantique (4), l'omble chevalier (2), la truite arc-en-ciel et saumon coho (1). Aucune installation pour l'omble de fontaine n'a été identifiée. Les volumes de production reportés vont de 1.8 tonnes à 100 tonnes avec une moyenne de 52.2 tonnes métriques. 64% sont dédiés à la table, 57% à l'alevinage, 36% à l'incubation des œufs et 21% au maintien des géniteurs.

72% des installations utilisent des bassins circulaires mais l'utilisation de raceways est également courante. Les problèmes les plus reportés ont trait à la filtration et sont solutionnés par le remplacement du médium de filtration. Le type de biofiltration le plus utilisé est celui faisant intervenir les médiums fluidisés mais les filtres pressurisés et les contacteurs rotatifs sont de plus en plus utilisés. La gestion des gaz se fait principalement par les colonnes d'aération, l'utilisation d'oxygène liquide en association avec un oxygénateur (low head oxygenator; LHO) est très courante. 33% ne contrôlent pas la température, lorsqu'elle l'est, les échangeurs de chaleur sont les plus utilisés. L'utilisation d'UV et de l'ozone pour la désinfection sont les méthodes les plus utilisées. La moitié des stations doivent contrôler l'alcalinité de l'eau, le contrôle du pH par l'aération est très important, lorsqu'il doit être contrôlé par l'ajout de produits, c'est le plus souvent avec du bicarbonate de sodium.

Une meilleure compréhension de la balance énergétique des systèmes en recirculation pourrait réduire substantiellement les coûts de construction. Des données récentes

suggèrent que la balance thermique d'une ferme en recirculation est basée principalement sur la chaleur produite par les poissons, la biomasse bactérienne et la perte de chaleur des pompes. Les besoins en chauffage de l'eau sont donc largement dépendant des pertes de chaleurs lors des échanges d'eau, de la ventilation, la température extérieure et la biomasse de poisson dans les bassins.

## 5.0 AUTRES SECTEURS EN DÉVELOPPEMENT

### Activité bactérienne.

L'activité bactérienne est déterminante dans un système en recirculation. Pour le bon fonctionnement des biofiltres nitrifiants la concentration de l'oxygène à des niveaux élevés est essentielle. En conditions partiellement anoxiques, l'oxydation complète de l'ammoniaque en nitrates sera incomplète ou en tous cas ralentie (ks autour de 0.5mg/l). Des modèles pour déterminer l'évolution des populations bactériennes sous différentes conditions d'opération sont en développement de même que l'optimisation des performances en eau froide (Blancheton comm. pers.).

### Nutrition.

Aliment : la composition de l'aliment est l'élément clé dans l'établissement des performances des poissons et des systèmes (Boujard et Médale 1994). Il est possible en contrôlant la teneur en lipides des aliments tout en gardant la teneur en protéines constante, d'améliorer l'utilisation des protéines et de diminuer la consommation d'oxygène à l'intérieur du système. Une augmentation de 10 à 30% en lipides permet une meilleure ingestion des aliments alors que la croissance demeure stable et que le niveau d'excrétion d'azote diminue. Ceci implique une meilleure utilisation des protéines disponibles et une diminution de la consommation de l'oxygène par les poissons et le système (Blancheton 2000). La formulation d'aliment spécialement produit pour l'utilisation en circuit fermé pouvant permettre une réduction du lessivage et de dégradation de la particule alimentaire et la production de fèces plus stables est en développement ce qui réduirait la charge de matière organique du système (Eding et Kamstra 2001).

Photopériode : la photopériode a un impact déterminant sur le comportement alimentaire et conséquemment sur le système d'élevage. Le prolongement de la photopériode maximise l'ingestion et la croissance et a pour effet de limiter les variations ponctuelle de la qualité de l'eau sur un cycle journalier en uniformisant l'activité alimentaire sur une base quotidienne (Blancheton 2000).

### Qualité de l'eau et densité d'élevage.

De façon générale la technologie pour le contrôle de la qualité de l'eau existe mais les seuils de régulation sont peu documentés (Hardy et Poxton 1993; Tomasso 1994). Des études ont portées sur les niveaux individuels de quelques facteurs (température, TAN et pH)(Lemarié et coll. 1996) mais presque rien sur les effets du CO<sub>2</sub>, des nitrates ou sur leurs effets synergiques sur les performances des poissons. Par ailleurs, le niveau des paramètres de qualité de l'eau compatible avec une bonne productivité des élevage

doivent être identifiés pour chaque espèce et à différents stades de développement (Blancheton 2000).

#### Hydroponique.

L'intégration de l'aquaculture et de la culture hydroponique de plantes a été examinée à maintes reprises au cours des trente dernières années par l'étude d'une grande variété de designs de plantes et d'animaux aquatiques et de protocoles expérimentaux (Rakocy et Hargreaves 1993; Timmons 2002). Les systèmes en recirculation sont les plus appropriés pour une intégration avec l'hydroponique car les nutriments peuvent potentiellement être maintenus à des concentrations suffisantes pour permettre la culture de plantes (Nair et coll. 1985). Par contre, les aliments conventionnels semblent inadéquats car leur composition génère des variations non-désirables au cours de l'élevage en fonction de la charge et de l'activité alimentaire des poissons. Seawright et coll. (1998) suggère l'utilisation d'un aliment dont les nutriments auraient une haute disponibilité biologique : les nutriments non-absorbés par les poissons seraient excrétés sous une forme soluble qui serait disponibles à des concentrations adéquates pour les besoins des végétaux et ce à des niveaux non-toxiques pour les poissons. La faisabilité de l'utilisation de ces procédés en eau salée reste à être démontrée.

#### Semi-recirculation et production intégrée (mollusques, algues)

En Israël, un système intégré en semi-recirculation produisant des poissons (*Sparus aurata*) et des invertébrés (*Haliothus discus hannai* ou *Paracentrotus lividus*) et des algues (*U. lactuca*) utilisés pour la nitrification, l'oxygénation et pour alimenter à leur récolte les invertébrés (Schuenhoof et coll. 2003). Le biofiltre d'algues traitait 50% des effluents provenant de la décharge du bassin de poissons et le 50% résiduel était de l'eau non-filtrée directement pompée de la mer et qui passait à travers l'élevage d'invertébrés avant approvisionnement aux bassins de poissons. Les nutriments dissous et l'ammoniaque traitée par le biofiltre d'algues réduisait de 30% leur teneurs (l'ammoniaque à des seuils non toxiques pour les poissons lors des pics de production matinal : alimentation des poissons). L'oxygénation était partiellement générée par l'activité de photosynthèse des algues alors que l'assimilation du CO<sub>2</sub> était égale à la production de CO<sub>2</sub> des poissons. La conversion des nutriments polluants en biomasse algale de haute-qualité peut réduire les coûts de la biofiltration. Projet UE en cours coordinateur M Spighele (IOLR, Israël).

#### Traitement thérapeutique

L'effet d'un aliment médicamenteux contenant de l'acide oxolinique sur les performances d'un biofiltre sur lit fluidisé a été examiné sur une période de 29 jours. La plupart des systèmes en circuit fermé sont équipés de biofiltres. À cause de la nature de ces systèmes, les agents chimiques ajoutés à l'eau des bassins lors d'épisode d'infection vont pénétrer dans les filtres biologiques. L'effets des antibiotiques ou autres agents chimiques pour le contrôle des maladies peut donc potentiellement altérer les performances de ces unités nitrifiantes et causer une diminution de la qualité de l'eau pouvant être problématique (Heinen et coll., 1995). Une attention particulière devrait être portée à la stabilité et la cinétique du système de biofiltre suivant une exposition aux antibiotiques (Skjoldstrup et coll. 2000).



Selon le Dr. Blancheton, l'expérience nous montre qu'il n'y a pas de pathologies bactériennes dans des systèmes bien conduits : si les poissons entrés sont sains, pas de parasites ni de maladies virales. Ce point est extrêmement important car pas de traitement à faire, donc poisson et rejet sans résidus de molécules de traitement. Les mécanismes pour expliquer ce phénomène seront étudiés dans les trois prochaines années (à venir thèse en démarrage) (Blancheton, comm.pers.)

#### Traitement des rejets concentrés

Traitement et recyclage des déchets de production : le traitement des effluents plus concentrés d'une unité de production comparativement aux effluents d'un système en circuit ouvert les rendent a priori plus facile à traiter. Leur traitement est essentiel pour le développement durable de l'activité d'élevage en re-circulé. Les procédés actuels sont coûteux ainsi l'utilisation d'organisme s'alimentant de ces déchets (mollusques, algues)(Shpigel 1993) peut améliorer la productivité du système en minimisant les coûts. La dénitrification et déphosphatation fonctionne bien en eau douce et en eau de mer. L'Ifremer a conduit des essais de traitement par lagunage à haut rendement algal des effluents du système recyclé et réutilisation de l'eau traitée dans l'élevage (pub en cours, présentations à Pekin (WAS) et à Trondheim (EAS), G. Deviller premier auteur thèse en cours)(Blancheton, comm.pers.). L'addition d'un circuit en parallèle pourrait également offrir une solution. A prime abord, il faudra quantifier et caractériser les déchets. La création de marais salant artificiels est envisageable à l'image de ce qui se fait déjà en eau douce. L'accumulation de phosphore ne semble pas directement toxique aux organismes marins mais pose un problème de production d'algues dans le système lorsque trop élevée. Ce sont ces algues qui posent ensuite des problèmes de toute sorte en augmentant la charge organique du système, en salissant les bassins, en s'accumulant un peu partout etc. Un système de déphosphatation a donc été récemment installé au Biodôme de Montréal afin de répondre aux problèmes d'accumulation de phosphates (Parent, comm pers.). Ce nouveau système repose sur le principe d'adsorption du phosphore sur des scories d'aciéries et semble répondre aux attentes de ses utilisateurs. Encore une fois ce système n'est pas conçu pour l'aquaculture commerciale et ne peut traiter les forts volumes d'eau recirculée mais nous croyons que ces systèmes sont très envisageables pour le traitement de rejets piscicoles.

## **6.0 BILAN DE LA PRODUCTION MONDIALE**

En Europe, la plupart des écloséries performantes utilisent la technologie de la recirculation. Le grossissement porte encore aujourd'hui sur une petite part de la production et il est difficile de connaître précisément les niveaux de production surtout des poissons d'eau douce mais également des poissons marins. Elle se situerait selon J.P. Blancheton (Ifremer, comm. pers.) autour de 10 000 tonnes annuellement. Au niveau mondial cette information est également difficile à obtenir. Utilisant le recyclage, la Hollande annonce environ 800T de poissons marins, 2000T de catfish et 4000T d'anguilles. En France, on doit être autour de 1500T de poissons marins.

#### Production commerciale en eau douce(non exhaustif)

Production de juvéniles de saumon (atlantique, coho et/ou chinook) pour l'introduction en cages marines pour activités de grossissement commercial dans les provinces maritimes (saumon atlantique seulement) et dans les provinces de l'Ouest au Canada, aux États-Unis, au Chili et en Norvège principalement.

Production de tilapia (Etats-Unis, Asie) , poissons chats (Channel catfish *Ictalurus punctatus* Etats-Unis), carpes (Indonésie, Asie), bar rayé, (Etats-Unis) anguille (*Anguilla anguilla*) principalement au Danemark (Pedersen 1998); barramundi (Australie). Au Québec, les productions actuelles ou prévues se font en eau douce : l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)(ex : Pisciculture Orléans), l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) (Aquaculture Nordik inc.) la perchaude (*Perca flavescens*) et le doré (*Stizostedion vitreum*) sont en voie de développement.

Production commerciales ou pré-commerciales en eau salée (non exhaustif).

La plupart des productions de juvéniles de poissons marins en France et potentiellement des autres pays européen se font en système en circuit fermé. En Norvège, les unités de productions de juvéniles de morues qui sont projetées s'appuieront également sur cette technologies et seront essentiellement inspirées de la technologie développée pour le bar européen (*Dicentrarchus labrax*) ou la dorade (*Sparus aurata*). Des installations en circuit fermé pour le grossissement de bar européen (*Dicentrarchus labrax*) sont en opération via une collaboration France-Islande (Project MARITECH, Mistral-Mar et Maki). Ce projet a vue ces installations augmenter graduellement sa production de 2-5 tonnes à 60-100 tonnes à 1000-2000 tonnes (actuellement en cours). La compagnie Mistral-Mar désire augmenter l'échelle de production des systèmes en recirculation actuel d'un facteur 10, en créant une production environnementalement saine, à la fine pointe de la technologie et une alternative compétitive aux systèmes d'élevage en cage conventionnel dans le nord de l'Islande (Mistral-Mar [www.innovation-showcase.net/pdf/newsletter%20issue4.pdf](http://www.innovation-showcase.net/pdf/newsletter%20issue4.pdf) Sustainable fish-farming. A key for regional revitalization.)

Des productions de turbot sont également en cours au Portugal (100 tonnes en 2001 à 250 tonnes en 2002, capacité de 270 tonnes), en Espagne (capacité de 500 tonnes), en France (Bretagne et Normoutier)(>250 tonnes), en Angleterre (Northern Wales : capacité de production de 200 tonnes et Écosse(Aquascot)) en Hollande (Yerseke et Seafarm, moins de 10 tonnes) et en Allemagne (Ecomares, capacité de production de 10 tonnes). Une opération expérimentale de production de sole (*Solea solea* et *S. senegalensis*) est en opération en Hollande (RIVA)(ICES 2002a).

Au Canada la production commerciale se limite à la production de flétan de l'atlantique (*Hippoglossus hippoglossus*) par Scotian Halibut inc. (150 tonnes)(B. Blanchard comm. pers.) et un projet d'élevage de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) en eau saumâtre au Nouveau-Brunswick (Cooks Aquaculture, M. Couturier comm. pers; Northern Aquaculture 2001).

Espèces marines en développement (non exhaustif)

Les étapes clé dans le développement d'une nouvelle production en recirculation et qui sont généralement manquantes et décisives sont : les connaissances biologiques (besoins en terme de qualité de l'eau, sensibilité aux variables tels le pH, l'ammoniaque etc.), l'aspect consommation-production des poissons (connaissances des marchés, taille optimale de commercialisation)(Blancheton comm. pers.).

Calmars. (Walsh 2002)

Cardeau d'été. Élevage expérimental de *Paralichthys dentatus* en recirculation au Rhode-Island (É.-U.) Bengston (1999)

Quahog. La forte demande et le prix de vente du quahog font de cette espèce une candidate commerciale pour l'aquaculture. La façon la plus économique de produire cette espèce est de les élever en milieu naturel a des densités contrôlées. Des écloséries commerciale produisent du naissain (1-2 mm) qui sont par la suite élevés en nurseries jusqu'à une taille compatible avec le transfert en milieu naturel. Le rôle pivot que joue la phase nurserie dans la croissance de cette industrie pousse la recherche a amélioré la croissance durant la phase de pré-grossissement. L'utilisation de la technologie de la recirculation peut contribuer au développement et au succès de ces unités de production car offre de meilleur taux de survie et de croissance que les systèmes classiques (Pfeiffer et coll. 1999).

Pétoncle. Production de post-larves de pétoncle (*Pecten maximus*) en recirculation en Norvège pour réduire la quantité d'eau utilisée et d'algues requises (Van der Meeren et al. 1997).

Crevettes sp. Élevage en recirculation de la crevette tigrée (*Penaeus monodon*) (Menasveta et al. 2001) et selon Lawrence et Lee (1997) une priorité dans le développement de systèmes en recirculation pour l'élevage de crevettes (maturation des gonades et production de larve) devrait être identifiée.

Rotifères. Considérant qu'aucune diète de formulation commerciale pour la première alimentation de larves de poissons marins n'est disponible, la distribution de proie vivante est essentielle pour les opérations d'écloserie commerciales. La production commerciale de poissons marins dans la Méditerranée découle de l'amélioration significative des techniques de production de proies vivantes (Dehasque et coll. 1998). La culture en batch est toujours peu prédictible et difficile à gérer et à récolter et rends difficile la désinfection des rotifères (vecteurs de maladies potentiels) avant leur distribution aux larves. L'utilisation de diète pour la culture de rotifères lorsque les besoins d'enrichissement en EPA et DHA sont modérés à faible permet une composition nutritionnelle des rotifères plus stable avant la distribution larvaire. De nouvelles techniques de culture de rotifères tels que les systèmes en circuit fermé offrent de nouvelles possibilité pour la production en continue de rotifères de haute qualité à des densités 10 fois plus élevé que les cultures en batch. L'augmentation de la production en circuit fermé est du à la meilleure qualité de l'eau par l'introduction d'écumoire à

protéines et à la filtration biologique. Au niveau bactériologique les systèmes en recirculé ne sont par plus sujet à la prolifération bactérienne que les autres techniques de production (décompte bactériens plus stables et de 10 à 100 fois moins élevés). Le développement de système en circuit fermé permet un contrôle accru sur la qualité de l'eau (moins de mortalité) et pourrait faciliter la gestion bactérienne (introduction de probionts) et ainsi contribuer à l'amélioration de la productivité. Cette technique permet une réduction substantielle de la main d'œuvre, une meilleure productivité, la production de rotifères plus propres et des possibilités accrues d'automatisation (Dhert et coll. 2001).

## **7.0 MISSION DANS LES MARITIMES (NOUVEAU-BRUNSWICK, NOUVELLE-ÉCOSSE)**

Au cours de la semaine du 13 avril 2003, une mission de 3 jours dans les maritimes a été réalisée au cours de laquelle des membres universitaires et du secteur privé de l'équipe Aquanet sur la recirculation en eau froide (EI 13 : Development of cold-water recirculation systems) ont été rencontrés soit le :Dr Graham Gagnon Université Dalhousie, Dr Michel C. Couturier Université du Nouveau-Brunswick et Brian Blanchard de Scotian Halibut (160 tonnes/an). Le projet Aquanet qui s'est terminé en 2002 visait à accélérer le développement de l'utilisation des systèmes en recirculation en eau froide et appuyer en particulier le développement de Scotian Halibut qui produit du flétan de l'atlantique (œuf à œuf). Le Dr Couturier a travaillé sur la modélisation du retrait des particules et sur les pertes énergétiques des systèmes en recirculation. Le Dr Gagnon a travaillé sur l'évaluation de la production de bromates par les systèmes d'ozonation.

Ces entretiens nous ont permis de confirmer que l'usage de l'ozone en eau salée n'était pas problématique (les doses utilisées ne génèrent pas de bromates ni ne semblent affecté les poissons) et que l'utilisation de l'ozone chez Scotian Halibut est strictement une question de coloration de l'eau. La construction de Scotian Halibut s'est fait de façon modulaire. Ce type de construction consiste en plusieurs systèmes de production relativement identiques et tous indépendants. L'approche modulaire qui a l'avantage de sécuriser la production, a permis de construire un premier module de production, de l'opérer un moment, d'analyser ses performances et de déterminer quelles améliorations pourraient être amenées avant la construction du deuxième module et ainsi de suite. Au cours de cette visite, nous avons observé une nette amélioration du premier au dernier système (design des bassin et du circuit de traitement). Le nombre de filtre à tambour a diminué et le niveau de complexité général a également diminué. La station de Scotian Halibut sert plus ou moins de banc d'essais pour ce type de systèmes. Le dernier module développé sera en application dans une nouvelle unité de production commerciale qui augmentera considérablement son niveau de production. Les coûts d'entretien des différentes composantes d'un système en circuit fermé sont directement proportionnels aux nombres d'unités de pompage et de filtration. Les pompes sont toutefois généralement plus petites et beaucoup de recherche au niveau de la conception des systèmes porte sur la réduction des coûts de pompage (low-head; type de pompe). Les installations de Scotian Halibut pompent leur eau neuve directement de la mer, ce qui provoque des fluctuations de température et de salinité saisonnières qui doivent être

rectifiées par climatisation. L'utilisation de puits souterrains est fortement conseillée. Les plus grosses pertes de chaleur surviennent par le toit. Au niveau du choix de l'espèce, le prix de vente, l'existence d'un marché stable, le niveau des débarquements prévisibles dans les prochaines années sont déterminants de mêmes que des prédispositions naturelles aux fortes densités (flétan, loup de mer, omble chevalier > autres salmonidés).

Selon Mr. Blanchard, tous les systèmes commerciaux reliés au traitement de l'eau fonctionnent. Le choix d'un système plutôt qu'un autre repose sur les besoins et les contraintes spécifiques (site, espèce, espace). Au niveau du support au développement et malgré le programme de recherche Aquanet sur la recirculation, les trois intervenants ont constaté un manque de compréhension de part et d'autre (ingénierie-biologie-industrie). Les attentes du secteur privé sont probablement élevées en fonction du fonctionnement de la recherche universitaire qui doit inclure la formation d'étudiants (projet de maîtrise de deux ans). Une solution envisageable pour assurer une vision commune est l'intervention d'organismes tels la SODIM, la SORDAC.

## **8.0 LE TRANSFERT TECHNOLOGIQUE AU QUÉBEC**

Lors d'une conférence sur les pratiques piscicoles et les technologies disponibles Funge-Smith et Phillips (2001) ont identifié les principaux axes de R&D pour le développement de l'aquaculture à l'échelle mondiale :

- Des stations pilotes et mise à l'échelle afin de tester les nouveaux systèmes et composantes
- Établissement de critères standards pour les matériaux, procédures et marges de sécurité qui devraient être appliqués aux élevages et systèmes futurs
- Continuer R&D sur des systèmes économiques pour les espèces existantes et nouvelles espèces
- Le développement en STR pour eaux turbides, eaux vertes
- Développement d'outils de suivi et gestion de paramètres plus vastes que seulement la qualité de l'eau (biomasse, mortalité, croissance, comportement, événements critiques, etc.)
- Traitement des eaux de rejets et gestion des boues
- Design de moules minimisant les fuites et facilitant la gestion des excréments (en les agglomérant par exemple)
- L'utilisation des effluents et sédiments pour d'autres formes d'agriculture.
- L'étude du comportement des animaux en fonction de l'environnement d'élevage afin d'optimiser les systèmes et parvenir à la polyculture
- Minimisation du stress et autres réponses physiologiques à l'environnement d'élevage
- Domestication et sélection
- Diversification des espèces spécialement en eau froides où les niches sont encore disponibles

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

- Développement d'espèces indigènes compatibles plutôt qu'exotiques

Plus spécifiquement, Blancheton (2000)) suggère que les systèmes proprement dit pourront bénéficier de développement dans les secteurs suivantes :

- 1) amélioration de l'efficacité de filtration mécanique
- 2) une meilleure compréhension des niveaux des différents paramètres dans l'environnement d'élevage
- 3) une meilleure connaissance de la dynamique des populations bactériennes
- 4) l'incorporation et le recyclage des produits de rejets
- 5) amélioration du budget énergétique

### Conclusion

La production de poissons en eau salée au Québec est pratiquement inexistante. A court et moyen terme, il est improbable de voir cette industrie se développer de façon importante en systèmes ouverts à cause des contraintes de température (coûts énergétiques) et environnementales (gestion des rejets). La technologie de la recirculation constitue donc une voie de développement très prometteuse.

Les contacts que Aqu@Nova SP a établis au cours de la réalisation de cette étude-synthèse ont mis en lumière un besoin de réseautage entre les intervenants nationaux et internationaux. Un intérêt certain, pour la collaboration aux efforts québécois de R&D dans ce secteur nous ont été exprimé spontanément à maintes reprises lors de nos échanges.

### Recommandations et priorisation des efforts R&D pour le Québec

La revue de littérature et les consultations révèlent l'absence d'obstacles majeurs pour un transfert de la technologie du circuit fermé en eau de mer vers le Québec. Cependant, de façon générale, l'intégration des différentes composantes dans une unité de production efficace et rentable nécessite une attention particulière. La présence sur le marché de plusieurs types d'unités utilisant différentes technologies mais ayant les mêmes fonctions rends nécessaire 1) une bonne **évaluation des besoins spécifiques** de l'utilisateur, 2) de la **planification** et 3) la **comparaison** des performances des différents systèmes : en d'autres mots « magasiner intelligemment » avant d'arrêter son choix.

La situation québécoise actuelle (absence de production commerciale en eau salée) situent les besoins immédiats face à l'introduction de cette technologie au Québec à un exercice de démonstration de la faisabilité technologique et économique et à l'acquisition d'un savoir faire. La mise en place d'une opération pilote pour faciliter l'effet de synergie entre l'industrie et la recherche devrait être préconisée. Ces installations opérées préférentiellement par une société privée avec l'appui d'organisme de soutien au développement économique (DEC, SODIM) pourraient avoir un double mandat : un unité de R&D pour l'évaluation de nouvelles espèces et amélioration des performances et une unité de production intensive à vocation commerciale dont les profits générés

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

seraient réinjectés en R&D. Cette station agirait comme une vitrine technologique pour instaurer au sein de l'industrie un climat de confiance.

R&D à court terme:

- L'utilisation de systèmes en recirculation déjà existants (LARSA U. Laval) comme banc d'essais pour :
  - 1) Optimiser le système de traitement de l'eau (réduction de la complexité des systèmes par l'utilisation de composantes à fonction multiples)
  - 2) Faire des essais de passage d'un tel système en eau de mer
  - 3) Caractériser les rejets d'une espèce d'intérêt commercial au Québec (Omble chevalier)
  - 4) Caractériser les performances de cette espèce en recirculation tant en eau douce qu'en eau de mer
  - 5) Faire une évaluation technico-financière de l'utilisation de cette technologie en contexte québécois
  - 6) Favoriser l'établissement d'un groupe de recherche s'intéressant à cette technologie et permettre une intégration des intervenant des différentes institutions (Polytechnique, U. Laval, UQAR, MAPAQ...) et différents domaines de recherche (ingénierie, biologie, économie et industrie)
  - 7) Favoriser le développement de techniques de gestion des élevages (fréquence d'alimentation, composition des aliments) ou de l'environnement d'élevage qui permettent l'amélioration de la productivité par unité de recirculation (optimum de température, optimum de salinité, densité, photopériode etc.).
  - 8) L'évaluation des potentiels hydriques de sources souterraines d'eau salée afin de cibler des sites potentiels pour l'établissement de stations piscicoles.
  - 9) Gestion des boues (déjà amorcer une réflexion)

Les priorités de R&D à moyen terme ciblent le développement de stations pilotes ayant pour fonction principale de servir de banc d'essais pour la R&D mais également de vitrine permettant de démontrer la faisabilité de l'utilisation rentable de la recirculation.

L'expérience accrue dans l'utilisation de ces systèmes et la saturation des marchés pour les espèces existante devrait provoquer un intérêt pour de nouvelles espèces. Dans la sélection d'espèces pour la mariculture en circuit fermé, la consultation d'études sur le potentiel biologique et technique des poissons marins et anadromes et des invertébrés est recommandée (Le François et coll. 2002; Lemieux et coll. 2002).

Dans une phase complémentaire, les axes de recherche suivant devraient être explorés :

- Les performances des espèces susceptibles d'être ciblée pour des opérations d'élevage en circuit fermé devront être évaluées rigoureusement sur le plan biologique et économique (caractérisation des rejets et tolérances aux niveaux des nitrates, ammoniacs, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, densité, comportement etc. et prix de vente, coûts de production etc.) (Exemple : l'omble chevalier comparativement à l'omble de fontaine pourrait être plus prédestiné à un élevage en circuit fermé car : supporte des densités

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

d'élevage plus élevées, la croissance en eau froide est meilleure, démontre une plus grande résistance aux maladies, génère un meilleur prix de vente *marché de niche* développé)

- Des efforts en marketing permettront vraisemblablement l'expansion future de nouvelles productions en circuit recyclé (Ex. loup de mer *Anarhichas* sp)
- Dans le cadre du développement d'un axe de production en cage marine ou en bassins terrestres en eau salée de salmonidés (Programme ECO), le conditionnement de juvéniles d'omble de fontaine ou d'omble chevalier selon une technologie expérimentale (ex : manipulation de l'aliment ou de l'environnement aqueux (composition ionique  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ), SuperSmolt System<sup>®</sup>) serait une avenue de recherche intéressante
- Évaluer le transfert de la technologie à échelle commerciale et ciblant les besoins spécifiques des différentes régions du Québec.



## 9.0 BIBLIOGRAPHIE

- Akunna J, C Bizeau et R Moletta. 1993. Nitrate and nitrite reductions with anaerobic sludge using various carbon sources. *J. Wat. Poll. Control Fed.* 58 : 398-404.
- Balderston WL et JMCN Sieburth. 1976. Nitrate removal in closed-system aquaculture by columnar denitrification. *Appl. Environ. Microbiol.* 12 : 808-818.
- Bardach JE. 1997. In: Sustainable aquaculture (Bardach JE ed). John Wiley and Sons inc. New York, USA.
- Bengston D et V. Oiestad. 2002. Recent advances in recirculation technology for marine fish culture. A report prepared for ICES Working Group on Marine Fish Culture (WGMAFC) Olhao, Portugal 11-14 march 2002. Pp. 22-26.
- Bengston, DA. 1999. Aquaculture of summer flounder (*Paralichthys dentatus*); status of knowledge, current research and future research priorities. *Aquaculture* 176 : 39-49.
- Bergheim A et A Brinker. 2003. Effluent treatment for flow through systems and European Environmental Regulations. *Aquacultural Engineering* 27 : 61-77.
- Blancheton JP. 2000. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. *Aquacultural Engineering* 22 : 17-31.
- Blancheton JP et D. Coves. 1992. Closed systems in intensive marine finfish hatcheries. State of the art and future prospects. Dans : Bordeaux Aquaculture 92. 25-27 March, Bordeaux, France.
- Blaszczyk M. 1993. Effect of medium composition on the denitrification of nitrate by *Paracoccus denitrificans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 59 : 203-210.
- Blaszczyk M., R Mycielski, H Jaworowska-Deptuch et K Brzosteck. 1980. Effect of various sources of organic carbon and high nitrite and nitrate concentrations on the selection of denitrifying bacteria. I. Stationary cultures. *Acta Microbiol. Polon.* 29 : 397-406.
- Bonin P, Gilewicz M et JC Bertrand. 1989. Effect of oxygen on each step of denitrification on *Pseudomonas nautica*. *Can J Microbiol.* 35 : 1061-1064.
- Bonin P, Gilewicz et JC Bertrand. 1987. Denitrification by a marine bacterium *Pseudomonas nautica* strain 617. *Ann. Inst. Pasteur/Microbiol.* 138 : 371-383.
- Boujard T et F Médale. 1994. Regulation of voluntary feed intake in juvenile rainbow trout fed by hand or by self-feeders with diets containing two different protein/energy ratios. *Aquatic Living Resource* 7 : 211-215.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Chamberlain G et H Rosenthal. 1995. Aquaculture in the next century, opportunities for growth, challenges and sustainability. World Aquaculture 26 : 21-25.

Chen S, DE Coffin et RF Malone. 1993. Production characteristics and modelling of aquaculture sludge from a recirculating aquaculture system using a granular media biofiltre. Dans : Wang JK (ed) Techniques for modern aquaculture. American Society of Agricultural Engineers, St-Joseph, MI pp. 16-25.

Chen S, DE Coffin et RF Malone. 1997. Sludge production and management for recirculating aquaculture systems. Journal of World Aquaculture Society. 28: 303,315

Christensson M, E Lie et T Welander. 1994. A comparison between ethanol and methanol as carbon sources for denitrification. Wat. Sci. Technol. Wat. Quality Int. '94, part 6, 83-90.

Christensson M et P Harremoës. 1977. Biological denitrification of sewage : a literature review. Prog. Wat. Technol. 8 : 509-555.

Cripps SJ et A Bergheim. 2000. Review. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. Aquacultural Engineering 22 : 33-56.

Dhert P, G Rombaut, G Suantika et P Sorgeloos. 2001. Advancement of rotifer culture and manipulation techniques in Europe. Aquaculture 200 : 129-146.

Eding E et Kamstra A. 2001. Design and performance of recirculation systems for european eel *Anguilla anguilla* and african catfish *Clarias gariepinus*. Aquacultural Engineering Society Special session : International recirculating systems. Aquaculture 2001. Pp. 3-14.

FAO 1997. Review of the state of world aquaculture. FAO Fisheries department, FAO Fisheries Circular 886 Rev. 1 FAO Rome, 163 pp.

FishPro 2001. Big spring fish culture station: recirculation study. Document réalisé pour Fish and Boat Commission Pennsylvanie, USA 260 pp.

Forsythe A et KC Hosler. 2002. Experiences in constructing and operating cold water recirculating aquaculture facilities for salmon smolt production. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Recirculation, Virginia Tech, Roanoke, USA, 18-21 July. Pp. 325-333.

Funge-Smith S et MJ Phillips. 2001. Aquaculture systems and species. Conférence session of aquaculture systems and technologies FAO p. 129-135.

Golz W, KA Rusch et RF Malone. 1999. Modeling the major limitations on nitrification in floating bed filters. Aquacultural Engineering 1: 43-61.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

- Grgurik G, SS Wetmore et RW Fournier. 2000. Biological denitrification in a closed-seawater system. *Chemosphere* 5: 549-555.
- Handy RD et MG Poxton. 1993. Nitrogen pollution in mariculture : toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. *Rev. Fish Biol. Fish.* 3 : 205-241.
- Heinen JM, JA Hankins et PR Adler. 1996. Water quality and waste production in a recirculating trout culture system with feeding of a higher energy or a lower energy diet. *Aquaculture Research* 27 : 699-710.
- Heinen JM, AL Weber, AC Noble et JD Morton. 1995. Tolerance to formalin by a fluidized bed biofilter and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a recirculating culture system. *Journal of World Aquaculture Society* 26 :65-71.
- ICES. 2002a. Report of the working group on marine fish culture. Olhao, Portugal 11-14 march 2002. ICES CM 2002/F :01.
- ICES 2002b. Report of the working group on environmental interactions of mariculture. ICES Headquarters 8-12 avril 2002. ICES CM 2002/F:04.
- Kelly LA, A Bergheim A et J Stellwagen. 1997. Particle size distribution of wastes from freshwater fish farms. *Aquaculture International* 5 : 65-87.
- Kim SK, I Kong, BH Lee, L Kang, MG Lee et KH Such. 2000. Removal of ammonium-N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifier. *Aquacultural Engineering* 3 : 139-150.
- Labbé N., S Parent et R Villemur. 2003. Addition of trace metals increases denitrification rate in closed marine systems. *Water Research* 4: 914-920.
- Lanteigne S. 2002. Current status and potential of the canadian aquaculture industry. Study no.1 OCAD-BCDA December 2002. 53 pp.
- Lawrence AL et PC Lee. 1997. Research in the Americas. In : D'abramo L, Conklin D, Akiyama D (eds). *Crustacean nutrition*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana pp. 566-587.
- Lee PG, RN Lea, E Dohmann, W Prebilsky, PE Turk, H Ying et JL Whitson. 2000. Denitrification in aquaculture systems : an example of a fuzzy logic control problem. *Aquacultural Engineering* 23 : 37-59.
- Le François NR, H. Lemieux et PU Blier. 2002. Biological and technical evaluation of the potential of marine and anadromous fish species for cold-water mariculture. *Aquaculture Research* 33: 95-108.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Le François NR et B. Archer. 2001. Revue de littérature : Impacts environnementaux et socio-économiques de l'activité d'élevage de salmonidés en cages marines avec emphase sur les mesures d'atténuation et les modèles de gestion. Revue de littérature Programme ÉCO, 83 pp.

Lekang OI et H Kleppe. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering* 3 : 181-199.

Lemarié G, D Coves, G Dutto, E Gasset et J Person-Le Ruyet. 1996. Chronic toxicity of ammonia for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Dans : Swanson C, P Young et D MacKinlay eds. *Applied Environmental Physiology of Fishes Symposium Proceedings*. International Congress on the Biology of Fishes, San Francisco State University July 14-18, 1996. American Fisheries Society, Bethesda MD pp. 65-76.

Lemieux H, PU Blier, B Parent et NR Le François. 2002. Rearing potential of numerous marine invertebrate species for the diversification needs of the mariculture industry in the east of Canada. UQAR 283 pp. Disponible OCAD-BCDA, Moncton, N.-B.

Leonard N, JP Guiraud, E Gasset, JP Cailleres et JP Blancheton. 2002. Bacteria and nutrients- nitrogen and carbon- in a recirculating system for sea bass production. *Aquacultural Engineering* 26 : 111-127.

Liltved H. 2001. Ozonation and UV-desinfection in intensive fin-fish systems. *Aquacultural Engineering Society Workshop : Intensive fin-fish systems and technologies*. *Aquaculture* 2001. Pp. 57-72.

Losordo T, M Masser et J Racoky. 1992. Recirculating aquaculture tank systems. *Southern Aquaculture Center (SRAC) Pub.* 51 : 1-8.

Madigan MT, JM Martinko et J Parker. 1997. *Brock biology of microorganisms*, 8<sup>ième</sup> édition, Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

Mayer I et E McLean. 1994. Bioengineering and biotechnological strategies for reduced waste aquaculture. *Nutritional strategies and management of aquaculture waste*. 1995. Pp. 85-102. *Water Science and Technology* Vol 31, no. 10.

Menasveta P, T Panritdam, P Sihanonth, S Powtongsook, B Chuntapa et P Lee. 2001. Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering*. 25 : 35-49.

Nair A, JE Rakocy et JA Hargreaves. 1985. Water quality characteristics of a closed recirculating system for tilapia culture and tomato hydroponics. *Second International Conference on Warm Water Aquaculture-Finfish*. Proceedings of a conference, HI pp. 223-254.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Olin PG. 2001. Current of aquaculture in North America. In: RP Subasinghe, P Bueno MJ Phillips, C Hough, SE McGladdery et JR Arthur eds. Aquaculture in the third millennium. Technical Proceedings of the conference on aquaculture in the third millennium. Bangkok Thailand 20-25 fevrier 2000, p. 377-396. NACA Bangkok et FAO Rome.

Olivar, MP, PP Ambrosio et IA Catalan. 2000. A closed water recirculation system for ecological studies in marine fish larvae : growth and survival of sea bass larvae fed with live prey. Aquatic Living Resource 13 : 29-35.

Outwater AB, (1994) Reuse of sludge and minor waste water residuals. Lewis, Boca Raton, FL

Park EJ, JK Seo, MR Kim, IH Jung, Jy Kim et SK Kim. 2001. Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifier. Aquacultural Engineering 24 : 169-180.

Patterson RN, KC Watts et TA Gill. 2003. Micro-particles in recirculating aquaculture systems : determination of particle density by density gradient centrifugation. Aquacultural Engineering 27 : 105-115.

Patterson RN, KC Watts et MB Timmons. 1999. The power law in particle size analysis for aquacultural facilities. Aquacultural Engineering 19 : 259-273.

Pedersen PB. 1998. Status of recirculation technology in Denmark. ICES CM 1998/L :8 Farming Marine Fish beyond the year 2000 : Technological solutions for biological challenges 6 pp.

Pfeiffer TJ et KA Rusch. 2000. An integrated system for microalgal and nursery seed clam culture. Aquacultural Engineering 24 : 15-31.

Pfeiffer TJ, TB Lawson et KA Rusch. 1999. Northern quahog, *Mercenaria mercenaria*, seed clam waste characterization study : precursor to a recirculating culture system design. Aquacultural Engineering. 3 : 149-161.

Rakocy JE et JA Hargreaves. 1993. Integration of vegetable hydroponics with fish culture : a review. Dans : Wang JK (ed), Techniques for modern aquaculture.. Proceedings of a conference 21-23 June 1993, Spokane, WA pp. 112-136.

Reed, SC, RW Crites, EJ Middlebrooks, (1995) Natural systems for waste management and treatment second edition McGraw-Hill NY.

Sandu SI, GD Boardman, BJ Watten et BL Brazil. 2002. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bed medium. Aquacultural Engineering 1: 41-59.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Sauthier N, A Grasmick et JP Blancheton. 1998. Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. *Wat. Res.* 6: 1938-1938.

Schuenhoff A, M Shpigel, I Lupatsch, A Ashkenazi, FE Msuya et A Neori. 2003. A semi-circulating, integrated system for the culture of fish and seaweed. *Aquaculture* 1-4:167-181.

Seawright DE, RR Stickney et RB Walker. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture* 160: 215-237.

Shpigel M, A Neori, DM Popeer et H Gordin. 1993. A proposed model for “environmentally clean” land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. *Aquaculture* 117: 115-128.

Skjolstrup J, E McLean, PH Nielsen et JO Frier. 2000. The influence of dietary oxolinic acid on fluidised bed biofilter performance in a recirculation system for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) *Aquaculture* 183: 255-268.

Suantika G, P Dhert, G Rombaut, J Vandenberghe, T De Wolf et P Sorgeloos. 2001. The use of ozone in a high density recirculation system for rotifers. *Aquaculture* 201: 35-49.

Suantika G, P Dhert, M Nurhudah et P Sorgeloos. 2000. High-density production of the rotife *Brachionus plicatilis* in a recirculation system: consideration of water quality, zootechnical and nutritional aspects. *Aquacultural Engineering* 21: 201-214.

Summerfelt ST, PR Adler, DM Glenn et RN Kretschmann. (1999) *Aquaculture sludge removal and satbilization within created wetlands. Aquacultural Engineering* 19 : 81-92

Timmons MB, JM Ebeling, FW Weaton, ST Summerfelt et BJ Vinci. 2002. *Recirculating aquaculture systems.* 2<sup>nd</sup> Ed. NRAC Publication No. 01-002 769 pp.

Tomasso JR. 1994. Toxicity of nitrogenous wastes to aquaculture animals. *Rev. Fish. Sci.* 2: 291-314.

Van der Meeren T, T Magnesen, L Torkildsen et S Andersen. 1997. Spat production of scallops (*Pecten maximus*): Part 2: Development and upscaling of the spat production 1996. *Fisken og Havet* no. 4 61 pp. March 1997.

Viadero RC Jr et JA Noblet. 2002. Membrane filtration for removal of fine solids from aquaculture process water. *Aquacultural Engineering* 26: 151-169.

Walsh LS, PE Turk, JW Forsythe et PG Lee. 2002. Mariculture of the loliginid squid (*Sepioteuthis lessoniana*) through seven successive generations. *Aquaculture* 1-4: 245-262.

Aqu@Nova SP  
Technologie du circuit recyclé- mariculture Québec

Wedemeyer GA, NC Nelson et WT Yasutake. 1979. Physiological and biochemical aspects of ozone toxicity to rainbow trouts (*Salmo gairdneri*). J. Fish. Res. Board Can 36: 605-614.

Weeks CT et H Westers. 2002. Manageability concerns in engineering and design of recirculating aquaculture systems. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Recirculation, Virginia Tech, Roanoke, USA, 18-21 July. Pp. 382-392.

Welander U et B Mattiasson. Sous presse. Denitrification at low temperatures using a suspended carrier biofilm process. Water Res.

Westers H. 1999. Operationnal waste management in aquacultural effluents. Dans: Cowey CB, Cho, CY Eds. Nutritional strategies in aquaculture waste. University of Guelf, Guelf Ont Canada. pp231-238

Westers H. 2000. A white paper on the status and concerns of aquaculture effluents in the North Central Region. 12 pp.  
[ag.ansc.purdue.edu/aquanic/ncrac/wpapers/effluents32900.pdf](http://ag.ansc.purdue.edu/aquanic/ncrac/wpapers/effluents32900.pdf)

Yang L, L-S Chou et WK Shieh. 2001. Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. Water Resource 13: 3097-3108.