

ETUDE DE LA DIMINUTION DES REJETS ET DES ECONOMIES D'EAU EN PISCICULTURE



Figure 1 : Bassin de production en eau recirculée – Beaufort (38)

Convention Agence de l'Eau / ADAPRA n°2006 1035



FICHE RESUME

TITRE DU PROJET : Etude de la diminution des rejets et des économies d'eau en pisciculture

DEMANDEUR : **ADAPRA** (Association pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Rhône-Alpes)

Association loi 1901, Code APE 9412Z – non assujettie à la TVA
N° SIRET : 332 836 840 00048

Agrapole – 23 rue Jean Baldassini - 69364 LYON Cedex 07
Tél. : 04 72 72 49 66 Fax : 07 72 72 49 26

Responsable du projet : M. Jean-Christophe CORMORECHE
(mail : jc.cormoreche@adapra.org)
M. Timothée GADENNE

PARTENAIRES DE L'OPERATION :

S.A.S les Fils de Charles MURGAT
Pisciculture Sources des Fontaines
38270 BEAUFORT
Tél : 04.74.79.18.98. Fax : 04.74.79.79.94.
Correspondant : M. Laurent MURGAT



IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER)
Chemin de Maguelone
34250 Palavas-les-Flôts
Tel: 04 67 13 04 00 Fax: 04 67 68 28 85
Correspondant : M. Jean-Paul BLANCHETON
Thèse : Emmanuelle ROQUE d'Orbcastel



OBJET DU PROJET : Mise en place d'un site pilote de production de truites en eau recirculée intégrant un système de traitement de l'eau d'élevage

DUREE du PROJET : 4 ans

MONTANT :	Coût de l'étude :	232 891 € (prévisionnel 231 705 €)
	SAS les Fils de Charles MURGAT :	197 808,37 €
	ADAPRA :	35 082,22 €

FINANCEMENT :	Agence de l'Eau :	115 853€
	Porteurs du projet :	117 038 €

SOMMAIRE

Fiche Résumé	p 2
 PARTIE TECHNIQUE	
I) Présentation des maîtres d'œuvre	p 6
II) Présentation de la problématique et de l'étude	p 7
III) Articulation des travaux	p 8
IV) Bassin de production en eau recirculée	p 9
1) Construction du bassin	p 9
2) Fonctionnement	p 11
3) Suivi du fonctionnement	p 12
V) Méthodologie et résultats de l'expérimentation	p 12
1) Matériel et méthodes	p 12
1.1) Séries d'élevages	p 12
1.1.1) Fonctionnement physico-chimique et biologique d'un système d'élevage en circuit recirculé à la densité d'élevage habituelle et maintenue constante	p 12
1.1.2) Capacité d'accueil maximale du système d'élevage en circuit recirculé et bien être des poissons	p 13
1.2) Points de mesures et caractéristiques	p 13
1.2.1) Qualité de l'eau d'élevage	p 13
1.2.2) Croissance et mortalité des poissons	p 15
1.2.3) Bien être des poissons	p 16
1.2.4) Analyse statistique	p 18
2) Résultats	p 18
2.1) Fonctionnement du système d'élevage en circuit recirculé et performance des poissons	p 18
2.1.1) Qualité de l'eau entrante et écoulements	p 18
2.1.2) Qualité de l'eau dans les bassins d'élevage	p 19
2.1.3) Efficacité du système de traitement de l'eau du SR	p 20
2.1.4) Evaluation des rejets du SR et comparaison avec le SO	p 21
2.1.5) Performances des poissons	p 22
2.2) Capacité d'accueil maximale du système d'élevage en circuit recirculé et bien être des poissons	p 24
2.2.1) Qualité de l'eau entrante et écoulements	p 24
2.2.2) Qualité de l'eau dans les bassins d'élevage	p 25
2.2.3) Performances des poissons	p 25
2.2.4) Bien être des poissons	p 27

VI)	Discussions et Perspectives	p 29
VII)	Bibliographie	p 32
VIII)	Communications sur le projet	p 34
IX)	Publications	p 34

PARTIE FINANCIERE

I)	Budget engagé	p 36
II)	Etat des dépenses	p 37
III)	Justifications des écarts	p 38

REMERCIEMENTS

p 40

ANNEXES

PARTIE

TECHNIQUE

l) Présentation des maîtres d'œuvre

L'ADAPRA, Association pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche Professionnelle en Rhône-Alpes, créée en 1984, est une structure qui fédère les différents secteurs professionnels de la pisciculture et de la pêche professionnelle de la Région (salmoniculture, pêche professionnelle, pisciculture d'étangs, entreprises de transformation). Elle accompagne la profession dans des projets d'intérêt collectif ayant trait aussi bien à la promotion des produits et des activités qu'à la gestion des milieux aquatiques, notamment sur la prise en compte de l'environnement pour une aquaculture durable.

Rôle dans le projet :

L'ADAPRA a assuré la coordination et le suivi de l'opération sur le terrain et a présenté les rapports d'étape et finaux de l'expérimentation.

La S.A.S. les Fils de Charles MURGAT, avec sa pisciculture située au lieu-dit les Fontaines à Beaufort dans l'Isère, produit 600 tonnes de salmonidés et s'est équipé d'un atelier de transformation. Quatre espèces de salmonidés sont produites sur eau de source : la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), la truite fario (*Salmo trutta fario*), l'Omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) et le Saumon de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). La qualité des eaux de sources ainsi que son savoir-faire ont permis à l'entreprise d'obtenir le précieux Label Rouge sur sa truite arc-en-ciel.

En 1999, la S.A.S. MURGAT s'est dotée de deux filtres rotatifs d'une capacité de 600 l/s afin de traiter ses rejets et de restituer une eau de bonne qualité dans l'Oron.

Rôle dans le projet :

La pisciculture a accueilli le projet. La S.A.S. MURGAT a délégué une partie de son personnel sur cette étude et a fourni les moyens techniques nécessaires à la réalisation de ces travaux de recherche.

L'IFREMER a pour missions de conduire et de promouvoir des recherches fondamentales et appliquées, des activités d'expertise et des actions de développement technologique et industriel.

L'objectif de l'IFREMER dans le domaine de l'aquaculture est l'acquisition de connaissances et la mise au point de technologies utiles au développement d'une aquaculture capable de produire et maintenir durablement un apport de protéines complémentaire de celui de la pêche. Les impératifs de qualité attachés à cet enjeu concernent la santé des consommateurs, l'amélioration et la surveillance des cheptels, et la mise au point de systèmes d'élevage respectueux de l'environnement et compatibles avec les autres usages de la mer.

Rôle dans le projet :

La participation de l'IFREMER dans cette étude s'est portée sur le suivi technique et scientifique dans le cadre d'une thèse soutenue en mars 2008 par Mlle Emmanuelle Roque d'Orbcastel et encadrée par M. Jean-Paul BLANCHETON de la Station de Palavas les Flots.

II) Présentation de la problématique et de l'étude

Les salmonidés (familles des saumons et truites) sont traditionnellement produits en circuit ouvert à terre. L'eau est généralement utilisée 1 ou 2 fois avant le rejet dans le milieu naturel (soit un renouvellement de 100 à 200% du volume d'élevage par heure), ce qui conduit à des quantités d'eau utilisées par kg de poisson produit variant autour de 100 à 200m³ (Jimenez del Rio et al, 1996 ; Lemarié et al 1998). Cette eau n'est pas consommée puisqu'elle est restituée en intégralité au milieu naturel. Cependant les quantités utilisées rendent le traitement des rejets, notamment la fraction dissoute, très difficile (faible charge et débit important). La capacité de production d'un site est donc liée à la disponibilité en eau et à la possibilité de restituer cette eau dans de bonnes conditions. Notre activité est encadrée par une réglementation spécifique (arrêtés du 1^{er} avril 2008) mais aussi par des textes dont la portée transversale touche toutes les activités en lien avec l'eau (LEMA, DCE).

La problématique générale du projet est l'optimisation de l'utilisation des intrants dans les bassins en maintenant une qualité optimale du produit final, tout en réduisant l'utilisation d'eau et en minimisant l'empreinte écologique de l'élevage sur le milieu.

Nos collègues danois ont développé de nouvelles technologies de production qui répondent en partie à notre problématique. Ces systèmes en circuit semi-ouvert (Lareau et al, 2004) reposent sur une circulation rapide de l'eau dans les bassins, 5 à 10 fois par heure (soit un renouvellement de 500 à 1000% du volume d'élevage par heure). Deux types de systèmes existent : soit plusieurs bassins sont installés en série et réutilisent la même eau, soit l'eau recircule dans le même bassin (de type Foster-Lucas). Le temps de séjour de l'eau dans le bassin d'élevage est donc de 6 à 12 minutes et le temps de séjour de l'eau dans la pisciculture dépend du système de traitement de l'eau mis en place (avec ou sans filtration biologique). Dans ce cas, les débits de rejet (qui équivalent aux besoins en eau neuve) sont considérablement réduits (10 à 20m³ par kg de poisson produit) et les concentrations en substances dissoutes multipliées par le facteur correspondant. En amont de chaque bassin ou section de raceway, un puits permet l'installation d'un air lift qui induit la circulation de l'eau. Les deux premiers facteurs limitants étant la concentration en O₂ et en CO₂. A chacun des passages dans l'air lift, le CO₂ est dégazé et l'eau est re-saturée en O₂. Par ailleurs, un dispositif de collecte des particules produites par les poissons est installé, soit à la fin de chaque bassin, soit à la fin de chaque section de raceway de 30m.

Ce même type de bassin peut être associé à une boucle de recyclage comprenant une filtration mécanique, une filtration biologique pour traiter l'eau soit avant réutilisation, soit avant rejet dans le milieu naturel et éventuellement une oxygénation, qui permet alors de réduire les rejets et les besoins en eau neuve autour de 1 à 2 m³ par kg d'aliment (Blancheton, 2000 ; Léonard, 2000 ; Pagand, 1999). Le filtre biologique peut être en boucle annexe ou dans la dernière section d'un raceway. Le concept, basé sur une dépense énergétique minimale et donc une variation de la hauteur de la ligne d'eau minimale, implique le choix de filtres immergés (à lit mobile ou à lit fixe).

Grâce au soutien de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et à la participation de la pisciculture MURGAT à Beaufort (38), nous avons pu tester ce système de production avec nos contraintes locales, notamment climatiques.

La pisciculture disposait d'anciens bassins de production que nous avons pu réaménager sur le modèle de bassin « danois ». Le financement de ces travaux a fait l'objet d'une convention avec l'Agence de l'Eau, convention 2005-2032 pour un montant total de 60 272,70€.

Le suivi technique et scientifique de l'étude a été assuré par Mlle Emmanuelle Roque d'Orbcastel dont la thèse était encadrée par M. Jean-Paul Blancheton (IFREMER – Palavas les Flots).

III) Articulation des travaux

L'ADAPRA travaille depuis plusieurs années sur la problématique du traitement de l'eau en salmoniculture.

Nous avons conduit en partenariat avec divers organismes, le Syndicat des Pisciculteurs du Sud Est (SPSE), le Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture (CIPA) et le Pôle d'Expérimentation et de Progrès (PEP), plusieurs expérimentations et études technico-économiques sur cette thématique :

- ◆ 2000 : Essai de compostage de déchets d'atelier de transformation et déchets verts sur plateforme de traitement industriel (ONYX)
- ◆ 2000-2001 : Caractérisation et quantification des boues sur les trois sites de production salmonicoles de Rhône-Alpes équipés de filtres à tambour rotatif
- ◆ 2002 : Etude économique pour mise en place d'une filière de valorisation par lombricompostage
- ◆ 5/12/2002 : Journée d'échanges techniques sur le traitement et la valorisation des déchets en pisciculture en partenariat avec l'IFREMER, Sté BIOMAR, et Sté Lombricole du Sud-Est
- ◆ 2003-2005 : Pilote de valorisation des boues en salmoniculture en partenariat avec l'IFREMER, le SPSE et avec le soutien financier de la Région Rhône-Alpes et de l'Agence de l'Eau RMC
- ◆ 2004-2007 : Aquaculture Effluent Treatment Technology (AquaETreaT), programme européen en partenariat avec le CIPA et l'IFREMER sur le traitement et la valorisation des effluents piscicoles
- ◆ 2005-2008 : Etude de la diminution des rejets et des économies d'eau en pisciculture en partenariat avec l'IFREMER, la SAS Les Fils de Charles MURGAT et avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau RMC (*étude faisant l'objet du présent rapport*)

Les travaux, que nous avons conduits depuis 2000 sur la problématique du traitement de l'eau et de la valorisation des effluents piscicoles, nous ont permis de jeter les bases de la présente étude. Ils ont en partie répondu aux questions concernant la composition des boues issues de la filtration des eaux de pisciculture. Ils ont permis d'améliorer le système de récupération de celles-ci grâce à une pré-décantation à la sortie des filtres rotatifs.

En parallèle de notre étude sur la diminution des rejets et les économies d'eau, un programme européen (AquaETreaT) sur le traitement et la valorisation des effluents piscicoles a vu la collaboration de quatre pays autour de quatre systèmes de production piscicole différents. La partie française du programme a été coordonnée par le Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture (CIPA) et s'est appuyée sur notre projet. Ces travaux ont porté sur le traitement de l'eau et des boues issues de notre bassin de production. Il s'agit d'une expérimentation non traitée par le projet ADAPRA mais qui s'inscrit dans sa continuité. Le suivi technique et scientifique de ce projet européen a été mené par l'IFREMER et les résultats ont également été publiés dans le cadre de la thèse soutenue par Mlle Emmanuelle ROQUE d'Orbcastel le 17 mars 2008.

IV) Bassin de production en eau recirculée

Pour mener à bien nos travaux de recherche sur la diminution et les économies d'eau en pisciculture, nous nous sommes appuyés sur les compétences de l'entreprise les Fils de Charles MURGAT et sur leurs disponibilités en personnel et en moyens techniques. Ainsi, nous avons pu réaménager un ancien bassin de production selon les critères de l'étude. Ces travaux ont fait l'objet d'une convention entre la SAS les Fils de Charles MURGAT et l'Agence de l'Eau sous le numéro 2005-2032. L'entreprise MURGAT a fait appel à des entreprises locales pour la maçonnerie et l'électricité mais aussi à des sociétés spécialisées pour les supports bactériens ou les compresseurs.

1) Construction du bassin

La SAS Les Fils de Charles MURGAT disposait de deux anciens bassins de production de type Foster-Lucas (L : 75m, l : 6m, p : 0,8m) que nous avons reconverti sur le modèle « danois ».

Le bassin qui nous avons reproduit se divise en deux compartiments : une partie élevage (70m³) et une partie traitement de l'eau (110m³). Cette dernière partie est subdivisée en trois sous-compartiments, pour le captage des matières en suspension (12 cônes de décantation d'un mètre-carré), le traitement des rejets azotés (lit fluidisé) et pour le dégazage du CO₂, la ré-oxygénation et la mise en circulation de l'eau (airlift).

L'aménagement de ces compartiments a nécessité de décaisser le fond des anciens bassins pour implanter les cônes de décantation et pour descendre le système d'airlift à 4,20m de profond. Des travaux de maçonnerie ont été nécessaires pour aménager la zone de traitement du rejet azoté par lit fluidisé. Ce filtre biologique est composé de 9 cellules contenant un garnissage plastique (800 m².m⁻³ de surface spécifique). Les 20m³ de supports bactériens sont mis en mouvement par une injection d'air au fond des cellules.



Fig 2 : Supports bactériens

Vu de dessus, le bassin se présente de la façon suivante :

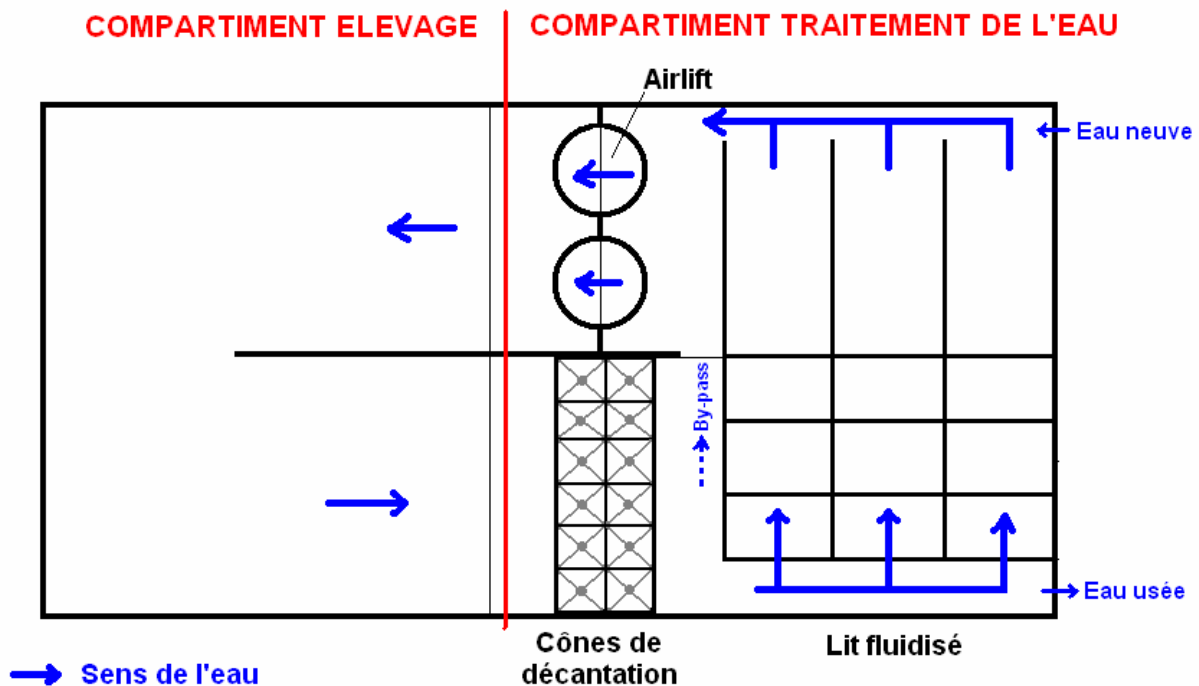


Figure 3 : Schéma du bassin de production en eau recirculée

Les photographiques ci-dessous permettent de visualiser les différentes parties du bassin.

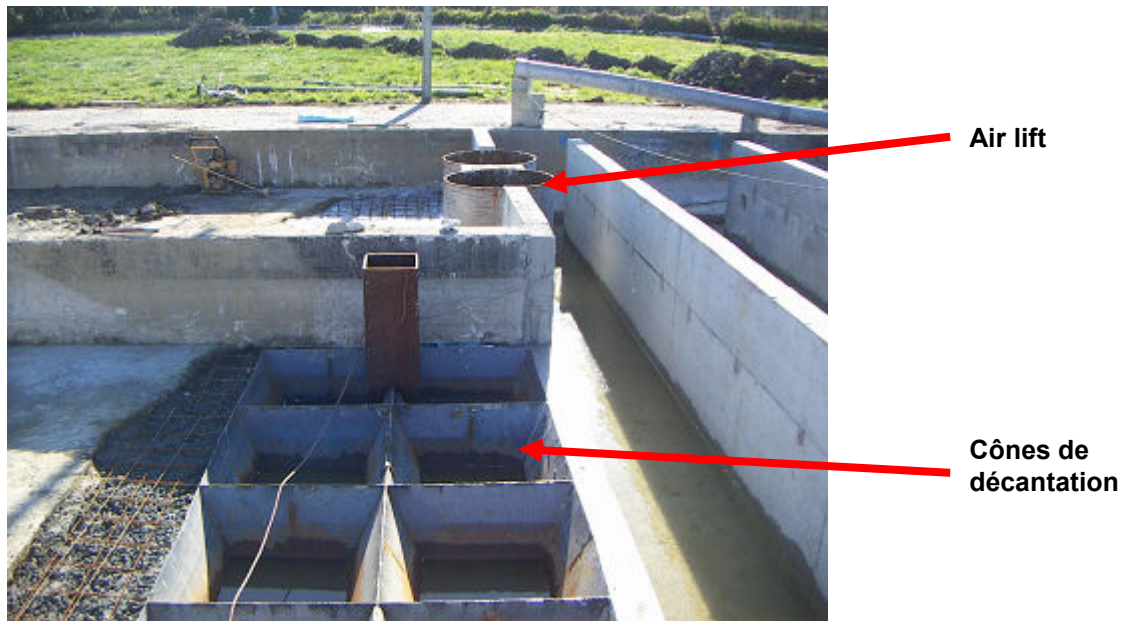


Figure 4 : Construction du bassin (airlift et cônes de décantation)



Figure 5 : Bassin de production en eau recirculée (lit fluidisé)



Partie Elevage

Figure 6 : Bassin de production en eau recirculée (partie élevage)

2) Fonctionnement

Le bassin tel qu'il a été conçu comporte une partie « Elevage » et une partie « traitement de l'eau » ayant trois objectifs :

- le captage des matières en suspension à l'aide des 12 cônes placés au fond du bassin dans une zone exempte de poissons. Les particules sont évacuées quotidiennement par un système de chasse par le fond qui les envoie, grâce à une pompe, vers un silo de pré décantation puis un bassin de rétention.
- Le traitement du rejet azoté par lit fluidisé. Les poissons excrètent de l'azote sous forme NH_4^+ . L'eau chargée en ammonium traverse un lit de support bactérien mis en mouvement permanent et oxygéné par un surpresseur d'air. Ces supports plastiques sont colonisés par Nitrobacter et Nitrosomonas qui transforment l'ammonium en nitrites puis en nitrates.
- La mise en circulation de l'eau par un air lift. Deux tubes compartimentés ont été enfoncés à une profondeur de 4,2 mètres dans le sol. Au fond de ceux-ci deux diffuseurs d'air (deuxième surpresseur) permettent de faire remonter l'eau en la réoxygénant et en dégazant le dioxyde de carbone.

L'eau neuve est admise par gravité en provenance de la source. Le débit, contrôlé par un orifice réglable et par un courantomètre, est fixé sur la base de $8\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$ d'aliment distribué (soit entre 4,5 et $6,6\text{ l.s}^{-1}$ selon les biomasses maintenues en élevage au cour des expérimentations).

Les performances du système recirculé (SR) ont été comparées à celles du système d'élevage « standard » fonctionnant en circuit ouvert (SO). Un volume utile de 10 à 18m^3 a été délimité dans un autre bassin de la pisciculture recevant entre 150 et 500 l.s^{-1} .

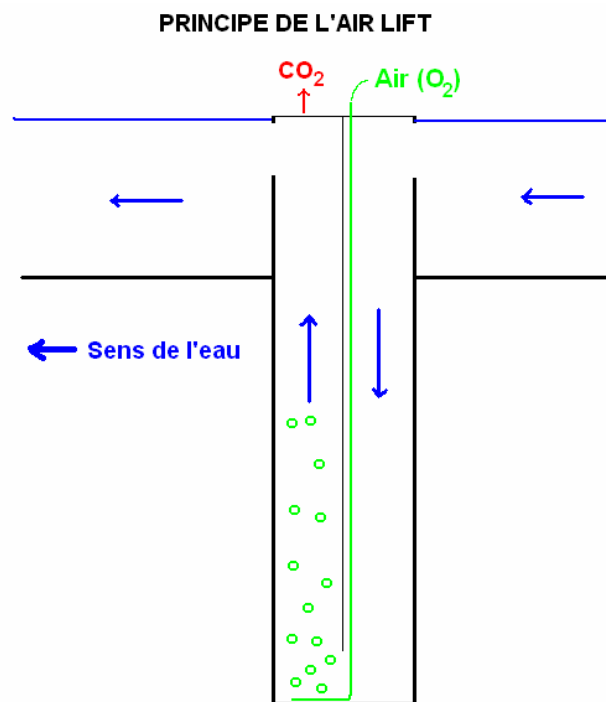


Figure 8 : Air lift en fonctionnement

Figure 7 : Schéma de l'air lift

3) Suivi du fonctionnement

La production de salmonidés dans le bassin intégrant le traitement de l'eau nécessite un suivi des paramètres d'élevage afin de juger de l'efficacité de cette technique.

Ce suivi s'est porté sur la qualité de l'eau, le grossissement, le bien-être des poissons et le coût énergétique d'une telle installation.

Les résultats du suivi ont été mesurés par Mlle ROQUE ainsi que par le personnel de la pisciculture. Ils ont été comparés au système de référence : circuit ouvert sur la même pisciculture.

V) Méthodologie et résultats de l'expérimentation

Les détails des résultats ont été publiés dans la thèse de Mlle ROQUE d'Orbcastel. Ce document complet étant joint au présent rapport, les paragraphes ci-dessous ne reprennent que les conclusions sur chaque élément suivi :

- La qualité d'eau,
- Le grossissement,
- Le bien-être,
- Le coût énergétique.

1) Matériel et méthodes

1.1) Séries d'élevages

1.1.1) Fonctionnement physico-chimique et biologique d'un système d'élevage en circuit recirculé à la densité d'élevage habituelle et maintenue constante

Les performances des truites AEC dans le système d'élevage en circuit recirculé (SR) ont été comparées durant 200 jours aux performances des poissons dans le système d'élevage en circuit ouvert (SO), à une densité d'élevage standard pour la pisciculture (60 kg.m⁻³). Dans le SR, le taux de renouvellement en eau neuve exprimé en m³ par kilogramme d'aliment distribué a été maintenu

constant pour l'ensemble des expérimentations, alors que le débit de recirculation dans le bassin a été modifié : au cours de la 1^{ère} expérience, le SR a fonctionné à débit de recirculation maximal. Le débit de recirculation a ensuite été réduit durant la 2^{ème} expérience afin de connaître l'effet de la diminution du débit de recirculation sur les performances des poissons et du système d'élevage.

Pour la 1^{ère} expérience (du 23/08/2006 au 23/11/2006), 23 464 poissons d'un poids individuel de 104,6 g (de même population initiale) ont été répartis au hasard entre le SR et le SO, à une densité initiale de 45 kg.m⁻³. Les effectifs et biomasses initiaux dans les bassins ont été contrôlés par un compteur à poissons (HELIOS40, Faivre®), à 1.6% de précision. La densité a été maintenue constante à 60 kg.m⁻³ par retrait de poissons toutes les deux semaines (pêche aléatoire). Le débit de recirculation dans le SR a été maintenu au maximum durant la 1^{ère} expérience (appelée SR1).

Pour la 2^{ème} expérience (du 23/11/2006 au 07/03/2007), 24 053 poissons d'un poids individuel de 230 g ont été répartis au hasard entre le SR et le SO ; les deux systèmes d'élevage ont été approvisionnés avec la même densité initiale de 50 kg.m⁻³ (15 220 poissons pour le SR et 8 833 pour le SO). La densité a été maintenue constante à 60 kg.m⁻³ par retrait de poissons toutes les deux semaines (pêche aléatoire). Le débit de recirculation dans le SR a été réduit progressivement au cours de la 2^{ème} expérience (appelée SR2).

Les poissons ont été nourris deux fois par jour (distribution manuelle) avec deux types d'aliment commercial Skretting® (2P et 3P, selon le poids des poissons) ; l'aliment 2P est à 46% de teneur en protéines et 26% en lipides, l'aliment 3P est à 45% et 28% respectivement.

Le taux d'alimentation journalier a été fixé entre 0,8 et 1% de la biomasse selon les tables de rationnement du fabricant d'aliment, fonction du poids moyen des poissons et de la température de l'eau.

1.1.2) Capacité d'accueil maximale du système d'élevage en circuit recirculé et bien être des poissons

La 3^{ème} expérience (du 07/03/2007 au 23/05/2007) a commencé avec des truites AEC de poids individuel de 650 g précédemment triées, d'une même population initiale. 7 441 poissons ont été répartis au hasard entre le SR et le SO ; les deux systèmes d'élevage ont été approvisionnés avec la même densité initiale de 57 kg.m⁻³ (5859 poissons pour le SR et 1582 pour le SO).

Les performances et le bien être des poissons ont été étudiés dans les deux systèmes d'élevage en parallèle durant 77 jours, avec une densité en élevage augmentant naturellement de 57 à 100 kg.m⁻³ tout au long de l'expérience et un débit de recirculation maximale dans le SR.

Les poissons ont été nourris deux fois par jour (distribution manuelle), avec un aliment commercial Skretting®, à 45% de teneur en protéines et 28% en lipides. Le taux d'alimentation journalier a varié entre 0,8 et 1% de la biomasse sur la période.

1.2) Points de mesures et caractéristiques

1.2.1) Qualité de l'eau d'élevage

L'O₂ et la température ont été enregistrés en continu au moyen de sondes SEDIA®. Les autres paramètres physico-chimiques ont été suivis par des prélèvements effectués toutes les 2 semaines dans le SR (Fig.9) et en sortie du SO.

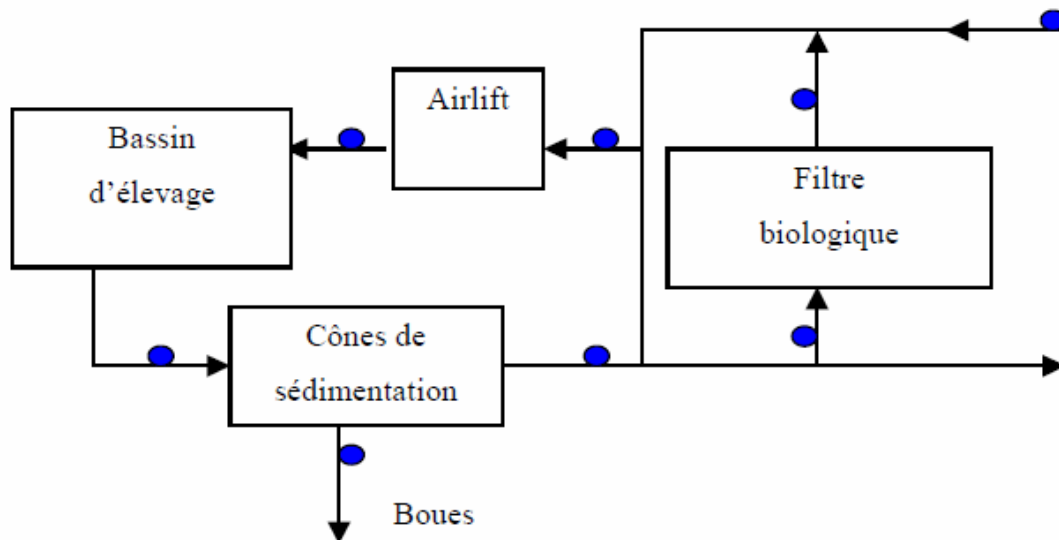


Figure 9. Points de prélèvement de l'eau dans le SR (représentés par des points bleus)

Les échantillons d'eau ont été prélevés 4 h après l'alimentation du matin au moment du pic post-prandial. Les MES, AAT, N-NO₃, N-NO₂, P-PO₄ et l'urée ont été analysés. Les échantillons d'eau, conservés à 4°C après filtration, ont été analysés en laboratoire 24 h après prélèvement. Sur place, le CO₂ a été mesuré par une sonde Oxyguard®, les pressions totales en gaz dissous à l'aide d'un 300 ETM tensionmètre® et la valeur de pH avec au moyen d'une sonde Ecoscan®.

La vitesse de circulation de l'eau a été mesurée avec le courantomètre électromagnétique FLO-MATE®. Les mesures de vitesse ont été faites en fin de la zone d'élevage, dans des zones sans poisson. Chaque mesure de débit a été obtenue par l'intégration de 21 mesures de vitesse sur la section mouillée ; chaque mètre, dans la largeur du bassin (entre 0 et 6 m), 3 mesures de vitesse ont été effectuées dans la colonne d'eau (surface, milieu de colonne et fond de bassin). Les mesures de vitesses ont été prises pour chacun des 21 points de mesures après stabilisation (10 secondes) et en triplicat (précision à 32% près). Les débits d'air fournis par les compresseurs ont été calculés grâce aux relevés de pression effectués avec un manomètre de précision. La consommation électrique a été calculée à partir des relevés effectués au niveau des compteurs électriques installés sur les compresseurs.

Les rendements d'oxygénation et de dégazage des pompes airlift ont été calculés par des bilans de matières (O₂ et CO₂) en entrée-sortie de l'airlift. Le rendement d'oxygénation a été calculé de la façon suivante :

$$\text{Rendement d'oxygénation (\%)} = 100 * k / K$$

$$k \text{ (kg j}^{-1}\text{)} = (C2 - C1) * Q * 24 / 1000$$

$$K \text{ (kg j}^{-1}\text{)} = Qa * 24 * O2\% * 32 / 22,4$$

avec k = quantité d'O₂ transférée par l'airlift (kg j⁻¹); K = quantité d'O₂ disponible dans le débit d'air (kg j⁻¹); C1 = concentration en O₂ dans l'eau en entrée d'airlift (mg l⁻¹); C2 = concentration en O₂ dans l'eau en sortie d'airlift (mg l⁻¹); Q = débit d'eau (m³ h⁻¹); Qa = débit d'air (m³ h⁻¹); O₂% = pourcentage d'O₂ dans l'air (21%).

La cinétique d'oxydation de l'AAT (Rb) par le filtre biologique a été calculée sur la base de prélèvements d'eau en entrée et sortie du filtre (24 bilans réalisés), selon l'équation de bilans matières suivante :

$$Rb = [(Ci - Ce) (Q1 - q)] * 24 / Vb$$

avec Rb, la cinétique d'oxydation de l'AAT (g m⁻³ j⁻¹); Ci la concentration en AAT en entrée du filtre biologique (mg l⁻¹); Ce la concentration en AAT en sortie du filtre biologique (mg l⁻¹);

Q1 le débit d'eau circulant dans le filtre biologique (m³ h⁻¹); q le débit d'eau de sortie du SR (m³ h⁻¹).

L'efficacité de traitement des rejets solides par les cônes de sédimentation a été évaluée par la mesure du taux de rétention des MES. Les MES émises par les poissons ont été évaluées en utilisant le modèle nutritionnel proposé par Papatryphon *et al.* (2005), pour une quantité d'aliment distribuée connue sur une période de 24 heures. Pour la période équivalente, le volume de boues retenues par les cônes de sédimentation a été récupéré et la teneur en matières sèches a été analysée. La qualité de l'eau de rejet du SR a été comparée à celle du SO par les méthodes hydrobiologique et nutritionnelle.

1.2.2) Croissance et mortalité des poissons

La mortalité des poissons dans les deux systèmes d'élevage a été relevée tous les jours. L'augmentation de la biomasse de poissons a été estimée toutes les deux semaines dans les deux systèmes d'élevage, par des pesées individuelles de 100 poissons prélevés au hasard et par des pesées de lots de poissons, sur des poissons mis à jeun 24 heures auparavant. Du fait de ces mises à jeun, les pesées de poissons ont été dissociées des prélèvements d'eau et des mesures sur place afin de ne pas perturber les mesures de rejets. Le taux de croissance spécifique (TCS) a été calculé selon l'équation (1) avec pi et pf les poids initial et final des poissons sur la période étudiée :

$$(1) \quad TCS = 100 * (\ln pf - \ln pi) * \text{nombre de jours}^{-1}$$

La température de l'eau est un paramètre essentiel pour la croissance. Le modèle de croissance Muller-Feuga (1998) a été utilisé pour corriger les effets sur la croissance des éventuels décalages de température entre les systèmes d'élevage. Le coefficient thermique de croissance (thermal growth coefficient ou TGC) a également été calculé selon l'équation :

$$(2) \quad TGC = (pf^{1/3} - pi^{1/3}) * 100 * \text{somme des degrés jours}^{-1}$$

L'indice de conversion alimentaire (IC) apparent a été calculé comme la quantité d'aliment distribué sur une période donnée rapportée au gain de biomasse sur cette même période. Pour chacune des 3 expériences, l'IC global des deux systèmes a été calculé, correspondant à la quantité totale d'aliment distribuée au cours de l'expérience rapportée au gain total de biomasse. Pour chacune des 3 expériences, l'IC global a été comparé à la moyenne des IC calculés chaque quinzaine (correspondant à la fréquence des biométries).

La morphologie des poissons a été notée avec l'indice K de Fulton tous les mois selon l'équation (3) avec p = poids (g) et L = longueur du poisson à la fourche (cm) :

$$(3) \quad K = p * 100 * L^{-3}$$

Les données de la pisciculture ont été utilisées comme référence, correspondant à la croissance de truites AEC maintenues à une densité d'élevage habituelle de 60 kg.m⁻³, avec une température moyenne de l'eau autour de 11°C (Fig.10).

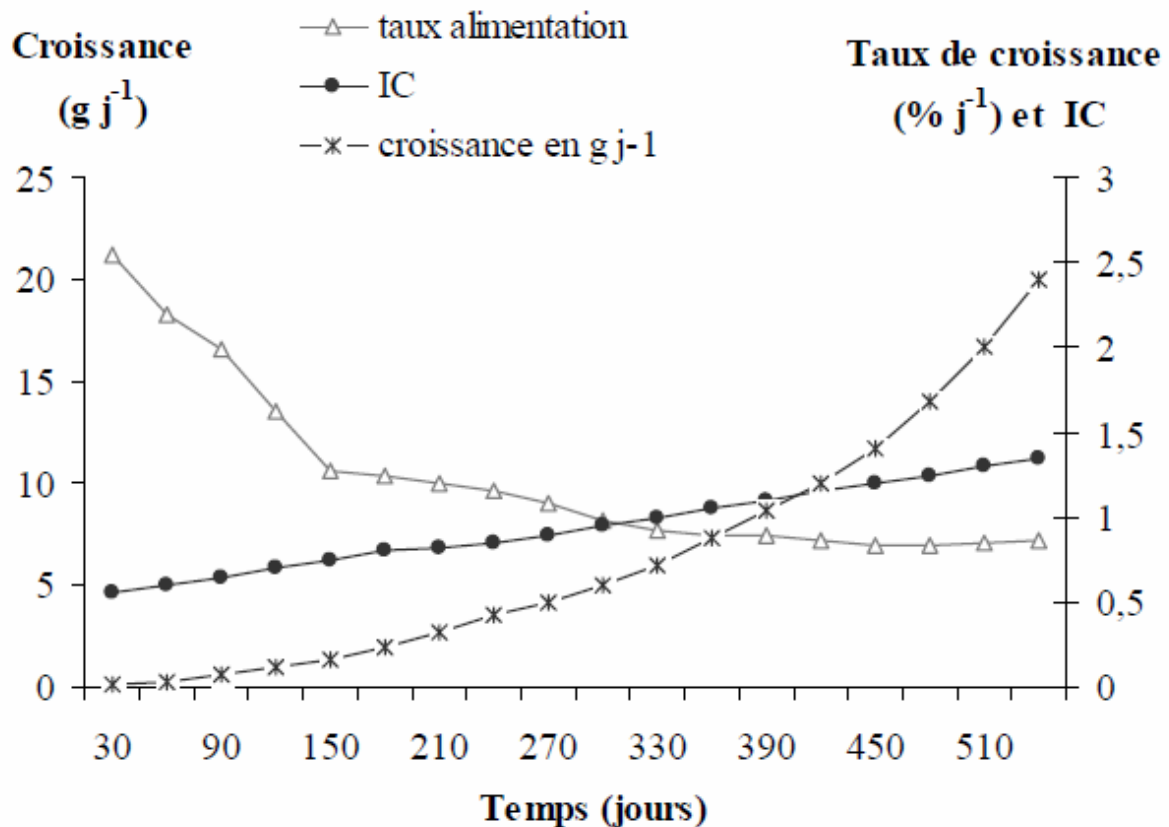


Figure 10. Croissance de la truite AEC en circuit ouvert à 60 kg.m⁻³

1.2.3) Bien être des poissons

Le bien être des poissons a été étudié dans la seconde phase de ce travail, visant à fixer les limites du système d'élevage en circuit recirculé, au cours d'une expérience de 77 jours pendant laquelle la densité en élevage a augmenté progressivement. La densité en élevage du SO a été laissée en augmentation naturelle au cours de cette même période.

L'aspect des nageoires a été utilisé comme indicateur de bien être selon la méthode décrite par Person-Le Ruyet *et al.* (2007). Les nageoires pectorales et dorsales de 50 poissons par système d'élevage ont été examinées aux jours 15 (j15) et 69 (j69), quand les densités étaient de 61,2 kg.m⁻³ et 60,7 kg.m⁻³ respectivement pour le SR et le SO (j15), et de 94,9 kg.m⁻³ et 87,9 kg.m⁻³ (j69). Les poissons ont été anesthésiés avant examen (éthylène-glycol-monophényl-éther, à 0,5%).

Le même opérateur a effectué les observations. La longueur maximale des nageoires pectorales et dorsales a été mesurée au mm près pour calculer l'Indice de Longueur Relative (ILR) selon l'équation (4) :

$$(4) \quad ILR = 100 \times \text{longueur de la nageoire} \times \text{longueur du poisson à la fourche}^{-1}, \text{ (mm, mm)}$$

Le profil général utilisé pour évaluer le niveau d'érosion des nageoires est présenté (figure 11).

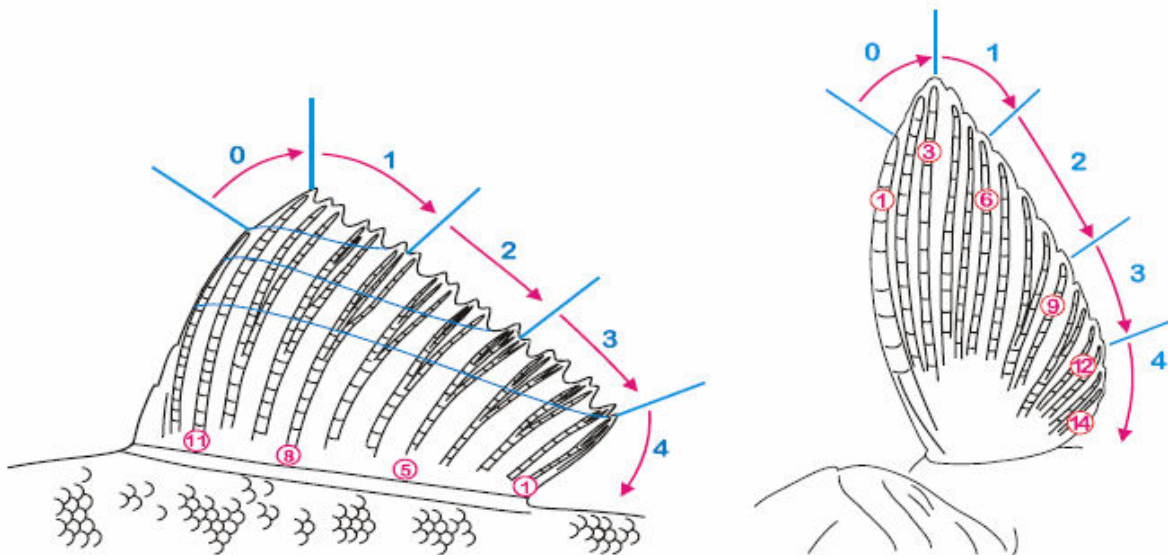


Figure 11. Niveaux d'érosion des nageoires pectorales et dorsale: niveau 0 pour une nageoire intacte et niveau 4 une nageoire avec tous les rayons touchés (Person-Le Ruyet *et al.*, 2007).

L'érosion des nageoires pectorales et dorsale dans le SR et le SO a été exprimée en fréquence (en %) par catégorie (de 0 à 4) et le niveau d'érosion moyen a été calculé. Les moignons, attribués à des problèmes de manipulations antérieures (blessures survenues durant le prégressissement) n'ont pas été pris en compte.

Les nageoires caudales ont été examinées et classées en 3 groupes selon la référence de la pisciculture pour le tri à l'aspect (commercialisation de poissons entiers) (Fig 12).

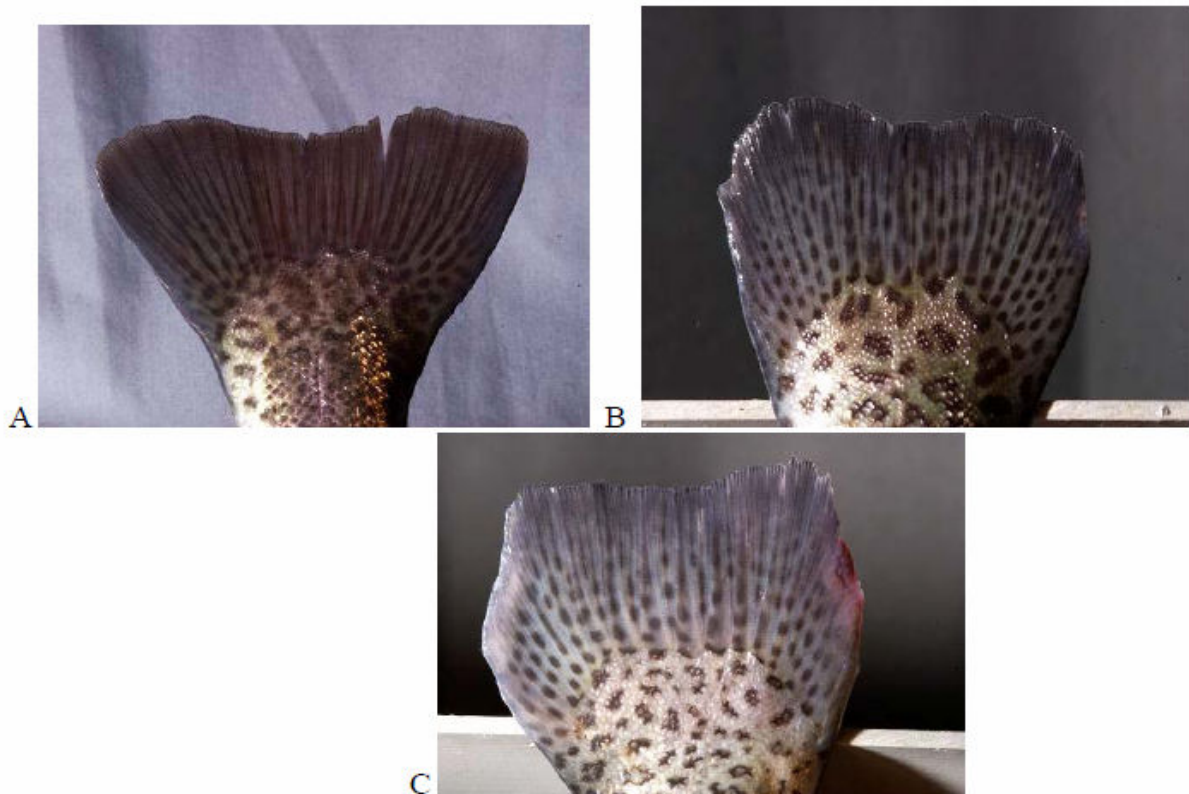


Figure 12. Les trois niveaux d'érosion de la nageoire caudale : (A) pas de changement notable du profil par rapport à une nageoire intacte, exceptées quelques déchirures classiquement observées en élevage, (B) érosion modérée avec un changement du profil général (rayons extérieurs érodés), (C)

érosion majeure de la caudale avec des extrémités sanguinolentes ou enflammées (non commercialisable comme poisson entier)

1.2.4) Analyse statistique

Les statistiques ont été réalisées en s'appuyant sur le logiciel XLstat®. Les différences entre les systèmes d'élevage en terme de performances et d'érosion des nageoires ont été testées en réalisant des ANOVA à un facteur fixe (le système d'élevage).

La qualité d'eau du SR a été comparée à celle du SO sur une période de 200 jours en réalisant des ANOVA à un facteur fixe (le système d'élevage) sur l'ensemble des paramètres physicochimiques. La qualité de l'eau du SR en condition de recirculation maximale a été comparée à celle du SR avec un taux de recirculation réduit avec un ANOVA à un facteur fixe (le débit).

2) Résultats

2.1) Fonctionnement du système d'élevage en circuit recirculé et performance des poissons

2.1.1) Qualité de l'eau entrante et écoulements

La qualité physico-chimique de l'eau neuve a été sensiblement constante tout au long de notre étude (tableau 1).

Tableau 1. Qualité physico-chimique de l'eau de renouvellement du SR (Concentrations en mg l-1)

	pH	T°C	O ₂	MES	AAT	P-PO ₄	N-urée	N-NO ₂	N-NO ₃
Moyenne	7.3	11.9	8.3	0.0	0.0	0.01	0.01	0.00	7.37
écart-type	0.4	1.1	1.1	0.0	0.0	0.03	0.01	0.00	1.07

L'apport d'eau neuve dans le SR (tableau 2) a été 4 fois inférieur à celui du SO.

Tableau 2. Données sur l'eau neuve apportées au SR

Débit d'eau neuve	Période SR1	Période SR2	Moyenne SR (23/08/06 au 07/03/07)
En m ³ .kg d'aliment ⁻¹	8.9 ± 3.1	8.3 ± 1.4	8.6 ± 2.4
En m ³ .j ⁻¹	474	301	379
En % de renouvellement.j ⁻¹	260	170	210

Deux débits de recirculation ont été successivement assurés par les pompes airlift dans le SR (tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques du compresseur SF 700 / 1PC, des débits d'air injectés dans les pompes airlift et des débits d'eau induits, sur l'ensemble de la période (SR), et sur les deux périodes étudiées (SR1 et SR2)

Paramètres	1 ^{ère} période (du 23/08/06 au 23/11/06) : SR1	2 ^{ème} période (du 23/11/06 au 07/03/07) : SR2	Moyenne SR (23/08/06 au 07/03/07)
Vitesse moteur (tour.min ⁻¹)	2687	2015	2350
Fréquence (Hz)	40	30	35
Débit d'air introduit dans airlift (m ³ .h ⁻¹)	88	60	71 ± 17
Débit d'eau induit (m ³ .h ⁻¹)	1175±207	870±94	913 ± 171

La vitesse de circulation de l'eau a été de $8.2 \pm 1.2 \text{ cm.s}^{-1}$ en condition SR1 et de $5.7 \pm 0.2 \text{ cm.s}^{-1}$ en conditions SR2. Ces vitesses sont très supérieures à celle du SO ($2.2 \pm 0.7 \text{ cm.s}^{-1}$).

2.1.2) Qualité de l'eau dans les bassins d'élevage

Le suivi de la qualité de l'eau dans le SO et le SR est détaillé dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'élevage des deux systèmes d'élevage testés (NS, différence non significative ; différence significative *, $P < 0.05$; ***, $P < 0.001$).

Période	Nb jours	MES	AAT	N-NO ₂	N-NO ₃	N-Urée	P-PO ₄
		Concentrations en mg.l ⁻¹					
SR (N = 18)	200 jours	7.3±7.1	0.29±0.09	0.11±0.05	8.56±0.99	0.07±0.02	0.04±0.03
SO (N = 13)		3.9±2.7	0.89±0.08	0.02±0.00	7.51±0.70	0.13±0.01	0.05±0.01
<i>P</i>		NS	***	***	***	***	NS
SR 1 (N = 7)	94 jours	4.8±1.8	0.26±0.14	0.13±0.10	8.06±0.99	0.06±0.02	0.03±0.03
SR 2 (N = 11)	106 jours	8.0±7.9	0.29±0.07	0.10±0.03	8.68±0.96	0.07±0.02	0.04±0.03
<i>P</i>		NS	NS	NS	NS	NS	NS

Les MES sont en moyenne plus élevées en conditions de recirculation, relativement aux conditions de circuit ouvert, mais la forte variabilité des résultats ne permet pas de retenir d'effet significatif. En revanche, il apparaît des différences significatives entre les systèmes d'élevage pour les teneurs en azote dissous, avec des concentrations en AAT significativement inférieures dans le SR et des concentrations en N-NO₂ et N-NO₃ significativement supérieures. Lors de la réduction du débit de recirculation de l'eau dans le SR, la qualité d'eau ne s'est pas significativement dégradée.

En matière de suivi des gaz dissous (tableau 5), la concentration en O₂ en sortie de SR est significativement plus élevée que celle du SO, tandis que la concentration en CO₂ est moindre. Le SR occasionne une élévation de la valeur de pH et une sursaturation chronique en azote dissous. Cette dernière ne cède pas à la réduction du débit de recirculation de l'eau dans le SR (condition SR2).

Tableau 5. Concentrations en gaz dissous, pH et température dans les systèmes d'élevage testés.

Période	Nb jours	pH	T (°C)	O ₂ sortie de bassin (mg l ⁻¹)	CO ₂ (mg l ⁻¹)	Saturation N ₂ (%)
SR	200 jours	7.36 ± 0.21	11.2 ± 1.4	7.9 ± 1.1	8.5 ± 2.6	107.5 ± 2.5
SO		6.86 ± 0.32	11.6 ± 0.5	6.6 ± 0.8	18.8 ± 4.2	98 ± 7
<i>P</i>		***	***	***	***	*
SR 1	94 jours	7.35 ± 0.17	12.6 ± 0.8	7.97 ± 1.01	9.0 ± 2.8	107.1 ± 2.4
SR 2	106 jours	7.36 ± 0.23	10.2 ± 0.7	7.93 ± 1.11	8.3 ± 1.6	108.5 ± 2.1
<i>P</i>		NS	***	NS	NS	NS

2.1.2) Efficacité du système de traitement de l'eau du SR

Le tableau 6 présente les résultats sur l'efficacité du système de traitement de l'eau du SR en condition de recirculation maximale (SR1) et en condition de recirculation réduite (SR2).

Tableau 6. Efficacité du système de traitement de l'eau du SR en condition de recirculation maximale (SR1) et en condition de recirculation réduite (SR2).

Période	Nb jours	Rendement d'oxygénation (%)	Rendement d'oxygénation (g d'O ₂ .kWh ⁻¹)	Rendement de dégazage du CO ₂ (%)	Rendement de récupération des MES (%)
Moyenne	200	7.4 ± 6.4	392 ± 132	23.9 ± 11.6	59.6 ± 27.7
SR 1	94	6.8 ± 7.6	459 ± 200	21.4 ± 12.1	40 ± 18.5
SR 2	106	6.3 ± 7.1	342 ± 21	25.6 ± 12.7	80 ± 11.9
<i>P</i>		NS	NS	NS	*

La réduction du débit de recirculation n'a eu d'effet significatif que sur le rendement de traitement des rejets solides par sédimentation ($P = 0.04$). Au cours des 200 jours d'expérience, la capacité moyenne d'oxygénation des pompes airlift a été de $20,4 \pm 12,4$ g d'O₂.m⁻³ d'air soit 290 ± 177 g d'O₂ par passage au travers des airlifts.

Les pompes airlift ont fourni en moyenne 392 g d'O₂.kWh⁻¹ (maximum de 690 g d'O₂.kWh⁻¹) avec un rendement énergétique de $2,4 \pm 0,8$ kWh.kg⁻¹ de poisson produit ; la diminution du débit de recirculation a permis de réduire la consommation énergétique des pompes airlift de $2,8 \pm 0,9$ à $2,1 \pm 0,6$ kWh.kg⁻¹ de poisson produit.

Le filtre biologique a fonctionné avec 11 m³ d'air.h⁻¹.m⁻³ de substrat. La cinétique d'oxydation de l'AAT par le filtre biologique a été en moyenne sur la période de 200 jours de $33,5 \pm 13,5$ g AAT.m⁻³ de substrat.j⁻¹, pour une concentration d'AAT en entrée de filtre de $0,27 \pm 0,05$ mg.l⁻¹ et une concentration résiduelle de N-NO₂ de $0,10 \pm 0,03$ mg.l⁻¹ (tableau 7 ; Fig.13).

Tableau 7. Cinétique d'oxydation de l'AAT en condition de recirculation maximale (SR1) et en condition de recirculation réduite (SR2).

	Période	Cinétique d'oxydation (g N-NH ₄ .m ⁻³ de substrat.j ⁻¹)	[AAT] en entrée du filtre (mg.l ⁻¹)	[N-NO ₂] résiduelle (mg.l ⁻¹)
Moyenne	200 jours	33.5 ± 13.5	0.27 ± 0.07	0.10 ± 0.03
SR 1	94 jours	34.9 ± 12.7	0.21 ± 0.06	0.10 ± 0.04
SR 2	106 jours	33.4 ± 13.7	0.29 ± 0.07	0.10 ± 0.03
<i>P</i>		NS	NS	NS

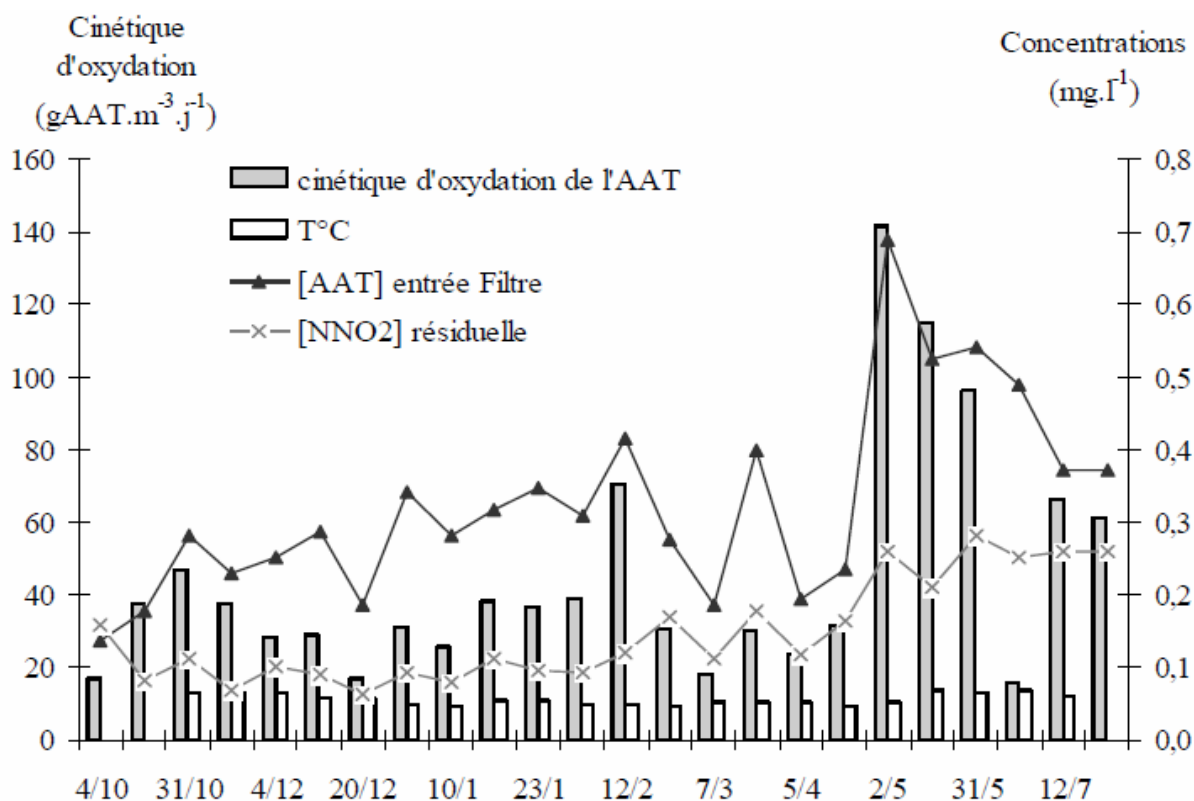


Figure 13. Evolution temporelle de l'oxydation de l'AAT dans le filtre biologique du SR

La cinétique d'oxydation de l'AAT s'est améliorée avec l'augmentation de biomasse dans le SR au cours de la 3^{ème} expérience ; la cinétique moyenne de cette période a été de $59,8 \pm 44,4$ g AAT.m⁻³ de substrat.j⁻¹ ([AAT] de $0,40 \pm 0,16$ mg.l⁻¹ et [N-NO₂] résiduelle de $0,21 \pm 0,06$ mg.l⁻¹), avec une valeur maximale atteinte à 141 g AAT.m⁻³ de substrat.j⁻¹ ([AAT] en entrée de filtre de 0,69 mg.l⁻¹). Le coût énergétique du filtre biologique n'a pu être évalué, une partie de l'air n'étant pas utilisée.

L'utilisation d'un seul compresseur (5,5 kWh) pour l'alimentation en air du système airlift + filtre biologique a été testé sur une courte période (débit d'air de 293 m³.h⁻¹) indiquant un rendement énergétique total du système de traitement de $2,49 \pm 0,05$ kWh.kg⁻¹ de poisson produit.

2.1.4) Evaluation des rejets du SR et comparaison avec le SO

Le suivi de la qualité des eaux de rejets du SR et du SO, associé aux contrôles des débits, a permis d'établir les flux de rejets des deux systèmes d'élevage selon la méthode hydrobiologique.

Le tableau 8 donne les flux de rejets ainsi obtenus et ramenés à la masse d'aliment distribué.

A titre de comparaison, les estimations de rejets par la méthode nutritionnelle sont indiquées dans la dernière colonne.

Tableau 8. Qualité de l'eau de rejet du SR et flux de rejets des deux systèmes d'élevage mesurés par la méthode hydrobiologique et calculés par la méthode nutritionnelle (nm= non mesuré)

	Concentrations en sortie du SR	Flux de rejets mesurés du SR (moy. 200 j)	Flux de rejets mesurés du SO	Flux de rejets calculés des SR/SO
	mg l ⁻¹	g. kg ⁻¹ aliment.j ⁻¹	g. kg ⁻¹ aliment.j ⁻¹	g. kg ⁻¹ aliment.j ⁻¹
Méthode	Hydrobiologique	Hydrobiologique	Hydrobiologique	Nutritionnelle
MES	7.4 ± 5.0	68.6 ± 48.4	226.2 ± 117.9	147.0 ± 0.2
NT	nm	nm	38.5 ± 7.1	42.6 ± 0.4
AAT	0.33 ± 0.15	3.6 ± 3.4	22.5 ± 5.3	28.3 ± 0.3
N-Urée	0.08 ± 0.03	0.8 ± 0.7	7.6 ± 1.8	nm
N-NO ₂	0.16 ± 0.11	1.7 ± 2.0	0.8 ± 0.1	nm
N-NO ₃	9.15 ± 1.01	91.9 ± 56.8	15.8 ± 15.1	nm
PT	nm	nm	9.7 ± 2.5	4.5 ± 0.1
P-PO ₄	0.04 ± 0.04	0.5 ± 0.8	2.8 ± 0.1	nm

Les flux de rejets solides (MES) sont 3 fois plus bas en sortie du système recirculé qu'en sortie du système ouvert ; les flux d'AAT et de P-PO₄ sont 6 fois plus bas en sortie du système recirculé. A l'inverse, les flux de N-NO₂ et les flux de N-NO₃ sont plus élevés en sortie du système recirculé, avec des facteurs multiplicatifs de 2 et 6 respectivement.

2.1.5) Performances des poissons

Les performances des poissons dans le SR ont été comparées à celle des poissons dans le SO, en condition de recirculation maximale (SR1) puis en condition de recirculation réduite (SR2) (tableau 9).

Tableau 9. Indices biologiques du SR en condition de recirculation maximale (SR1) et en condition de recirculation réduite (SR2) en comparaison aux indices du SO (NS : différence non significative, P>0.05).

Période	Système d'élevage	Densité (kg.m ⁻³)	Taux de mortalité (%)	TCS (%)	TGC	IC
23.08.06 au 23.11.06	SR1	71	0.2	1.45	0.22	0.83
	SO	33	0.1	1.15	0.19	1.06
	<i>P</i>		<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
23.11.06 au 06.03.07	SR2	59	0.1	1.26	0.21	0.82
	SO	60	0.1	1.24	0.21	0.94
	<i>P</i>		<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>

Durant la 1ère période, l'IC global du SR a été de 0,84 et l'IC global du SO de 1,10, valeurs similaires aux moyennes des IC de chaque quinzaine (Tableau 10). Durant la 2^{ème} période, les IC globaux ont été de 0,97 dans les deux systèmes.

En condition de recirculation maximale dans le SR (SR1) Les poissons ont été maintenus à 71 et 33 kg.m⁻³ dans le SR et le SO respectivement, selon les contraintes de gestion de la ferme, et nourris à 1,2% de la biomasse par jour. Aucune pathologie particulière n'est survenue dans les systèmes d'élevage et le taux de mortalité a été similaire.

Aucune différence significative d'augmentation de biomasse n'a été observée entre les deux systèmes d'élevage (Fig.14).

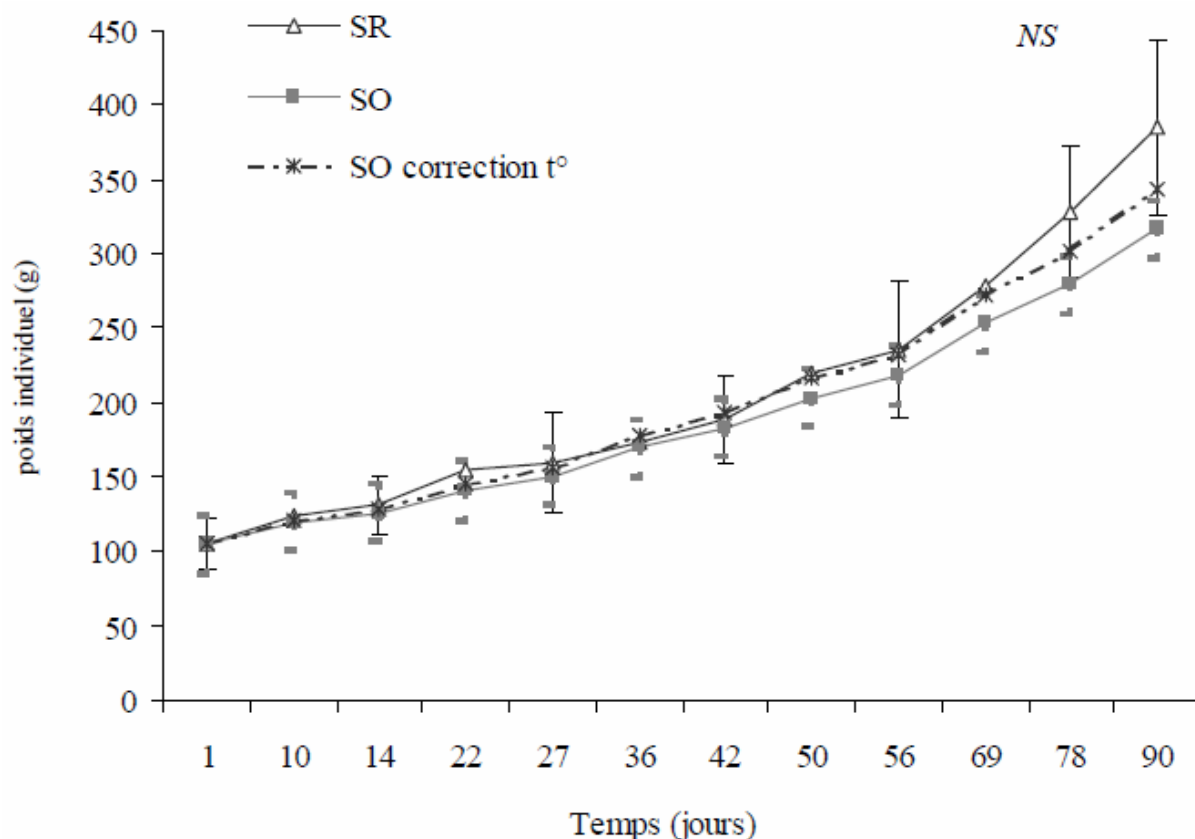


Figure 14. Evolution dans le temps du poids individuel des poissons (moyenne \pm écart-type) dans le SR (période SR1) et le SO (les statistiques sont présentées pour le SR et le SO, avec NS= différence non significative et *= différence significative avec $P < 0.05$).

Aucune différence significative n'a été constatée entre les dispersions pondérales (CV de 17% pour le SR et 19% pour le SO) et il n'y a pas eu d'évolution dans le temps des coefficients de variation pondérale.

En conditions recirculation réduite dans le SR (SR2) Les poissons ont été maintenus à 59 ± 7 et $60 \pm 8 \text{ kg.m}^{-3}$ dans le SR et le SO respectivement, et nourris à 0,9% de la biomasse par jour. Aucune maladie n'est apparue dans les deux systèmes d'élevage, la mortalité a été identique dans les deux systèmes et de 0,1%. Aucune différence significative d'augmentation de biomasse n'a été constatée entre les systèmes d'élevage (Fig.15).

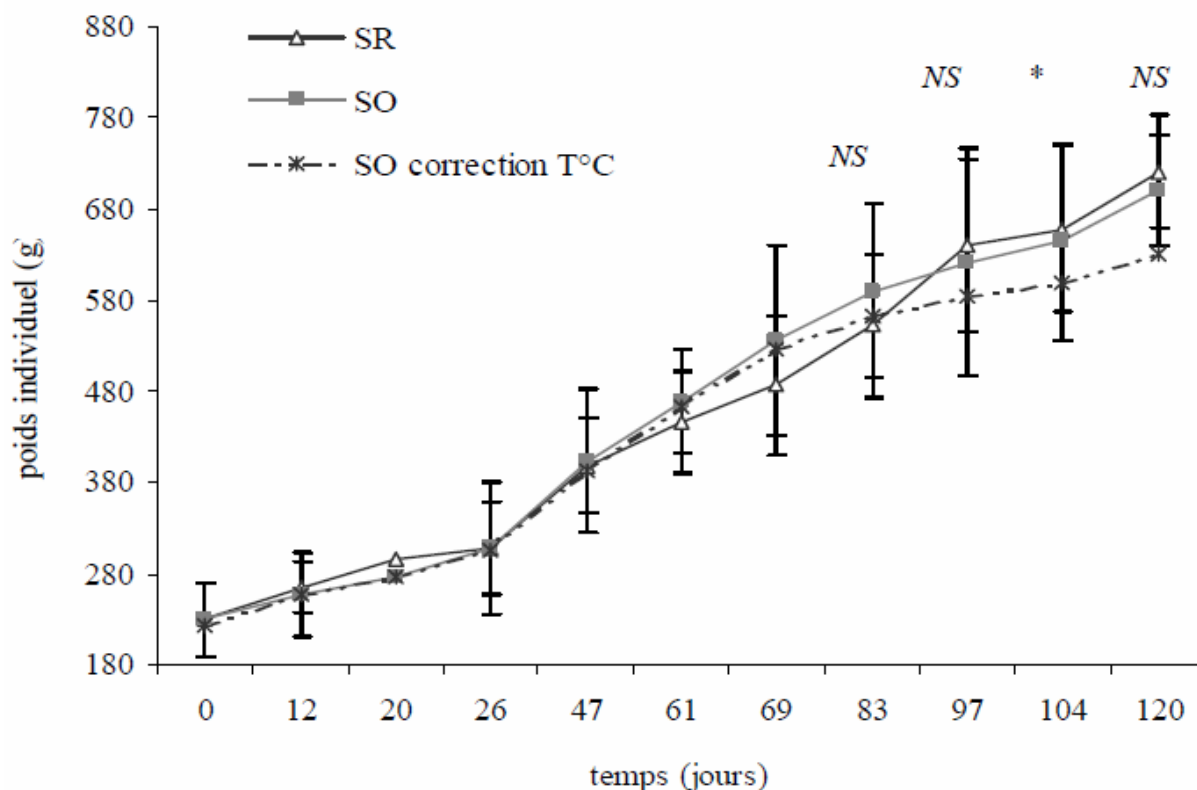


Figure 15. Evolution dans le temps du poids individuel des poissons (moyenne \pm écart-type) dans le SR (période SR2) et le SO (les statistiques sont présentées pour le SR et le SO, avec NS= différence non significative et *= différence significative avec $P < 0.05$).

La dispersion pondérale dans le SR a été légèrement inférieure à celle dans le SO, sans augmentation dans le temps (CV de 13,7% et 17,1% pour le SR et le SO à la fin de l'expérience respectivement).

2.2) Capacité d'accueil maximale du système d'élevage en circuit recirculé et bien être des poissons

2.2.1) Qualité de l'eau entrante et écoulements

Au cours de cette 3^{ème} phase expérimentale, la qualité physicochimique de l'eau neuve du SR a été similaire à celle des deux premières phases expérimentales et constante tout au long de l'expérimentation. L'apport en eau neuve a été de $7,6 \pm 1,2 \text{ m}^3.\text{kg d'aliment}^{-1}$, c'est à dire $352 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$. Ce taux de renouvellement dans le SR (195% par jour), similaire au taux de renouvellement des deux premières phases expérimentales, est quatre fois inférieur à celui du SO. Le débit de recirculation dans le SR a été maintenu à un niveau maximal, équivalent à une vitesse mesurée de circulation de l'eau 3 fois supérieure ($6,1 \pm 0,8 \text{ cm s}^{-1}$) à celle mesurée dans le SO ($2,21 \pm 0,13 \text{ cm s}^{-1}$).

2.2.2) Qualité de l'eau dans les bassins d'élevage

Le suivi de la qualité de l'eau dans le SR et le SO est présenté dans le tableau 10.

Tableau 10. Paramètres physico-chimiques de l'eau d'élevage des 2 systèmes d'élevage testés (N=9)

Période		MES	AAT	N-NO ₂	N-NO ₃	N-Urée	P-PO ₄
Concentrations en mg.l ⁻¹							
J 0-43	SR	12.1 ± 1.5	0.24 ± 0.08	0.14 ± 0.03	9.4 ± 0.8	0.10 ± 0.05	0.05 ± 0.04
	SO	6.9 ± 3.7	0.78 ± 0.11	0.02 ± 0.00	7.9 ± 0.2	0.15 ± 0.03	0.06 ± 0.01
	<i>P</i>	***	***	***	***	**	NS
J 43-77	SR	7.5 ± 1.4	0.56 ± 0.02	0.24 ± 0.02	9.2 ± 0.5	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.02
	SO	1.9 ± 0.5	0.73 ± 0.16	0.02 ± 0.01	7.6 ± 0.7	0.15 ± 0.04	0.05 ± 0.02
	<i>P</i>	***	NS	***	***	NS	***

Les mesures et analyses ont montré des différences significatives de qualité d'eau entre les deux systèmes d'élevage et des changements au cours du temps ont été observés. Pour la période j0-43, les concentrations en MES, N-NO₂, N-NO₃ et N-urée étaient supérieures dans le SR et au contraire l'AAT était deux fois moins élevé que dans le SO. A partir de j43, une augmentation significative ($P < 0,0001$) des concentrations en AAT, N-NO₂ et P-PO₄ a été constatée dans le SR, avec un doublement des concentrations par rapport à la période j0-43.

Pour la période j43-77, les concentrations en AAT n'étaient pas significativement différentes dans le SR et le SO. Les concentrations correspondantes en NH₃ étaient de $0,0017 \pm 0,0009$ mg.l⁻¹ dans le SR et $0,0016 \pm 0,0003$ mg.l⁻¹ dans le SO (concentrations maximales de 0,0033 et 0,0020 mg.l⁻¹ respectivement). Les N-NO₂ ont augmenté dans le SR jusque 0,28 mg.l⁻¹ en fin d'expérience, concentration 10 fois supérieure à celle du SO.

Le pH et la température ont été similaires dans les deux systèmes d'élevage : pH de $7,33 \pm 0,17$ dans le SR et $7,01 \pm 0,29$ dans le SO, températures de 11,6°C avec des fluctuations supérieures dans le SR (écart type de 1,9°C dans le SR et 0,6°C dans le SO). La concentration de sortie en O₂ a toujours été supérieure à 6 mg.l⁻¹ dans les deux systèmes d'élevage. La concentration en CO₂ a été de $8,4 \pm 3,1$ mg.l⁻¹ dans le SR et 2 fois supérieure dans le SO, $17,8 \pm 5,7$ mg.l⁻¹. Une sursaturation en N₂ a été constatée dans le SR tout au long de l'expérience, autour de $109,5 \pm 2,5\%$.

2.2.3) Performances des poissons

La densité a augmenté progressivement dans les deux systèmes d'élevage, de 56 à 108 kg.m⁻³ dans le SR et de 58 à 98 kg.m⁻³ dans le SO (Fig.16 A et B). Aucune maladie n'est apparue dans les systèmes d'élevages expérimentaux et la mortalité, de 0,7%, est comparable à celle de l'ensemble de la ferme en circuit ouvert et à 60 kg.m⁻³ pour la même période.

L'augmentation de biomasse a été comparable dans le SR et le SO jusqu'au j56, puis la croissance est devenue inférieure dans le SO, jusque la fin de l'expérience où la densité a atteint 84,5 kg.m⁻³. Dans le SR, la croissance a été similaire à la référence de la ferme à 60 kg.m⁻³.

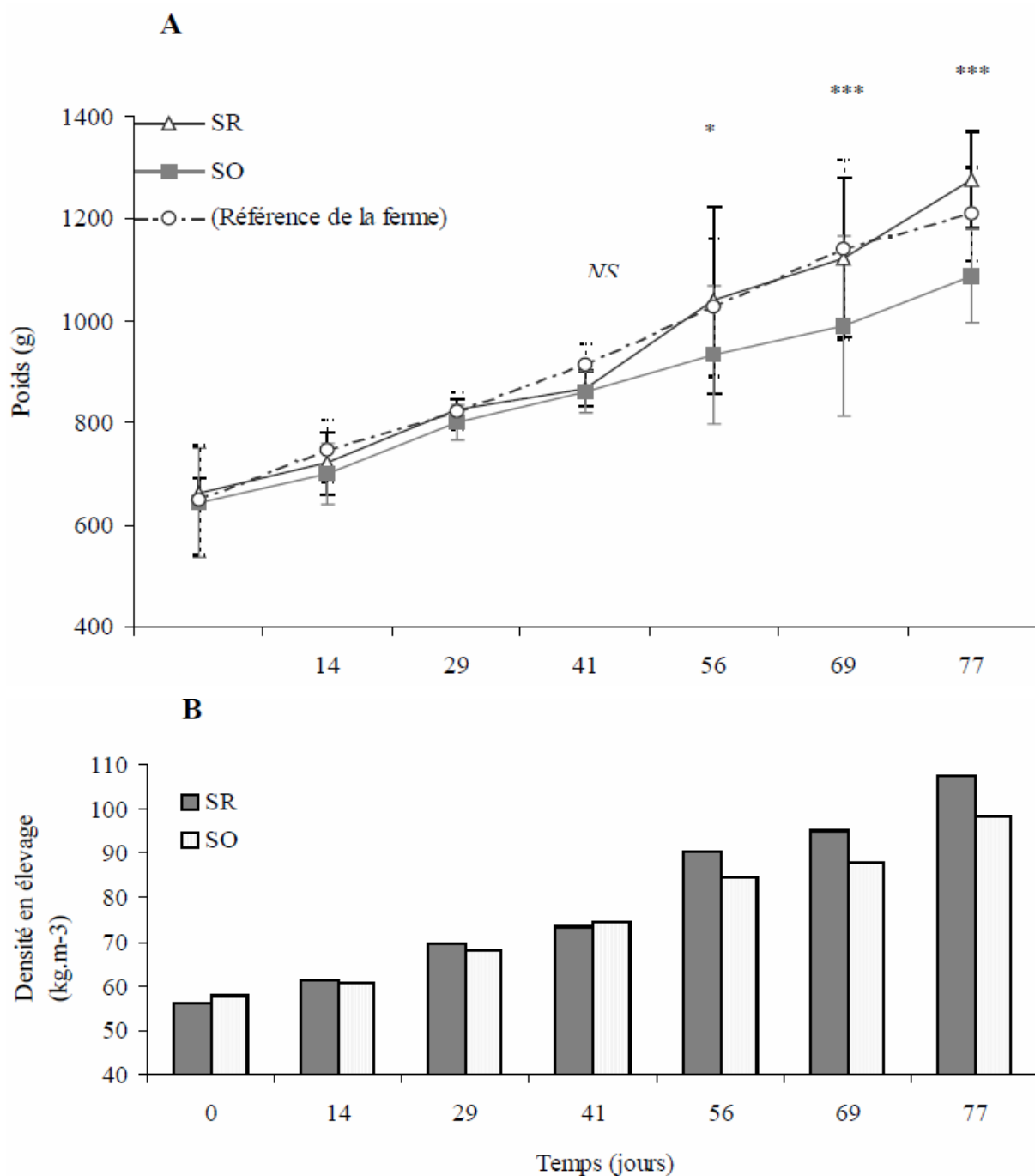


Figure 16. Evolution (A) du poids individuel (moyenne \pm écart-type) et (B) de la densité en élevage dans le SR et le SO. La référence de croissance établie pour la ferme en SO et à 60 kg.m^{-3} est mentionnée en pointillés. Les résultats statistiques sont donnés pour le SR et le SO (NS, différence non significative ; différence significative *, $P < 0,05$; ***, $P < 0,001$).

Le TCS de j0-77 a été de 0,85% pour le SR et de 0,68% pour le SO (référence de la ferme à 0,81%). L'IC apparent était meilleur dans le SR que dans le SO, 0,97 et 1,17 respectivement (référence à 1,05). Il n'y a pas eu de différence entre les dispersions pondérales des deux systèmes d'élevage à la fin de l'expérience (CV de 7,4% et 8,5% pour le SR et le SO respectivement).

L'indice K était similaire en fin d'expérience, de 1,5 dans les deux systèmes d'élevage.

2.2.4) Bien être des poissons

A j15, aucun effet du système d'élevage sur l'ILR des nageoires pectorales et dorsales n'a pas été mis en évidence, de légères différences sont apparues à j69. L'ILR des nageoires du SR a été toujours plus faible que dans le SO (tableau 11).

Tableau 11 Evolution de l'ILR des nageoires pectorales gauche (PG), droite (PD) et dorsales (D) dans le SR et le SO, avec NS : différence non significative ($P>0,05$) et * : significative ($P<0,05$)

Jour		PG	PD	D
15	SR	9,03±0,17	8,47±0,19	7,90±0,15
15	SO	9,28±0,15	9,24±0,18	8,01±0,15
	<i>P</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
69	SR	8,98±0,16	8,57±0,4	7,70±0,19
69	SO	9,65±0,21	9,35±0,35	8,29±0,19
	<i>P</i>	*	<i>NS</i>	*

Il n'y a pas eu de différence significative entre les deux systèmes d'élevage sur les niveaux d'érosion des nageoires. Une amélioration de l'état des nageoires a même été observée à j69 (tableau 12).

Tableau 12. Niveau d'érosion moyen des nageoires pectorales gauche (PG), droite (PD) et dorsales (D) dans le SR et le SO, avec NS : différence non significative ($P>0,05$)

Jour		PG	PD	D
15	SR	2,06±0,10	2,30±0,11	1,50±0,13
15	SO	1,94±0,09	2,04±0,09	1,46±0,10
	<i>P</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
69	SR	1,65±0,12	1,60±0,13	1,26±0,13
69	SO	1,38±0,07	1,37±0,09	1,36±0,13
	<i>P</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>

Les nageoires pectorales ont été plus érodées que les nageoires dorsales. Pour les nageoires pectorales, le niveau d'érosion le plus fréquent a été le niveau 2 à j15 (55% dans le SR et 65% dans le SO) et le niveau 1 à j69 (57% dans le SR et 64% dans le SO). Aucune pectorale intacte n'a été observée mais les poissons avec des nageoires complètement érodées ou avec des extrémités enflammées étaient rares.

Pour la dorsale, le niveau d'érosion 1 a été le plus fréquent, avec de meilleurs résultats à j15 (tableau 13).

Tableau 13. Evolution de l'érosion des nageoires pectorales gauche (PG), droite (PD) et dorsales (D) dans le SR et le SO

Jour	Nageoire	Fréquence des niveaux d'érosion (%)					
		0	1	2	3	4	
15	SR	PG	0	20	56	22	2
15		PD	0	12	54	26	8
15		D	6	56	24	10	4
15	SO	PG	0	22	62	16	0
15		PD	0	15	69	15	2
15		D	2	58	32	8	0
69	SR	PG	0	54	29	15	2
69		PD	0	60	24	11	4
69		D	14	60	16	6	4
69	SO	PG	0	62	38	0	0
69		PD	0	66	30	2	2
69		D	6	70	12	6	6

L'état de la caudale a été moins bon dans le SR que dans le SO aux j15 et j69, avec environ 50% des nageoires en catégorie C (truites non commercialisable comme poisson entier), en comparaison aux 20% du SO. Dans les deux systèmes d'élevage, les caudales de niveau A ont été moins nombreuses à j69 (tableau 14).

Tableau 14. Evolution de l'érosion de la nageoire caudale dans le SR et le SO Fréquence de l'indice (%)

Jour		Fréquence de l'indice (%)		
		A	B	C
15	SR	22	32	46
15	SO	56	24	20
69	SR	0	46	54
69	SO	26	58	16

Aucune marque de morsure et ni d'extrémités sanguinolentes n'ont été relevées. Aucun comportement agressif entre les individus n'a été observé durant l'expérimentation dans le SR et le SO. Par contre, un changement dans le comportement des poissons a été observé durant la deuxième partie de l'expérience, avec des poissons plus calmes, une activité natatoire réduite dans le SR.

VI) Discussion et Perspectives

Dans les deux systèmes d'élevage et en particulier dans le système d'élevage en circuit recirculé (SR), la qualité de l'eau est restée conforme aux recommandations pour l'élevage des salmonidés (cf. tableau 15, Bibliographie). Considérés comme des éléments de toxicité à court terme, la concentration en O_2 en sortie de bassin est restée supérieure à 6 mg.l^{-1} et la concentration en AAT inférieure à 1 mg.l^{-1} . Les teneurs en éléments azotés dissous de l'eau du SR ont été significativement différentes de celles du SO, avec des concentrations inférieures en AAT et supérieures en $N\text{-NO}_2$ et $N\text{-NO}_3$ qui s'interprètent comme le résultat du fonctionnement de la filtration biologique du SR. Les paramètres limitants ont été différents selon le système d'élevage considéré. Dans le SR, les concentrations en $N\text{-NO}_2$ ont augmenté avec la densité en élevage, atteignant $0,28 \text{ mg.l}^{-1}$ en fin d'expérience. La réduction de consommation d'eau et le fonctionnement du système de traitement du SR expliquent ces différences de qualité de l'eau par rapport au système d'élevage en circuit ouvert.

Indépendamment de l'oxygène, le suivi des autres gaz dissous a mis en évidence moins de CO_2 dans le SR, ce qui traduit une efficacité très satisfaisante du système de dégazage assuré par l'injection d'air dans les pompes airlift. Ce résultat tend à valider le dimensionnement de ce compartiment. La valeur maximale de CO_2 du SR a toujours été inférieure à 10 mg.l^{-1} , le SO a présenté des taux supérieurs aux $10\text{-}20 \text{ mg.l}^{-1}$ recommandés (Heinen *et al.*, 1996 ; Fivelstad *et al.*, 1999 ; 2003). Le phénomène majeur est l'installation d'une sursaturation chronique en azote dissous dans le SR. Le taux de saturation en azote a toujours dépassé le seuil toxique de 105% avancé par Hussenot et Leclercq (1987). Comme ce gaz est biologiquement neutre (ni produit ni consommé), cette sursaturation est inhérente au montage.

Parmi les causes probables, l'injection d'air en profondeur dans les pompes airlift assure des échanges air/eau sous pression supérieure à la pression atmosphérique et génère donc une sursaturation par rapport à la pression de surface. La sursaturation en azote est un facteur limitant bien connu des systèmes d'aération utilisant une injection d'air comprimé en profondeur (Belaud, 1996 ; Blancheton *et al.*, 2006) ; si cette sursaturation n'a manifestement pas eu d'impact sur les performances des truites, il conviendra cependant de revoir les profondeurs d'injection d'air en cas d'élevage de poissons plus vulnérables à la sursaturation gazeuse. D'un côté, l'injection profonde assure une meilleure efficacité de pompage, d'oxygénation et de dégazage du CO_2 , de l'autre côté elle favorise la sursaturation gazeuse.

Un compromis devra être ajusté au cas par cas en vue de la généralisation éventuelle de ce type d'élevage en circuit recirculé.

Lors de l'expérience de réduction du débit de recirculation dans le SR, la qualité d'eau ne s'est pas significativement altérée. Ceci est dû, pour les éléments azotés, à la solidité du fonctionnement du filtre biologique et, pour les concentrations en O_2 et CO_2 , à la capacité d'échange de l'airlift. La restriction des débits de recirculation diminue la vitesse moyenne de circulation de l'eau à $2,67 \text{ cm.s}^{-1}$ dans le SR, soit une valeur comparable à celle dans le SO.

La restriction du débit de recirculation a permis de réduire la consommation énergétique de des pompes airlift de $0,7 \text{ kWh.kg}^{-1}$ de poisson produit. L'utilisation d'un compresseur unique pour l'alimentation en air de l'ensemble du système de traitement est alors possible, avec une consommation énergétique totale de $2,49 \pm 0,05 \text{ kWh.kg}^{-1}$ de poisson. Ce résultat se situe dans la fourchette haute des références danoises, dont la consommation énergétique est de l'ordre de 1,9 à $2,3 \text{ kWh.kg}^{-1}$ de poisson produit (Lareau *et al.*, 2004).

Le rendement d'oxygénation et de dégazage du CO_2 des pompes airlift a été faible tout au long de l'étude, la réduction du débit de recirculation ayant peu d'effet sur les rendements.

Les airlifts n'ont fourni que $392 \pm 132 \text{ g d'O}_2.\text{kWh}^{-1}$ quand Mozes *et al.* (2004) tablent sur plus de $500 \text{ g O}_2.\text{kWh}^{-1}$. Ces différences peuvent s'expliquer sur la base des lois physiques qui régissent les échanges de gaz à l'interface air/eau. Conformément aux lois de diffusion de Fick, le transfert dépend essentiellement de la surface de contact air/eau (surface des bulles), de la profondeur d'immersion (conditionnant la pression des gaz dans l'air) mais également de la tension en O_2 et CO_2 dans l'eau entrant dans les airlifts. Pour un système de géométrie donnée, on peut donc obtenir des rendements d'oxygénation et de dégazage en CO_2 différents selon la déplétion en oxygène ou la sursaturation en CO_2 des eaux entrant dans l'appareil.

Selon ce raisonnement, le rendement sera d'autant meilleur que les eaux traitées seront préalablement appauvries en O_2 et enrichies en CO_2 . L'augmentation de la biomasse ou la réduction du débit recirculé augmentera le déficit en O_2 et l'excédent en CO_2 des eaux à traiter et augmentera

automatiquement le rendement de l'appareillage. Les différences entre les présents résultats et ceux de Mozes *et al.* (2004) pourraient simplement résulter d'une différence de concentration des eaux admises dans une pompe airlift de géométrie et fonctionnement identique. Le fait que le rendement des airlifts n'atteigne pas le maximum décrit par ailleurs par Mozes *et al.* (2004) ouvre la voie à des optimisations, par exemple en testant d'autres débits et/ou modes d'injection d'air et d'autres profondeurs d'injection, tout en gardant en mémoire les effets indésirables des injections profondes sur les sursaturations gazeuses. Des investigations supplémentaires sont nécessaires sur l'airlift afin de définir l'optimum économique qui combine les différentes fonctions de ce système (échanges de gaz et circulation de l'eau).

L'efficacité du système de traitement des rejets solides par sédimentation a été évaluée à 60% mais avec des variations très importantes selon les mesures ; la gestion des MES dans le SR doit être améliorée. Une unité supplémentaire de traitement des rejets solides serait nécessaire afin d'accroître la récupération des fines particules qui restent en circulation dans le système d'élevage, présentant un risque de dégradation de la qualité de l'eau à long terme ou de décantation incontrôlée dans des zones sans poisson.

Enfin, l'efficacité d'un filtre biologique est liée à de multiples facteurs, tels que l'O₂, la température, le pH, la concentration en AAT et la charge organique de l'eau (Rusten *et al.*, 2006). L' O₂ et le pH n'ayant pas été limitants, d'autres facteurs (agissant un à un ou en association) pourraient expliquer le rendement médiocre globalement constaté ($45 \pm 32 \text{ g AAT.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$) : la température basse de l'eau ($12,0 \pm 1,9^\circ\text{C}$), la concentration faible en AAT à l'entrée du filtre biologique ($0,3 \pm 0,1 \text{ mg.l}^{-1}$) et/ou un problème de charge organique trop élevée dans le système d'élevage. Les concentrations élevées en N-NO₂, qui ont atteint $0,28 \text{ mg.l}^{-1}$ quand la biomasse dans le SR était la plus élevée, sans redescendre après malgré la diminution de la biomasse, pourraient accréditer l'hypothèse d'une charge organique trop élevée dans le SR, avec des zones de décantation incontrôlées et de relargage en éléments dissous. Une amélioration de la gestion du filtre biologique, notamment la fréquence et la méthode de nettoyage du garnissage, est à envisager sur le SR en vue d'optimiser la dégradation de l'AAT.

En absence de pathologie particulière, il n'est pas apparu de différence notable de mortalité entre les systèmes d'élevage en circuit recirculé et en circuit ouvert et les pertes ont été du même ordre que dans les conditions habituelles de la pisciculture. La pisciculture étant classée zone agréée indemne des principales maladies des salmonidés, aucun traitement préventif n'est effectué sur les truites AEC de la ferme.

La croissance des truites AEC a été comparable dans les deux systèmes d'élevage, avec une dispersion pondérale légèrement moindre dans le SR. L'IC apparent a été meilleur dans le SR tout au long des expérimentations relativement au SO, mais sans différence significative. De plus, la distribution de l'aliment dans les deux systèmes d'élevage et l'enregistrement des quantités distribuées ayant été réalisés par la même équipe, l'hypothèse d'un éventuel gaspillage d'aliment peut être écartée.

Il n'y a pas eu d'effet de la réduction du débit de recirculation sur la croissance des poissons, cependant le débit minimal testé dans le SR est resté élevé, deux fois supérieur au débit du SO et les traitements de l'eau (en particulier l'aération) sont restés suffisants. Il existe donc une marge de sécurité par rapport aux préconisations danoises et des possibilités d'optimisation des rendements. La méthodologie mise en oeuvre dans ce travail pourra être appliquée aux essais futurs.

Lors de l'augmentation des densités en élevage dans les systèmes, les meilleurs résultats sur la croissance des poissons ont été obtenus dans le SR jusqu'à des densités atteignant 100 kg.m^{-3} , en dépit d'une qualité d'eau réduite par rapport au SO. Les résultats de croissance dans le SR ont été similaires à ceux de la référence de la ferme à une densité en élevage de 60 kg.m^{-3} . Dans le SO, les causes de la baisse de croissance constatée au delà de 85 kg.m^{-3} ne sont pas clairement identifiées, sinon par un effet possible à long terme du CO₂ (exposition des poissons en continu à de fortes concentrations, $17,8 \text{ mg.l}^{-1}$ en moyenne) mais un effet de l'augmentation de la densité en élevage ne peut pas être écarté. Sous les conditions de notre étude, la capacité maximale d'accueil du SR pour le grossissement de la truite AEC a été atteinte à 100 kg.m^{-3} , cette limite étant fixée par l'accumulation de nitrites dans le système, facteur de risque connu des filtres biologiques à garnissage plastique dont la nitrification est souvent incomplète (Rusten *et al.*, 2006). En revanche, le système de d'oxygénation et dégazage est apparu suffisant.

Dans le SR, l'indice de longueur relative des nageoires pectorales et dorsales a toujours été plus faible que dans le SO et la différence s'est accentuée en fin d'expérience. Cependant, dans les deux

systèmes d'élevage, la fréquence de nageoires pectorales et dorsales hautement érodées a été inférieure à 10%, indiquant une faible dégradation du profil des nageoires quelle que soit la densité en élevage. Une amélioration du profil des nageoires pectorales et dorsales a même été observée au cours de l'expérience dans les deux systèmes d'élevage. Concernant la nageoire caudale, les deux systèmes d'élevage ont montré des érosions marquées, quelque soit la densité, avec 20 à 50% des poissons non commercialisables en tant que "poissons entiers" selon le cahier des charges de la pisciculture. La différence entre les longueurs maximales des nageoires pectorales et dorsales dans les deux systèmes d'élevage pourrait être attribuée à la configuration du SR et un hydrodynamisme plus important (vitesse de circulation de l'eau 3 fois supérieure au SO) tel que démontré sur les jeunes stades de salmonidés (Latreuille, 2003 ; Pelis et McCormick, 2003 ; Person-Le-Ruyet *et al.*, 2007).

Une dégradation de l'état des nageoires est généralement observée à de fortes densités en élevage (Ellis *et al.*, 2002), mais à notre connaissance, il n'existe pas de données disponibles sur la truite AEC maintenue à des densités de 60 et 100 kg.m⁻³ en condition d'élevage en ferme. Le changement dans le comportement des poissons observé durant la deuxième partie de l'expérience a certainement induit une diminution des contacts entre les individus et donc une baisse de l'érosion des nageoires. Le risque de subjectivité de la méthode utilisée ne peut pas être complètement exclu en dépit du fait que cette méthode est normalisée et qu'un même opérateur a observé la totalité des échantillons de poissons pour éviter un biais de lecture tel que discuté par Person-Le-Ruyet *et al.* (2007). L'érosion de la caudale, plus importante dans le SR (50% du lot non commercialisable en "poissons entiers", à fileter), peut être attribuée à la forme particulière en U du bassin et à la vitesse de circulation de l'eau accrue. La qualité physico-chimique de l'eau et les aspects bactériologiques (qui n'ont pas été étudiés lors de cette expérimentation) peuvent également expliquer en partie ces résultats. Cependant, les 20% de nageoires caudales hautement érodées dans le SO dès le début de l'expérience confirment que cette nageoire est souvent abîmée dans les conditions de grossissement en bassins, avec des interactions non agressives lors de l'alimentation des poissons. Pour cette raison, la nageoire caudale est principalement utilisée comme critère commercial, plus difficilement comme indice de bien être sans combinaison avec les autres nageoires.

La capacité maximale d'accueil du SR devra être confirmée par des expériences supplémentaires sur la truite AEC après quelques améliorations du système d'élevage, notamment la forme du bassin et le système de traitement de l'eau (amélioration de la gestion du filtre biologique et du système de traitement des rejets solides) pour limiter l'érosion des nageoires caudales en particulier et réduire les concentrations en N₂ et NO₂ dans l'eau d'élevage. Il serait intéressant de tester alors le SR modifié avec des espèces plus sensibles aux conditions environnementales telles que le saumon de fontaine ou l'omble chevalier (Wallace *et al.*, 1988 ; Baker et Ayles, 1990 ; Jorgensen *et al.*, 1993). Aucune étude scientifique n'a été faite sur l'évaluation de la qualité organoleptique des poissons des deux systèmes. Néanmoins l'entreprise contrôle régulièrement la qualité des poissons commercialisés à l'aide d'un jury d'évaluation interne. Dans le cadre de ces contrôles, des off flavors ont été systématiquement détectées sur les poissons du SR. Des investigations supplémentaires pourront être entreprises sur la gestion de ces "off flavors", probablement liées au développement de cyanobactéries ou actinomycètes dans le système. Celles-ci relarguent des molécules de diméthyl-isobornéol et de géosmine à l'origine de ce mauvais goût (Fauconneau et Laroche, 1995 ; Howgate, 2004 ; Robin *et al.*, 2006).

Fin de citation

VII) Bibliographie

- Baker, R.F., Ayles, G.B., 1990. The effects of carrying density and loading level on the growth of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *World Aquaculture* 21: 58-62.
- Belaud, A., 1996. Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive. Cépaduès Editions, collection Polytech, 207p.
- Blancheton, J.P., 2000. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. *Aquac. Eng.* 22, 17-31
- Blancheton, J.P., Piedrahita, R., Belaud, A., Moutounet, Y., Fievelstadt, S., Lemarié, G., 2006. Gas control in land based aquaculture, physiological and technical aspects. *Aqua 2006: Linking tradition & technology highest quality for the consumer*, International conference Aquaculture Europe 2006 & World Aquaculture 2006, Firenze (Florence), Italy, May 9-13, 2006, Abstracts. World aquaculture society and European aquaculture society (CD-ROM).
- Ellis, T., North, B., Scott, A.P., Bromage, N.R., Porter, M., Gadd, D., 2002. The relationship between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. *Journal of Fish Biology*, 61: 493-531.
- Fauconneau, B., Laroche, M., 1995. Characteristics of the flesh and quality of products of catfishes. *Aquatic Living Resources*, 9 : 165-179.
- Fivelstad, S., Olsen, A.B., Kløften, H., Ski, H.W., Stefansson, S., 1999. Effects of carbon dioxide for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at constant pH in bicarbonate rich freshwater. *Aquaculture*, 178: 171-187.
- Fivelstad, S., Olsen, A., Åsgård, T., Bæverfjord, G., Rasmussen, T., Vindheim, T., Stefansson, S.O., 2003. Long-term sub-lethal effects of carbon dioxide on Atlantic salmon smolts: ion regulation, haematology, element composition, nephrocalcinosis and growth parameters. *Aquaculture*, 215: 301-319.
- Heinen, J.M., Hankins, J.A., 1996. Water quality and waste production in a recirculating troutculture system with feeding of a higher-energy or a lower-energy diet. *Aquaculture Research*, 27: 699-710.
- Howgate, P., 2004. Tainting of farmed fish by geosmin and 2-methyl-iso-borneol: a review of sensory aspects and of uptake/depuration. *Aquaculture*, 234: 155-181.
- Hussenot, J., Leclercq, D., 1987. La sursaturation des gaz dissous, un phénomène souvent mal connu en aquaculture. *Aquarevue*, 11 :27-31.
- Jimenez del Rio, M., Ramazanov, Z., Garcia-Reina, G. 1996. *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia*, 326-327, 61-66
- Jørgensen, E.H., Christiansen, J.S., Jobling, M., 1993. Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Aquaculture*, 110: 191-204.
- Latremouille, D.N., 2003. Fin erosion in aquaculture and natural environments. *Reviews in Fisheries Science*, 11: 315-335.
- Lareau, S., Champagne, R., Gilbert, E., Vandenberg, G., 2004. Rapport sur les missions d'évaluation de la technologie danoise pour l'élevage en eau douce des salmonidés.
- Lemarié, G., Martin, J.L.M, Dutto, G., Garidou, C., 1998. Nitrogenous and phosphorous waste production in flow-through land-based farm of European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquatic Living Ressources* 11, 247-254

Léonard, N., 2000. Recherche et élimination des facteurs inhibiteurs de croissance dans les élevages piscicoles en circuit fermé. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2. Montpellier, France 165p.

Mozes, N., Haddas, I., Conijeski, D., Eshchar, M., 2004. The Low-Head Mega-Flow air driven Recirculating system - minimizing biological and operational risks. Proc. Aquacult. Eur. Conf., Barcelona, Spain, 598-599.

Pagand, P., 1999. Traitement des effluents piscicoles marins par lagunage à haut rendement algal. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 1, Montpellier, France, 220p.

Papatryphon, E., Petit J., Hayo, V., Kaushik, S.J., Claver, K., 2005. Nutrient balance modelling as a tool for environmental management in aquaculture: The case of trout farming in France. Journal of Environmental Management, 35: 161-174.

Pelis, R.M., McCormick S.D., 2003, Fin development in stream- and hatchery-reared Atlantic Salmon. Aquaculture, 220: 525-536.

Person-Le Ruyet, J., Le Bayon, N., Gros, S., 2007. How to assess fin damage in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*? Aquatic Living Resources, 20 (2), 191-195.

Robin, J., Cravedi, J.P., Hillenweck, A., Deshayes, C., Vallod, D., 2006. Off flavor characterization and origin in French trout farming. Aquaculture, 260: 128-138.

Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., Lygren, E., 2006. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquacultural Engineering, 34 (3): 322-331.

Wallace, J.C., Kolbeinshavn, A., Reisnes, T.G., 1988. The effects of stocking density on early growth in Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.). Aquaculture, 73: 101-110.

Tableau 15. Limites de qualité d'eau pour l'élevage en eau douce des salmonidés

Paramètres	Valeurs seuils	Référence
N-NH ₃ (mg.l ⁻¹)	0.002 - 0.025	Thurston <i>et al.</i> , 1981; US EPA, 1998; Neori <i>et al.</i> , 2004
AAT (mg.l ⁻¹)	1-1.5	US EPA, 1998; Colt, 2006; Crab <i>et al.</i> , 2007
CO ₂ (mg.l ⁻¹)	10-20	Heinen et Hankins, 1996; Fivelstad <i>et al.</i> , 1999, 2003
O ₂ (mg.l ⁻¹)	6-7	Brett, 1979; Pedersen, 1987; Jobling, 1994
pH	6-8	Jenssen et Leivestad, 1989
N-NO ₂ (mg.l ⁻¹)	0.2-0.3	Fivelstad <i>et al.</i> , 1993
MES (mg.l ⁻¹)	< 80	Piper <i>et al.</i> , 1982; Laird et Needham, 1988

VIII) Communications

Blancheton J.P., Roque d'Orbcastel, E. 2006. Présentation du projet de traitement des rejets d'un système d'élevage en recirculation dans une ferme de production de truite (Aquaetreat). Journées du SFAM 2006, Montpellier, France, 16 mars, 2006.

Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.P., Przybyla, C., Moutounet, Y., Boujard, T., 2006. Fish farm effluent treatment and valorisation : comparison between two methods of waste evaluation. Aqua 2006: Linking tradition & technology highest quality for the consumer, International conference Aquaculture Europe 2006 & World Aquaculture 2006, Firenze, Italy, May 9-13, 2006. World aquaculture society and European aquaculture society (CDROM)

Blancheton, J.P., Roque d'Orbcastel, E., 2006. Projets Aquaetreat et Pilote en recirculation. Forum thématique. « Aujourd'hui l'aquaculture et la pêche professionnelle », Rencontres interprofessionnelles Lyon 2006, Lyon, France, 28-29 septembre, 2006.

Blancheton, J.P., Roque d'Orbcastel, E., 2006. Elevage en système recirculé. Workshop Aquaetreat Rencontres interprofessionnelles Lyon 2006, Lyon, France, 28-29 septembre, 2006.

Roque d'Orbcastel E., Blancheton J.P., 2007. Projet « Aquaetreat » et « Pilote en recirculation ». Journées du SFAM 2007, Montpellier, France, 15 mars, 2007.

Blancheton, J.P., Roque d'Orbcastel, E., 2007. Le projet Aquaetreat : fonctionnement des marais construits pour traiter les surnageants issus de la concentration des boues. 1ères Journées de la recherche filière piscicole Paris, France, 3-4 juillet, 2007.

Roque d'Orbcastel E., 2007, Projet AquaETreat, Projet pilote en recirculé - Conclusion et Perspectives, Conférence Nationale du Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture 7 novembre 2007

Roque d'Orbcastel E., 2008, Pilote salmonicole en circuit recirculée, Projet Agence de l'Eau, Pisciculture Charles MURGAT, Colloque « Traitement des effluents et Recirculation de l'eau en salmoniculture », Lycée du Bréhoulou, 10 octobre 2008

IX) Publications

Roque d'Orbcastel, E., 2008. Optimisation de deux systèmes de production piscicole: biotransformation des nutriments et gestion des rejets. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse. 137pp.

Roque d'Orbcastel E., Blancheton J-P., Aubin J., 2009. Towards environmentally sustainable aquaculture: Comparison between two trout farming systems using Life Cycle Assessment, Aquacultural Engineering 40, 113–119

Roque d'Orbcastel E., Blancheton J-P., Belaud A., 2009. Water quality and rainbow trout performance in a Danish Model Farm recirculating system: Comparison with a flow through system, Aquacultural Engineering 40, 135–143

Roque d'Orbcastel, E., Person-Le-Ruyet, J., Le Bayon, N., Blancheton, J.P., 2009. Comparative growth and welfare in rainbow trout reared in re-circulating and flow through rearing systems. Aquacultural Engineering 40 (2), 79–86.

Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.P., Boujard, T., Aubin, J., Moutounet, Y., Przybyla, C., Belaud, A., 2008. Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. Aquaculture 274, 72–79

PARTIE

FINANCIERE

BUDGET ENGAGÉ

Etude de la diminution des rejets et des économies d'eau en pisciculture

Désignation	€ TTC		€ TTC Réalisé	H.T. EUROS	T.T.C EUROS	%
	Prévisionnel	Réalisé				
Maitrise d'ouvrage ADAPRA						
30 jours ingénieur x 488 € (10j/an)	14 640 €	14 640 €	14 640 €		115 853 €	49,7%
forfait déplacements	2 000 €	688 €	688 €			
forfait communication et diffusion des résultats	4 000 €	4 000 €	4 000 €			
Sous-Total 1	20 640 €	19 328 €	19 328 €		117 038 €	50,25%
Maitrise d'oeuvre						
SAS MURGAT						
Apport en poissons (2 bandes)	24 750 €	pm	pm			
Apport main d'oeuvre	54 200 €	107 351 €	107 351 €			
Vacataire IFREMER	67 500 €	81 858 €	81 858 €			
Apport énergie (EDF)	5 410 €	4 896 €	4 896 €			
Frais déplacement	6 000 €	2 264 €	2 264 €			
Sous-Total 2	157 860 €	196 368 €	196 368 €			
Analyses						
Analyses en continu et suivi IFREMER	pm	pm	pm			
Prélèvements échantillons boues (SPSE)	1 921 €	0 €	0 €			
Analyses boues (LDA 26)	2 183 €	835 €	835 €			
Matériel de mesures de débit	6 479 €	7 599 €	7 599 €			
Formation débitmètre	2 452 €	0 €	0 €			
Analyses organoleptiques	19 106 €	1 440 €	1 440 €			
Sous-Total 3	32 141 €	9 874 €	9 874 €			
Frais divers et imprévus						
Forfait 10% (sous-total 1+2+3)	21 064 €	7 320 €	7 320 €			
Sous-Total 5	21 064 €	7 320 €	7 320 €			
SOUS-TOTAL GENERAL	231 705 €	232 891 €	232 891 €		232 891 €	
TOTAL GENERAL	231 705 €	232 891 €	232 891 €		232 891 €	

TOTAL GENERAL

Etude de la diminution des rejets et des économies d'eau en pisciculture

Etat récapitulatif des dépenses réellement engagées

Code action ADAPRA : 6500

Porteur	Fournisseur	Objet	Facture		
			N°	Date	Montant TTC
ADAPRA	SNCF	Déplacement Soutenance Thèse E. Roque - Toulouse (31)	-	17-mars-08	186,70 €
	Tisseo Reseau Urbain	Déplacement Soutenance Thèse E. Roque - Toulouse (31)	-	17-mars-08	5,00 €
	Hôtel Trianon	Déplacement Soutenance Thèse E. Roque - Toulouse (31)	Fact 18509	17-mars-08	55,00 €
	Lyon Parc Auto	Déplacement Soutenance Thèse E. Roque - Toulouse (31)	-	17-mars-08	29,50 €
	SNCF	Colloque Effluents d'Elevage - Fouesnant (29)	-	9 et 10 oct 08	162,00 €
	Lyon Parc Auto	Colloque Effluents d'Elevage - Fouesnant (29)	-	9 et 10 oct 08	54,65 €
	Déplacement	Réunion avec Société Hanch Lange - Beaurepaire (38)	RD Janvier 07	10-janv-07	40,57 €
	Déplacement	Réunion Pilote Murgat/Agence de l'Eau - Beaurepaire (38)	RD Janvier 07	31-janv-07	42,70 €
	Déplacement	Réunion avec M. Terrasson (AE RMC) - Beaurepaire (38)	RD Février 07	6-févr-07	41,48 €
	Le Safran	Réunion Pilote avec partenaires Lyon (69)	Ticket 93	1-mars-07	40,10 €
	Déplacement	Réunion Pilote avec ITAVI - Beaurepaire (38)	RD Septembre 07	28-sept-07	30,16 €
	Cometec	Achat Courantomètre	Fact 1802026	27-févr-07	7 599,38 €
	Laboratoire d'Analyses de la Drôme	Analyse des boues	LDA 117539	11-janv-06	612,78 €
	Laboratoire d'Analyses de la Drôme	Analyse des boues	LDA 118982	14-févr-06	222,20 €
	ADAPRA	Dépenses de personnel	-	31-déc-08	21 960,00 €
	ADAPRA	Frais de communication	-	31-déc-08	4 000,00 €
	Sous-total ADAPRA :				
SAS MURGAT	SAS Les Fils de Charles MURGAT	Dépenses de personnel	Etat de dépenses du 15/10/08	15-oct-08	107 351,00 €
	SAS Les Fils de Charles MURGAT	Main d'œuvre Vacataire E.Roque	Etat de dépenses du 15/10/08	15-oct-08	81 857,71 €
	SAS Les Fils de Charles MURGAT	Déplacement Vacataire E.Roque	Etat de dépenses du 15/10/08	15-oct-08	2 263,66 €
	SAS Les Fils de Charles MURGAT	Consommation électrique	Etat de dépenses du 15/10/08	15-oct-08	4 896,00 €
	CAPINOV	Analyses organoleptiques	Etat de dépenses du 15/10/08	15-oct-08	1 440,00 €
	Sous-total SAS MURGAT :				
TOTAL :					232 890,59 €

III) Justification des écarts

La ventilation du budget prévisionnel établi au moment du dépôt du dossier a été modifiée au fur et à mesure de la mise en œuvre du projet. Certaines lignes budgétaires se sont en effet avérées sous estimées et d'autres sur estimées au moment de la réalisation du programme de recherche qui s'est étalé sur 4 ans.

Les montants engagés et les écarts entre le budget prévisionnel et le budget réalisé s'impliquent comme suit :

- **Personnel ADAPRA** : Au total, 45 jours ont été consacrés à la gestion et à la coordination de ce projet et nous n'avions prévu que 30 jours. Le fait générateur de cet écart est la reprise en cours du projet par M. Jean-Christophe CORMORECHE qui a dû passer plus de temps que prévu pour s'imprégner du projet et organiser sa finalisation, faute de tuilage avec son prédécesseur.
- **Frais de déplacements** : peu de déplacements sur site ont finalement été nécessaires pour assurer une bonne gestion du projet. E. Roque était présente en permanence sur site et seulement quelques réunions de travail ont eu lieu à Beaufort. La majorité des échanges entre les partenaires ont eu lieu par mail ou par téléphone.
- **Frais de communication** : l'avancement du projet et les résultats finaux ont fait l'objet de huit présentations à l'occasion de rencontres professionnelles devant un parterre d'aquaculteurs, d'experts et de scientifiques de toute l'Europe. Ses présentations ont été assurées par Mlle Roque et par JP Blancheton. Elles ont nécessité la production de documents papier distribués aux participants. Les frais de reproduction de présentation n'ont pas pu être chiffrés précisément malgré la gestion analytique de la comptabilité du projet.
- **Apport de poissons** : cette ligne devait couvrir le risque de mortalité des poissons fournis par l'entreprise MURGAT. Nous n'avons heureusement déploré aucune mortalité, ce qui a permis à la SAS de commercialiser ses truites et de ne pas consommer cette ligne budgétaire.
- **Apport de main d'œuvre** : la pisciculture MURGAT a délégué une partie de son personnel à la conduite de cette expérimentation. S'agissant d'une mise au point d'un nouveau système de production, les interventions du personnel ont été très nombreuses. Lors des travaux, la nature du sous-sol (gravier) a énormément compliqué le creusement des puits d'air lift et des cônes de décantation. Les réglages nécessaires au bon fonctionnement de la vidange des cônes, à la diffusion d'air dans les air lifts et le lit fluidisé ont été plus difficiles que prévus.
- **Vacataire IFREMER (E. Roque d'Orbcastel)** : Les remarques concernant l'implication du personnel de la SAS sont également valables pour E. Roque qui a vu le temps de ses travaux de thèse s'allonger au fil des problèmes techniques que l'équipe a dû comprendre, analyser puis résoudre.
- **Apport d'énergie** : l'énergie consommée dans le projet est liée à l'utilisation des deux compresseurs d'air alimentant l'air lift et le lit fluidisé. La facture totale d'électricité est plus légère que prévu et pourra l'être encore plus à l'avenir grâce à des réglages encore plus fins et à la recherche de nouvelles économies d'énergie.
- **Frais de déplacement** : ils sont liés aux déplacements d'E. Roque pour assurer la présentation des résultats de ses travaux. Ce budget a été sous utilisé bien que le nombre de communication ait été important.
- **Analyses d'eau** : le suivi des paramètres physico-chimiques de l'eau circulant dans le pilote a été assuré par le laboratoire d'analyses de l'IFREMER qui comme convenu n'a pas facturé ses prestations.
- **Prélèvements de boues** : les échantillonnages de boues et leur transport a pu être pris en charge lors de déplacements d'E. Roque.
- **Analyses de boues** : Deux analyses des boues collectées dans les cônes de décantation ont été confiées au Laboratoire Département de la Drôme. Les résultats étant concordant avec les précédentes analyses effectuées sur le site, le suivi de la qualité des boues a été limité.
- **Matériel de mesure du débit** : les réglages du débit entrant et du débit circulant ont nécessité l'achat d'un courantomètre électromagnétique de marque Cometec.

- **Formation débitmètre** : l'usage du courantomètre s'étant avéré simple, nous n'avons pas eu besoin de former le personnel d'étude au maniement de cet appareil.
- **Analyses organoleptiques** : les analyses organoleptiques des produits issus du bassin en eau recirculée ont finalement été limitées. Le personnel de l'entreprise ayant acquis la technique et la sensibilité nécessaires grâce à un entraînement spécifique, le suivi de ce paramètre extrêmement important a été réalisé en interne.
- **Frais imprévus** : Cette ligne a été utilisée pour faire face à la surconsommation en frais de personnel ADAPRA comme expliqué plus haut.

Au total, les dépenses engagées par l'ADAPRA et la SAS les Fils de Charles MURGAT s'élèvent à 232 891 euros soit 1 186 euros de plus par rapport au budget prévisionnel. Malgré quelques écarts liés au caractère très innovant du projet, le budget et les délais ont été tenus.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas pu être menée à bien sans la très forte implication de tous les partenaires.

Nous remercions tout particulièrement les salariés de la pisciculture MURGAT, Ludovic, Patrick, Franck, Thomas et Catie, pour leur disponibilité et leur efficacité dans la mise en œuvre de ce pilote. Nos remerciements vont également vers Laurent et Vincent MURGAT qui, en tant que dirigeants de la SAS, ont contribué à la faisabilité du projet et surtout à sa réalisation. Leur contribution financière au projet doit être soulignée et mise en perspective par rapport à la taille de leur entreprise familiale.

Emmanuelle Roque d'Orbcastel et Jean-Paul Blancheton de l'IFREMER ont eux aussi contribué à la réalisation de cette étude. Nous tenons à féliciter Emmanuelle pour sa réussite et nous la remercions tout particulièrement pour son travail de thèse mené sur ce pilote.

Les personnels de l'Agence de l'Eau, par le suivi attentif de notre dossier et par leurs expertises, doivent également être remerciés, nous pensons particulièrement à Mme Dumas, M. Tournon et M. Terrasson.

Pour n'oublier personne, nous souhaitons également remercier Timothée Gadenne, aujourd'hui parti sous d'autres latitudes, pour son implication dans le démarrage et dans le suivi du programme.

ANNEXES

Factures et relevés de dépenses

ANNEXES

Communications

Les publications et les communications réalisées au sujet du projet sont jointes sur un CD-Rom en version numérisée.