



HAL
open science

Vers une pisciculture durable à hautes performances environnementales

Marc Vandeputte, Joël Aubin, Françoise Médale, Edwige Quillet, Éric
Duchaud, Pierre Boudinot, Laurent Labbé, Sadasivam S. Kaushik

► To cite this version:

Marc Vandeputte, Joël Aubin, Françoise Médale, Edwige Quillet, Éric Duchaud, et al.. Vers une pisciculture durable à hautes performances environnementales. *Innovations Agronomiques*, 2011, 12 (Février), pp.179-188. 10.17180/kpzc-yx71 . hal-01000759

HAL Id: hal-01000759

<https://hal.science/hal-01000759v1>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Vers une pisciculture durable à hautes performances environnementales

Vandeputte M.^{1,2}, Aubin J.³, Médale F.⁴, Quillet E.¹, Duchaud E.⁵, Boudinot P.⁵, Labbé, L.⁶, Kaushik S.J.⁴

¹INRA UMR 1313 GABI, Equipe Genaqua, Domaine de Vilvert, 78352 Jouy en Josas cedex

²Ifremer UMR110 INTREPID, Chemin de Maguelone, 34250 Palavas les Flots

³INRA UMR1069 SAS, 65 rue de St Briec, 35042 Rennes cedex

⁴INRA UR1067 NuMeA, Pôle d'Hydrobiologie, 64310 St Pée sur Nouvelle

⁵INRA UR0892 VIM, Domaine de Vilvert, 78352 Jouy-en Josas Cedex

⁶INRA UE0937 PEIMA, 29450 Sizun

Correspondance : Marc.Vandeputte@jouy.inra.fr

Résumé:

La pisciculture est une production en plein développement au niveau mondial, où elle couvre désormais près de 50% des apports de poisson pour la consommation humaine. En France et en Europe, son développement est plus lent, en partie du fait d'une perception négative de ses impacts sur l'environnement. En premier lieu, la quantité de poissons sauvages utilisés sous forme de farines et huiles pour alimenter les poissons carnivores pose question, mais dans ce domaine d'importants progrès ont été réalisés par la substitution de ces matières premières par des protéines et huiles d'origine végétale, et l'apport de la pisciculture à la production nette de poisson est en constante amélioration. Les rejets dans le milieu naturel sont aussi une question importante, d'autant plus qu'ils sont visibles et quantifiables, étant émis directement dans l'eau. Des études sont en cours pour quantifier leurs impacts, les réduire à la source et les traiter avant rejet, ayant là aussi permis des progrès importants. Plus globalement, il est important de bien quantifier l'ensemble des impacts, par des méthodologies globales de type Analyse du Cycle de Vie (ACV). Ceci permettra d'identifier les leviers d'actions les plus importants pour aller vers une amélioration continue de l'efficacité de la production piscicole, qui permettra d'une part de limiter les rejets et d'autre part d'optimiser la consommation de ressources (matières premières, énergie, eau) qui sont amenées à se renchérir à l'avenir. Contribuer au développement durable des filières piscicoles en définissant les bases d'une pisciculture à haute valeur environnementale pour des produits de qualité (nutritionnelle et organoleptique) est pour l'INRA un objectif qui va se poursuivre dans les prochaines années, en multipliant les approches disciplinaires et inter-disciplinaires.

Mots-clés : pisciculture, durabilité, impact environnemental, efficacité

Abstract: Towards fish production systems with high environmental performances

Fish farming is one of the fastest growing animal productions in the World, where it now covers close to 50% of fish supplies for human consumption. In France and in Europe, it develops at a lower rate, partly due to the negative perception by the public of its environmental impact. The use of fish meal and fish oil derived from capture fisheries is a well known issue, but in this domain important progress has been done by substituting marine ingredients by plant-based meals and oils. Then the net contribution of fish farming to fish supply is continuously increasing. The management of waste is also an important issue, and is easily pointed out as it is emitted directly in the water, thus being visible and quantifiable. Ongoing studies focus on monitoring the impact of waste on the aquatic ecosystems, but also on reducing their production and treating farm effluents. These combined approaches also produced and will produce positive results. More globally, impacts have to be correctly assessed, using

comprehensive methods such as Life Cycle Analysis (LCA). This will make it possible to identify key drivers to progress towards an ever-increasing production efficiency, allowing to reduce waste production but also to optimize the consumption of resources (raw materials, energy, water) which will be scarcer and more expensive in the future. Contributing to the sustainable development of fish farming through the definition of high environmental value systems for high quality (nutritional and sensory) products will remain a major objective for INRA in the coming years, combining disciplinary and multi-disciplinary approaches.

Keywords: fish culture, sustainability, environmental impact, production efficiency

Introduction

Afin d'approvisionner le marché malgré la stagnation des apports de la pêche, la pisciculture ne cesse de se développer depuis une trentaine d'années, au point de fournir aujourd'hui 48% des apports de poisson pour la consommation humaine (FAO, 2009). Avec une production mondiale de 31 millions de tonnes (Mt) en 2007 contre 18 Mt en 1997, c'est l'une des productions animales ayant la plus forte croissance. Aujourd'hui, l'essentiel de cette production est localisée en Asie, particulièrement en Chine qui représente 70% de la production mondiale. En France et en Europe, après une croissance rapide jusqu'aux années 1995-2000, le développement de la pisciculture est à l'arrêt, voire en régression.

La consommation de poisson est cependant toujours en hausse en France et en Europe, et la demande est aujourd'hui essentiellement couverte par des importations (70% en Europe, 85% en France). L'hypothèse d'une restauration des stocks en milieu naturel permettant une augmentation durable des captures de pêche est peu probable dans les années à venir, et certaines études prévoient même un effondrement rapide et important des stocks (Worm et al., 2006). Par ailleurs, le poisson représente un facteur d'équilibre nutritionnel important dans les PED comme dans les pays développés, et il n'est ni prévisible ni souhaitable que sa consommation diminue (Chevassus-au-Louis et Lazard, 2009). Une hausse continue de la demande est donc attendue et sa couverture reposera essentiellement sur la pisciculture. Cette constatation est faite à tous les niveaux - français, européen et mondial - et des initiatives pour permettre un développement durable de cette activité voient le jour partout. Aux niveaux français et européen, la question essentielle est la capacité de la pisciculture locale à couvrir une part significative de la demande pour limiter les importations, issues à la fois de la pêche et de l'aquaculture (équilibre de la balance commerciale, indépendance alimentaire et sécurité sanitaire des produits), alors qu'au niveau mondial, c'est bien la capacité à fournir du poisson en quantité suffisante pour nourrir les populations, sans conduire les populations sauvages à l'extinction, qui est en jeu.

Cependant, cette nécessaire croissance ne va pas de soi, comme le montre la stagnation des productions piscicoles française et européenne. L'accès à de nouveaux sites de production est difficile : ainsi, aucun nouveau site de pisciculture marine n'a pu être créé en France depuis 1997. Ceci est lié à la compétition avec d'autres activités, à une réglementation environnementale contraignante et sujette à des interprétations diverses, ainsi qu'à une perception négative des pratiques d'élevage (alimentation, rejets d'origine alimentaire et médicamenteuse, interaction entre poissons d'élevage et populations sauvages) s'exprimant lors des enquêtes publiques, préalable obligatoire à l'implantation de toutes les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement – dont font partie les piscicultures. L'activité piscicole doit donc se placer dans une dynamique d'amélioration de ses performances environnementales afin d'améliorer son acceptabilité et son image. De nombreuses recherches, passées ou en cours, ont pu et pourront contribuer à ces objectifs de durabilité environnementale de la production.

Un point majeur : la consommation de ressources marines pour l'alimentation des poissons d'élevage

Quelques articles dans de grandes revues avaient initialement mis en avant le fait que l'aquaculture, loin d'avoir un effet positif sur la production mondiale de poissons, pouvait avoir un impact nul voire négatif, du fait de l'utilisation de farines et huiles de poissons issues de la pêche dans l'alimentation des poissons, et en particulier des espèces carnivores telles que salmonidés et beaucoup de poissons marins (Naylor et al., 2000). Ainsi, en 2008, on estimait qu'il fallait de 2 à 5 kg de poisson sauvage pour produire 1 kg de poisson carnivore (Tacon et Metian, 2008). L'impact négatif de l'aquaculture sur la pêche peut cependant être contesté, car l'augmentation spectaculaire de la production aquacole mondiale, multipliée par 5 entre 1985 et 2005 a été réalisée sans hausse des pêches « minotières », restées stables autour de 20 millions de tonnes par an. Néanmoins, du fait de la disponibilité limitée en farines et huiles de poisson (ces pêcheries sont bien gérées, mais déjà exploitées à leur maximum), la poursuite du développement de l'aquaculture ne pourra se faire sans 1) une substitution des ressources naturelles marines par des matières premières d'origine terrestre et/ou 2) une production de matières premières marines nouvelles, comme des microalgues, ainsi que le recyclage des déchets ou co-produits de la pêche.

Depuis plus de 15 ans, de nombreux travaux ont été menés pour rendre possible la substitution des huiles et farines de poisson par des huiles et farines végétales et ont permis des progrès considérables. L'utilisation de mélanges d'ingrédients végétaux permet d'obtenir des aliments de compositions équilibrées couvrant les besoins en acides aminés et en acides gras essentiels des poissons, tout en limitant les facteurs antinutritionnels spécifiques à ces ingrédients. On peut ainsi, selon les espèces, remplacer 70 à 90 % des farines de poisson par des protéines végétales, et 80 à 100 % des huiles de poisson par des huiles végétales, sans baisse de performances (voir les revues de Corraze et Kaushik, 2009 ; Médale et Kaushik, 2009). La contribution de l'INRA dans ce domaine à travers le programme Européen Aquamax¹ a été importante. Ces résultats sont aujourd'hui largement utilisés par les fabricants d'aliments aquacoles, et au niveau mondial, la quantité de poisson de pêche nécessaire à la production d'un kilo de poisson d'élevage a baissé de façon significative, étant presque divisée par deux de 1996 à 2005 (Tacon et Metian, 2008). Compte tenu de ces évolutions, Naylor et al. (2009) reconnaissent maintenant que le consensus évolue vers l'idée que l'aquaculture aide l'océan plutôt qu'elle ne le pille.

Cependant, des limites au remplacement plus poussé demeurent : diminution de la prise alimentaire en cas de remplacement total de la farine de poisson, impact sur la qualité du produit final lorsque les huiles de poissons sont remplacées par des huiles végétales (baisse de la teneur en acides gras oméga3 à chaîne longue tels EPA et DHA), impliquant la nécessité d'une phase de finition avec un aliment riche en huile de poisson (Corraze et Kaushik, 2009). Une stratégie complémentaire à l'optimisation des formules alimentaires est la recherche de souches de poissons mieux adaptées à l'utilisation efficace de ce type d'aliments. Des travaux sont en cours sur la truite, le bar, la daurade et le maigre. Les premiers résultats obtenus chez la truite (Dupont-Nivet et al., 2009) et chez le bar (Le Boucher et al., 2010) valident l'hypothèse : certains génotypes sont effectivement plus ou moins efficaces lorsqu'ils sont nourris avec des aliments totalement substitués. Il serait donc possible de sélectionner des lignées de poissons carnivores plus aptes à valoriser les matières premières d'origine végétale. Ces aptitudes spécifiques doivent encore être caractérisées dans différents contextes de production, ainsi que leurs conséquences sur la physiologie du poisson et la qualité du produit, pour évaluer l'intérêt de mettre en place des programmes de sélection les exploitant.

¹ http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FR_NEWS&ACTION=D&SESSION=&RCN=33068

En parallèle, l'intérêt de nouvelles sources de nutriments est exploré, par exemple les micro-algues, pour lesquelles les travaux en cours portent à la fois sur la production et le fractionnement des principaux constituants² et sur la valeur biologique de ces produits chez le poisson.

De nombreuses solutions, dont certaines sont déjà largement employées et d'autres encore en développement, existent donc pour résoudre cette question des matières premières pour l'alimentation des poissons d'élevage. Une autre option, qui est l'élevage de poissons ayant des besoins plus faibles en protéines (carpe, tilapia), voire réellement herbivores (carpe amour et carpe argentée), est peu explorée en France, en partie du fait que les espèces de ce type adaptées à nos latitudes (carpes essentiellement) sont peu conformes aux attentes du consommateur occidental actuel (chair souvent grise ou jaune, nombreuses arêtes) et présentent des efficacités de transformation de l'aliment plus faibles que les salmonidés dans des conditions d'élevage en étangs.

La maîtrise des rejets et de leur impact dans le milieu naturel

Contrairement aux élevages terrestres dont les émissions dans le milieu aquatique passent par le filtre des sols, les rejets des piscicultures sont directs et les impacts plus facilement identifiables. Cette caractéristique explique en partie l'attention qui leur est portée. Pourtant, la contribution des rejets piscicoles d'origine alimentaire à la pollution du milieu est limitée puisque la pisciculture consomme 0,5% de l'ensemble des aliments pour animaux d'élevage en France (Agreste, 2008) et que le poisson est un transformateur efficace de l'aliment, avec des indices de conversion proches de 1 chez la truite. Par ailleurs, les rejets peuvent aussi comporter des éléments d'origine vétérinaire (produits sanitaires et antibiotiques). Pour améliorer l'insertion environnementale de l'activité piscicole, il faut donc à la fois décrire, évaluer et comprendre les impacts, puis trouver des moyens de les réduire.

Une première étape consiste à fixer une référence sur l'état du milieu pour suivre ensuite son évolution et les impacts éventuels des activités. Dans ce cadre, au-delà des analyses physico-chimiques, les approches basées sur la diversité des peuplements biologiques sont intéressantes car elles permettent d'évaluer les impacts en termes de fonctionnement des écosystèmes, et plus seulement en référence à des normes de concentrations, dont la pertinence peut varier fortement en fonction de l'état du milieu et des écosystèmes considérés. Ainsi, des méthodes permettant de mesurer la qualité des peuplements animaux et végétaux des cours d'eau ont été mises au point (Haury et al., 2004 ; Ombredane, 2007 ; Roussel, 2009). Elles seront utilisées dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau pour évaluer la qualité des masses d'eau.

Par ailleurs, la gestion des émissions polluantes par les piscicultures nécessite l'utilisation d'outils opérationnels de simulation. L'application de méthodes de bilans de masse et d'énergie chez les poissons (Cho et Kaushik, 1990) a permis d'adapter des outils au contexte des piscicultures de truite en France (Aubin et al., 2011 ; Papatryphon et al., 2005 ; Roque d'Orbcastel et al., 2008). Ces outils pourront être utilisés dans les études d'impact de piscicultures. Enfin, les rejets de matière organique peuvent aussi être réduits à la source grâce à une amélioration de l'efficacité de la production.

Les rejets médicamenteux, essentiellement des antibiotiques, constituent un problème réel à double titre : (1) l'utilisation régulière et le rejet d'antibiotiques peuvent sélectionner des antibiorésistances (2) la prise de conscience de ce risque conduit à la mise en place de contraintes réglementaires de plus en plus restrictives qui laissent les élevages sans solution efficace de contrôle des infections bactériennes. Les rejets devraient être quantifiés et leur impact évalué, en particulier en termes de sélection d'antibiorésistances (Gordon et al., 2007 ; Pouliquen et al., 2006). La réduction à la source des rejets, dans ce cas, passe par celle de l'utilisation des antibiotiques et autres produits de traitement, grâce à des programmes prophylaxie et de vaccinations efficaces.

²<http://www4.inra.fr/cepia/layout/set/print/Vous-recherchez/des-projets/France/Algoraffinerie>

Enfin, les méthodes de traitement des rejets sont un axe de travail important pour diminuer l'impact des piscicultures sur l'environnement. Ce traitement est complexe car le rejet des piscicultures est très dilué et si des méthodes de filtration existent, elles ne retiennent de fait que les matières en suspension, et non les matières dissoutes. Une nouvelle approche propose l'utilisation de systèmes naturels aménagés (marais construits) pour capter une part importante des nutriments (Roque d'Orbcastel et al., 2008). Au-delà du traitement, la mise en place de systèmes clos où l'eau est recirculée et utilisée plusieurs fois est aussi une option intéressante, car elle permet d'une part un traitement des formes azotées les plus toxiques du rejet (ammoniacque) et d'autre part la production d'un rejet final de volume plus limité, donc plus facile à traiter. Néanmoins, ces systèmes sont souvent plus consommateurs en énergie et leur durabilité environnementale globale doit être évaluée (Aubin et al., 2006). Dans certains cas, malgré la consommation directe d'énergie, ces systèmes recirculés ont un bilan environnemental positif par rapport aux systèmes en circuit ouvert (Roque d'Orbcastel, 2008). D'autres options consistent à élaborer des systèmes intégrés, utilisant la complémentarité d'espèces aquatiques pour une meilleure utilisation des nutriments apportés ou la production en mer au large (offshore) qui peut diminuer les impacts par un effet de dilution et en se plaçant dans des milieux moins convoités et moins sensibles aux émissions de rejets polluants que les bandes côtières et les cours d'eau (Blancheton et al., 2009).

Les interactions entre stocks sauvages et stocks domestiques

Un des aspects particuliers de la pisciculture par rapport aux autres productions animales est la domestication récente des espèces, dont le corollaire est la coexistence de populations sauvages et d'élevage d'une même espèce. Il peut donc exister des interactions écologiques et génétiques entre individus domestiques et sauvages, par le biais d'échappement à partir des élevages ou par déversement volontaire (repeuplement) dans le milieu naturel. En France, la principale espèce de salmonidés élevée est la truite arc-en-ciel, qui n'est pas présente à l'état sauvage et qui n'établit pas – sauf cas exceptionnel - de populations férales ; dans ce cas, la question est peu prégnante. Par contre, la truite commune, qui est l'espèce indigène, fait l'objet d'un repeuplement intensif et ancien. Il a été montré qu'il existait deux grands rameaux évolutifs (atlantique et méditerranéen) avec une introgression du rameau atlantique, traditionnellement utilisé pour le repeuplement, vers le rameau méditerranéen. Cette introgression est importante mais variable selon les secteurs (Barbat-Leterrier et al., 1989 ; Caudron et al., 2009). De nouvelles méthodes de gestion sont maintenant proposées pour réhabiliter les populations natives (Caudron et al., 2009), et des travaux sont en cours pour développer des souches de repeuplement proches des souches locales. Par ailleurs, d'autres méthodes pourraient être proposées, utilisant la triploidie qui est un moyen d'obtenir génétiquement des poissons stériles, éliminant la possibilité d'interactions génétiques avec les populations naturelles (Quillet et al., 1991). Cette approche n'est pas pour l'instant retenue en France mais commence à être appliquée au Royaume-Uni.

Vers une production plus efficiente

Au final, le défi qui se pose à la pisciculture est de pouvoir produire davantage de produits consommables en 1) utilisant moins de ressources (eau, énergie, matières premières halieutiques et agricoles) et 2) en rejetant moins d'éléments polluants (nutriments et xénobiotiques) dans le milieu naturel. Cependant, comme pour les autres productions, la conception de systèmes innovants est un exercice difficile en raison de possibilité de transferts entre types d'impacts (l'amélioration d'un volet technique peut induire la dégradation d'autres impacts). L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet de quantifier les différents impacts d'un système de production depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit a été adaptée aux spécificités piscicoles. Cet outil permet d'évaluer globalement l'impact des systèmes piscicoles et de guider leurs modifications (Aubin et Van der Werf, 2009).

Ainsi, le poids environnemental de certains facteurs dans l'efficacité des systèmes a pu être mis en évidence. C'est en particulier le cas pour l'efficacité alimentaire : le niveau d'utilisation de l'aliment est en effet responsable d'environ 70% des impacts de la pisciculture de poissons carnivores en termes de potentiel de changement climatique et d'eutrophisation (Aubin et al., 2009 ; Aubin et Van der Werf, 2009). Cette efficacité alimentaire n'est pas limitée au poisson, mais s'envisage à l'échelle du système en prenant en compte l'ensemble des facteurs d'élevage et le recyclage des matières. Par exemple, une attention particulière portée au bien-être des poissons et à la qualité des produits permet aussi d'améliorer cette efficacité globale en limitant les quantités de produits déclassés.

Des progrès très importants ont été réalisés par la mise au point d'aliments à haute énergie : ceux-ci permettent aux poissons d'épargner les protéines alimentaires, en favorisant leur utilisation pour la croissance plutôt qu'à des fins énergétiques. Ces aliments ont permis une forte réduction des rejets ammoniacaux des élevages (Médale et al., 1995). Des traitements technologiques (extrusion) ont aussi permis d'améliorer la digestibilité des matières premières végétales (Burel et al., 2000). Chez les poissons, l'amélioration de l'efficacité alimentaire *sensu stricto* par sélection d'animaux plus efficaces est difficile à mettre en œuvre, car aucune technique ne permet pour le moment une mesure précise de la quantité d'aliment ingérée au niveau individuel, et donc de classer les animaux sur leur performance de transformation de l'aliment. De nouvelles approches indirectes, utilisant la perte de poids lors d'un jeûne comme indicateur indirect de l'efficacité alimentaire, donnent des résultats prometteurs à l'échelle expérimentale (Grima et al., 2008) mais demandent encore à être validés.

Au-delà des progrès zootechniques, du contrôle de la reproduction pour limiter les mortalités associées à la maturation, et de la sélection d'animaux plus robustes vis-à-vis des stress d'élevage en général (recherche d'indicateurs de réponse au stress - Prunet et al., 2008, variabilité génétique de la sensibilité à l'environnement - Dupont-Nivet et al., 2007), le contrôle des maladies infectieuses est un point critique pour améliorer l'efficacité de la production. En effet, les organismes pathogènes sont très divers, et le déclenchement des maladies dépend de nombreux facteurs, en particulier les souches de pathogènes présentes et le statut immunologique de l'hôte quand il rencontre le pathogène (âge, immunité innée et acquise). La chimiothérapie, utilisée avec un large succès contre les maladies bactériennes et parasitaires, est soumise à de fortes contraintes (contrôle des rejets, sélection de pathogènes résistants) et son emploi est appelé à une rationalisation et à des limitations croissantes. La mise au point de vaccins efficaces constitue une solution attractive mais reste souvent complexe. C'est la seule méthode disponible à ce jour pour protéger contre les maladies virales. La sélection d'immunogènes pertinents nécessite une connaissance approfondie des modes d'action et des facteurs de virulence des agents pathogènes. Une analyse exhaustive du génome de divers représentants de la bactérie *Flavobacterium psychrophilum*, un pathogène majeur chez les salmonidés, a également été entreprise dans ce but (Duchaud et al., 2007 ; Dumetz et al., 2008). Différentes approches vaccinales (virus atténué, vaccination ADN par injection d'un plasmide codant une protéine virale, virus recombinant - Boudinot et al., 1998 ; Romero et al., 2008) assurent une protection complète des poissons contre différents agents pathogènes comme la Septicémie Hémorragique Virale ou la Nécrose Hématopoiétique Infectieuse des salmonidés, mais le protocole d'administration du vaccin constitue un élément critique pour que la procédure soit économiquement viable, en particulier pour les jeunes animaux de faible valeur individuelle. Les travaux se poursuivent sur les modalités de la réponse vaccinale au cours du cycle de vie des poissons.

L'exploitation des résistances génétiques naturelles est également d'un grand intérêt, car les résistances à des pathologies spécifiques sont souvent assez fortement héréditaires (Quillet et al., 2007a). Des travaux spécifiques pour les comprendre et les exploiter sont en cours sur plusieurs virus (Quillet et al., 2007b) et sur la bactérie *Flavobacterium psychrophilum* (Quillet et al., 2009).

Pour améliorer la qualité des produits et les rendements de découpe, des approches directes par sélection génétique sont explorées avec succès chez plusieurs espèces. Des approches génétiques indirectes permettant l'obtention de populations monosexes et stériles ont aussi connu un grand succès

chez les salmonidés (Breton et al., 1996) car elles permettent de réduire notablement les mortalités et pertes de croissance rencontrées pendant la période de reproduction. Contrairement à ce qui se pratique parfois dans certains pays en développement (par exemple, chez le tilapia), aucune hormone n'est administrée aux poissons destinés à la consommation avec les méthodes de monosexage génétique actuelles, mais des doses minimales sont encore nécessaires pour obtenir les géniteurs. La découverte et l'analyse de facteurs génétiques mineurs du sexe, en cours d'étude, pourraient ouvrir la voie à des méthodes de monosexage sans recours à des hormones (Quillet et al., 2002 ; Vandeputte et al., 2007).

Une approche globale de la durabilité de la pisciculture

La recherche piscicole à l'INRA, avec ses nombreux partenaires, y compris professionnels en France et à l'étranger, a apporté et continue à apporter une contribution importante à l'efficacité environnementale de la production piscicole par la maîtrise de la biologie des espèces et des facteurs de production. Ces travaux scientifiques se complètent maintenant par des approches plus concertées avec les acteurs des filières et de la société afin d'aborder la durabilité au travers de ses trois piliers (social, économique et environnemental) et de leur perception (Rey-Valette et al., 2008). La compétitivité est encore un facteur clé de la durabilité de l'activité en France, et contribuer à l'efficacité environnementale de la pisciculture, c'est aussi préparer la compétitivité de demain, dans un monde où l'énergie sera chère, et où la compétition sur les ressources, l'eau, l'espace et les matières premières sera plus forte. Les ressorts de l'acceptabilité de l'activité sont aussi à approfondir, tant il est vrai que l'absence de création de nouveaux sites de production piscicole en Europe est fortement liée à une compétition entre activités, et à une mauvaise image de l'activité piscicole (comme des autres activités de production). Cependant, là aussi, travailler sur la durabilité environnementale permet de préparer l'avenir en fournissant des arguments pour améliorer l'acceptabilité de la production, en attestant des progrès importants réalisés et en cours sur sa compatibilité avec un environnement préservé. Contribuer au développement durable des filières piscicoles en définissant les bases d'une pisciculture à haute valeur environnementale pour des produits de qualité (nutritionnelle et organoleptique) est pour l'INRA un objectif qui va se poursuivre dans les prochaines années, en multipliant les approches disciplinaires et inter-disciplinaires.

Références bibliographiques

- Agreste, 2008. Résultats nationaux sur les matières premières de l'alimentation animale 2006. Agreste chiffres et données agroalimentaires 155.
- Aubin J., Papatryphon E., Van der Werf H.M.G., Chatzifotis S., 2009. Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish production systems using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 17, 354-361.
- Aubin J., Papatryphon E., Van der Werf H.M.G., Petit J., Morvan Y.M., 2006. Characterisation of the environmental impact of a turbot (*Scophthalmus maximus*) re-circulating production system using Life Cycle Assessment. *Aquaculture* 261, 1259-1268.
- Aubin J., Tocqueville A., Kaushik S., 2011. Characterisation of waste output from flow-through trout farms in France: comparison of nutrient mass-balance modelling and hydrological methods. *Aquat. Living Resour.* 24, sous presse.
- Aubin J., Van der Werf H.M.G., 2009. Pisciculture et environnement: apports de l'analyse du cycle de vie. *Cahiers Agricultures* 18, 220-226.
- Barbat-Leterrier A., Guyomard R., Krieg F., 1989. Introgression between introduced domesticated strains and mediterranean native populations of brown trout (*Salmo trutta* L.). *Aquat. Living Resour.* 2, 215-223.

- Blancheton J.P., Bosc P., Hussenot J., Roque d'Orbcastel E., Romain D., 2009. Tendances pour la pisciculture européenne de demain: cages au large, systèmes en eau recirculée et systèmes intégrés. *Cahiers Agricultures* 18, 227-234.
- Boudinot P., Blanco M., De Kinkelin P., Benmansour A., 1998. Combined DNA immunization with the glycoprotein gene of viral hemorrhagic septicemia virus and infectious hematopoietic necrosis virus induces double-specific protective immunity and nonspecific response in rainbow trout. *Virology* 249, 297-306.
- Breton B., Quillet E., Jalabert B., 1996. Contrôle de la reproduction et du sexe chez les poissons d'élevage. *INRA Prod. Anim. hors série*, 17-26.
- Burel C., Boujard T., Tulli F., Kaushik S.J., 2000. Digestibility of extruded peas, extruded lupin, and rapeseed meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture* 188, 285-298.
- Caudron A., Champigneulle A., Guyomard R., 2009. Evidence of two contrasting brown trout *Salmo trutta* populations spatially separated in the River Borne (France) and shift in management towards conservation of the native lineage. *J. Fish Biol.* 74, 1070-1085.
- Chevassus-au-Louis B., Lazard J., 2009. Situation et perspectives de la pisciculture dans le monde: consommation et production. *Cahiers Agricultures* 18, 82-90.
- Cho C.Y., Kaushik S.J., 1990. Nutritional energetics in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Reviews in Nutrition and Dietetics* 61, 132-172.
- Corraze G., Kaushik S., 2009. Alimentation lipidique et remplacement des huiles de poisson par des huiles végétales en pisciculture. *Cahiers Agricultures* 18, 112-118.
- Duchaud E., Boussaha M., Loux V., Bernardet J.F., Michel C., Kerouault B., Mondot S., Nicolas P., Bossy R., Caron C., Bessieres P., Gibrat J.F., Claverol S., Dumetz F., Le Henaff M., Benmansour A., 2007. Complete genome sequence of the fish pathogen *Flavobacterium psychrophilum*. *Nature Biotech.* 25, 763-769.
- Dumetz F., Duchaud E., Claverol S., Orieux N., Papillon S., Lapaillerie D., Le Henaff M., 2008. Analysis of the *Flavobacterium psychrophilum* outer-membrane subproteome and identification of new antigenic targets for vaccine by immunomics. *Microbiology-Sgm* 154, 1793-1801.
- Dupont-Nivet M., Robert-Granie C., Tiquet F., Le Guillou S., Quillet E., 2007. What clones tell us about genetic determinism of phenotypic plasticity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 272, S253.
- Dupont-Nivet M., Médale F., Leonard J., Le Guillou S., Tiquet F., Quillet E., Geurden I., 2009. Evidence of genotype-diet interactions in the response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) clones to a diet with or without fishmeal at early growth. *Aquaculture* 295, 15-21.
- FAO, 2009. The state of world fisheries and aquaculture 2008. 1-196.
- Gordon L., Giraud E., Ganière J.P., Armand F., Bouju-Albert A., De La Cotte N., Mangion C., Le Bris H., 2007. Antimicrobial resistance survey in a river receiving effluents from freshwater fish farms. *Journal of Applied Microbiology* 102, 1167-1176.
- Grima L., Quillet E., Boujard T., Robert-Granié C., Chatain B., Mambrini M., 2008. Genetic variability in residual feed intake in rainbow trout clones and testing of indirect selection criteria. *Genet. Sel. Evol.* 40, 607-624.
- Haury J., Daniel H., Adam B., 2004. Impacts des piscicultures sur les peuplements macrophytiques en rivières à salmonidés : comparaisons éco-régionales et évolutions temporelles sur la période 1981-2002. *Les dossiers de l'environnement de l'INRA* 26, 88-101.
- Le Boucher R., Vandeputte M., Dupont-Nivet M., Quillet E., Mazurais D., Robin J., Vergnet A., Médale F., Kaushik S., Chatain B., 2010. A first insight into genotype x diet interactions in European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L. 1756) in the context of plant-based diet use. *Aquacult. Res* 42, 583-592.
- Médale F., Brauge C., Vallée F., Kaushik S.J., 1995. Effects of dietary protein/energy ratio, ration size, dietary energy source and water temperature on nitrogen excretion in rainbow trout. *Water Science and Technology* 31, 185-194.

- Médale F., Kaushik S., 2009. Les sources protéiques dans les aliments pour les poissons d'élevage. Cahiers Agricultures 18, 103-111.
- Naylor R.L., Goldberg R.J., Primavera J.H., Kautsky N., Beveridge M.C.M., Clay J., Folke C., Lubchenco J., Mooney H., Troell M., 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. Nature 405, 1017-1024.
- Naylor R.L., Hardy R.W., Bureau D.P., Chiu A., Elliott M., Farrell A.P., Forster I., Gatlin D.M., Goldberg R.J., Hua K., Nichols P.D., 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. PNAS 106, 15103-15110.
- Ombredane, D., 2007. Les poissons bioindicateurs de la qualité des milieux - Indice poisson en Rivière (IPR). Séminaire International "Valorisation des Biohydrosystèmes", 27 juin 2007; Mahajanga, Madagascar.
- Papatryphon E., Petit J., Van Der Werf H.M.G., Sadasivam K.J., Claver K., 2005. Nutrient-Balance Modeling as a Tool for Environmental Management in Aquaculture: The Case of Trout Farming in France. Environmental Management 35, 161-174.
- Pouliquen H., Le Bris H., Thorin C., Larhantec-Verdier M., Morvan M.L., 2006. Quantitative HPLC determination and preliminary assessment of dissolved, suspended and settled oxolinic acid from a turbot farm. Acta Chromatographica 17, 173-187.
- Prunet P., Cairns M.T., Winberg S., Pottinger T.G., 2008. Functional Genomics of Stress Responses in Fish. Reviews in Fisheries Science 16, 157-166.
- Quillet E., Aubard G., Quéau I., 2002. Mutation in a Sex-Determining Gene in Rainbow Trout: Detection and Genetic Analysis. Journal of Heredity 93, 91-99.
- Quillet E., Boudry P., Lapègue S., 2007a. Variabilité génétique de la réponse aux organismes pathogènes: un outil pour améliorer la santé des mollusques et des poissons d'élevage. INRA Prod. Anim. 20, 239-252.
- Quillet E., Dechamp N., Hervet C., Michel C., 2009. Resistance to *Flavobacterium psychrophilum* in homozygous clones of rainbow trout: effects of host genotype and bacterium isolates. 2nd conference on members of the genus *Flavobacterium*, 21-23 septembre 2009; Paris.
- Quillet E., Foisil L., Chevassus B., Chourrout D., Liu F.G., 1991. Production of all triploid and all-female brown trout for aquaculture. Aquat. Living Resour. 4, 27-32.
- Quillet E., Dorson M., Le Guillou S., Benmansour A., Boudinot P., 2007b. Wide range of susceptibility to rhabdoviruses in homozygous clones of rainbow trout. Fish & Shellfish Immunology 22, 510-519.
- Rey-Valette H., Clément O., Aubin J., Mathé S., Chia E., Legendre M., Caruso D., Mikolasek O., Blancheton J.P., Slembrouck J., René F., Levang P., Morissens P., Lazard J., 2008. Guide de co-construction d'indicateurs de développement durable en aquaculture. CIRAD, Ifremer, INRA, IRD, UM1, Montpellier, France, 144 pp.
- Romero A., Figueras A., Thoulouze M.I., Bremont M., Novoa B., 2008. Recombinant infectious hematopoietic necrosis viruses induce protection for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. Dis. Aquat. Org. 80, 123-135.
- Roque d'Orbcastel E., 2008. Optimisation de deux systèmes de production piscicole: biotransformation des nutriments et gestion des rejets. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- 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.
- Roussel J.M., inventors. Dépôt d'une marque désignant une méthode simple et rapide pour estimer l'abondance des juvéniles de truite en cours d'eau. Licence VIGITRUIE (R), INPI. 2009 2009.
- Tacon A.G.J., Metian M., 2008. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. Aquaculture 285, 146-158.
- Vandeputte M., Dupont-Nivet M., Chavanne H., Chatain B., 2007. A Polygenic Hypothesis for Sex Determination in the European Sea Bass *Dicentrarchus labrax*. Genetics 176, 1049-1057.

Worm B., Barbier E.B., Beaumont N., Duffy J.E., Folke C., Halpern B.S., Jackson J.B.C., Lotze H.K., Micheli F., Palumbi S.R., Sala E., Selkoe K.A., Stachowicz J.J., Watson R., 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 314, 787-790.