

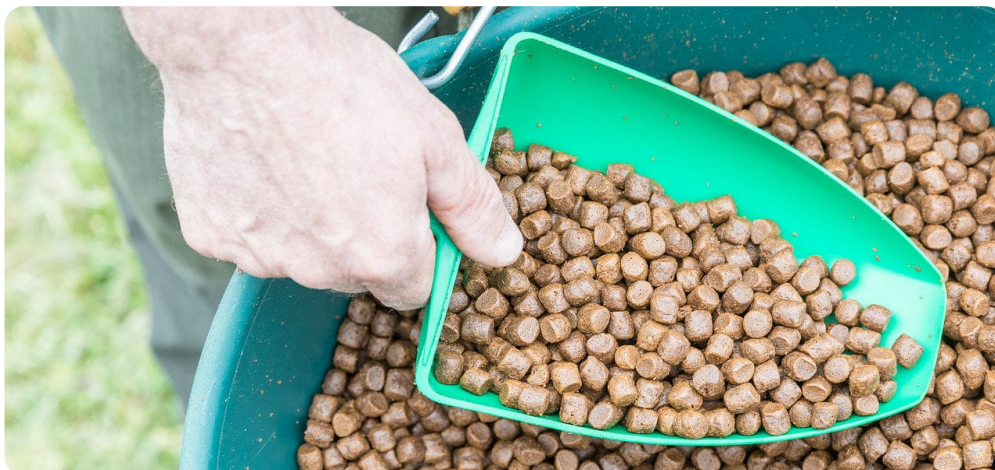
AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

Année universitaire : 2019-2020 Spécialité : Agronomie Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences halieutiques et aquacole, option aquaculture	Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur AgroSup Dijon
--	---

L'aquaculture en circuit-fermé : maîtrise et optimisation via la nutrition

Par : Nicolas TANRATTANA



Soutenu à Rennes le 18 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : Hervé LE BRIS

Maître de stage : Cyndel MASSET

Enseignant référent : Grégory RAYMOND

Autres membres du jury :

Joël AUBIN, ingénieur de recherche, chargé de
l'analyse environnementale des systèmes de
production animaux et aquaculture

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon maître de stage Cyndel Masset, qui m'a accordé sa confiance pour mener à bien ce projet et m'avoir ouvert les portes de la R&D dans le monde de l'entreprise. Je la remercie pour son accompagnement tout au long du stage, malgré les conditions exceptionnelles de l'année 2020.

Je souhaite également remercier toute l'équipe de Le Gouessant Aquaculture, en particulier Yann Marchand et Louis Lesur pour leurs précieux conseils et le partage de leurs connaissances. Je remercie François Ferrand qui m'a fait confiance pour la réalisation des essais auprès des clients de l'entreprise. Je remercie Amélie Gonçalves, Pascal Loric, Julien Ropert, Francisco Frindt, Nadège Touze, Servane Zerari et Stéphanie Tépho Lacroix qui m'ont accompagné pendant mon stage.

Je remercie aussi les « gars de l'usine », Frédéric Vasse, Julien Lavanant, David Just, Olivier Davy, Noan Raoult et Stéphane Robin pour leur précieuse aide, leur bonne humeur et la confiance qu'ils m'ont accordé dans la réalisation des essais.

Un grand merci à Olivier Magat pour m'avoir autorisé à accéder librement au laboratoire pour les différentes manipulations. Je remercie également Sandra Hamon, Dominique Gueguen, Julie Aubert, Sandrine Lagadec et Laurent Le Picard pour m'avoir assisté dans certaines manipulations.

Je remercie Éric Boinet du service qualité, Jean-Luc Lemordant du service achats et Sophie Tehard du service formulation pour le temps qu'ils m'ont accordé au cours de différents entretiens. Je remercie aussi Fanny Ledieu et Pauline Rouillard, du service Newborn Animal Care, ainsi que Matthieu Baudry et Antoine Guignard, les apprentis, pour les bons moments passés pendant et en dehors des horaires de travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Hervé Le Bris pour son appui et sa disponibilité pour répondre à mes différentes interrogations au cours du stage.

Je remercie ma famille, mon père, ma mère, mon frère et mes sœurs qui ne cessent de m'apporter leur soutien au quotidien.

Je remercie mes amis avec qui j'ai pu passer d'agréables moments à distance pendant la longue période de confinement que nous avons connu cette année, puis à 1 mètre de distance après l'annonce du déconfinement.

Je remercie Apolline qui m'a offert en plus de son soutien inconditionnel, son toit pendant le confinement. Je la remercie également d'avoir relu et commenté ce mémoire.

Enfin, je remercie à nouveau l'équipe Le Gouessant Aquaculture qui continue de me faire confiance en me proposant un CDD qui débutera à partir de septembre 2020.

Table des matières

1.	INTRODUCTION	1
1.1.	CONTEXTE DE L'AQUACULTURE CONTEMPORAINE	1
1.2.	PRESENTATION DE L'AQUACULTURE EN CIRCUIT-FERME	3
1.2.1.	Principe de l'aquaculture en circuit-fermé	3
1.2.2.	La qualité de l'eau, un enjeu majeur pour l'aquaculture en circuit fermé	4
1.3.	PRESENTATION DE LA PRODUCTION DES ALIMENTS AQUACOLES	8
1.3.1.	Le processus de fabrication par cuisson-extrusion	8
1.3.2.	Les objectifs des fabricants d'aliments aquacoles pour répondre aux enjeux de l'aquaculture en circuit fermé	11

Liste des figures

Figure 1.	Production halieutique et aquacole mondiale, 1980 – 2030	1
Figure 2.	Production mondiale de poissons nourris avec des aliments et estimation de la quantité d'aliment utilisée : 2000 – 2025	2
Figure 3.	Projets d'aquaculture en circuit-fermé pour la production de saumon à travers le monde	2
Figure 4.	Description d'un système en circuit-fermé	4
Figure 5.	Distribution des tailles de particules pour les matières en suspension solides produites en aquaculture ..	5
Figure 6.	Gammes de concentration et valeurs moyennes en N, P et carbone total (TC) dans les aliments pour salmonidés, leur fèces et les boues	5
Figure 7.	Systèmes de filtration mécanique courants avec leur gamme de tailles de particules traitées	7
Figure 8.	Exemple de fabrication d'aliments extrudés	9
Figure 9.	Schéma d'une extrudeuse monovis	10

Sigles, acronymes et abréviations

AMTI : Aquaculture multitrophique intégrée

DDM : Date de durabilité minimale

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

HPHT : Haute pression et haute température

MES : Matières en suspension

MG : Matières grasses

m/v : Masse par unité de volume

N : Newton, unité de force

RAS : Recirculating Aquaculture Systems, systèmes en circuit-fermé

Glossaire

Aliment formulé : combinaison de deux ingrédients ou plus, avec ou sans additifs, répartis, mélangés et transformés, conformément à un ensemble de spécifications.

Extrusion : procédé de fabrication mécanique de haute pression et haute température par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière.

Filière : pièce placée à la sortie de l'extrudeuse comportant un ou plusieurs orifices par lesquels la matière s'écoule sous l'action de la pression.

Fine : toute matière capable de passer au travers d'un tamis dont les mailles sont d'une taille inférieure au diamètre minimum des granulés.

Lixiviation : extraction de substances solubles par un solvant.

1. Introduction

1.1. Contexte de l'aquaculture contemporaine

L'aquaculture est le secteur de la production animale avec la croissance la plus forte. Selon les projections de la FAO (2020), la production aquacole devrait passer de 77 millions de tonnes en 2018 à 109 millions de tonnes en 2030, soit une augmentation de 32% (*figure 1*). En 2018, l'aquaculture représentait déjà 46% de la production mondiale de poisson¹, contre 25,7% en 2000, et 52% du volume était destiné à la consommation humaine, 2015 marquant l'année durant laquelle l'aquaculture dépasse la pêche en matière de production destinée à la consommation humaine. En termes de valeur, Le marché est dominé par la Chine qui produisait 35% de la production mondiale en 2018, suivie de l'Asie (Chine exclue) (34%), les Amériques (14%), l'Europe (10%), l'Afrique (7%) et l'Océanie (1%) (FAO, 2020).

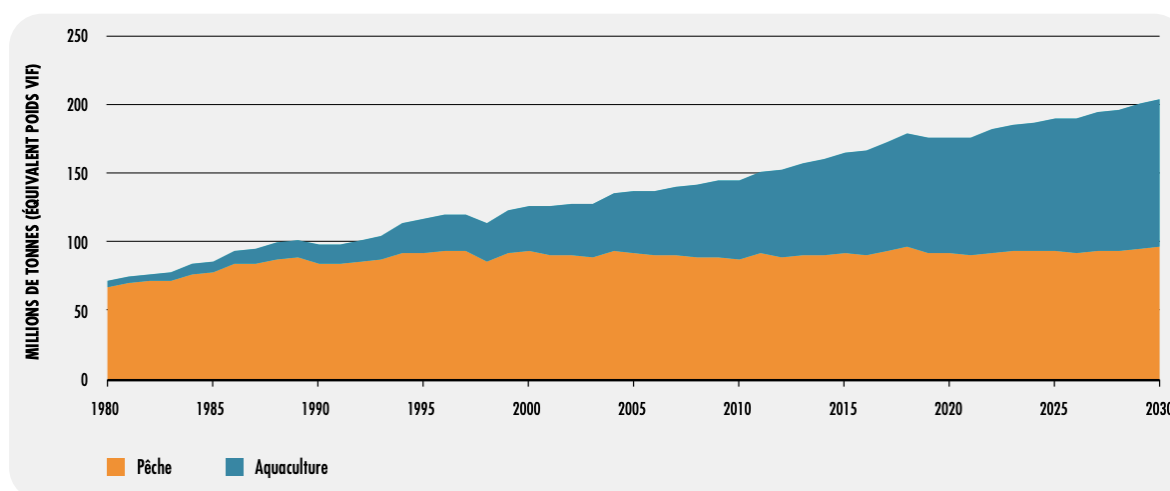


Figure 1. Production halieutique et aquacole mondiale, 1980 – 2030 (FAO, 2020)

Traditionnellement extensifs, les élevages aquacoles se tournent vers un mode de production plus intensif depuis les années 1950 (Bregnballe et al., 2015). L'aquaculture avec apport de nourriture qui représentait 57 millions de tonnes en 2018, s'est développée plus rapidement que celle pratiquée sans (FAO, 2020). À partir des données FAO sur la production mondiale d'espèces aquacoles majeures, poissons et crustacés, nourries aux aliments formulés, Tacon (2020) a estimé la quantité d'aliments consommés à l'aide des indices de conversion (IC) de chaque espèce élevée (*figure 2*). Entre 2000 et 2017, la production d'espèces aquacoles nourries connaissait un taux de croissance de 7% et celui des aliments formulés de 8%. Les prévisions pour la période 2017-2025 revoient les croissances à la baisse, mais celles-ci restent toujours positives avec un taux supérieur à 4%. Ce constat met en lumière la dépendance de la production aquacole par rapport à la production d'aliments.

¹ Le terme « poisson » utilisé englobe les poissons, les crustacés, les mollusques et les autres animaux aquatiques, à l'exclusion des mammifères et des reptiles aquatiques, des algues marines et des autres plantes aquatiques.

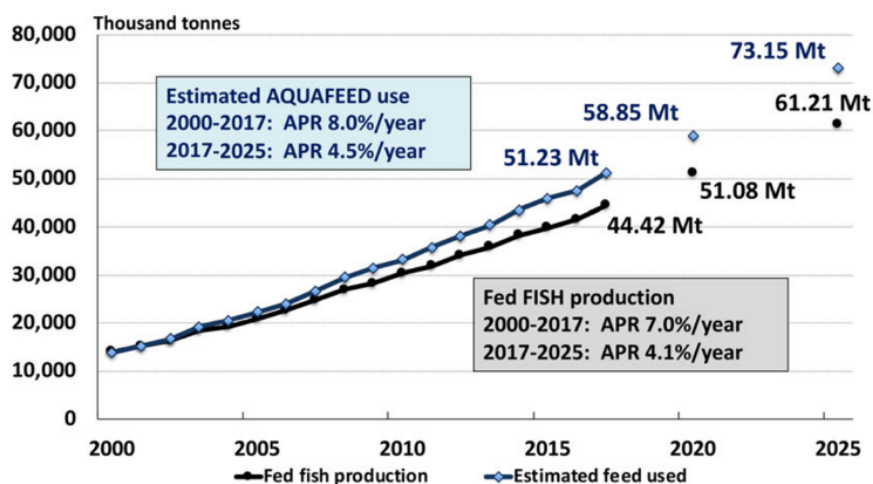


Figure 2. Production mondiale de poissons nourris avec des aliments et estimation de la quantité d'aliment utilisée : 2000 – 2025 (Tacon, 2020), APR : Taux de croissance annuel

De plus, une tendance vers l'aquaculture en circuit-fermé s'observe récemment (de Jong, 2019 ; Martins et al., 2010), avec une forte augmentation des projets de fermes de ce type et une majorité ciblant la production de saumon, selon Beyhan de Jong, analyste chez RaboResearch Food & Agribusiness du groupe financier multinational Rabobank (de Jong, 2019). Bien que la production actuelle de saumon en RAS ne s'élève qu'à 2500 tonnes par an, la production estimée pour 2030 des 50 projets enregistrés à ce jour pourrait être équivalente à 25% de la production mondiale actuelle de saumon, soit 700 000 tonnes. Néanmoins, l'auteure du rapport estime que ces quantités ne seront probablement pas atteintes en 2030, mais elle pense que ces systèmes auront le potentiel de produire 250 000 tonnes à cette date.



Figure 3. Projets d'aquaculture en circuit-fermé et production estimée (en milliers de tonnes) pour la production de saumon à travers le monde (de Jong, 2019)

Les projets proviennent majoritairement de la Norvège, principal producteur mondial de saumon (FAO, 2020), suivi des États-Unis et de la Chine (de Jong, 2019). Néanmoins, les projections en termes de quantité placent les États-Unis en tête, suivie de la Chine et de la Norvège (figure 3). La distribution à travers le monde des différents projets s'expliquent

notamment par la forte demande en produits de la mer dans ces pays, avec une consommation apparente de poissons par habitant sur la période 2015-2017 allant de 30-50 kg/an en Norvège et en Chine, bien supérieure à la moyenne mondiale qui s'élevait à 20,3 kg en 2017 (FAO, 2020). La réussite des projets de circuits-fermés pourrait redessiner l'organisation mondiale actuelle du marché du saumon, en relocalisant les lieux de production et en bouleversant les flux commerciaux, les chaînes d'approvisionnement et la commercialisation du saumon. Les circuits-fermés pourraient éventuellement devenir la norme dans les décennies à venir selon l'analyste, si les projets planifiés aboutissent avec succès en produisant près de 500 000 tonnes (de Jong, 2019).

1.2. Présentation de l'aquaculture en circuit-fermé

1.2.1. Principe de l'aquaculture en circuit-fermé

L'aquaculture en circuit-fermé (RAS) est une méthode d'élevage d'organismes aquatiques qui consiste à limiter l'apport d'eau dans le système, en la réutilisant partiellement après traitement (Bregnballe et al., 2015 ; Martins et al., 2010). La technologie repose sur l'utilisation de filtres mécaniques et biologiques qui sont en charge du traitement de l'eau, en retirant les déchets excrétés par les animaux, et d'un apport constant d'oxygène pour les maintenir en vie. Elle est en principe adaptée à tous les types d'espèces comme les poissons, les crevettes et les mollusques (Bregnballe et al., 2015). Les systèmes peuvent être de toute taille, allant des grandes fermes produisant des milliers de tonnes de poisson par an aux petites installations de jardin destinées à maintenir des poissons d'ornements. De plus, les circuits-fermés continuent leur diversification avec l'émergence des systèmes aquaponiques, dans lesquelles la production de poisson est couplée à une production végétale, et les systèmes d'aquaculture multitrophique intégrée (AMTI) (Chopin, 2013).

Le développement rapide des RAS est lié à de nombreux facteurs : intensification de la production, diminution de l'espace disponible, réglementation stricte sur l'utilisation de l'eau, besoin d'un contrôle total des paramètres de production, nécessité de se protéger vis-à-vis des aléas de l'environnement (pollution, pathogènes, aléas climatiques) (Bregnballe et al., 2015 ; Martins et al., 2010). En effet, les RAS offrent aux producteurs la possibilité d'avoir un contrôle quasi-total des paramètres de l'eau, alors que les systèmes ouverts sont grandement dépendants des conditions du milieu extérieur. Des paramètres tels que le taux d'oxygène dissous, les matières en suspension (MES) et la température de l'eau peuvent être modulés grâce à l'utilisation d'équipements comme des oxygénateurs, des filtres et des chauffages respectivement. De plus, du fait de leur utilisation réduite en eau, les RAS peuvent prélever de l'eau de forage qui, bien que souvent riche en ions ferreux et en gaz carbonique dissous, permet de réduire considérablement les risques d'entrée de pathogènes extérieurs dans le système (Bregnballe et al., 2015).

D'un point de vue environnemental, les RAS sont considérés comme une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport aux systèmes ouverts en rivière ou en cage, en raison d'une utilisation efficace de l'eau en termes de consommation, de traitement des effluents et de recyclage des nutriments (Martins et al., 2010). Toutefois, ces systèmes sont gourmands en énergie, nécessitent des investissements importants, et ils ne contribuent que faiblement à la production mondiale, bien que les projections prévoient une production des RAS en hausse (de Jong, 2019).

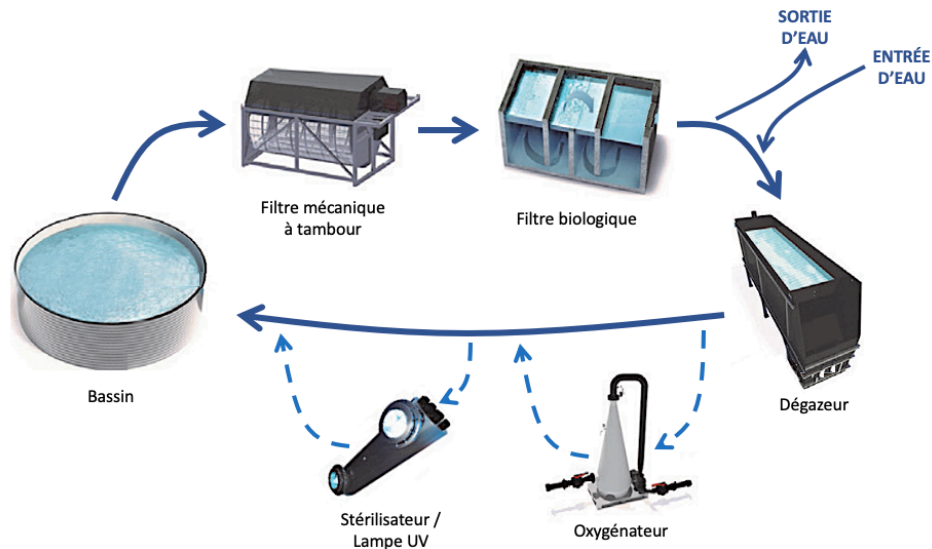


Figure 4. Description d'un système en circuit-fermé (adapté de Bregnballe et al., 2015)
 En trait plein, les équipements de base et en tirets, les équipements additionnels

Un système en circuit-fermé est décrit sur la *figure 4*. Un système de base est composé d'un bassin où sont élevés les poissons, un filtre à tambour mécanique qui permet de récupérer les MES (fèces, aliments non consommés) et un filtre biologique pour traiter l'ammoniaque (NH_3) sécrété par les poissons à l'aide de bactéries nitrifiantes. Un dégazeur est placé après l'arrivée d'eau du forage pour extirper le gaz carbonique (CO_2) et le diazote (N_2) naturellement présents dans l'eau. Selon les besoins, le système peut être complété par l'ajout d'un oxygénateur pour enrichir l'eau en oxygène et d'un stérilisateur pour prévenir tout risque de développement des pathogènes (Bregnballe et al., 2015).

1.2.2. La qualité de l'eau, un enjeu majeur pour l'aquaculture en circuit fermé

La qualité de l'eau est un élément-clé pour le bon fonctionnement des piscicultures, et cela est d'autant plus vrai pour les RAS. Un problème majeur, intrinsèque au fonctionnement des RAS, concerne l'accumulation de matières en suspension solides et dissoutes dans l'eau. Or, une eau de bonne qualité permet de respecter le bien-être des animaux et les maintenir en bonne santé, afin qu'ils puissent exprimer leur potentiel de croissance.

a) Les sources de pollution

i. Les matières en suspension solides

Les matières en suspension solides en aquaculture peuvent provenir de différentes sources, externes lorsqu'elles sont amenées par la source d'eau et internes lorsqu'elles sont produites par les poissons et les intrants utilisés dans les bassins. Du fait de la particularité de l'approvisionnement en eau des RAS, souvent issue de forage avec des eaux peu chargées en MES, seules les MES produites en interne seront abordées dans cette partie. Les principales sources sont les fèces des poissons et les aliments non consommés (Reid et al., 2009 ; Schumann et Brinker, 2020). L'unité de mesure des MES solides est une quantité exprimée en concentration de matière sèche par volume (mg.L^{-1}). Cependant, il s'agit d'une mesure quantitative brute qui ne donne pas d'information sur d'importants paramètres physiques (distribution des tailles, forme), mécanique (stabilité) et chimique (composition en nutriments) (Schumann et Brinker, 2020).

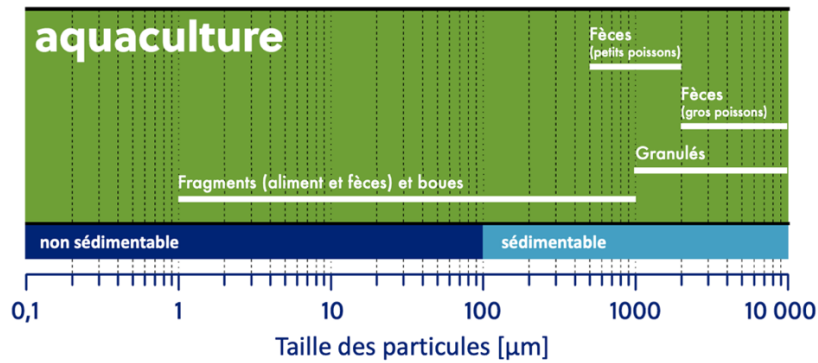


Figure 5. Distribution des tailles de particules pour les matières en suspension solides produites en aquaculture (adapté de Schumann et Brinker, 2020)

Les fèces

Les fèces des poissons constituent la source principale des MES solides dans un circuit fermé (Schumann et Brinker, 2020). La production des fèces est directement corrélée à la quantité d'aliments ingérés et à la digestibilité des différents ingrédients qui les composent (Cho et Bureau, 1997). La composition des fèces est proche de celle des aliments, et les principaux éléments qui constituent la matière sèche sont les protéines, les lipides, les glucides, les fibres et les minéraux. Les fractions non digestibles de l'aliment sont constituées principalement des fibres et des amidons provenant d'ingrédients végétaux car les poissons carnivores comme les salmonidés ne possèdent pas de cellulase, ni d'amylase pour les digérer (Cho et Bureau, 1997). Les fèces sont riches en nutriments, en particulier en azote (N), en phosphore (P) et en carbone (C) (figure 6), dont les quantités excrétées dépendent à la fois de la qualité et de la quantité des ingrédients ingérés. Le pourcentage du P ingéré qui est excrété par les fèces est estimé à 30-50% et il est de 6-8% pour le N (Dalsgaard et Pedersen, 2011). La lixiviation de ces nutriments est quasi-immédiate au contact de l'eau (Chen et al., 2003) et elle peut se prolonger sur plusieurs jours (Kibria et al., 1997 ; Stewart et al., 2006). Les fèces deviennent particulièrement problématiques pour les RAS lorsqu'elles se désagrègent, que les nutriments qu'elles contiennent se solubilisent et qu'il est alors impossible de les récupérer *via* les filtres mécaniques. Il est impératif de les collecter le plus vite possible depuis leur excrétion par les poissons pour limiter la dégradation de la qualité d'eau.

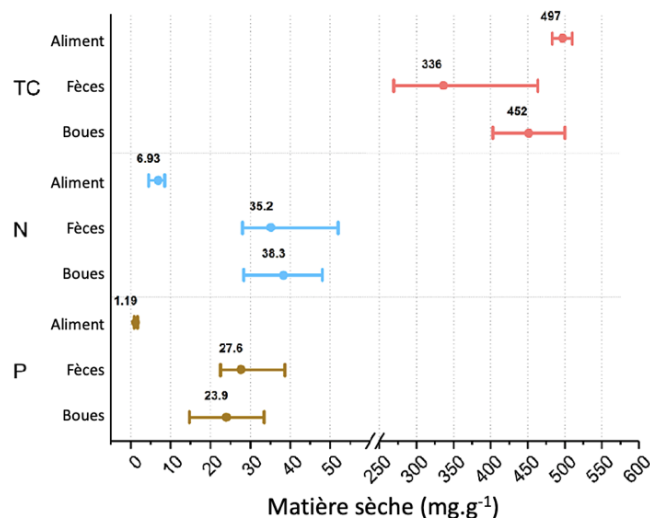


Figure 6. Gamme de concentration et valeurs moyennes (•) en N, P et carbone total (TC) dans les aliments pour salmonidés, leur fèces et les boues (adapté de Schumann et Brinker, 2020)

Les aliments non consommés

Les aliments non consommés des poissons représentent aussi une des sources de pollution principale de l'eau (Schumann et Brinker, 2020). Ils peuvent ne pas être consommés par les poissons pour diverses raisons. Premièrement, ils peuvent être dégradés avant d'avoir été distribués aux poissons, notamment lors du transport de l'usine à la pisciculture, lors du stockage et dans les systèmes de distribution pneumatique (Aas et al., 2011). Ces aliments cassés produisent des fines, des poussières de granulés, qui s'accumulent et polluent l'eau des bassins car les poissons ne peuvent pas les capter. De plus, ils sont plus susceptibles de libérer dans l'eau l'huile qu'ils contiennent, notamment à cause des brèches créées par les cassures permettant la sortie de l'huile (Sørensen, 2012). À l'instar des fèces, il est important de collecter les aliments non consommés le plus vite possible pour limiter les risques de lixiviation des nutriments par l'eau et le phénomène de relargage des huiles. Pour les RAS, il est recommandé de distribuer l'aliment en petites quantités régulièrement tout au long de la journée, afin de diminuer les risques de suralimentation et de préserver un environnement stable (Bregnballe et al., 2015). Les aliments non consommés sont à la fois une perte d'argent pour les pisciculteurs, une perte de nutriments disponibles pour les poissons et une source de pollution de l'eau, qui a son tour est une source de stress pour les poissons.

ii. Les polluants dissous

Les polluants dissous sont constitués des déchets métaboliques des poissons et de la lixiviation des nutriments issus des fèces et des aliments (Chen et al., 2003 ; Dalsgaard et Pedersen, 2011 ; Schumann et Brinker, 2020 ; Stewart et al., 2006). Les principaux polluants dissous en aquaculture sont l'ammoniaque (NH_3), les nitrites (NO_2^-) et le phosphate (PO_4^{3-}). Le NH_3 et les NO_2^- sont des composés toxiques pour les poissons (Esmail et al., 2015). Le NH_3 est un des produits finaux du métabolisme des protéines, il est excrété notamment par les branchies des poissons (Bishop, 1976). Le nitrite provient principalement du métabolisme d'oxydation de l'azote ammoniacal ($\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$) et s'accumule en raison de déséquilibres dans l'activité des bactéries nitrifiantes (Wang et al., 2004). Contrairement au NH_3 et au NO_2^- , le phosphate n'est pas toxique pour les poissons. En revanche, c'est un nutriment qui sert au développement des algues, responsable des phénomènes d'eutrophisation en aval des piscicultures (Herath et Satoh, 2015). Il s'accumule dans les RAS du fait qu'une grande partie du phosphore contenu dans l'aliment est inutilisé par les poissons (Rodehutsord et Pfeffer, 1995) et en raison du manque de méthodes appropriées pour l'élimination du phosphore dans ces systèmes (Barak et van Rijn, 2000).

b) Les systèmes de filtration pour récupérer les polluants

i. Les filtres mécaniques

Les filtres mécaniques permettent de récupérer les particules solides afin de préserver la qualité de l'eau (Cripps et Bergheim, 2000). L'objectif de ces filtres est de diminuer la charge en MES de l'eau avant le passage dans le filtre biologique. Il existe différents types de filtration mécanique comme les filtres à sable, les filtres rotatifs à tambour, les filtres à membrane et également les bassins de sédimentation (Cripps et Bergheim, 2000). Cependant, une large majorité des RAS ont adopté les filtres mécaniques de type microfiltration *via* un filtre à tambour, avec une toile filtrante de 30 à 100 micromètres (Bregnballe et al., 2015). La *figure 7* présente les différentes gammes de taille des particules traitées pour les systèmes de filtration mécanique couramment utilisés (Cripps et Bergheim, 2000).

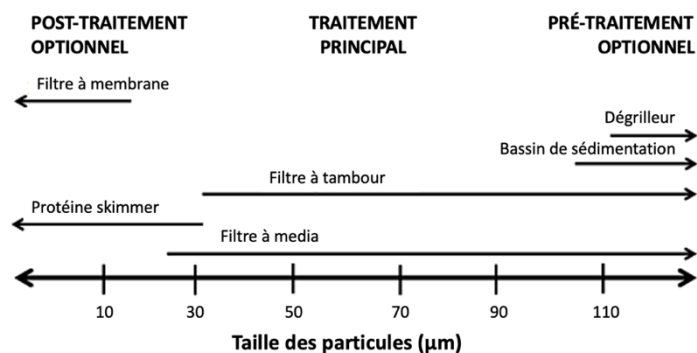


Figure 7. Systèmes de filtration mécanique courants avec leur gamme de tailles de particules traitées (adapté de Cripps et Bergheim, 2000)

ii. Les filtres biologiques

Les filtres biologiques ou biofiltres permettent d'épurer l'eau d'une partie des polluants dissous. Ils hébergent les bactéries nitrifiantes autotrophes qui permettent de traiter les nutriments organiques dissous comme l'ammoniaque (NH_3) et le nitrite (NO_2^-) (Crab et al., 2007). Ces composés extrêmement toxiques pour les poissons sont traités par les bactéries nitrifiantes. Dans un premier temps, les *Nitrosomonas* convertissent le NH_3 en NO_2^- , puis les *Nitrobacter* convertissent le NO_2^- en NO_3^- presque inoffensif pour les poissons (Chen et al., 2006).

Il existe différents types de biofiltre comme par exemple le biofiltre sur lit fixe ou le biofiltre sur lit agité (Crab et al., 2007). Ce dernier est le plus souvent utilisé car il est moins sujet à l'encrassement que le premier. Il existe aussi des biofiltres par ruissellement, mais aujourd'hui la quasi-totalité des biofiltres sont immergés. Les biofiltres sur lit agité sont constitués de media, des supports en plastique développant une grande surface, sur lesquels des biofilms de bactéries nitrifiantes peuvent se fixer, qui sont mis en mouvement *via* des aérateurs (Leclercq, 2020). L'utilisation de ces derniers possède un double-avantage : d'une part, les media mis en mouvement s'entrechoquent et s'auto-nettoient limitant les risques d'encrassement et d'autre part, l'air injecté permet d'oxygéner l'eau, ce qui contribue à faciliter la nitrification réalisée par les bactéries nitrifiantes aérobies. Aussi, la nitrification produit un proton (H^+) qui fait diminuer le pH de l'eau. Il est donc nécessaire d'ajouter une base comme du bicarbonate de sodium pour stabiliser le pH (Bregnballe et al., 2015).

c) Les conséquences d'une eau de mauvaise qualité

i. Sur les poissons

L'accumulation de particules dans l'eau du bassin est considérée comme néfaste pour la santé et le bien-être des poissons. On estime que les charges en particules deviennent problématiques à partir d'un certain seuil, car elles causent des dommages physiologiques directs aux tissus des poissons, en particulier les branchies, et des effets indirects comme une visibilité réduite à cause de la turbidité (Schumann et Brinker, 2020). La turbidité de l'eau peut perturber le comportement alimentaire des poissons, en particulier leur faculté à repérer les granulés dans l'eau (Becke et al., 2017). Cela peut entraîner une diminution de la prise alimentaire et également aggraver la qualité de l'eau, à cause de l'accumulation des granulés non consommés. Toutefois, des études récentes ont montré que la truite arc-en-ciel présente une certaine tolérance à des charges en MES élevées (Becke et al., 2018, 2017). D'après la littérature, il est recommandé de maintenir la concentration en MES inférieure à 25 mg.L^{-1} pour tout type de système, ouvert et fermé (Timmons et Ebeling, 2010).

Concernant les effets des polluants dissous, l'ammoniaque et les nitrites sont très toxiques pour les poissons (Esmail et al., 2015). L'ammoniaque est le plus toxique pour les poissons d'élevage, provoquant des convulsions voire la mort des animaux à partir de concentrations supérieures à 1,5 mg/L. En général, les concentrations acceptables de NH₃ en aquaculture n'excèdent pas 0,025 mg/L (Chen et al., 2006). Le nitrite est moins toxique que le NH₃, mais il reste un composé dangereux pour les poissons. Il peut entraver le métabolisme de l'oxygène chez les poissons en se liant à l'hémoglobine pour former la méthémoglobine. Contrairement à l'hémoglobine, la méthémoglobine ne peut ni capter, ni transporter l'oxygène dans le sang, ce qui peut entraîner une hypoxie des tissus de l'animal (Esmail et al., 2015).

Enfin, des études ont montré un lien entre la saveur désagréable (off-flavour) des poissons et l'accumulation des MES dans les RAS (Auffret et al., 2013 ; Guttman et van Rijn, 2008). La géosmine et le 2-méthylisobornéol (MIB) sont des molécules produites par des cyanobactéries qui ont été identifiées comme les principales substances responsables de la saveur désagréable, en s'accumulant dans l'eau des RAS, puis dans les tissus des poissons. Il est donc nécessaire pour les aquaculteurs de réduire la charge en MES afin de produire des poissons en bonne santé et de bonne qualité.

ii. Sur les bactéries du filtre biologique

Becke et al. (2019) ont montré que l'activité bactérienne est fortement corrélée à l'augmentation des concentrations de MES. De nombreuses études rapportent que les MES ont des effets négatifs indirects en déclenchant la prolifération de bactéries et micro-organismes hétérotrophes opportunistes à croissance rapide (Pedersen et al., 2017). Ces bactéries opportunistes colonisent la surface des particules, et si ces dernières ne sont pas filtrées mécaniquement avant de passer dans le biofiltre, les bactéries hétérotrophes opportunistes entrent en compétition avec les bactéries nitrifiantes pour l'espace, l'oxygène et les nutriments (De Schryver et Vadstein, 2014 ; Ling et Chen, 2005). Une augmentation de la concentration en carbone organique dans un biofiltre entraîne une diminution exponentielle de la nitrification (Ling et Chen, 2005), ce qui peut considérablement entraver l'élimination du NH₃ et NO₂⁻ toxiques pour les poissons. La récupération des MES est donc d'un intérêt majeur pour permettre le bon fonctionnement du biofiltre des RAS.

1.3. Présentation de la production des aliments aquacoles

1.3.1. Le processus de fabrication par cuisson-extrusion

Les aliments pour poisson sont majoritairement produits par cuisson-extrusion. La cuisson-extrusion est un procédé de haute pression et haute température (HPHT) réalisé dans une extrudeuse, dans laquelle de la matière est travaillée au sein d'un fourreau par des vis sans fin et poussée au travers d'une filière placée à l'extrémité du fourreau (Lević, 2010). Les premiers aliments extrudés destinés à l'aquaculture ont été produits à partir des années 90. Leur propriétés poreuses ont permis une augmentation des teneurs en lipides et en énergie, et une réduction des protéines dans l'aliment, par rapport aux aliments pressés, principalement utilisés au cours des dernières années passées (Skiba, 2020). Le passage de l'aliment pressé à l'aliment extrudé a notamment permis de lever certaines contraintes liées aux rejets azotés, résultant du catabolisme des protéines alimentaires utilisées pour couvrir les besoins énergétiques des poissons (Skiba, 2020), et de réduire les rejets en phosphore grâce à la gélatinisation des amidons lors de l'extrusion, qui permet simultanément d'augmenter la digestibilité de l'amidon, améliorer la qualité physique des granulés et améliorer la cohésion des fèces des poissons (Welker et al., 2018). Enfin, les aliments extrudés possèdent d'autres caractéristiques recherchées en nutrition

aquacole comme l'inactivation des facteurs antinutritionnels, présents notamment dans les ingrédients végétaux (Barrows et al., 2007 ; Kokou et Fountoulaki, 2018).

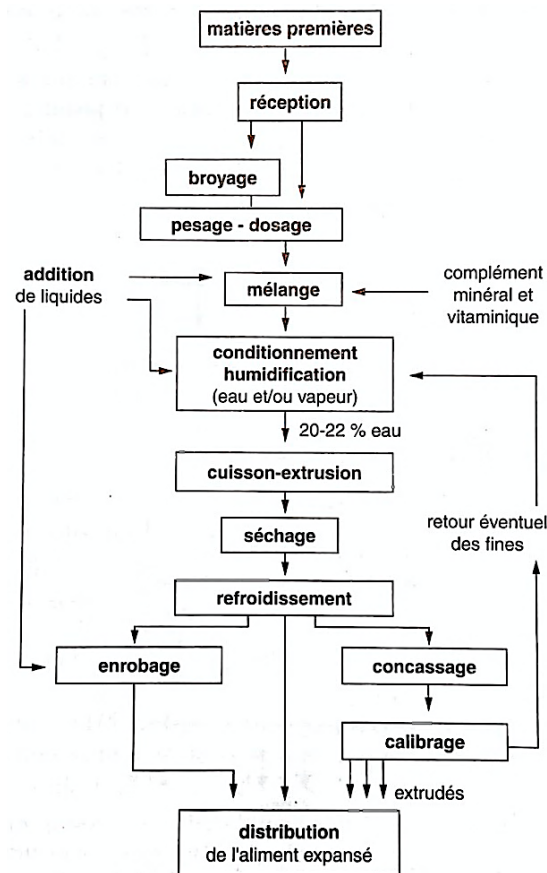


Figure 8. Exemple de fabrication d'aliments extrudés (Guillaume et al., 1999)

a) Le broyage

La première étape qui suit la réception des matières premières est le broyage. Ce procédé a pour but de réduire la taille des matières premières en particules plus fines. L'objectif est de permettre de faire des mélanges homogènes aux étapes suivantes. La machine utilisée est le broyeur à marteau, dans lequel le produit à broyer est violemment percuté par des marteaux fixés sur un rotor contre une grille. Les particules broyées traversent les trous de la grille, dont le diamètre varie entre 0,5 à 3,5 mm, et sont ensuite envoyées dans la mélangeuse. Pour les aliments destinés aux juvéniles, les particules sorties du broyeur sont broyées à nouveau dans un second broyeur pour atteindre des diamètres de l'ordre de 50 µm (Guillaume et al., 1999).

b) Le dosage et mélange

Le dosage correspond à l'ajout des différents ingrédients de la formule dans des proportions bien définies. Il est impératif que le dosage soit très précis. En effet, les substances actives ajoutées (prémix, additifs) à cette étape sont généralement onéreuses et sont incorporées à des taux très bas dans la formule. Par conséquent, le moindre excès ou insuffisance d'un élément représente une dépense pour le fabricant d'aliment ou un risque pour le pisciculteur (Guillaume et al., 1999).

L'homogénéisation des différentes matières premières et additifs est ensuite réalisée dans une mélangeuse. Le but de cette étape est d'obtenir une répartition uniforme des différents

éléments constituant la formule. Chaque élément du mélange doit être présent dans une quantité donnée du produit à un pourcentage concordant avec le pourcentage théorique annoncé par le fabricant. Le mélange passe ensuite au conditionnement, étape à laquelle de l'eau et des huiles sont ajoutés au mélange avant de passer à l'extrusion.

c) La cuisson-extrusion

La cuisson-extrusion consiste à soumettre un mélange d'ingrédients aux effets conjugués de la pression (30 à 120 bars) et de la température (90 à 180°C) pendant un temps court (inférieur à 30 secondes), et à le mettre en forme par passage forcé à travers une filière (Guillaume et al., 1999). Elle est réalisée dans une extrudeuse à vis, mono ou bivis, et les vis sont emboîtées au sein d'un fourreau dans lequel passe le mélange. Dans le cas d'une extrudeuse bivis comme c'est le cas chez Le Gouessant Aquaculture, les frottements sont obtenus à l'interface entre les deux vis.

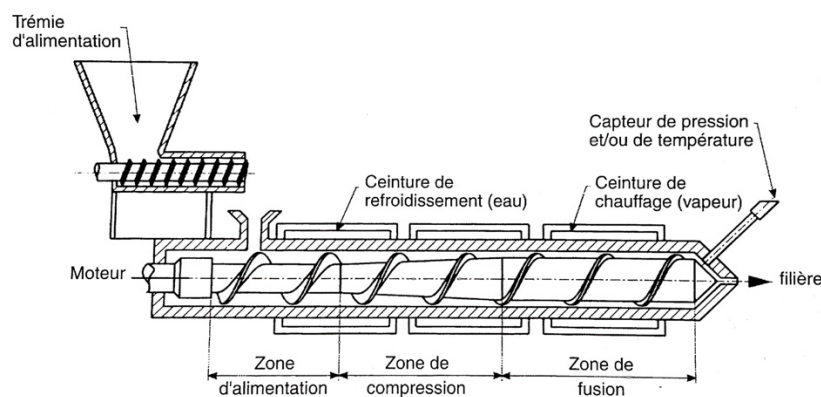


Figure 9. Schéma d'une extrudeuse monovis (dessin Sire A., INRA Nantes dans Guillaume, 1999)

Malgré les températures élevées, l'eau injectée au conditionnement et dans l'extrudeuse est à l'état liquide au sein du fourreau du fait de la forte pression. Lorsque la pâte passe au travers de la filière et retourne à pression atmosphérique, l'eau se vaporise ce qui entraîne une expansion radiale qui donne la structure alvéolaire caractéristique des aliments extrudés (Arhaliass et al., 2003). L'expansion va dépendre de nombreux paramètres : le diamètre des trous de la filière, la pression, la température, les matières premières utilisées, la quantité d'eau injectée, la quantité de vapeur injectée, la quantité d'huile incorporée, etc. (Arhaliass et al., 2003 ; Dethlefsen, 2017). Il est difficile de prédire à l'avance l'expansion des produits extrudés, et c'est à l'opérateur de la machine que revient la tâche de manipuler les différents paramètres, comme l'injection d'eau et de vapeur, pour obtenir les produits désirés. À la sortie de la filière, les produits extrudés sont coupés par des couteaux rotatifs qui définissent la longueur des aliments selon leur vitesse de rotation.

La cuisson-extrusion est un processus complexe et difficile à maîtriser, en raison des nombreux paramètres qui sont mis en jeu. Néanmoins, l'extrusion s'est aujourd'hui imposée dans l'alimentation des poissons du fait de sa grande flexibilité. Elle permet en effet de faire des aliments divers, du flottant au coulant, de l'aliment maigre à l'aliment gras, à partir d'une multitude de matières premières diverses.

d) Le séchage

Les granulés extrudés sont envoyés au sécheur dans lequel leur humidité est ramenée de 15-16% à un niveau inférieur à 10%. Le séchage est une étape importante pour la conservation des produits sur le plan physique, chimique et microbiologique. La date de durabilité minimale (DDM – anciennement DLUO) des aliments extrudés varie entre 8 à 12 mois et il est impératif que les produits préservent leurs qualités jusqu'à leur utilisation, tout en prévenant le développement microbien et/ou de champignons.

e) L'enrobage

Les granulés séchés sont tamisés avant de passer dans une enrobeuse sous vide. Dans cette machine, ils sont enrobés par de la matière grasse (MG), afin d'incorporer à la ration des acides gras essentiels et des vitamines liposolubles. Les huiles liquides et les vitamines sont prémélangées dans une cuve et sont pulvérisées dans le tambour de l'enrobeuse, dans lequel un brassage est réalisé afin de répartir le mélange sur l'ensemble des granulés. Un vide est créé au sein du tambour à l'aide de pompes, l'air contenu dans le cœur des granulés est extirpé, créant une force d'aspiration permettant la pénétration des huiles dans les pores des granulés. Cette technique permet de faire des aliments riches en MG, atteignant des taux d'incorporation jusqu'à 40%. Enfin, en sortie d'enrobeuse, les granulés sont refroidis à l'air libre. Ils sont ensuite soit ensachés, soit directement livrés en vrac aux aquaculteurs.

1.3.2. Les objectifs des fabricants d'aliments aquacoles pour répondre aux enjeux de l'aquaculture en circuit fermé

Une fois livrés aux clients, les aliments sont soumis à de nombreux stress avant d'être consommés par les poissons, comme des contraintes mécaniques lors du stockage et de la distribution dans les bassins, des températures élevées dans les silos de stockage et la dégradation par l'eau après avoir été distribués dans les bassins (Aarseth et al., 2006). Il est primordial que ces aliments résistent à l'ensemble de ces stress avant que les poissons ne les consomment, afin qu'ils préservent l'ensemble de leur qualité nutritionnelle tout en limitant la pollution de l'eau. Un premier objectif pour les fabricants est donc d'améliorer la qualité physique des granulés. Un second objectif concerne l'amélioration de la digestibilité des aliments. La digestibilité étant un axe massivement étudié au cours des dernières décennies, les aliments d'aujourd'hui sont beaucoup plus digestes qu'ils ne l'étaient autrefois (Bureau et Hua, 2010 ; Schumann et Brinker, 2020). Par exemple, Bureau et Hua (2010) ont estimé que dans les années 1980, un kilogramme d'aliment consommé entraînait la production de 300 g de fèces, contre 150 g pour les aliments actuels (Dalsgaard et Pedersen, 2011). De ce constat, l'amélioration de la digestibilité n'est pas un axe abordé dans ce rapport. Globalement, ces deux premiers objectifs ne sont pas spécifiques aux RAS, mais concernent l'ensemble des aliments aquacoles. Cependant, un nouvel objectif spécifique aux RAS consiste à améliorer la cohésion des fèces des poissons, afin de prévenir leur dissolution dans l'eau et faciliter leur extraction par les systèmes de filtration mécanique.

a) Améliorer la qualité physique des granulés

i. La dureté

La dureté d'un granulé correspond à la résistance maximale à la compression à laquelle le granulé résiste jusqu'à rupture (Guillaume et al., 1999 ; Kaliyan et Vance Morey, 2009). Elle est généralement mesurée avec un texturomètre (Thomas et van der Poel, 1996) pour réaliser un test de résistance à la compression, qui simule à la fois la compression exercée par le poids des granulés supérieurs sur les granulés inférieurs dans les silos de stockage, le broyage des granulés

dans les systèmes de transport à vis sans fin et la mastication exercée par la mâchoire des poissons (Kaliyan et Vance Morey, 2009). Ainsi, un granulé avec une dureté élevée sera moins sujet à la casse par rapport à un autre moins résistant. De plus, Baeverfjord et al. (2006) ont indiqué que la dureté est positivement corrélée avec l'intégrité à l'eau des granulés. La dureté est un bon indicateur de la qualité physique des granulés et les fabricants se basent en partie sur cet indicateur pour évaluer leurs produits.

ii. La durabilité

La durabilité des granulés est une mesure de la résistance à l'abrasion (Guillaume et al., 1999). Elle est évaluée par le pourcentage de particules fines produites après que les granulés aient subi des chocs et des frottements dans une machine qui simule un système de distribution mécanique ou pneumatique (Kaliyan et Vance Morey, 2009). Un aliment de bonne qualité est un aliment avec une bonne durabilité. En effet, la production de fines est responsable de la diminution des qualités nutritionnelles des aliments par pertes directes de matière qui peut résulter en pollution environnementale (Dethlefsen, 2017). De plus, ces fines peuvent s'accumuler et obstruer les conduites des systèmes de distribution pneumatique (Aas et al., 2011). Enfin, les fines sont un motif de réclamation de la part des clients pour cause de non-conformité, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour le fabricant.

iii. L'intégrité à l'eau

L'intégrité ou stabilité à l'eau est une caractéristique importante car elle définit la propriété du granulé à rester intact après une immersion prolongée. Un aliment avec une faible intégrité à l'eau se fragmente rapidement, entraînant des pertes de matière qui peuvent dégrader la qualité de l'eau. De plus, une étude a mis en lumière une corrélation entre la stabilité à l'eau des aliments et l'éructation de l'huile chez la truite arc-en-ciel (Baeverfjord et al., 2006). Les auteurs ont montré que des aliments avec une faible stabilité à l'eau entraînent la séparation de l'huile des granulés, qui s'accumule dans l'estomac des poissons et peut potentiellement être éructée par ces derniers. Plusieurs méthodes existent pour estimer l'intégrité à l'eau des granulés (Guillaume et al., 1999). La méthode statique consiste à immerger l'aliment dans l'eau sans aucun mouvement pour une durée donnée. L'aliment est ensuite récupéré, séché puis pesé. La différence de masse avant et après immersion dans l'eau indique la perte de matière sèche et les résultats sont exprimés en pourcentage de la quantité de matière sèche initiale. Pour la méthode dynamique, l'aliment est placé sur un tamis dans lequel il est mis sous agitation et est alternativement plongé dans l'eau, puis ramené à l'air à une cadence régulière pour un temps donné. Les particules fines sont arrachées des granulés à cause du brassage de l'eau. Les résultats sont ensuite exprimés en pourcentage de la matière sèche (Guillaume et al., 1999).

iv. Le relargage d'huile

Aujourd'hui, la demande tend vers des aliments de plus en plus riches en lipides. Le passage de l'aliment pressé à l'aliment extrudé et l'utilisation de l'enrobeuse sous vide ont permis de fabriquer ces aliments riches en MG (Skiba, 2020). Cependant, ce type d'aliment pose des problèmes de relargage de l'huile enrobée, lors du stockage et au contact de l'eau. Cela est problématique car à la fois l'aliment perd une partie de son potentiel énergétique et de plus, l'huile relarguée pollue l'eau et les systèmes de distribution de l'aliment, ce qui peut créer des dysfonctionnements au sein du système (Nissinen et Sneddon, 1999). Le relargage d'huile est la mesure de la quantité d'huile relarguée par les granulés lors du stockage (Sørensen, 2012). Malgré l'importance de ce critère dans la qualité des aliments, aucune méthode de référence n'existe pour l'estimer.

b) Améliorer la cohésion des fèces des poissons

Les fèces des poissons, une fois excrétées, sont soumises à des dégradations chimiques et biologiques, et à des forces mécaniques causées par le brassage de l'eau, lié à l'hydraulique des bassins et aux mouvements des poissons (Schumann et Brinker, 2020). Elles ont alors tendance à se fragmenter et à se dissoudre dans l'eau, les rendant irrécupérables par les filtres mécaniques. La lixiviation des nutriments dépend fortement du rapport surface-volume, et donc de la distribution de la taille des fèces. Brinker (2005) a montré que les fèces de grande taille avaient une capacité de rétention du N et P significativement supérieure aux fèces de petite taille. De plus, des fèces de grande taille sont plus aptes à tomber rapidement au fond du bassin pour être récupérées (Reid et al., 2009 ; Unger et Brinker, 2013). L'objectif est donc d'obtenir des fèces de grande taille avec une bonne consistance, qui sont rapidement récupérables pour réduire la charge en MES dans l'eau et retirer une source de nutriments lixiviables qui est difficile à traiter et à éliminer une fois dissoute.

Bibliographie

- Aarseth, K.A., Sørensen, M., Storebakken, T., 2006. Effects of red yeast inclusions in diets for salmonids and extrusion temperature on pellet tensile strength: Weibull analysis. *Animal Feed Science and Technology* 126, 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.06.005>
- Aas, T.S., Oehme, M., Sørensen, M., He, G., Lygren, I., Åsgård, T., 2011. Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system. *Aquacultural Engineering* 44, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.11.002>
- Arhaliass, A., Bouvier, J.M., Legrand, J., 2003. Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process. *Journal of Food Engineering* 60, 185–192. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00039-6)
- Auffret, M., Yergeau, É., Pilote, A., Proulx, É., Proulx, D., Greer, C.W., Vandenberg, G., Villemur, R., 2013. Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems. *FEMS Microbiology Ecology* 84, 235–247. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12053>
- Baeverfjord, G., Refstie, S., Krogedal, P., Åsgård, T., 2006. Low feed pellet water stability and fluctuating water salinity cause separation and accumulation of dietary oil in the stomach of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 261, 1335–1345. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.033>
- Barak, Y., van Rijn, J., 2000. Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system. *Aquacultural Engineering* 22, 121–136. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00036-4)
- Barrows, F.T., Stone, D.A.J., Hardy, R.W., 2007. The effects of extrusion conditions on the nutritional value of soybean meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 265, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.01.017>
- Becke, C., Schumann, M., Steinhagen, D., Geist, J., Brinker, A., 2018. Physiological consequences of chronic exposure of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to suspended solid load in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* 484, 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.030>
- Becke, C., Schumann, M., Steinhagen, D., Rojas-Tirado, P., Geist, J., Brinker, A., 2019. Effects of unionized ammonia and suspended solids on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* 499, 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.048>
- Becke, C., Steinhagen, D., Schumann, M., Brinker, A., 2017. Physiological consequences for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) of short-term exposure to increased suspended solid load. *Aquacultural Engineering* 78, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.11.001>
- Bishop, S.H., 1976. NITROGEN METABOLISM AND EXCRETION: REGULATION OF INTRACELLULAR AMINO ACID CONCENTRATIONS, in: Wiley, M. (Ed.), *Estuarine Processes*. Academic Press, pp. 414–431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-751801-5.50042-3>
- Bregnballe, J., Eurofish, FAO, 2015a. A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations : Eurofish, Copenhagen.

- Bregnballe, J., Eurofish, FAO, 2015b. A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations : Eurofish, Copenhagen.
- Brinker, A., Koppe, W., Rösch, R., 2005. Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces. *Aquaculture* 249, 125–144. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.12.029>
- Bureau, D.P., Hua, K., 2010. Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations. *Aquaculture Research* 41, 777–792. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02431.x>
- Chen, S., Ling, J., Blancheton, J.-P., 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering* 34, 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004>
- Chen, Y.-S., Beveridge, M.C.M., Telfer, T.C., Roy, W.J., 2003. Nutrient leaching and settling rate characteristics of the faeces of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and the implications for modelling of solid waste dispersion. *J Appl Ichthyol* 19, 114–117. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2003.00449.x>
- Cho, C.Y., Bureau, D.P., 1997. Reduction of Waste Output from Salmonid Aquaculture through Feeds and Feeding. *The Progressive Fish-Culturist* 59, 155–160. [https://doi.org/10.1577/1548-8640\(1997\)059<0155:ROWOFS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8640(1997)059<0155:ROWOFS>2.3.CO;2)
- Chopin, T., 2013. Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA), in: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. pp. 542–564. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8_173
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., Verstraete, W., 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture* 270, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006>
- Cripps, S.J., Bergheim, A., 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22, 33–56. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5)
- Dalsgaard, J., Pedersen, P.B., 2011. Solid and suspended/dissolved waste (N, P, O) from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 313, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.01.037>
- de Jong, B., 2019. Aquaculture 2.0: RAS Is Driving Change — Land-Based Farming Is Set to Disrupt Salmon. RaboResearch Food & Agribusiness (Rabobank).
- De Schryver, P., Vadstein, O., 2014. Ecological theory as a foundation to control pathogenic invasion in aquaculture. *The ISME Journal* 8, 2360–2368. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.84>
- Dethlefsen, M.W., 2017. Die Hard – Improving the physical quality of extruded fish pellets. Technical University of Denmark.
- Esmail, M.Y., Astrofsky, K.M., Lawrence, C., Serluca, F.C., 2015. Chapter 20 - The Biology and Management of the Zebrafish, in: Fox, J.G., Anderson, L.C., Otto, G.M., Pritchett-Corning, K.R., Whary, M.T. (Eds.), *Laboratory Animal Medicine (Third Edition)*, American College of Laboratory Animal Medicine. Academic Press, Boston, pp. 1015–1062. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409527-4.00020-1>
- FAO, 2020. LA SITUATION MONDIALE DES PECHES ET DE L'AUQUACULTURE 2020: la durabilite an action. FOOD & AGRICULTURE ORG, S.I.
- Guillaume, J., Kaushik, S., Bergot, P., Métailler, R. (Eds.), 1999. Nutrition et alimentation des poissons et crustacés, Du labo au terrain. INRA ; IFREMER, Paris : Issy-les-Moulineaux.

- Guttman, L., van Rijn, J., 2008. Identification of conditions underlying production of geosmin and 2-methylisoborneol in a recirculating system. *Aquaculture* 279, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.03.047>
- Herath, S.S., Satoh, S., 2015. 15 - Environmental impact of phosphorus and nitrogen from aquaculture, in: Davis, D.A. (Ed.), *Feed and Feeding Practices in Aquaculture*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, Oxford, pp. 369–386. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00015-5>
- Kalihan, N., Vance Morey, R., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* 33, 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kibria, G., Nuggeoda, D., Fairclough, R., Lam, P., 1997. The nutrient content and the release of nutrients from fish food and faeces. *Hydrobiologia* 357, 165–171. <https://doi.org/10.1023/A:1003147122847>
- Kokou, F., Fountoulaki, E., 2018. Aquaculture waste production associated with antinutrient presence in common fish feed plant ingredients. *Aquaculture* 495, 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.003>
- Leclercq, D., 2020. *Approche méthodique des RAS - Formation Le Gouessant*.
- Lević, J., 2010. 2nd Workshop Feed-to-Food FP7 REGPOT-3. Extrusion technology in feed and food processing, Thematic Proceedings. Novi Sad, Serbia, 19-21 October, 2010. Institut for Food Technology.
- Ling, J., Chen, S., 2005. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. *Aquacultural Engineering* 33, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.002>
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C.J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J.P., d'Orbcastel, E.R., Verreth, J.A.J., 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 43, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Nissinen, V.J., Sneddon, S., 1999. Method for preparing high oil content fish feed pellets. WO1998049904A3.
- Pedersen, P.B., von Ahnen, M., Fernandes, P., Naas, C., Pedersen, L.-F., Dalsgaard, J., 2017. Particle surface area and bacterial activity in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 78, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.04.005>
- Reid, G.K., Liutkus, M., Robinson, S.M.C., Chopin, T.R., Blair, T., Lander, T., Mullen, J., Page, F., Moccia, R.D., 2009. A review of the biophysical properties of salmonid faeces: implications for aquaculture waste dispersal models and integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Research* 40, 257–273. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02065.x>
- Rodehutschord, M., Pfeffer, E., 1995. Effects of supplemental microbial phytase on phosphorus digestibility and utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Water Science and Technology, Nutritional Strategies and Management of Aquaculture Waste* 31, 143–147. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00433-N](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00433-N)
- Schumann, M., Brinker, A., 2020. Understanding and managing suspended solids in intensive salmonid aquaculture: a review. *Rev Aquacult raq.12425*. <https://doi.org/10.1111/raq.12425>
- Skiba, S., 2020. Évolution de l'alimentation d'un poisson carnivore, la truite, vers un régime à base de végétaux : stratégies pour repousser les limites.

- Sørensen, M., 2012. A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods. *Aquaculture Nutrition* 18, 233–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2011.00924.x>
- Stewart, N.T., Boardman, G.D., Helfrich, L.A., 2006. Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) sludge. *Aquacultural Engineering* 35, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.01.004>
- Tacon, A.G.J., 2020. Trends in Global Aquaculture and Aquafeed Production: 2000–2017. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 28, 43–56. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1649634>
- Thomas, M., van der Poel, A.F.B., 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science and Technology* 61, 89–112. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(96\)00949-2](https://doi.org/10.1016/0377-8401(96)00949-2)
- Unger, J., Brinker, A., 2013. Feed and treat: What to expect from commercial diets. *Aquacultural Engineering* 53, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.012>
- Wang, W.-N., Wang, A.-L., Zhang, Y.-J., Li, Z.-H., Wang, J.-X., Sun, R.-Y., 2004. Effects of nitrite on lethal and immune response of *Macrobrachium nipponense*. *Aquaculture* 232, 679–686. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.08.018>
- Welker, T.L., Overturf, K., Snyder, S., Liu, K., Abernathy, J., Frost, J., Barrows, F.T., 2018. Effects of feed processing method (extrusion and expansion-compression pelleting) on water quality and growth of rainbow trout in a commercial setting. *Journal of Applied Aquaculture* 30, 97–124. <https://doi.org/10.1080/10454438.2018.1433095>