

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2019 - 2020</p> <p>Spécialité : Sciences de la Mer et du Littoral, Biologie</p> <p>Parcours : Sciences Halieutiques et Aquacoles (Aquaculture)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	---

Conséquences de la prise en compte des impacts environnementaux dans la formulation des aliments aquacoles sur les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*).

Par : Espoir SOUDE

Soutenu à Agrocampus Rennes

Le 16 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : Hervé LE BRIS, enseignant
Agrocampus-Ouest

Maître de stage : Sandrine SKIBA, directrice de
recherche, NuMeA, INRA

Enseignant référent : Hervé LE BRIS

Autres membres du jury :

Auriane JONES, enseignante-chercheuse,
Agrocampus-Ouest

Yann MARCHAND, formulation et R&D
Le Gouessant

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



REMERCIEMENTS

- Je remercie sincèrement Sandrine pour m'avoir permis de faire ce stage qui pour moi, a été une très belle expérience d'acquisition de connaissances. Merci également pour ton encadrement, ta disponibilité et tes conseils pendant le stage et tout au long de la rédaction du présent rapport.
- Un sincère Merci à Anne pour m'avoir transmis toutes les connaissances nécessaires lors des manips de biochimie. Merci d'être une personne si bienveillante et de m'avoir proposé plusieurs fois ton aide pendant le confinement.
- Merci également à Peyo pour toutes les connaissances transmises pendant les manips de digestibilité. Merci pour ta bonne humeur. Chez moi, on dit que : « un vieux assis voit plus loin qu'un jeune debout ». Je tâcherai de faire miens tes précieux conseils.
- Merci à toute l'équipe du NuMéA, les chercheurs et les techniciens, de m'avoir accueilli au sein du labo et pour la bonne ambiance qui a toujours prévalu au cours de mon stage.
- Un merci particulier à mes amis du labo: Lokesh, Hongyan, Elodie, Guillaume, Laura, Pauline, Alex, Jesabel, Michaël, Thérèse, Emilie, Lucas. Merci pour votre belle compagnie, merci de m'avoir faire connaitre le pays basque et surtout Gantxiki.
- Enfin, je dédie ce mémoire à mes parents, mes sœurs et Hunic. Merci pour votre présence et votre soutien inconditionnel. Malgré la distance qui nous sépare vous êtes toujours aussi proches.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1. Contexte et bref état des lieux de la production mondiale de poisson	1
2. Défis de l'alimentation en Aquaculture et méthode d'Analyse de Cycle de Vie	2
3. Le concept de l'Eco-Aliment	4
4. Objectifs du stage	5
Matériels et méthodes	5
1. Régimes expérimentaux	6
1.1. Formulations.....	6
1.2. Impacts environnementaux	7
2. Protocoles expérimentaux	11
2.1- Digestibilité	11
2.1.1. Dispositif expérimental.....	11
2.1.2. Protocole expérimental	12
2.1.3. Calcul des coefficients d'utilisation digestive	13
2.2. Croissance.....	13
2.2.1. Protocole Expérimental	13
2.2.2. Calcul des indicateurs de performances.....	14
2.3. Analyses de composition biochimique des aliments, des fèces et des poissons	15
2.3.1. Matière sèche	15
2.3.2. Protéines	15
2.3.3. Lipides	16
2.3.4. Energie.....	16
2.3.5. Amidon	17
2.3.6. Cendres	17
2.3.7. Yttrium	17
2.4. Analyses statistiques.....	17
2.4.1. Tests statistiques	17
2.4.2. Détermination de l'équation de la droite de croissance	18
RESULTATS	18
1. Composition des régimes expérimentaux	18
2. Impacts environnementaux des régimes	19
3. Digestibilité des régimes	20
4. Croissance pondérale et paramètres zootechniques	21
4.1. Croissance pondérale	21
4.2. Performances zootechniques	22
5. Composition corporelle et bilan de l'utilisation des nutriments	23
5.1. Composition corporelle	23
5.2. Bilan de l'utilisation (Ingéré, Gain et Rétention) des nutriments	23
DISCUSSION	24
1. Impact de la prise en compte des paramètres environnementaux sur la croissance	25

2. Impact de la prise en compte des paramètres environnementaux sur la digestibilité	26
3. Limites et perspectives au développement de la méthode.....	27
<i>CONCLUSION</i>.....	28
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	29

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Evolution mondiale de la production de poissons, mollusques et crustacés issue de la pêche de capture et de l’aquaculture. (Source : FAO 2020)	1
Figure 2: Evolution des prix de la farine de poisson et de la farine de soja en Allemagne et au Pays-bas de 1984 à 2020 (Source : FAO 2020)	2
Figure 3: Evolution des prix de l’huile de poisson et de l’huile de soja aux pays bas de 1984 à 2020 (Source : FAO 2020)	3
Figure 4: Analyse de Cycle de Vie (ACV) du poisson d'élevage. (Source: Wilfart et al 2018)	3
Figure 5: Effet du remplacement de la farine et l'huile de poisson par des matières premières végétales sur la croissance de la truite arc-en-ciel. (source : Lazzarotto et al 2018)	5
Figure 6: Bacs cylindro-coniques de l'atelier digestibilité de l'INRAE St-Pée-sur-Nivelle(A) et gros plan de la sortie d'eau d'un bac sur les grilles rotatives du système de récolte automatique de fèces(B).....	11
Figure 7: Collecteur automatique de fèces sur grilles rotatives (Choubert et al., 1982).....	12
Figure 8 : Résumé schématique du protocole expérimental de digestibilité.....	12
Figure 9: Comparaison des réductions d’ impacts environnementaux et des prix des trois aliments expérimentaux : Eco-aliment (EcoA) ; Moindre coût (Mdc) et Type C Commercial (MDC).	20
Figure 10: Evolution du poids moyen corporel de truites arc-en-ciel nourries avec 3 régimes expérimentaux (EcoA, Mdc et Type C) durant 84 jours.....	20

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Composition des 3 régimes expérimentaux utilisés</i>	6
Tableau 2: Bilan des matières premières utilisées et leurs impacts environnementaux.	9
Tableau 3 : Composition biochimique des aliments expérimentaux	18
Tableau 4: Coefficients d'utilisation digestive apparente (%) des régimes expérimentaux....	21
Tableau 5: Résumé statistique des coefficients de la droite de régression	22
Tableau 6: Performances zootechniques des différents lots de truite arc-en-ciel nourries avec trois régimes alimentaires durant 84 jours d'expérimentation.....	22
Tableau 7: Composition biochimique des poissons en fin d'expérience.....	23
Tableau 8: Bilan de l'utilisation des nutriments par les truites nourries avec les aliments EcoA, Mdc et Type C durant 12 semaines d'expérimentation.	24

INTRODUCTION

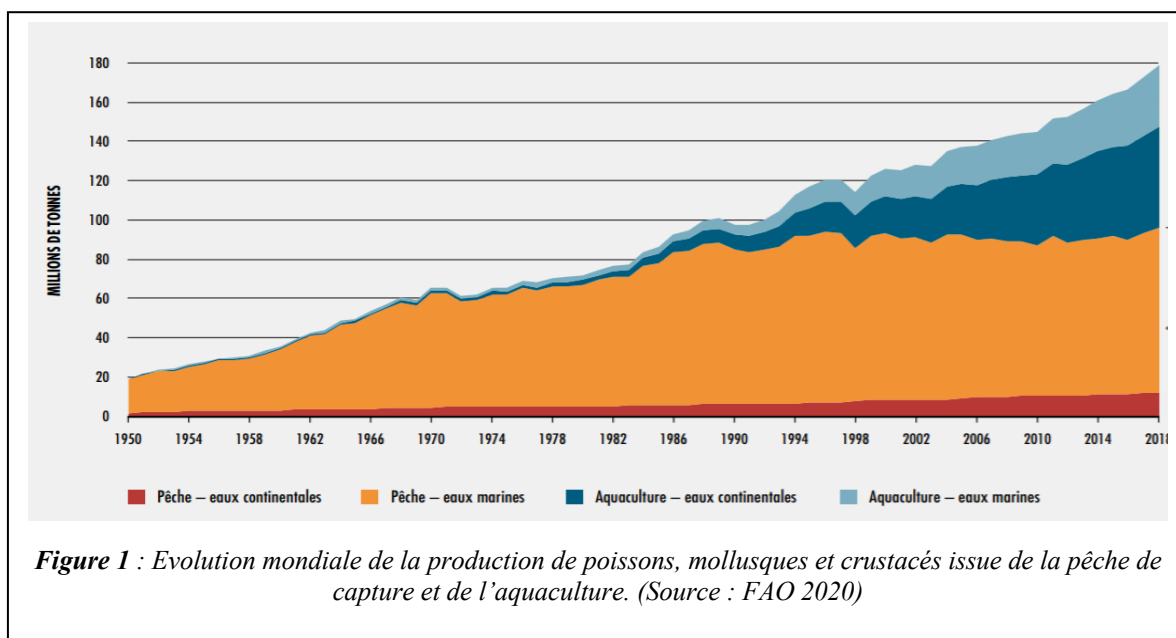
1. Contexte et bref état des lieux de la production mondiale de poisson¹

Depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle et le début de la révolution industrielle, la population humaine a connu un accroissement sans précédent. A titre d'exemple, la population européenne est passée de 187 millions à 423 millions d'habitants entre 1800 et 1900. Cette augmentation rapide de la population mondiale s'est accompagnée d'un accroissement des besoins alimentaires avec en corolaire, l'augmentation de la pression sur les ressources naturelles (FAO, 1996, Médale 2013, WWF 2017). Selon la FAO (2020), 34,2 % des stocks marins actuels sont exploités à des niveaux biologiquement non durables, 59,6 % sont exploités au niveau du rendement maximum durable et 6,2 % sont encore sous-exploités.

Pour garantir la sécurité alimentaire du globe, le poisson a un rôle prépondérant à jouer. Au-delà de fournir 20 % des protéines animales essentielles à l'équilibre du régime alimentaire de plus de 3,1 milliards d'habitants, il constitue une source notable d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne (AGPI-LC) et de micronutriments (Thilstedt et al., 2016 ; FAO, 2016 ; Béné et al., 2015).

Avec un taux de croissance annuel de 5,8% au cours de la période 2001-2016, l'aquaculture reste un secteur de production important, en constante évolution (Cahu, 2013; Smarason et al., 2017). Elle continue de croître plus rapidement que les autres grands secteurs de la production animale. Avec une production de 82,1 millions de tonnes (Mt) en 2018 (**figure 1**) et une consommation par an et par habitant de 20,5kg (FAO 2020), l'aquaculture fournit aujourd'hui à elle seule, 52% du poisson destiné à la consommation humaine.

Cette production est amenée à croître à l'avenir compte tenu de la stagnation des captures de pêche (autour de 90 millions de tonnes), de la croissance démographique (1,2%



par an pour 9,7 milliards d'habitant d'ici 2050) et de l'augmentation de la demande individuelle (Cahu, 2013; Médale et al., 2013). Pour faire face à cette croissance, l'aquaculture devra relever des défis, à la fois environnementaux, sociaux et économiques.

¹ Ici, le terme « poisson » englobe les poissons, les crustacés et les mollusques.

2. Défis de l'alimentation en Aquaculture et méthode d'Analyse de Cycle de Vie

Pour assurer le développement durable de l'aquaculture, l'apport de nourriture aux poissons sous forme d'aliments composés est incontournable. Selon la FAO (2014), plus de 80 % de la production mondiale de poisson dépend de nos jours d'un apport d'aliment exogène, soit de façon exclusive soit comme en complément à la nourriture issue du milieu. La production d'aliment en aquaculture est aussi en pleine croissance. A titre d'exemple, elle est passée de 39 millions de tonnes en 2018 à 41 millions de tonnes en 2019 soit une augmentation de 4% (Alltech 2020).

Les principales matières premières utilisées pour la fabrication des aliments aquacoles sont la farine et l'huile de poisson. Ces matières premières d'origine marine, sont particulièrement importantes pour les espèces de poissons à haut niveau trophique dont la truite arc-en-ciel fait partie, car elles contiennent les nutriments essentiels dont a besoin le poisson pour sa croissance et son bien-être. A la farine et l'huile de poisson, s'ajoutent des matières premières d'origine végétale (protéagineux, oléagineux et céréales) qui apportent également des éléments nutritifs au poisson.

La rentabilité économique d'une pisciculture est étroitement liée au coût de l'aliment et des matières premières utilisées (Hoffman et al., 1997). En effet, l'alimentation représente une part importante (60-75%) du coût de production aquacole. Le coût des matières premières (marines et végétales) représente respectivement 35 et 45% du coût total de production de l'aliment (données SPPA ; Marchand in Le Gouvello 2017). Ces matières premières qui sont en concurrence avec les autres productions animales ainsi qu'avec l'utilisation pour la consommation humaine sont ainsi soumises aux chocs et à la volatilité des prix. La volatilité des prix de ces matières premières résulte de l'augmentation du coût de l'énergie (flambée des prix du pétrole), des phénomènes El Nino de plus en plus fréquents et des quotas de pêche (Rana et al., 2009). A titre d'exemple, sur la période 2005-2008, les prix de la farine de soja et de la farine de poisson ont augmenté d'environ 50% passant respectivement de 200 et 700 dollars US à 410 et 1210 dollars US par tonne (**figure 2**). De même, le prix des principales huiles (huile de poissons et huile de soja) utilisées dans l'industrie aquacole a augmenté de 250 % sur la période 2005-2008 (**figure 3**). Les formulations alimentaires sont donc fortement sensibles à la volatilité des prix des matières premières et à leurs disponibilités (Marchand in Le Gouvello, 2017). C'est pourquoi la formulation actuelle des aliments est basée sur une minimisation du prix du kilogramme d'aliment. Elle incorpore les matières premières de façon à couvrir les besoins nutritionnels des poissons (NRC, 2011) tout en minimisant le prix de l'aliment.

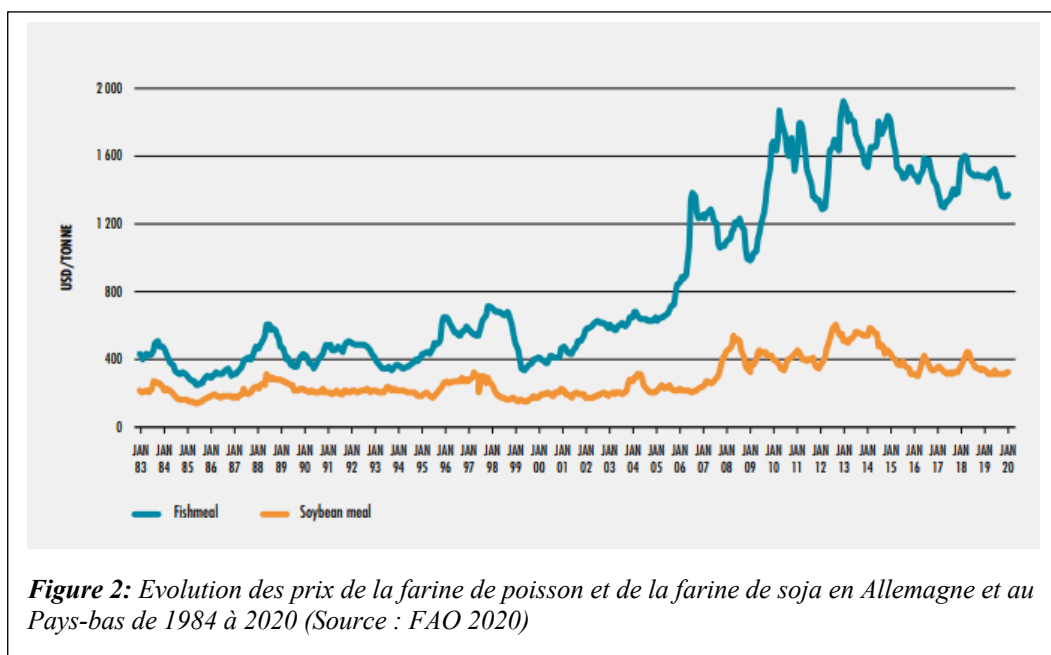


Figure 2: Evolution des prix de la farine de poisson et de la farine de soja en Allemagne et au Pays-bas de 1984 à 2020 (Source : FAO 2020)

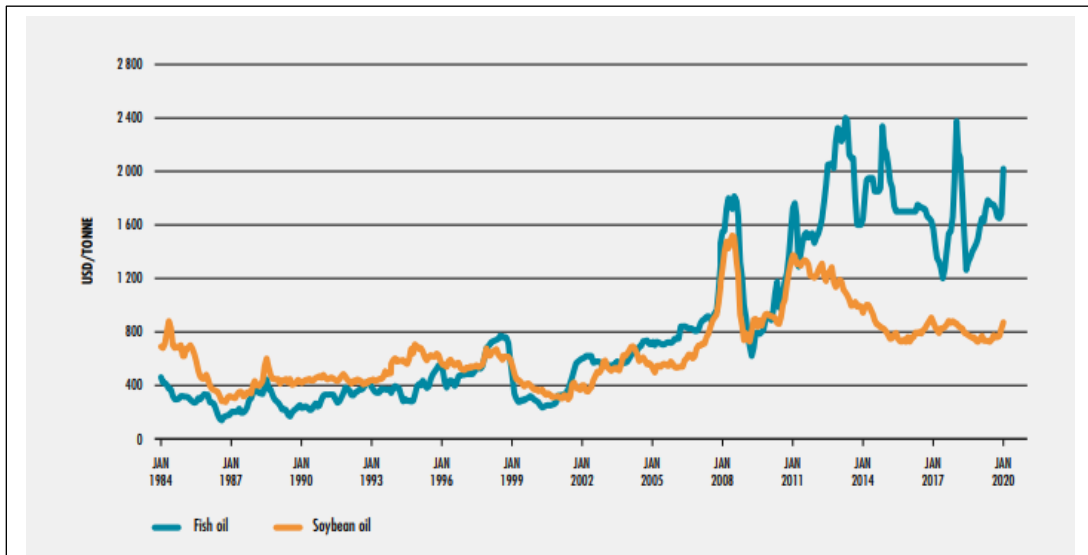


Figure 3: Evolution des prix de l'huile de poisson et de l'huile de soja aux pays bas de 1984 à 2020 (Source : FAO 2020)

Comme dans la plupart des systèmes de production animales, l'alimentation aquacole a plusieurs impacts sur l'environnement qui peuvent être évalués par la méthode dite d'Analyse de Cycle de Vie (ACV, **figure 4**). L'ACV est une méthode normalisée qui analyse les implications environnementales potentielles, en comptabilisant les consommations de ressources et les émissions polluantes associées à un produit ou à un service, tout au long de sa vie, depuis l'extraction des matières premières et sa fabrication jusqu'à sa mise en déchet ou son recyclage (ISO 2006, Aubin 2014). L'ACV prend en compte différents impacts : « le changement climatique », « la consommation d'énergie non renouvelable », « la consommation de phosphore », « l'occupation des terres », « l'acidification » ou encore « l'eutrophisation » (Wilfart et al., 2018).

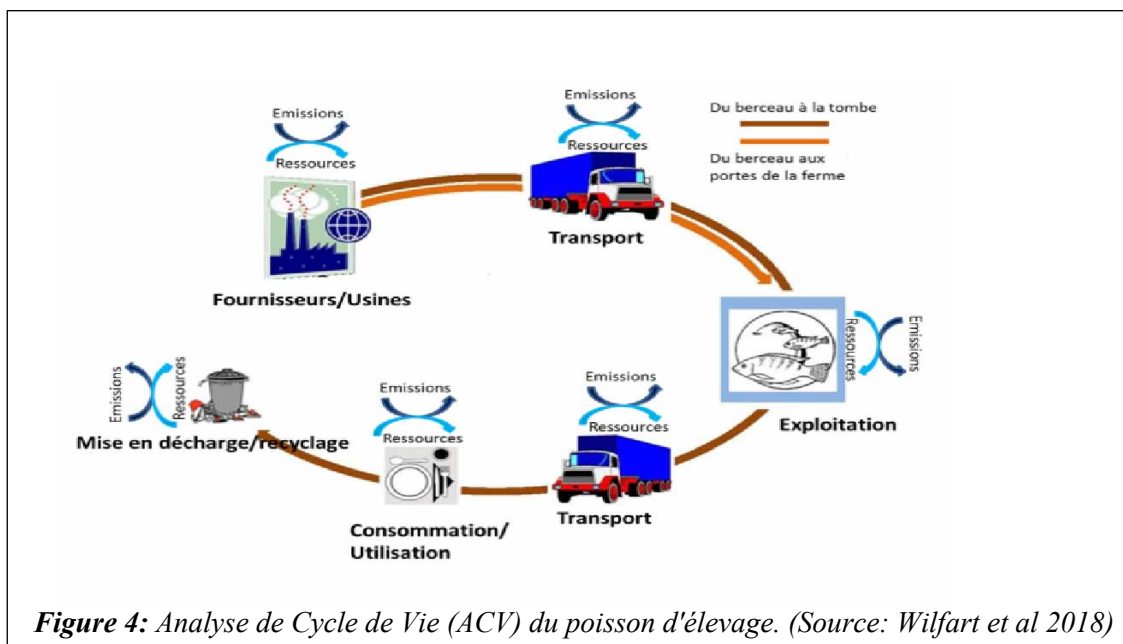


Figure 4: Analyse de Cycle de Vie (ACV) du poisson d'élevage. (Source: Wilfart et al 2018)

En élevage, l'alimentation peut représenter 65 à 95 % des impacts environnementaux des produits animaux en sortie de ferme (Wilfart et al., 2018). A titre d'exemple, pour un

élevage de truite arc-en-ciel, la production d'aliments (phase agricole, pêche et transformation) peut contribuer entre 73 - 87 % aux impacts « changement climatiques » ; 86% aux impacts « acidification » et 68-96% à « l'utilisation nette de la production primaire » (Papatriphon et al., 2004, Boissy et al. 2011, Parker et al. 2012, Espagnol et al. 2018). De ce fait, l'alimentation apparaît comme un levier potentiel pour diminuer l'impact environnemental de l'élevage (Bouvarel et al., 2010 ; Espagnol et al. 2018). Ainsi, afin de développer des formulations alimentaires minimisant le coût et les impacts environnementaux, une nouvelle méthode de formulation permettant de considérer simultanément dans une fonction multi objectif, le coût de la formule et plusieurs impacts environnementaux, a été développée. Elle utilise les impacts environnementaux des matières premières calculés par ACV (Garcia-Launay et al., 2018). Les aliments ainsi formulés, sont désignés par le terme « Eco-aliment ».

3. Le concept de l'Eco-Aliment

Un éco-aliment est défini comme un aliment composé dont la fabrication répond à des objectifs de réduction des impacts environnementaux, en mobilisant des matières premières plus écologiques vis-à-vis du changement climatique, de la consommation de phosphore, de la consommation d'énergie non renouvelable, de l'occupation des terres, de l'acidification et de l'eutrophisation. L'augmentation de prix par rapport à un aliment formulé à moindre coût devant rester la plus faible possible. Autrement dit, les éco-aliments sont élaborés à partir d'une formulation multi objectif qui cherche à satisfaire conjointement trois critères : répondre aux besoins nutritionnels des animaux ; minimiser le prix et réduire plusieurs impacts environnementaux liés à la nature des matières premières (Dusart et al., 2016, Wilfart et al., 2018, RMT 2019).

En production de poulet de chair, l'utilisation d'un éco-aliment dont les impacts sur la consommation de phosphore, la consommation d'énergie non renouvelable et le changement climatique sont respectivement réduits de 12 %, 20 % et 18 %, conduit à une réduction similaire des impacts environnementaux du produit (respectivement 11 %, 18 % et 17 % par kilo de poulet vif produit), sans effet négatif sur les autres impacts environnementaux et pour une augmentation du coût de production inférieure à 1 % (Dusart et al., 2016). Qu'en est-il en ce qui concerne les effets de l'utilisation d'un éco-aliment en aquaculture. En effet, les travaux réalisés chez les poissons montrent qu'une modification de la composition en matières premières des aliments affecte sensiblement les performances de croissance des animaux même si les besoins nutritionnels des poissons sont couverts. Par exemple, chez la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), de nombreuses études font état de baisses de performances de croissance (**figure 5**) lorsque la farine et l'huile de poisson sont remplacées par des matières premières d'origine végétales (Le Boucher et al. 2011; Veron et al. 2016; Lazzarotto et al. 2018).

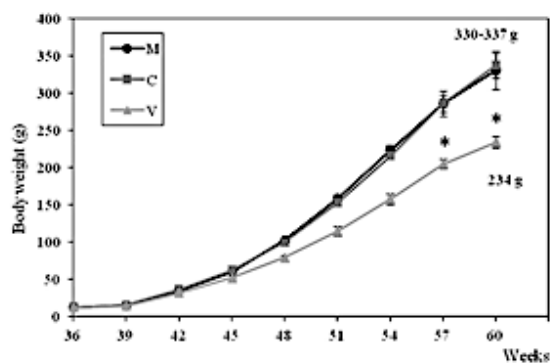


Figure 5: Effet du remplacement de la farine et l'huile de poisson par des matières premières végétales sur la croissance de la truite arc-en-ciel. (source : Lazzarotto et al 2018)

Les résultats de cette étude montrent une baisse significative de croissance pondérale du groupe de poissons nourris avec l'aliment végétal (V ; 0% farine poisson et 0% d'huile de poisson ; 234 ± 7 g) par rapport aux groupes de poissons nourris avec les aliments marin (M - 54,3% farine poisson et 13.6% d'huile de poisson ; 330 ± 25 g) et commercial (30% farine poisson et 8% d'huile de poisson ; 337 ± 17 g). Aucune différence significative de poids corporel n'a été constatée entre les groupes M et C.

4. Objectifs du stage

Avec une production de 41.000 tonnes en 2018 (CIPA), la truite arc-en-ciel représente 96% de la production piscicole d'eau douce française et la troisième espèce aquacole produite après l'huître et la moule (CIPA). Dans ce contexte, l'objectif de mon stage de Master 2 était d'évaluer les conséquences de la prise en compte du coût et des impacts environnementaux dans la formulation des aliments aquacoles sur les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel. La modification des formules alimentaires pose la question des interactions entre matières premières en particulier sur la palatabilité, l'efficacité d'utilisation métabolique des nutriments, voire la sensibilité des animaux à la nature de certains ingrédients.

De façon spécifique, l'étude a consisté à :

- Comparer les performances zootechniques (croissance, efficacité alimentaire, composition corporelle) de la truite arc-en-ciel nourrie avec trois régimes alimentaires : un régime de Type commercial actuel (Type C), un régime à faible impact environnemental (EcoA) et un régime formulé à moindre coût (MDC). L'impact environnemental de l'aliment étant estimé sur la base des impacts environnementaux des différents ingrédients déterminés au préalable par analyse de cycle de vie.
- Evaluer la digestibilité des aliments ainsi formulés.

Matériels et méthodes

Mon stage de Master 2 a comporté deux expérimentations : une mesure de digestibilité et un essai de croissance. Ces expérimentations ont été réalisées dans le cadre d'un projet scientifique sur le développement d'aliments à faible impacts environnementaux pour la truite et le porc. Trois unités de recherche du département INRAE Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage (PHASE) participent à ce projet : les UMR SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation) et PEGASE (Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les

Systèmes d'Élevage) de Rennes et l'UMR NuMÉA (Nutrition, Métabolisme, Aquaculture) de Saint Pée sur Nivelles où j'ai réalisé mon stage. Ce projet est soutenu par le département PHASE dans le cadre de sa politique de crédits incitatifs.

1. Régimes expérimentaux

1.1. Formulations

Les 3 trois régimes (Moindre coût - MDC, Eco-Aliment – EcoA et Type Commercial - Type C) utilisés au cours de mon stage, ont été formulés à l'aide de la méthode de formulation multi-objectif développée par F. Garcia Launay (2017) (MDC et ECOAE) et du logiciel de formulation Allix (Type C) par F. Terrier (NuMÉA, pisciculture de Donzacq) (**Tableau 1**). Les régimes ont été formulés pour être isoprotéiques, isolipidiques et isoénergétiques et répondre aux besoins nutritionnels de la truite arc-en-ciel (NRC 2011). Ces aliments ont été produits dans l'atelier de fabrication d'aliments de la pisciculture expérimentale INRAE de Donzacq (Landes, France) puis conservés au froid (+4°C) jusqu'à leur distribution aux poissons. Pour la fabrication des aliments, les mélanges de matières premières sans huiles ont été soumis à une cuisson extrusion sous pression puis granulés avec un extrudeur Clextral double vis bc 45. L'huile a été enrobée après séchage dans un mélangeur sous-vide. Deux granulométries (5mm et 7mm) ont été préparées pour chaque régime pour une meilleure adaptation des poissons au fur et à mesure de leur croissance.

Tableau 1. Composition des 3 régimes expérimentaux utilisés. (Mdc = Moindre coût ; EcoA = Eco-aliment, Type C= type commercial)

Ingrédients	Type C	MDC	EcoAlim
Concentré protéique de Soja Estril 75	25	0	0
Féverole	17	0	0
Farine de poisson 4 LT	16	9,7	7,24
Huile de Colza	13,18	6,81	6,82
Huile de poisson	6,53	3,58	3,61
Tourteau de soja tracé	6,09	0	0
Gluten de maïs	6	0,7	0
Gluten de blé	2,5	0	0
Blé entier	2	18	17,3
Attractant Aquativ HP1-S1 (hydrolysate crevettes)	2	2	2
Premix Minéraux	1,16	1	1,37
Premix Vitamines	1,16	1	1
L-Lysine	0,6	0,4	0,4
L-Méthionine	0,6	0,31	0,34
Dicalcium Phosphate	0,1	1,5	1,5
Yttrium	0,05	0,05	0,05

Carophyll pink (astaxanthine)	0,03	0,03	0,03
Concentré protéique de Pois Lysamine	0	19,99	19,99
Tourteau de colza	0	7,45	7,94
Farine de plume hydrolysée	0	13,52	13,98
Farine de sang volaille et porc	0	1,25	1,59
Farine de Pois dépelliculé	0	0,56	0,53
Tourteau Guar Roasted	0	2,63	2,97
Levure nutrisaf 503	0	0	1,82
L-Thréonine	0	0,2	0,2
Huile de Lin	0	0,02	0,02
Huile de volaille	0	3,55	3,55
Lécithine soja poudre	0	5,76	5,76
Concentré protéique de pomme de terre	0	0	0,01

1.2. Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux des aliments (**Tableau 2**) ont été calculés sur la base des impacts environnementaux de chaque ingrédient au prorata du taux d'incorporation. Les impacts environnementaux pris en compte dans cette étude sont les suivants :

- **la consommation de phosphore**, exprimée en kg P/kg ;
- **le changement climatique**, exprimé en kg de dioxyde de carbone (kg CO₂-eq/kg), qui repose sur la quantification des émissions de gaz à effet de serre ;
- **l'acidification**, exprimée en kg d'équivalent dioxyde de soufre (kg SO₂-eq/kg), qui évalue l'acidification potentielle des sols et des eaux due à la production de molécules acidifiantes dans l'air, les sols ou les eaux ;
- **l'eutrophisation**, exprimée en kg d'équivalent phosphates (kg PO₄-eq/kg), qui évalue une dégradation potentielle du milieu aquatique par le déversement de substances azotées et phosphorées induisant une prolifération d'algues qui consomment l'oxygène disponible ;
- **l'occupation des terres**, exprimée en m².an/kg, qui définit la surface annuelle mobilisée par le système d'élevage ;
- **l'utilisation d'énergie non renouvelable**, exprimée en Méga Joules (MJ/kg), qui regroupe l'ensemble des ressources énergétiques non renouvelables utilisées pour la production de l'ingrédient ;
- **l'utilisation de production primaire nette**, exprimée en kg de carbone (kg C/kg), qui reflète la pression sur la chaîne trophique par l'évaluation de la quantité de carbone issue de la photosynthèse nécessaire à la production d'une unité de poids de l'animal considéré ;
- **la demande en eau**, exprimée en m³/kg

Tableau 2: Bilan des matières premières utilisées et leurs impacts environnementaux.

CATEGORIE D'IMPACT MATIERE PREMIERE	CP (kgP/kg)	CC (kgCO2 eq/kg)	AC(mol H ⁺ eq/kg)	EU (kg PO4³⁻ eq/kg)	OT (m2.an/kg)	ENR (MJ/kg)	UPPN (kg C/kg)	DE (m3/kg)
Schizochytrium	0.001	0.988	0.011	0.002	0.486	17.163	0.310	26.304
Ble	0.004	0.461	0.011	0.004	1.340	3.391	0.163	0.142
Concentré protéique de soja	0.018	1.955	0.012	0.007	0.372	21.386	0.166	0.326
Concentré protéique de pois	0.006	0.413	0.003	0.006	0.037	4.850	0.188	0.952
Concentré protéique de féverole	0.011	0.824	0.008	0.011	4.899	15.429	0.176	6.047
Levure	0.002	1.367	0.004	0.001	0.066	41.764	0.719	0.416
Farine de poisson	0.000	0.925	0.013	0.002	0.016	17.739	1.771	26.849
Féverole décortiquée	0.005	0.301	0.003	0.004	2.321	3.614	0.170	0.064
Gluten de ble	0.011	2.385	0.037	0.014	4.189	38.462	0.159	0.515
Gluten de maïs	0.007	1.959	0.036	0.015	2.169	23.904	0.168	1.392
Huile de colza	0.002	1.583	0.036	0.014	5.749	9.698	0.249	0.401
Huile de lin	0.017	1.852	0.036	0.020	10.315	15.869	0.249	0.496
Huile de palme	0.003	2.845	0.012	0.009	1.597	9.499	0.249	2.641
Huile de poisson	0.000	2.396	0.023	0.005	0.034	48.123	2.264	83.179
Farine d'insecte hydrolyse	0.060	19.398	0.296	0.115	50.152	283.477	1.875	98.176
PAT de volaille	0.001	0.095	0.002	0.000	0.097	1.284	0.843	0.041
Farine de sang	0.000	0.131	0.000	0.000	0.004	2.788	0.843	0.014
Protéines de plumes	0.000	0.193	0.001	0.000	0.022	5.061	0.843	0.037
Tourteau de colza	0.000	0.347	0.008	0.003	1.212	2.285	0.162	0.085
Tourteau de korma	0.008	0.879	0.012	0.013	0.031	8.367	0.191	3.236
Tourteau de soja	0.013	1.116	0.007	0.005	1.528	12.149	0.165	0.190

Choline	0.005	3.985	0.031	0.011	2.312	121.788	0.000	1.748
Méthionine	0.001	3.011	0.011	0.002	0.033	89.677	0.000	0.820
Lécithine	0.000	1.759	0.039	0.015	6.218	11.694	0.276	7.281
Lysine	0.005	3.985	0.031	0.011	2.312	121.788	0.000	1.748
Thréonine	0.005	3.942	0.031	0.010	2.306	121.020	0.000	1.745
Phosphate mono calcique	0.351	1.347	0.021	0.009	0.477	25.383	0.000	5.120
Phytase	0.000	1.971	0.002	0.000	0.007	27.387	0.000	11.412
Complément oligo-vitaminique	0.000	1.500	0.063	0.022	0.194	27.236	0.000	1.100
Vitamine C monophosphate	0.000	2.603	0.015	0.005	0.206	38.239	0.000	1.141
Antifongique	0.001	2.682	0.190	0.115	0.459	39.506	0.000	2.392
Antioxydant	0.000	2.647	0.015	0.005	0.211	39.007	0.000	1.144
Astaxanthine	0.005	3.985	0.031	0.011	2.312	121.788	0.000	1.748

CP = Consommation de Phosphore, CC= Changement Climatique, AC= Acidification, EU= Eutrophication, OT= Occupation des terres, ENR = Demande en Energie non Renouvelable, UPPN= Demande en Production Nette Primaire, DE= Demande en eau (source : Garcia-Launay et al., 2018)

2. Protocoles expérimentaux

Les expérimentations ont été effectuées dans le respect des lois françaises et européennes relatives à la protection et au respect du bien-être des animaux utilisés à des fins scientifiques (Directive 2010/63/EU). Les protocoles expérimentaux n'ont pas été soumis à un comité d'éthique car les régimes utilisés ont été formulés de façon à couvrir les besoins nutritionnels des poissons et les prélèvements de poissons ont tous été effectués après sédation dans un bain de benzocaïne à 30mg/L puis euthanasie dans un bain de benzocaïne à 90mg/L.

2.1- Digestibilité

2.1.1. Dispositif expérimental

L'expérience destinée à l'évaluation de la digestibilité des régimes a été conduite dans les structures expérimentales (plateau technique) de l'Aquapôle INRAE de Saint Pée sur Nivelles. L'atelier digestibilité est composé d'un ensemble de 18 bacs cylindro-coniques de volume utile de 100 litres (**figure 6**). Ces bacs sont alimentés par un circuit en eau recyclée thermo-régulé comprenant un décanteur et un filtre biologique (épurateur azoté).

Un collecteur automatique de fèces à grilles rotatives (Choubert et al., 1979, **figure 7**) est positionné en face de chaque bac. L'eau d'évacuation des bacs cylindro-coniques est filtrée en continu sur des grilles métalliques dont la rotation est entraînée par un moteur électrique. Les palettes grillagées se succèdent horizontalement en un mouvement continu sous la sortie d'eau du bac. L'eau passe à travers la grille, les fèces restent à la surface et sont ainsi séparés de l'eau. Une fois qu'elles ne sont plus sous la sortie d'eau, les palettes passent en position verticale puis butent sur une structure métallique. Le choc permet aux fèces de tomber dans les récipients collecteurs. Le lessivage est minimisé. En effet, le temps de séjour des fèces dans l'eau est très court (environ 5 à 10 secondes) grâce à la forme cylindro-conique des bacs et au débit d'eau contrôlé. Ainsi, pendant toute la durée de l'essai, le débit d'eau dans les bacs a été maintenu entre 4 et 6 litres par minute afin d'entraîner rapidement les fèces vers le collecteur et d'éviter leur lessivage.

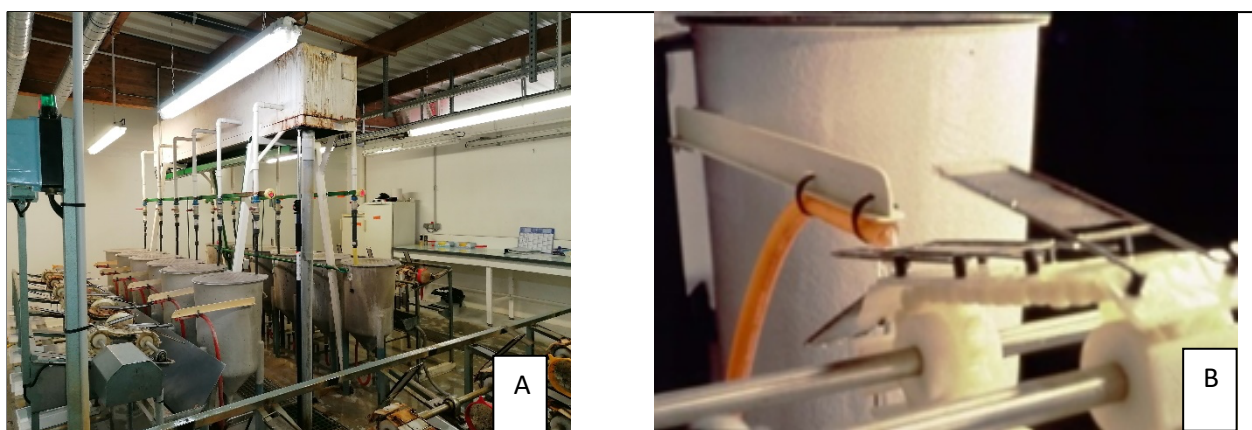
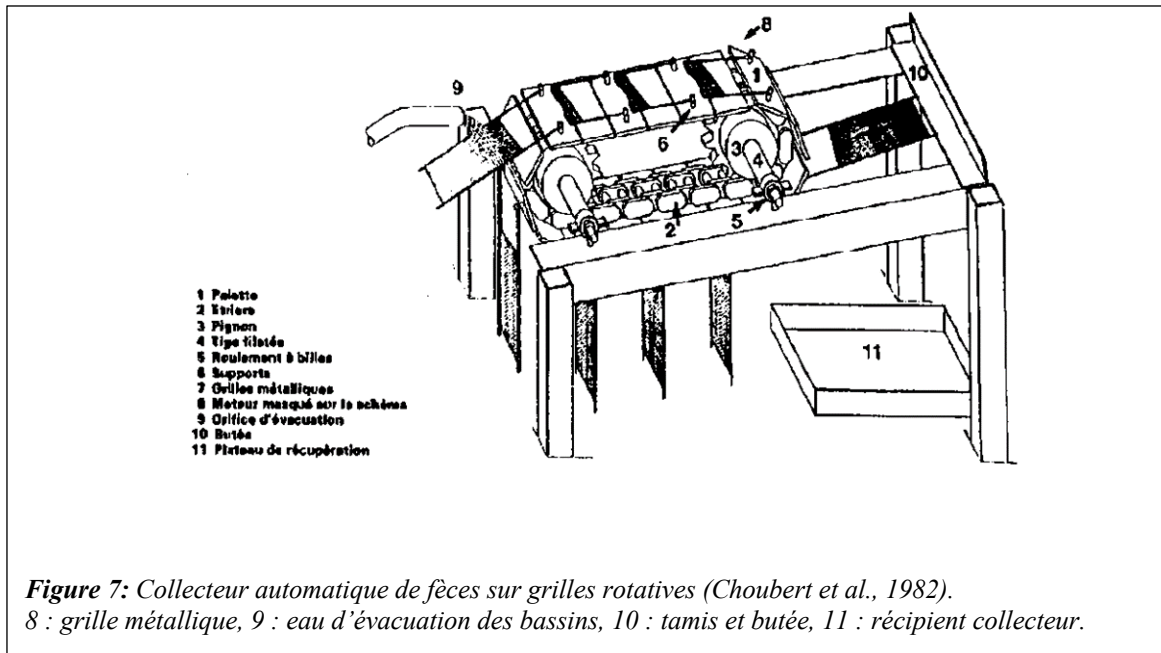


Figure 6: Bacs cylindro-coniques de l'atelier digestibilité de l'INRAE St-Pée-sur-Nivelles(A) et gros plan de la sortie d'eau d'un bac sur les grilles rotatives du système de récolte automatique de fèces(B)

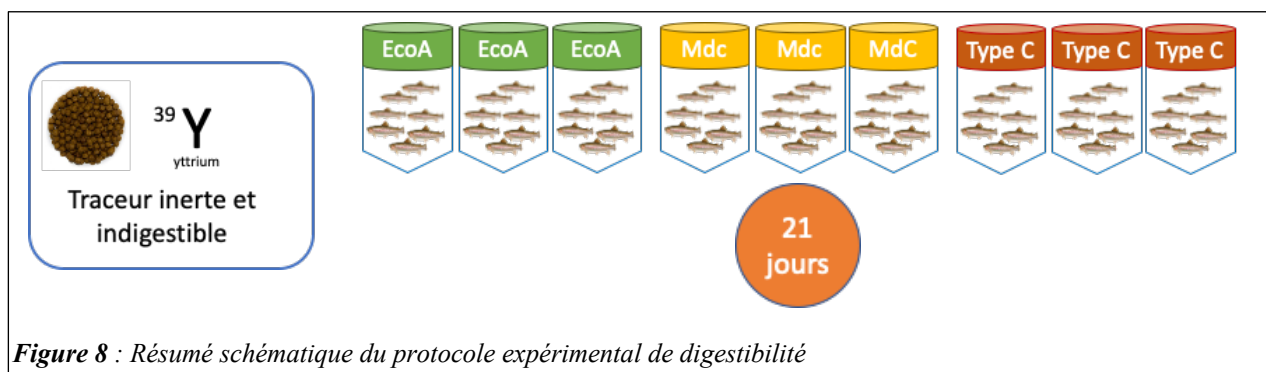


2.1.2. Protocole expérimental

Neuf lots (3 lots par régime) de 15 truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) d'un poids moyen de 100g ont été constitués à partir d'un groupe de poissons provenant de la pisciculture expérimentale de INRAE de Donzacq (Landes, France). Ces lots de poissons ont été placés dans les bacs cylindro-coniques et adaptés aux conditions d'élevage du circuit en eau recyclée de l'atelier de digestibilité (**figure 8**). La phase d'acclimatation aux régimes expérimentaux précédant la collecte des fèces a été fixée à une semaine. Cette phase permet aux coefficients d'utilisation digestives (CUDA) de se stabiliser (Noüe et al., 1980).

La teneur en oxygène dissous de l'eau a été contrôlée quotidiennement et maintenue en entrée à 9 ppm et autour de 7 ppm en sortie de bassin. L'épuration azotée de l'eau des bassins a été maximale, la teneur en azote ammoniacal (N-NH₄) était de zéro en sortie de filtre biologique. La température de l'eau a été réglée à 17± 0.5°C et la période d'éclairage a été de 12 heures (8h-20h).

Chaque régime a été distribué à 3 lots de poissons, 2 fois par jour jusqu'à satiété visuelle, pendant une durée de 3 semaines afin d'obtenir une quantité suffisante de fèces. Les fèces ont été collectées une fois par jour dans des bacs en aluminium et stockées à -20°C.



2.1.3. Calcul des coefficients d'utilisation digestive

La détermination des coefficients d'utilisation digestive apparente (CUDa) a été effectuée par la méthode indirecte. Cette méthode est basée sur l'analyse des concentrations en yttrium, traceur inerte et indigestible, ne modifiant pas le processus de digestion, dans les aliments et dans les fèces. L'avantage de cette méthode est de n'avoir à quantifier ni l'ingéré ni l'excrété. Les CUDa des nutriments des aliments ont été calculés selon la formule de Maynard et al. (1969), à partir des données obtenues à l'issue des analyses de composition des aliments et des fèces.

Calcul du **CUDa de la matière sèche (MS)** de l'aliment :

$$CUDa_{MS} = \left[1 - \left(\frac{\% \text{Yttrium aliment}}{\% \text{Yttrium fèces}} \right) \right] \times 100$$

Calcul des **CUDa des nutriments (protéines, lipides, amidon, minéraux) et de l'énergie** des aliments :

$$CUDa_{\text{nutriment}} = \left[1 - \left(\frac{\% \text{Yttrium aliment}}{\% \text{Yttrium fèces}} \right) \times \left(\frac{\% \text{nutriment fèces}}{\% \text{nutriment aliment}} \right) \right] \times 100$$

2.2. Croissance

2.2.1. Protocole Expérimental

L'expérience a été conduite dans la pisciculture expérimentale de Donzacq (Landes, France). Les poissons, toutes femelles, d'un poids moyen initial de 60 grammes sont issus de croisement entre femelles provenant de la pisciculture expérimentale de Léés-Athas et de sperme de néo-males de la Pisciculture Expérimentale INRAE des Monts d'Arrée (PEIMA). L'éclosion et le pré-grossissement ont eu lieu à Léés-Athas. Les poissons sont arrivés à Donzacq au mois d'août 2019.

Au total, 9 lots (3 lots par régime) de 27 truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) ont été répartis dans des bassins de 150 litres. Le taux d'oxygène a été maintenu supérieur à 7 mg/l en sortie de bassin. Les poissons ont été nourris ad libitum 2 fois par jour jusqu'à satiété visuelle. Ils ont été nourris les 6 premières semaines, avec des granulés de 5mm avant de passer à des granulés de 7 mm jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Des pesées de contrôle de biomasse ont été réalisées toutes les 3 semaines sur des poissons mis à jeun 24h auparavant. Pour ces pesées, une lessiveuse est remplie de 20 litres d'eau, posée sur une balance et tarée. Les poissons sont pêchés grâce à une épuisette et placés dans une autre lessiveuse. Le lot entier est versé dans une épuisette pour être placé dans la lessiveuse posée sur la balance. Le poids est noté et les poissons remis dans les bassins. Les poissons morts ont été comptés, pesés et enregistrés. La quantité d'aliments distribuée au bout des 3 semaines, a également été mesurée.

2.2.2. Calcul des indicateurs de performances

Les indicateurs de performances zootechniques ont été calculés de la manière suivante.

- **Poids moyen initial (g) - pmi**

$$pmi = \frac{\text{Biomasse initiale du bassin}}{\text{Nombre de poissons}}$$

- **Poids moyen final (g) - pmf**

$$pmf = \frac{\text{Biomasse finale du bassin}}{\text{Nombre de poissons}}$$

- **Gain de poids relatif - gpr**

$$gpr = \frac{(\text{Poids moyen final} - \text{Poids moyen initial}) \times 100}{\text{Poids moyen initial} \times \text{nombre de jours}}$$

- **Gain de poids individuel-gp**

$$gp = \frac{(\text{Poids moyen final} - \text{Poids moyen initial})}{\text{Nombre de jours}}$$

- **Taux de croissance spécifique – TCS**

$$TCS = \frac{\text{Ln}(\text{Poids moyen final}) - \text{Ln}(\text{Poids moyen initial})}{\text{Nombre de jours} \times 100}$$

- **Indice de croissance journalier - ICJ**

$$ICJ = \frac{(\text{Poids moyen final})^{1/3} - (\text{Poids moyen initial})^{1/3}}{\text{Nombre de jours} \times 100}$$

- **Indice de conversion – IC**

$$IC = \frac{\text{Quantité d'aliment distribuée}}{(\text{Biomasse finale} + \text{biomasse d'individus morts}) - \text{Biomasse initiale}}$$

- **Consommation journalière – CJ**

$$CJ = \frac{\text{Quantité d'aliment distribuée} \times 100}{\frac{(\text{Biomasse finale} + \text{biomasse initiale})}{2} \times \text{Nombre de jours}}$$

- **Efficacité alimentaire - EA**

$$EA = \frac{(\text{Biomasse finale} + \text{Biomasse d'individus morts}) - \text{Biomasse initiale}}{\text{Quantité d'aliment distribuée}}$$

L'ingestion ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$), le gain ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$) et le pourcentage de rétention des nutriments ont été calculés pour les protéines, les lipides et l'énergie digestible de la manière suivante :

$$\text{Ingestion} = \frac{\text{quantité de X dans l'aliment \%f} \times \text{DFI}}{100}$$

$$\text{Gain} = \frac{\frac{\text{qt é de X dans le poisson fin} \times \text{pmf}}{100} - \frac{\text{qt é de X dans le poisson ini} \times \text{pmi}}{100}}{\frac{\text{pmi} + \text{pmi}}{2} \times 10^{-3} \times \text{nombre de jour}}$$

$$\text{Rétention} = \frac{\text{Gain}}{\text{Ingestion}} \times 100$$

Avec

X : quantité de protéines, lipides, ou énergie digestible en pourcentage de matière fraîche (%f)

DFI : prise alimentaire journalière = quantité d'aliment consommée par kilogramme de poisson et par jour ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$)

pmi : poids moyen initial

pmf : poids moyen final

2.3. Analyses de composition biochimique des aliments, des fèces et des poissons

Avant analyse, les aliments et les matières premières ont été broyés pour assurer l'homogénéité des échantillons. Les fèces issues de l'expérimentation de digestibilité et les poissons ont été lyophilisés et broyés.

2.3.1. Matière sèche

La teneur en matière sèche a été déterminée à partir de la mesure de perte d'eau des échantillons, évaluée par différence de masse de la prise d'essai, avant et après dessiccation pendant 24h dans une étuve à 105°C.

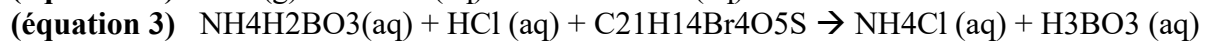
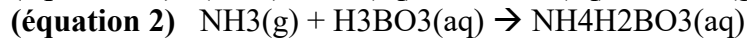
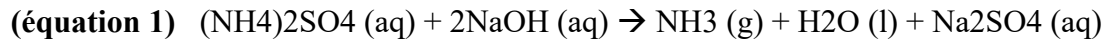
$$\% \text{ de matière sèche (MS)} = \frac{\text{masse de l'échantillon sec (g)}}{\text{masse de l'échantillon initial (g)}} \times 100$$

2.3.2. Protéines

La teneur en protéines brutes a été mesurée à partir du dosage de l'azote total (N), à l'aide d'un appareil Kjeltex (auto analyser 1030) et selon la méthode de Kjeldhal (1883). L'échantillon est minéralisé à chaud (440°C) par de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) en présence d'un catalyseur (mélange de sulfate de potassium (K_2SO_4) et de sélénium (Se)). L'azote produit est fixé par de l'acide sous forme de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).



Par addition d'une solution de soude, l'ammoniac est libéré (équation 1) et recueilli dans une solution d'acide borique (H_3BO_3), provoquant la formation de borate d'ammonium ($NH_4H_2BO_3$) (équation 2). Le borate d'ammonium est ensuite titré à l'aide d'une solution d'acide sulfurique de concentration connue (0,125N) en présence de vert de bromocrésol ($C_{21}H_{14}Br_4O_5S$) (équation 3). Le taux de protéines est directement indiqué par l'appareil Kjelttec dans lequel est entrée au préalable la masse de l'échantillon.



2.3.3. Lipides

Deux méthodes ont été utilisées : la méthode Soxtherm pour analyser les aliments et la méthode de Folch pour l'analyse des fèces, en raison des faibles quantités de lipides que comportent ces dernières.

Méthode Soxtherm (méthode AOAC 920.39)

Le principe consiste en une extraction des lipides de l'échantillon (prise d'essai d'environ 2 g) à chaud ($155^\circ C$), par de l'éther de pétrole. L'élimination du solvant est ensuite effectuée par évaporation et le résidu est séché à $105^\circ C$ pendant 1 heure dans une étuve puis dans un dessiccateur sous vide pendant 2h. La masse des lipides est ensuite déterminée par pesée après évaporation de la totalité du solvant et refroidissement. Les résultats sont exprimés par rapport au taux de matière sèche.

Méthode de Folch (1957)

La méthode d'extraction décrite en 1957 par Folch et al., (1957) permet d'isoler et de purifier les lipides totaux contenus dans les tissus animaux. L'homogénéisation d'un échantillon dans une solution de dichlorométhane et de méthanol permet d'extraire les lipides contenus dans les tissus organiques. L'extraction implique dans un premier temps l'obtention d'une solution monophasique composée de lipides dissous mais également de contaminants aqueux. La phase apolaire de l'homogénat contenant les lipides peut ensuite être séparée de la phase polaire hydrophile par ajout d'une solution saline. On obtient alors une solution biphasique dont la phase organique inférieure est récupérée et évaporée afin d'en isoler les lipides totaux par chromatographie en phase gazeuse.

2.3.4. Energie

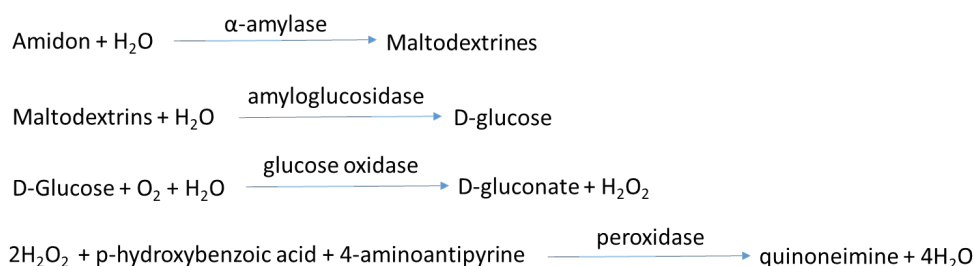
L'énergie calorifique brute, aussi appelée chaleur de combustion ou pouvoir calorifique, représente l'énergie thermique produite lors de la combustion d'une matière combustible par le dioxygène O_2 . Cette énergie brute a été déterminée à l'aide d'un calorimètre à bombe adiabatique (IKA C4000), à partir de la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un échantillon de masse connue (prise d'essai d'environ 300 mg), sous une pression d'oxygène de 25 atmosphères. Les résultats sont exprimés par rapport au taux de matière sèche.

$$H_0 = - \frac{C \times \Delta T^\circ - Q_1 - Q_2}{m}$$

C : capacité calorifique du calorimètre ou constante de bombe (kJ/g)
 T° : augmentation de la température au cours de la combustion (°C)
 Q1 : somme des quantités de chaleurs parasites (kJ/g)
 Q2 : quantité de chaleur dégagée par la gélule vide (kJ/g)
 m : la masse sèche de l'échantillon (g)

2.3.5. Amidon

Le dosage de l'amidon total a été effectué par une méthode enzymatique « Megazyme » (AOAC 996.11) basée sur l'utilisation de l'amylase thermostable α -amylase et de l'amyloglucosidase (Hall, 2015).



2.3.6. Cendres

La teneur en cendre a été déterminée par différence de masses après incinération des lyophilisats à 550°C pendant 12h dans un four à cendres.

2.3.7. Yttrium

La teneur en yttrium est déterminée sur les cendres en utilisant le spectromètre Agilent d'émission atomique à plasma micro-ondes (Agilent 4200 MP-AES) après minéralisation acide (méthode ISO 27085 :2009).

2.4. Analyses statistiques

2.4.1. Tests statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 3.6.2, <https://www.R-project.org/>). Les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne \pm erreur standard moyen (ESM, n = 3). La normalité des données et l'homogénéité de la variance ont été respectivement vérifiées par les tests de Shapiro-Wilk et de Batlett. Les données ont été testées par une analyse de variance (ANOVA) à un facteur pour mesurer l'effet des régimes sur les paramètres zootechniques considérés et la digestibilité des matières premières et des aliments. En cas de différence significative, un test post-hoc (Tukey) de comparaisons des moyennes deux à deux était effectué. Pour toutes les analyses statistiques, le niveau de signification a été fixé au seuil de 5%.

2.4.2. Détermination de l'équation de la droite de croissance

L'effet du régime sur la croissance des poissons a été déterminé. Étant donné que plusieurs mesures successives ont été effectuées sur un même bac, un modèle de régression linéaire mixte avec effet aléatoire du facteur « bac » a été utilisé. Le modèle décrivant l'effet est du type $y = ax + b$ où : **y** : est la biomasse au temps **x**, **a** : la pente de la droite de régression, **x** : le temps (durée de l'expérience : 0 - 84) et **b** : le poids initial au temps $x = 0$. La fonction « lme » (package lme4) du logiciel de R a été utilisé.

RESULTATS

Au cours des deux essais expérimentaux (digestibilité et croissance), aucune mortalité n'a été enregistrée et les poissons n'ont présenté aucun signe pathologique. Les trois régimes ont été bien acceptés par les poissons.

1. Composition des régimes expérimentaux

Le **tableau 3** présente les compositions biochimiques théoriques et analytiques des régimes expérimentaux (EcoA, Mdc et Type C).

Tableau 3 : Composition biochimique des aliments expérimentaux

Valeurs théoriques

Aliment	Protéines (% frais)	Lipides (% frais)	Energie (KJ/g frais)	Amidon (% frais)
EcoA	43,88	21,40	23,14	9,58
MdC	43,99	21,34	23,12	10,25
TypeC	43,97	21,50	23,67	8,33

Valeurs analytiques

Aliment	Matière sèche (%)	Protéines (% MS ¹)	Lipides (% MS)	Energie (KJ/g MS)	Cendres (% MS)	Amidon (% MS)
EcoA 5mm	97,17	48,17	23,71	24,56	6,75	11,11
EcoA 7mm	97,51	47,17	23,86	24,61	7,62	11,11
MdC 5mm	97,02	48,15	23,14	24,56	6,43	11,54
MdC 7mm	97,12	46,27	24,55	24,67	6,57	11,54
TypeC 5mm	96,68	47,36	24,27	25,86	6,19	9,15
TypeC 7mm	96,60	47,38	23,12	25,57	6,14	9,15

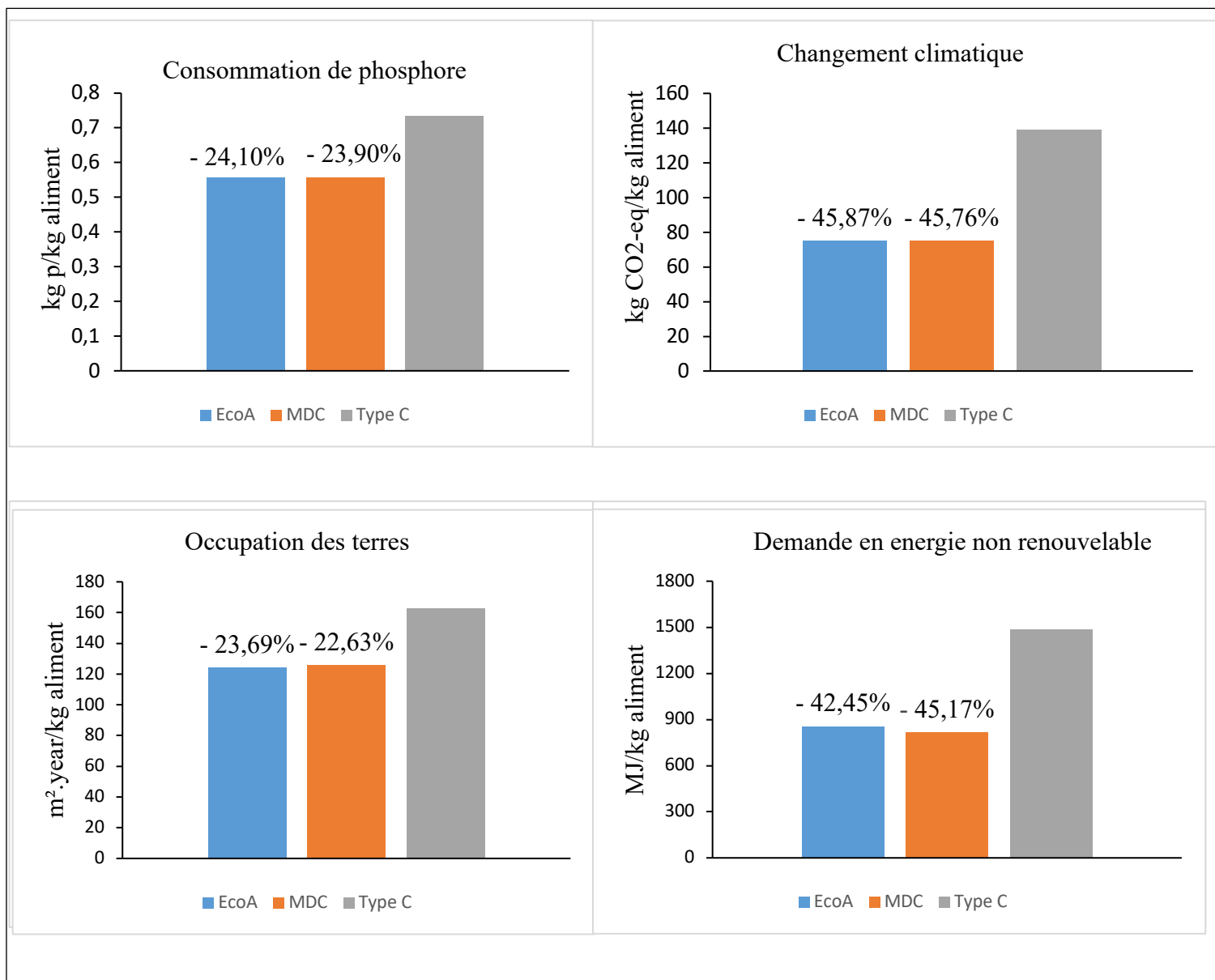
¹MS = Matière sèche

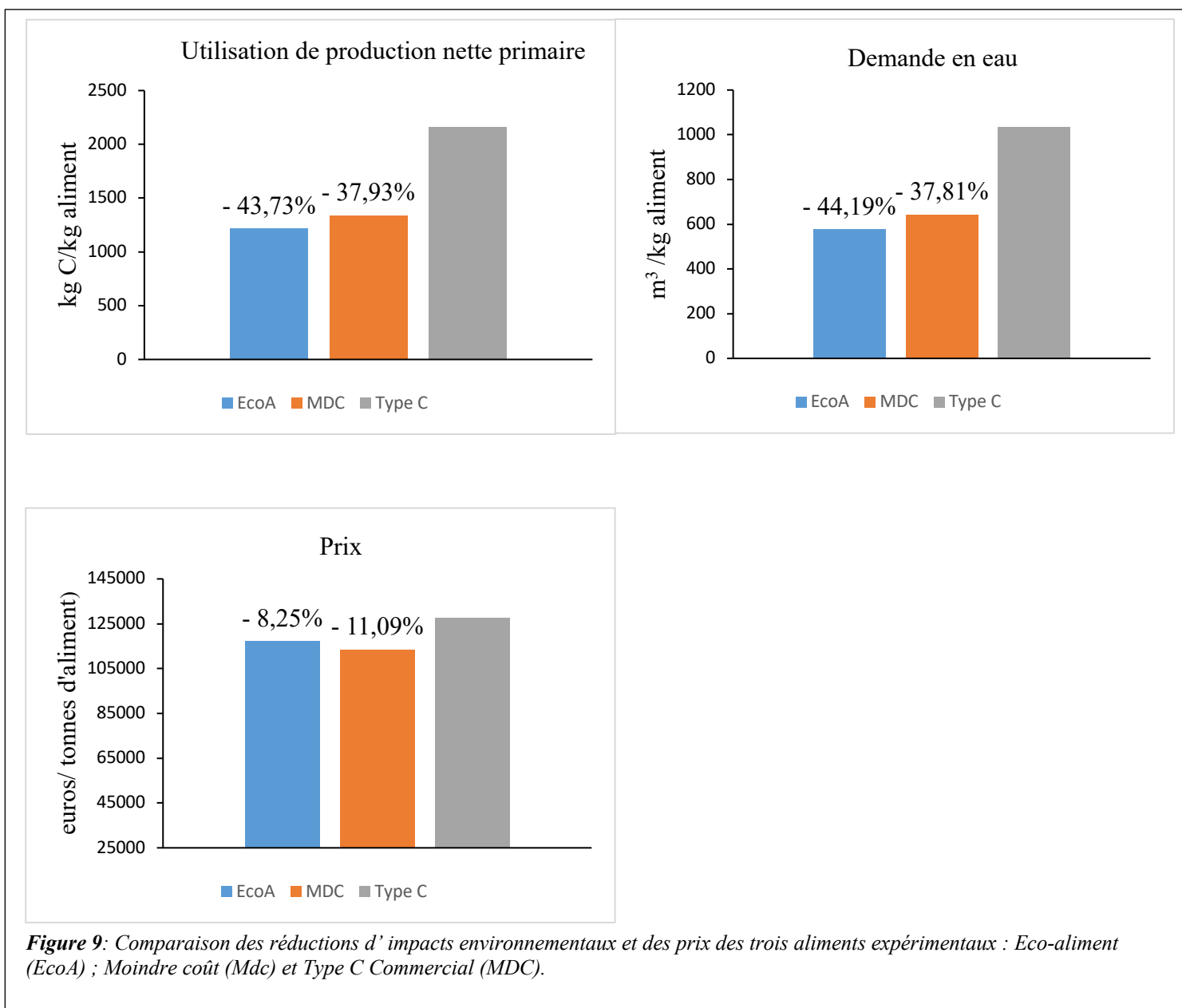
Les aliments expérimentaux, présentent une composition en protéines (> 40%), lipides (>20%) et énergie (20%) permettant de couvrir les besoins nutritionnels de la truite arc-en-ciel. La composition analytique des aliments correspond globalement aux valeurs théoriques obtenues lors des formulations. Les variations de composition entre les aliments granulés à 5

mm et 7 mm sont minimales et peuvent être attribuées à la variabilité analytique. Les aliments produits sont toutefois sensiblement isoprotéiques, isolipidiques et apportent la même quantité d'énergie. L'aliment commercial présente une teneur en amidon légèrement plus faible que les deux autres aliments conformément à la formulation.

2. Impacts environnementaux des régimes

Les bénéfices environnementaux des aliments EcoA et Mdc, de même que le prix, ont été calculés. La **figure 8** présente les réductions d'impacts observées à la tonne d'aliment produite. Les résultats indiquent une réduction de 25 - 45% des impacts environnementaux des aliments EcoA et Mdc en comparaison à l'aliment Type C. En ce qui concerne le prix, les aliments EcoA et Mdc n'engendrent pas un surcoût de production. Il y a même une réduction du coût de 8% et de 11% respectivement pour ces aliments en comparaison à l'aliment Type C.





3. Digestibilité des régimes

Le **tableau 4** présente les coefficients d'utilisation digestive apparente (CUDA) des composants nutritifs des aliments expérimentaux utilisés dans l'étude, obtenus dans nos conditions expérimentales.

Tableau 4: Coefficients d'utilisation digestive apparente (%) des régimes expérimentaux.. Les résultats sont exprimés en Moyenne \pm ESM de trois répétitions. Les valeurs (Moyenne \pm ESM, n=3) affectées par des lettres différentes, sont significativement différentes

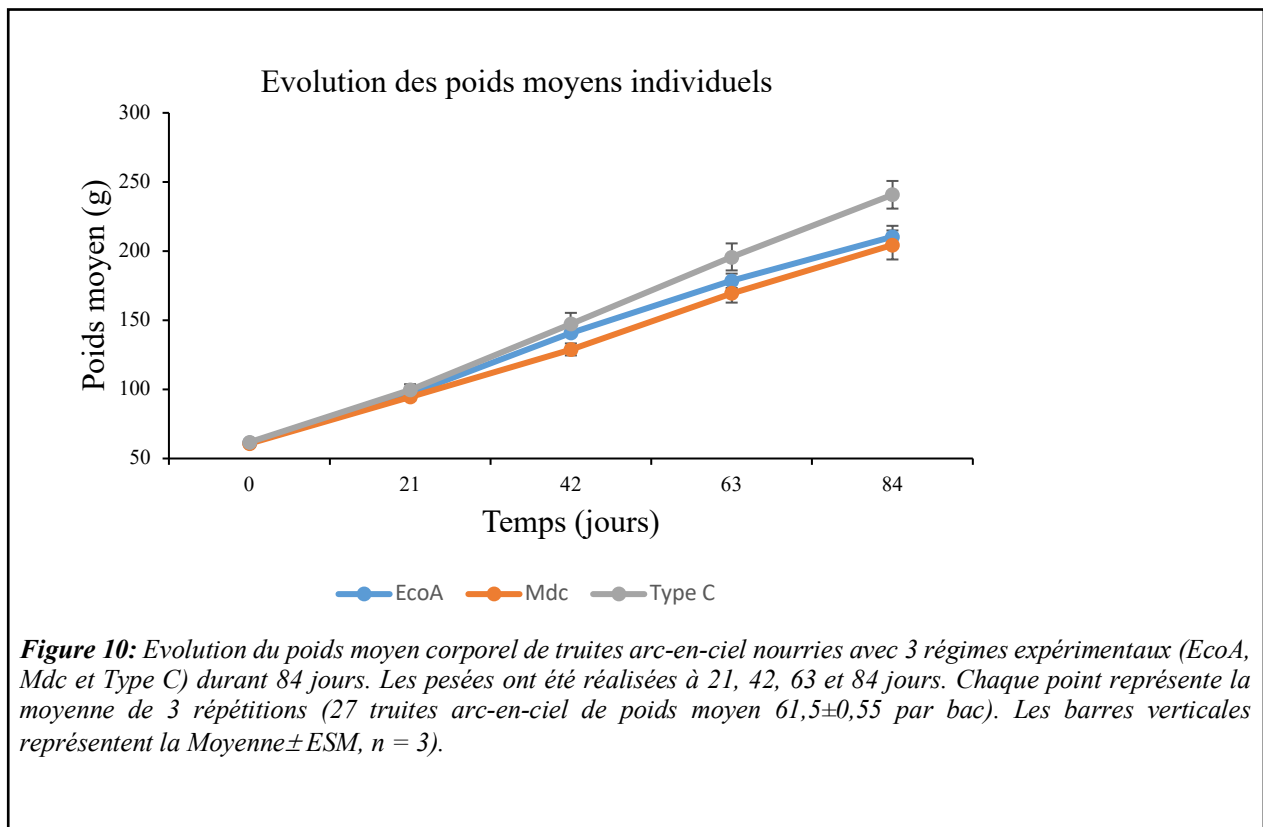
Régime	CUDA MS%	CUDA Prot %	CUDA E %	CUDA Lp %	CUDA Min. %	CUDA Amidon%
EcoA	81,45 \pm 0,15	91,01 \pm 0,17	87,27 \pm 0,29 ^{ab}	93,99 \pm 0,08 ^a	38,81 \pm 0,3	97,66 \pm 0,32 ^a
Mdc	80,45 \pm 1,07	90,6 \pm 0,51	86,31 \pm 0,78 ^a	93,33 \pm 0,4 ^a	38,18 \pm 2,94	93,07 \pm 0,84 ^b
Type C	83,3 \pm 0,363	91,7 \pm 0,23	89,07 \pm 0,34 ^b	95,6 \pm 0,1 ^b	44,9 \pm 1,36	92,51 \pm 0,27 ^b

Les CUDA de la MS, des protéines, des lipides et de l'énergie des trois régimes expérimentaux sont élevés : plus de 80%, pour la matière sèche, plus de 90% pour les protéines, les lipides et l'amidon, plus de 86% pour l'énergie et plus de 38% pour les minéraux. Les valeurs de digestibilité des nutriments de l'écoaliment (EcoA) sont très proches de celles obtenues pour les aliments Mdc et Type C. On note cependant un CUDA des lipides de l'aliment EcoA (93,99%) significativement inférieur ($P= 8.63 \text{ E-}3$) à celui de l'aliment Type C (95,6). En revanche, la valeur du CUDA de l'amidon du régime EcoA (97,66) est significativement supérieure ($P=0,001$) à celle des régimes Mdc (93,07) et Type C (92,51). L'EcoA garde des valeurs de CUDA des protéines, des minéraux et l'énergie qui ne sont pas significativement différentes de celles des Aliments Mdc et Type C (Anova, $P>0,05$).

4. Croissance pondérale et paramètres zootechniques

4.1. Croissance pondérale

La **figure 9**, illustre l'évolution des poids moyens obtenus pour les trois régimes au cours de l'expérimentation.



Le lot de poisson nourri avec l'aliment Type C, présente la meilleure croissance pondérale avec un poids final moyen de $240,74 \pm 10$ g, suivi des lots EcoA et MDC dont les poids moyens en fin d'expérimentation sont respectivement de $210,37 \pm 7,92$, g et $204,44 \pm 10,50$ g. Les tests statistiques effectués indiquent qu'en fin d'expérimentation (84 jours), il n'existe pas de différence significative de la croissance pondérale entre les trois régimes (ANOVA, $p=0,0734$). Il n'y a également pas de différence significative de croissance au bout de 21,42 et 63 jours ($P>0,05$). Sur la troisième période J42-J63, on observe une légère baisse de croissance pour le régime EcoA et une légère amélioration de la croissance pour le régime MDC. Pour le régime Type C, la croissance est maintenue constante tout au long de l'expérience.

- *Modèle de la droite de croissance en fonction des régimes et du temps*

Les coefficients estimés par le modèle linéaire mixte et leurs probabilités associées sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5: Résumé statistique des coefficients de la droite de régression

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	61.53086	5.548406	33	11.08983	0.0000
temps:regimeMdc	-0.08348	0.077102	33	-1.08273	0.2868
temps:regimeTypeC	0.35391	0.077102	33	4.59017	0.0001

Les résultats du tableau 3 montrent qu'il y a un effet significatif de l'interaction régime*temps entre les régimes EcoA et Type C ($P= 1e-04$). En revanche, il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction régime*temps entre les aliments EcoA et MDC ($P=0, 2868$). De ce tableau, les équations des droites de regression de croissance des poissons en fonction du temps (0-84 jours) et des régimes (EcoA, Mdc et Type C) sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{EcoA } y &= 1,81x + 61,53 \\ \text{Mdc } y &= 1,73x + 59,16 \\ \text{Type C } y &= 2,16x + 58,17 \end{aligned}$$

4.2. Performances zootechniques

Pour comparer les performances zootechniques, les résultats ont été rapportés au poids moyen final des poissons au bout de 84 jours d'expérimentation. Les paramètres sont étudiés à partir de la moyenne des trois bassins affectés à chaque régime.

Tableau 6: Performances zootechniques des différents lots de truite arc-en-ciel nourries avec trois régimes alimentaires durant 84 jours d'expérimentation. Les résultats sont exprimés en : Moyenne \pm ESM de trois répétitions

Paramètres	EcoA	Mdc	Type C	P-value
PMI (g)	$61,23 \pm 0,89$	$60,74 \pm 0,86$	$61,73 \pm 0,89$	0,74
PMF (g)	$210,37 \pm 7,92$	$204,44 \pm 10,50$	$240,74 \pm 10,00$	0,07
GPR (%)	$2,9 \pm 0,16$	$2,81 \pm 0,15$	$3,45 \pm 0,13$	0,04

GI (g/j/ind)	1,78±0,09	1,71±0,12	2,13±0,11	0,06
TCS (%/j)	1,47±0,05	1,44±0,05	1,62±0,03	0,05
ICJ (%/g/j)	2,39±0,09	2,33±0,10	2,7±0,08	0,06
IC	1,15±0,04	1,12±0,03	1,15±0,01	0,72
CJ (% poids/j)	1,5±0,01 ^b	1,44±0,01 ^a	1,62±0,02 ^c	<0,001***
EA (g/g)	0,87±0,03	0,89±0,02	0,87±0,01	0,727

1 Sur chaque ligne, les moyennes± ESM, affectées par des lettres différentes, sont significativement différentes ($P < 0,05$). PMI= Poids moyens initial, PMF= Poids moyens final, GPR= Gain de poids relatif, GI=Gain de poids individuel, TCS= Taux de croissance spécifique, ICJ= Indice de croissance journalier, IC=Indice de conversion, CJ= Consommation journalière, EA= Efficacité alimentaire

Le meilleur taux de croissance spécifique (TCS) calculés est obtenu, en valeur absolue, par le régime type C (1,62%±0,03) suivi des régimes EcoA (1,47%±0,05) et Mdc (1,44%±0,05). Ces différences ne sont pas statistiquement significatives mais la valeur de P (ANOVA, $P=0,054$), est proche du seuil de significativité et suggère une tendance. L'indice de conversion est compris entre 1,12 et 1,15 kg d'aliment par kg de poids frais produit mais il n'y a pas de différence significative entre les régimes (ANOVA, $p=0,724$). Seule la consommation journalière d'aliments présente une différence significative entre les régimes. La consommation la plus élevée est observée avec l'aliment type C et la plus faible avec l'aliment Mdc. L'éco-aliment présente une valeur intermédiaire.

5. Composition corporelle et bilan de l'utilisation des nutriments

5.1. Composition corporelle

Les compositions corporelles (Matière sèche, Protéines, Lipides, Cendres et Energies) des poissons nourris avec les trois aliments expérimentaux (EcoA, Mdc et Type C) sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7: Composition biochimique des poissons en début et fin d'expérience. Les résultats sont exprimés en: Moyenne ± ESM de trois répétitions.

Lot	MS Frais%	MS%	Protéines % MS	Lipides % MS	Energie KJ/g/%MS	Cendres % MS
EcoA	34,13±0,08	99,72±0,02	46,94±0,46	46,19±0,40	29,82±0,18	6,30±0,06
Mdc	33,69±0,75	99,82±0,17	47,56±1,00	45,80±1,20	29,76±0,19	6,15±0,12
Type C	34,00±0,24	99,51±0,49	48,83±0,82	45,46±0,43	29,87±0,14	6,16±0,07

Les résultats indiquent que la composition corporelle des poissons n'a pas été affectée par les régimes alimentaires. En effet, l'analyse statistique des teneurs en matières sèches (%), protéines (%MS), lipides totaux (%MS), cendres (%MS), et quantité d'énergie (KJ·g⁻¹ MS) ne relève aucune différence significative entre les régimes expérimentaux (Anova, $P > 0,05$).

5.2. Bilan de l'utilisation (Ingéré, Gain et Rétention) des nutriments

Le tableau 8, présente le bilan de l'utilisation des nutriments par les truites après 84 jours d'expérimentation.

Tableau 8: Bilan de l'utilisation des nutriments par les truites nourries avec les aliments EcoA, Mdc et Type C durant 12 semaines d'expérimentation. Les résultats sont exprimés en Moyenne \pm ESM de trois répétitions

	ECO A	MDC	Type C	P-value
Ingestion (g·kg⁻¹·j⁻¹)				
Lipides	3,50 \pm 0,03 ^{ab}	3,44 \pm 0,02 ^a	3,61 \pm 0,04 ^b	0.0206 *
Protéines	6,91 \pm 0,06 ^b	6,49 \pm 0,03 ^a	7,40 \pm 0,08 ^c	0.000133 ***
Energie	3,61 \pm 0,03 ^b	3,46 \pm 0,02 ^a	3,99 \pm 0,04 ^c	6.44 E-5 ***
Gain (g·kg⁻¹·j⁻¹)				
Lipides	2,64 \pm 0,06	2,56 \pm 0,14	2,68 \pm 0,06	0.672
Protéines	2,10 \pm 0,06 ^a	2,07 \pm 0,05 ^a	2,37 \pm 0,07 ^b	0.0221 *
Energie	1,57 \pm 0,03	1,52 \pm 0,06	1,64 \pm 0,03	0.238
Rétention (%)				
Lipides	75,42 \pm 2,21	74,28 \pm 3,89	74,30 \pm 0,81	0.941
Protéines	30,39 \pm 1,09	31,87 \pm 0,64	32,06 \pm 0,93	0.416
Energie	43,45 \pm 1,25	44,05 \pm 1,56	41,14 \pm 0,47	0.265

1 Sur chaque ligne, Les degrés de significativité sont indiqués par des astérisques (P<0,05 ; *** P<0,001) et ont été estimés par un test ANOVA (n=3 bacs) les valeurs (Moyenne \pm ESM, n = 3) affectées par des lettres différentes, sont significativement différentes (Anova, P<0,05)*

Les poissons nourris avec l'aliment EcoA ont ingéré plus de nutriments (lipides, protéines et Energie) que ceux soumis au régime Mdc mais moins que ceux nourris avec l'aliment Type C. Les tests statistiques effectués indiquent qu'il existe une différence très significative en ce qui concerne l'ingéré entre les trois régimes (ANOVA, p<0,01). Le régime alimentaire a donc un effet sur l'ingéré des nutriments.

En ce qui concerne le gain en nutriments, seul celui des protéines présente une différence significative montrant que le lot nourri au régime EcoA, présente un gain protéique équivalent au régime Mdc et moindre que celui du régime Type C. Il n'existe pas de différence significative en termes de gain lipidique et gain énergétique entre les différents régimes.

Par ailleurs, les capacités de rétention des nutriments (Anova, P>0,05) n'ont pas été affectées par la nature des régimes alimentaires.

DISCUSSION

L'objectif de mon stage de Master 2 était d'évaluer si la prise en compte des impacts environnementaux dans la formulation des aliments aquacoles pouvait avoir des répercussions sur les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel. L'étude mis en place dans le cadre de mon stade a donc consisté à :

- Comparer les performances zootechniques (croissance, efficacité alimentaire, composition corporelle) de la truite arc-en-ciel nourrie avec trois régimes alimentaires : un régime de Type commercial actuel (Type C), un régime formulé à moindre coût (Mdc) et un régime optimisant coût et impact environnemental (EcoA). L'impact environnemental de l'aliment étant estimé sur la base des impacts environnementaux des différents ingrédients déterminés au préalable par analyse de cycle de vie.
- Evaluer la digestibilité de ces aliments.

Les résultats montrent que de par leurs compositions, les trois régimes alimentaires répondent aux besoins nutritionnels de la truite arc-en-ciel. Au bout de 84 jours d'élevage, la croissance des poissons n'a pas été significativement affectée par les régimes. Seule la prise alimentaire est significativement différente montrant une meilleure consommation journalière des poissons nourris à l'aliment Type C comparés à ceux nourris avec les aliments EcoA et Mdc. En ce qui concerne la composition corporelle des poissons, on note une différence significative de l'ingéré des nutriments entre les trois régimes et un gain protéique significatif du lot nourri à l'aliment Type C. La rétention des nutriments n'est pas affectée par les régimes. Enfin, les nutriments présentent des coefficients d'utilisation digestives élevés et les valeurs obtenues correspondent à celles habituellement rencontrées pour un aliment de truite arc-en-ciel nutritionnellement équilibré.

1. Impact de la prise en compte des paramètres environnementaux sur la croissance

La prise en compte de critères environnementaux dans la formulation d'aliments pour truite, a consisté à substituer la farine et l'huile de poisson par des matières premières végétales (céréales, protéagineux, oléagineux, etc), des protéines animales transformées (PAT ; farine de plume hydrolysée, farine de sang porc volaille), et d'autres sources protéiques (levure, coproduits etc.). Les résultats indiquent une nette réduction (25-45%) des impacts environnementaux des aliments EcoA et Mdc en comparaison à l'aliment Type C. Ce gain environnemental est aussi accompagné d'un gain économique rapporté à la tonne de production respectivement de 8% et 11% pour les aliments EcoA et Mdc.

Ces gains environnementaux et économiques incitent à utiliser des aliments écoresponsables tels que EcoA, en aquaculture, pour assurer la durabilité de ce secteur. En effet, l'utilisation de ces formulations engendre une moindre pression sur les ressources halieutiques et agricoles.

De par leurs compositions (taux de protéines > 44%, lipides >21% ; Energie>24%), les aliments utilisés lors de cette étude, sont conformes aux exigences nutritionnelles de la truite arc-en-ciel (NRC 2011). Si l'on tient compte uniquement de la performance de croissance (évolution du poids moyen des poissons), il apparaît qu'il n'y a aucune différence significative de croissance entre les différents lots après 84 jours d'expérimentation. Il est donc intéressant de constater que les performances zootechniques des poissons nourris avec les aliments EcoA et Mdc dont les proportions respectives en farine et huile de poissons sont réduites de 55% et 45% pour l'aliment EcoA et 40% et 45% pour l'aliment Mdc, sont aussi bonnes que celles des poissons nourris avec l'aliment Type C même si les performances obtenues avec cet aliment sont légèrement supérieures sans être statistiquement significatives. Ces résultats sont en accord avec ceux de Kaushik et al., (1995), Bureau et al (2000), Palti et al (2006), qui ont montré que la substitution partielle de la farine et l'huile de poisson par des sources végétales et des protéines animales transformées (PAT) comme la farine de plume (Bureau et al. 2000) peut se faire sans effet délétère sur la croissance, le gain de poids, l'efficacité alimentaire, la mortalité et la composition corporelle des poissons. Cette substitution pouvant se faire évidemment à condition d'utiliser différents produits végétaux de bonne qualité (haute valeur nutritive et faible teneur en facteurs anti-nutritionnelle ; Collins et al. 2013).

Cependant, les résultats indiquent que certaines valeurs de performances zootechniques (gain de poids relatif, gain individuel, taux de croissance spécifique et indice de croissance journalier) se rapprochent du seuil de significativité (5%). De plus, l'ajustement du modèle linéaire mixte aux données de croissance, en prenant en compte l'interaction entre le régime et

le temps, indique une différence significative de croissance entre les aliments EcoA et Type C d'une part et Mdc et Type C d'autre part. Par conséquent, si l'expérimentation avait été conduite sur une période plus longue (>84 jours), nous aurions probablement observé une croissance significativement plus faible chez les poissons nourris avec les aliments EcoA et Mdc.

Ces résultats suggèrent que l'utilisation de l'éco-aliment pour l'alimentation de la truite est envisageable pour produire de la truite portion (200-250g). En effet, à ce stade, ce type d'aliment semble assurer des performances similaires à celles obtenues avec un aliment dont la formulation est proche des aliments actuellement commercialisés pour la production de truite portion. Par ailleurs, étant donné que la quantité de nutriments ingérés par les poissons nourris avec les aliments EcoA et Mdc est significativement plus faible que ceux nourris avec l'aliment Type C, il est probable que la différence de croissance à laquelle on s'attend si l'expérience était conduite sur une durée plus longue, serait due à la baisse de la consommation journalière des poissons et non à une diminution de l'efficacité digestive et métabolique des aliments.

La différence de consommation observée peut se justifier par le remplacement partiel et conjoint de la farine de poisson et de l'huile de poissons par des sources protéiques et lipidiques alternatives, dans les aliments EcoA et Mdc. En effet, plusieurs études ont montré que l'incorporation de matières premières végétales (Drew 2007, Médale et al. 2009, le Boucher 2013) et de farine de plume (Bureau et al. 2000, Campos et al. 2017) dans les aliments aquacoles pouvait affecter la qualité physico-chimique (olfactive et gustative) des granulés et ainsi détériorer l'appétence des aliments. La variation de la prise alimentaire chez les poissons soumis au régime EcoA pourrait résulter de phénomènes orosensoriels (goût ou texture de l'aliment) ou de rétrocontrôles post-absorptifs (Médale et al. 2009).

Ces résultats viennent conforter le fait que les différences de croissance attendues résultent de la variation de la prise alimentaire. Il ne s'agit donc pas d'une meilleure capacité d'utilisation de nutriments par les poissons nourris avec l'aliment Type C. Cette observation a été faite dans plusieurs études sur les salmonidés où la farine et l'huile de poissons ont conjointement et partiellement été remplacés par des sources protéiques alternative (Peng et al., 2008, Lim et al 2008, Collins et al. 2013). Ces auteurs ont en effet souligné que la variation de la prise alimentaire lors d'un remplacement de l'huile ou de la farine de poisson, reste le problème majeur auquel sont confrontés les formulations alimentaires à base de sources protéiques et lipidiques alternatives.

2. Impact de la prise en compte des paramètres environnementaux sur la digestibilité

Les trois aliments ont des valeurs de CUDA habituellement rencontrées pour un aliment pour truite arc-en-ciel, nutritionnellement équilibré : CUDA de 80% pour la matière sèche et CUDA des protéines et des lipides supérieurs à 90%. Les cendres qui correspondent à l'ensemble des minéraux de la ration, présentent des valeurs de CUDA de 40%. Ces valeurs indiquent une très bonne digestibilité des matières premières utilisées pour la formulation des aliments EcoA et Mdc.

Les résultats des CUDA montrent que les valeurs de digestibilité des nutriments de l'éco-aliment sont très proches de celles obtenues pour l'aliment Type C. Ces résultats obtenus sont conformes aux valeurs trouvées par Cowey et Cho (1991), Cheng et Hardy (2002) ou publiées par le NRC (2011). On note cependant un CUDA des lipides de l'aliment EcoA (93,99%) significativement inférieur ($P= 8.63 \text{ E-}3$) à celui de l'aliment Type C (95,6%). Cette différence peut se justifier par l'incorporation d'huile de volaille dans l'aliment EcoA. En effet, l'huile de

volaille est constituée d'acides gras saturés et l'utilisation digestive de cette classe d'acide gras par le poisson est faible (Burel 2017).

On observe d'une manière générale, des valeurs de CUDa de l'amidon (> 90%) plus élevées que celles habituellement rencontrées (45-55% Bergot et Breque 1983, NRC 2011). Ces valeurs élevées peuvent être justifiées par une erreur d'estimation de l'amidon présent dans les fèces. En effet, l'amidon étant un composé hydrosoluble, on peut avoir une perte rapide de ce composé par lessivage, pouvant conduire à une surestimation de sa digestibilité.

De plus, on note que le CUDa de l'amidon de l'aliment EcoA (97%) est significativement supérieure à celle de l'aliment Type C (92%). Plusieurs facteurs peuvent faire varier la digestibilité de l'amidon notamment la source principale qui apporte l'amidon dans l'aliment, le taux d'incorporation, l'ingéré alimentaire par l'animal et le procédé de transformation de l'amidon (cru, gélatinisé, extrudé, etc.) (Phillips 1948, Smith et al. 1971, Bergot et Breque 1983). Dans l'aliment EcoA, l'amidon est principalement apporté par du blé tandis que dans l'aliment Type C, il est apporté par la féverole. Par ailleurs, les précédents résultats montrent une meilleure prise alimentaire de l'aliment Type C comparé à l'aliment EcoA. L'amande de féverole et le blé n'ayant pas suivi de transformation particulière, ces résultats suggèrent que la différence significative de la digestibilité de l'amidon est due à la différence des sources de l'amidon ou à la variation de l'ingéré alimentaire. En effet, plus l'ingéré est élevé moins bonne est la digestibilité de l'amidon (Bergot 1983).

3. Limites et perspectives au développement de la méthode

Sur la base de leurs formulations, les aliments EcoA et Mdc comportent une plus grande variété de matières premières (23) que l'aliment type C (16). Ceci pourrait constituer une limite pour leur utilisation dans l'industrie aquacole étant donné que l'utilisation d'un nombre important de matières premières pose le problème de la gestion et du stockage des matières premières et du temps de fabrication des aliments. Une optimisation de ces formules, consisterait à éviter que les matières premières ne soient incorporées dans l'aliment en trop faible quantité, comme c'est respectivement le cas pour la farine de pois dépelliculé (0.55%), le gluten de maïs (0.7%), le concentré protéique de pomme de terre (0.01%) et l'huile de lin (0,02%) dans l'aliment EcoA. Pour cela, les contraintes d'incorporation minimale de certaines matières premières doivent être revues à la hausse. Une modification de la matrice des contraintes d'incorporation des matières premières aura forcément des conséquences sur la formulation de nouveaux aliments éco-responsables qu'il sera nécessaire de tester à nouveau chez l'animal.

De plus, la variation de la prise alimentaire pourrait être résolue en limitant l'incorporation des matières premières dans des proportions bien déterminées, en portant une attention particulière aux facteurs anti-nutritionnels et à la composition en acides aminés et acides gras de ces matières premières et enfin en utilisant d'autres types d'attractants afin d'améliorer l'appétibilité du régime EcoA. L'amélioration de la prise alimentaire des poissons dans la présente étude, pourrait se baser sur ces différentes pistes afin d'améliorer l'appétibilité des régimes.

Une autre contrainte liée à l'utilisation de ces régimes est le nombre de jours nécessaire à l'élevage en grossissement. En effet, la différence de pente de croissance obtenue avec le modèle de croissance, indique que pour un objectif de production de biomasse égale,

l'utilisation du régime EcoA nécessiterait plus de jours que celui du régime Type C. Le nombre de jours de production étant un facteur déterminant dans la production aquacole, les prochaines études, devront s'intéresser à l'amélioration du régime EcoA notamment pour la production de grosses truites destinées entre autres, à la production de filets fumés et dont le cycle d'élevage est beaucoup plus long. Un autre secteur dans lequel les aliments éco-responsables devront être évalués est celui de l'élevage des géniteurs pour la production d'œufs embryonnés. En effet, en pisciculture de truite arc-en-ciel, la plupart des éleveurs ne produisent pas directement leurs œufs. Cette production est délicate et requiert une technicité et un savoir-faire bien particulier. Les pisciculteurs achètent les œufs dont ils ont besoin auprès de centres de reproduction locaux ou bien sur le marché international. La France est mondialement reconnue pour la qualité de ses œufs et est devenue l'un des leaders mondiaux de la production d'œufs de truites de truite-arc-en-ciel embryonnés. Les aliments écoresponsables devront donc faire l'objet d'études chez les reproducteurs afin de s'assurer que de l'utilisation d'aliments écoresponsables est compatible avec la production d'œufs de qualité.

Cependant, même si la présente étude démontre que le régime EcoA présente un intérêt par la réduction de son impact environnemental, il est important de souligner que cet aliment, de par sa composition (présence de matières première végétales), produit une quantité importante de matières en suspension (observation réalisée lors du nourrissage en essai de digestibilité). La gestion de ces particules fines dans un système de production pourrait également constituer un frein à l'utilisation de ce type d'aliment par les producteurs. Cet aspect devra être pris en compte dans la conception et l'évaluation des aliments écoresponsables.

Enfin, l'introduction dans le régime EcoA des PAT, à savoir la farine de plume hydrolysée, la farine de sang de volaille ou de porc et les huiles de volaille, pourrait aussi poser des questions d'acceptabilité auprès des consommateurs. En effet, l'utilisation de ces matières premières peut susciter des inquiétudes sociétales d'ordre sanitaires, organoleptiques ou encore éthiques qu'il convient de prendre en compte. La mise sur le marché de truites nourries avec des aliments écoresponsables pourrait s'accompagner de la création d'un label ou d'une communication particulière permettant la différenciation de ces produits à travers un étiquetage explicite.

CONCLUSION

L'objectif de ce stage était d'évaluer les conséquences de la prise en compte des impacts environnementaux dans la formulation des aliments aquacoles sur les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel. Dans les conditions de l'étude, les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'un éco-aliment en élevage de truite, permet aux poissons d'avoir des performances zootechniques équivalente à un aliment de type commercial. De plus, cet aliment présente une haute digestibilité et n'engendre pas un surcoût de production tout en minimisant l'impact sur les ressources biotiques. Les résultats sont donc encourageants et ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement de futurs aliments écoresponsables pour truites.

Il faudra cependant d'autres expérimentations pour explorer l'efficacité de des nouveaux aliments éco-responsables à différentes étapes du cycle de vie de l'animal, caractériser les qualités organoleptiques de la chair de ces poissons et évaluer l'acceptabilité de ces nouveaux produits par les consommateurs.

BIBLIOGRAPHIE

- Alltech. (2020) Global Feed Survey Summary. Alltech internal researchreport.
- Aubin, J. (2014). *Contribution de l'analyse du cycle de vie à l'analyse environnementale des systèmes de pisciculture* (Doctoral dissertation, Agrocampus ouest).
- AOAC, 2006. Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed., Rev. 1, Association of Official Analytical Chemists, Washington, USA.
- Béné, C., Barange, M., Subasinghe, R., Pinstrup-Andersen, P., Merino, G., Hemre, G. I., & Williams, M. (2015). Feeding 9 billion by 2050—Putting fish back on the menu. *Food Security*, 7(2), 261-274.
- Bergot, F., & Breque, J. (1983). Digestibility of starch by rainbow trout: effects of the physical state of starch and of the intake level. *Aquaculture*, 34(3-4), 203-212.
- Boissy, J., Aubin, J., Drissi, A., van der Werf, H. M., Bell, G. J., & Kaushik, S. J. (2011). Environmental impacts of plant-based salmonid diets at feed and farm scales. *Aquaculture*, 321(1-2), 61-70.
- Bouvarel, I., Dourmad, J. Y., & Gac, A. (2010). Les stratégies d'alimentation des animaux au sein de l'exploitation et du territoire et leurs incidences environnementales.
- Bureau, D. P., Harris, A. M., Bevan, D. J., Simmons, L. A., Azevedo, P. A., & Cho, C. Y. (2000). Feather meals and meat and bone meals from different origins as protein sources in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets. *Aquaculture*, 181(3-4), 281-291.
- Burel, C. (2017). Bases de la nutrition et formulation en aquaculture.
- Cahu, C. (2013). Les grands défis de l'aquaculture en France et dans le monde. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 2, pp. 24-30). ESKA.
- Campos, I., Matos, E., Marques, A., & Valente, L. M. (2017). Hydrolyzed feather meal as a partial fishmeal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Aquaculture*, 476, 152-159.
- Cheng, Z. J., & Hardy, R. W. (2002). Apparent digestibility coefficients and nutritional value of cottonseed meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 212(1-4), 361-372.
- Choubert Jr, G., De La Noüe, J., & Luquet, P. (1979). Continuous quantitative automatic collector for fish feces. *The Progressive fish-culturist*, 41(2), 64-67.
- Collins, S. A., Mansfield, G. S., Desai, A. R., Van Kessel, A. G., Hill, J. E., & Drew, M. D. (2013). Structural equation modeling of antinutrients in rainbow trout diets and their impact on feed intake and growth. *Aquaculture*, 416, 219-227.
- Cowey, C. B., & Cho, C. Y. (1991). Nutritional strategies and aquaculture waste. In *1st International Symposium on Nutritional Strategies in Management of Aquaculture Waste, Guelph, Ont.(USA), 1990*. Fish Nutrition Research Laboratory, University of Guelph.
- Directive 2010/63/EU,
- Drew, M. D., Ogunkoya, A. E., Janz, D. M., & Van Kessel, A. G. (2007). Dietary influence of replacing fish meal and oil with canola protein concentrate and vegetable oils on growth performance, fatty acid composition and organochlorine residues in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 267(1-4), 260-268.
- Dusart, L., Bouvarel, I., & Méda, B. (2016). OVALI sustainability for poultry: Une méthode pratique pour évaluer la durabilité des filières avicoles et proposer des solutions. In *Journée sur*

l'évaluation multicritère organisée par les GIS Elevages Demain, GC HP2E et le RMT Erytage (pp. 9-diaositives).


- Espagnol, S., Tailleur, A., Dauguet, S., Garcia-Launay, F., Gaudré, D., Dusart, L., ... & Dronne, Y. (2018). Réduire les impacts environnementaux des produits animaux avec des éco-aliments.
- FAO. (1996). Besoins alimentaires et croissance démographique. In FAO. *Sommet mondial de l'alimentation*, Rome, FAO-DES, Documents d'information technique, volume 1, chapitre 4.
- FAO. (2014). The state of world fisheries and aquaculture 2014. Rome: FAO
- FAO. (2016). The state of world fisheries and aquaculture 2016: contributing to food security and nutrition for all.
- FAO. (2020). La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020. La durabilité en action. Rome.
- Folch, J., Lees, M., & Stanley, G. H. S. A. (1957). A simple method for total lipid extraction and purification. *J Biol Chem*, 226(497-509), 18.
- Garcia-Launay, F., Dusart, L., Espagnol, S., Laisse-Redoux, S., Gaudré, D., Méda, B., & Wilfart, A. (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British Journal of Nutrition*, 120(11), 1298-1309.
- Garcia-Launay, F., Wilfart, A., Dusart, L., Nzally, C., Gaudré, D., Laisse-Redoux, S., & Espagnol, S. (2017). Une formulation multiobjectifs pour réduire les impacts environnementaux des aliments pour porcs charcutiers. *Journées de la recherche porcine*, 49, 239-244.
- Hoffman, L. C., Prinsloo, J. F., & Rukan, G. (1997). Partial replacement of fish meal with either soybean meal, brewers yeast or tomato meal in the diets of African sharptooth catfish *Clarias gariepinus*. *Water SA*, 23(2), 181-186.
- ISO, E. (2006). 14044: 2006. *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*. European Committee for Standardization.
- Kaushik, S. J., Cravedi, J. P., Lalles, J. P., Sumpter, J., Fauconneau, B., & Laroche, M. (1995). Partial or total replacement of fish meal by soybean protein on growth, protein utilization, potential estrogenic or antigenic effects, cholesterolemia and flesh quality in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 133(3-4), 257-274.
- Kjeldahl, C. (1883). A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Z Anal Chem*, 22, 366.
- Kjeldahl, C., 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Z Anal Chem* 22, 366.
- Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. *PLoS One*, 13(1), e0190730.
- Le Boucher, R., Quillet, E., Vandeputte, M., Lecalvez, J. M., Goardon, L., Chatain, B., ... & Dupont-Nivet, M. (2011). Plant-based diet in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum): Are there genotype-diet interactions for main production traits when fish are fed marine vs. plant-based diets from the first meal?. *Aquaculture*, 321(1-2), 41-48.
- Le Boucher, R., Vandeputte, M., Dupont-Nivet, M., Quillet, E., Ruelle, F., Vergnet, A., ... & Chatain, B. (2013). Genotype by diet interactions in European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.): Nutritional challenge with totally plant-based diets. *Journal of animal science*, 91(1), 44-56.

- Le Gouvello, R., & Simard, F. (2017). *Durabilité des aliments pour poisson en aquaculture: réflexions et recommandations sur les aspects technologiques, économiques, sociaux et environnementaux*. UICN.
- Lim C, Webster CD, Lee CS. (2008) Alternative protein sources in aquaculture diets. New York : The Haworth Press ; Taylor & Francis group.
- M.B. Hall, Determination of dietary starch in animal feeds and pet food by an enzymatic-colorimetric method: collaborative study, *J. AOAC Int.* 98 (20 15) 397 – 409
- Maynard, L. A., & Loosli, J. K. (1969). Animal nutrition. *Animal nutrition.*, (6th ed).
- Médale, F., & Kaushik, S. (2009). Les sources protéiques dans les aliments pour les poissons d'élevage. *Cahiers Agricultures*, 18(2-3), 103-111.
- Médale, F., Le Boucher, R., Dupont-Nivet, M., Quillet, E., Aubin, J., & Panserat, S. (2013). Des aliments à base de végétaux pour les poissons d'élevage. *INRA Productions animales*, 26(4), 303-315.
- National Research Council. NRC.(2011). Nutrient requirements of fish and shrimp. *Washington, DC*.
- Noüe, J. D. L., Choubert, G., Pagniez, B., Blanc, J. M., & Luquet, P. (1980). Digestibilité chez la truite arc-en-ciel (*Salmo gairdneri*) lors de l'adaptation à un nouveau régime alimentaire. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(12), 2218-2224.
- Palti, Y., Silverstein, J. T., Wieman, H., Phillips, J. G., Barrows, F. T., & Parsons, J. E. (2006). Evaluation of family growth response to fishmeal and gluten-based diets in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 255(1-4), 548-556.
- Papatryphon, E., Petit, J., Kaushik, S. J., & van der Werf, H. M. (2004). Environmental impact assessment of salmonid feeds using life cycle assessment (LCA). *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(6), 316-323.
- Parker, R. W., & Tyedmers, P. H. (2012). Life cycle environmental impacts of three products derived from wild-caught Antarctic krill (*Euphausia superba*). *Environmental science & technology*, 46(9), 4958-4965.
- Peng, S., Chen, L., Qin, J. G., Hou, J., Yu, N., Long, Z., ... & Sun, X. (2008). Effects of replacement of dietary fish oil by soybean oil on growth performance and liver biochemical composition in juvenile black seabream, *Acanthopagrus schlegelii*. *Aquaculture*, 276(1-4), 154-161.
- Phillips, A. M. (1948). *The utilization of carbohydrates by trout*. New York State Conservation Department, Bureau of Fish Culture.
- Rana, K. J., Siriwardena, S., & Hasan, M. R. (2009). *Impact of rising feed ingredient prices on aquafeeds and aquaculture production* (No. 541). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Smáráson, B. Ö., Ögmundarson, Ó., Árnason, J., Bjornsdottir, R., & Davidsdottir, B. (2017). Life cycle assessment of Icelandic arctic char fed three different feed types.
- Smith, B. W., & Lovell, R. T. (1971). Digestibility of nutrients in semi-purified rations by channel catfish in stainless steel troughs. In *Proc. Annual Conf. Southeast. Assoc. Game Fish Comm* (Vol. 25, pp. 452-459).
- Thilsted, S. H., Thorne-Lyman, A., Webb, P., Bogard, J. R., Subasinghe, R., Phillips, M. J., & Allison, E. H. (2016). Sustaining healthy diets: The role of capture fisheries and aquaculture for improving nutrition in the post-2015 era. *Food Policy*, 61, 126-131.
- Veron, V., Panserat, S., Le Boucher, R., Labbé, L., Quillet, E., Dupont-Nivet, M., & Médale, F. (2016). Long-term feeding a plant-based diet devoid of marine ingredients strongly affects

certain key metabolic enzymes in the rainbow trout liver. *Fish physiology and biochemistry*, 42(2), 771-785.

Wilfart, A., Dusart, L., Méda, B., Gac, A., Espagnol, S., Morin, L., ... & Garcia-Launay, F. (2018). Réduire les impacts environnementaux des aliments pour les animaux d'élevage. *INRA Productions Animales*, 31(3), 289-306.

WWF (2016). Nourrir l'humanité à l'horizon 2050. 60p

	Diplôme : Master Sciences Biologiques Marines Spécialité : Sciences Halieutiques et Aquacoles Spécialisation / option : Aquaculture Enseignant référent : Hervé LE BRIS
Auteur : Soude Espoir Date de naissance : 09/05/1993	Organisme d'accueil : INRAE - Unité Nutrition Métabolisme et Aquaculture (Numéa)
Nb pages : 29 Annexe(s) :	Adresse : AQUAPOLE, Quartier Ibarron 64310 Saint Pée sur Nivelles
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Sandrine Skiba
Titre français : Conséquences de la prise en compte des impacts environnementaux dans la formulation des aliments aquacoles sur les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel. (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) Titre anglais : Consequences of taking into account environmental impacts in the formulation of aquaculture feed on the zootechnical performance of rainbow trout. (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	
Résumé: En élevage, l'alimentation peut représenter de 65 à 95 % des impacts environnementaux et jusqu'à 75 % du coût de production. Formuler des aliments à moindres impacts environnementaux avec un surcoût limité apparaît comme une approche innovante pour aider les productions animales à faire face aux enjeux du développement durable. Dans ce contexte, la présente étude a consisté à évaluer les performances zootechniques de la truite arc-en-ciel nourrie avec un éco-aliment formulé en fonction de critères multi-objectifs que sont la diminution de l'impact environnemental et l'optimisation du prix. Au bout de 84 jours, les résultats ont montré que l'éco-aliment répond aux besoins nutritionnels de la truite arc-en-ciel et n'a affecté ni la croissance, ni la composition corporelle des animaux. Une diminution de la prise alimentaire est constatée. Cet aliment qui présente d'excellentes valeurs de digestibilité, permet de réduire de 25-45% les impacts environnementaux et de 8% le coût de production. Cette expérimentation ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de futurs aliments écoresponsables en aquaculture.	
Abstract In livestock production, feed can account for 65 to 95% of environmental impacts and up to 75% of production costs. Formulating feeds with lower environmental impacts and limited additional costs appears to be an innovative approach to help fish production meet the challenges of sustainable development. In this context, the present study consisted in evaluating the zootechnical performance of rainbow trout fed with an eco-feed formulated according to multi-objective criteria such as reducing environmental impact and optimizing price. After 84 days, the results showed that the eco-feed met the nutritional needs of rainbow trout and did not affect either the growth or the body composition of the animals. A decrease in feed intake was noted. This feed, which has excellent digestibility values, reduces environmental impacts by 25-45% and production costs by 8%. This experimentation opens interesting perspectives for the development of future eco-responsible feeds in aquaculture.	
Mots-clés : Truite arc-en-ciel, Nutrition, Eco-aliment, Aquaculture durable, Analyse de cycle de vie ; impact environnemental Key Words: Rainbow trout, Nutrition, Eco-feed, Sustainable aquaculture; Life cycle assessment; Environmental impact	