



PRE-ETUDE REGIONALE SUR L'UTILISATION D'INSECTES DANS L'ALIMENTATION DES POISSONS D'ELEVAGE

Pré étude Régionale Insectes Feed for Fish – PERIFF

TRINTIGNAC Pascal¹, METIVIER Romain¹

¹ : Syndicat Mixte Aquaculture Pêche Pays de la Loire



MARS 2019

Table des matières

Résumé	4
Remerciements	6
Introduction.....	8
I. Rappels contextuels	9
I.A. Evolution de l'aquaculture et de la pêche au niveau mondial.....	9
I.B. L'alimentation aquacole.....	10
I.C. Les objectifs de PERIFF	12
II. Etat des connaissances	13
II.1. La réglementation	13
II.1.A. La liste des espèces autorisées.....	13
II.1.B. Les principales règles de production d'insectes	13
II.2. Les espèces ciblées.....	14
II.2.A. Le ténébrion meunier : <i>Tenebrio molitor</i>	15
II.2.B. La Mouche soldat noir : <i>Hermetia illucens</i>	15
II.3. Les essais d'aliments contenant des insectes	16
II.3.A. La farine de vers de farine.....	16
II.2.B. La farine de BSF	17
II.4. La qualité des poissons nourris avec les insectes	19
II.5. Les aspects technico économiques	21
II.6. L'impact environnemental	22
II.7. Les alternatives potentielles	24
III. Discussions et conclusion	25
III.1. Les insectes, une solution potentielle avec ses limites	25
III.2. Le contexte ligérien	27
Conclusion	29
Bibliographie	30
Sitographie	37
Glossaire.....	37
Figures.....	38
Tableaux	38
Annexes.....	39

Résumé

L'objectif de cette pré-étude est d'établir un panorama le plus complet possible sur les connaissances actuelles de la production et de l'emploi d'insectes en alimentation aquacole, puis de faire une analyse AFOM adapté au contexte ligérien. Au cours des trente dernières années, l'aquaculture mondiale n'a cessé de croître pour répondre à la demande croissante de poisson pour la consommation humaine qui ne peut plus être satisfaite par les seules captures de pêche. Plus de la moitié des farines de poissons produites (57%) sont utilisées par l'aquaculture. Les insectes, riches en protéines, font partie des alternatives qui font l'objet de recherche actuellement. Les études répertoriées sur l'utilisation de farines d'insectes montrent des performances de croissance équivalentes à l'utilisation de farine de poissons pour certaines espèces comme la Truite ou le Tilapia. Les performances sont moindres chez les espèces marines pour des raisons principalement de carences d'acides gras. Le vers de farine et la mouche soldat noir sont parmi les espèces d'insectes les plus intéressantes pour l'alimentation aquacole. Un remplacement partiel de farines de poisson est possible sous certaines conditions. Les principales contraintes concernent la production d'insectes en volume, les coûts de production et les process d'élevage assurant un produit de qualité standard nécessaire pour une utilisation à grande échelle dans l'alimentation aquacole. L'utilisation de farine d'insectes ne peut être intéressante à court terme dans le contexte national et local que pour certaines productions à haute valeur ajoutés et ne nécessitant pas de grands volumes d'aliments comme la production de poissons d'ornement et la production d'alevins. Le développement de systèmes d'élevage « autonomes » comme l'aquaponie et travaillant sur des cycles courts pourraient aussi constituer un débouché intéressant. A plus long terme, l'ouverture du marché des insectes à d'autres filières animales et l'utilisation d'autres sources de protéines pourraient limiter l'utilisation à grande échelle de cette voie alternative aux farines de poisson pour l'alimentation aquacole.

Remerciements

Cette pré-étude a permis de rencontrer une grande diversité d'acteurs.

Dans un premier temps, un grand remerciement est adressé à tous les partenaires techniques, en particulier M. Pierre Garsi du Lycée Olivier Guichard de Guérande, Mme Sandrine Marchand et M. Arnaud Lefèvre du Lycée Professionnel du Haut Anjou de Château-Gontier, M. Franck Bourgeois de la société Greensoldier et M. Pascal Aurouet de la société Innoprotéa.

A noter un remerciement appuyé à M. Guillaume Le Reste de la société Halieutica pour son expertise et sa participation à nos groupes de travail.

Nous remercions aussi vivement ceux qui ont apporté leur contribution par leur expertise et par leur conseil notamment M. Joel Aubin de l'UMR INRA/Agrocampus à Rennes, MM. Pierre Foucard et Aurélien Tocqueville de l'ITAVI, M. Pascal Ribaud de la société la Pommeraie aquaculture et M. Floran Laville de la société CycleFarms.

Introduction

La population mondiale devrait s'accroître à hauteur de 9 milliards d'individus à l'horizon 2050 (FAO, 2013b). La demande en protéine animale explose avec l'accroissement de la population mondiale et le développement de certains élevages dont l'aquaculture (FAO, 2014). Les insectes apparaissent comme étant une des sources de protéines les plus intéressantes (Vantomme, 2017), en particulier pour les élevages d'animaux monogastriques (Al-Qazzaz & Ismail, 2016). Dans un contexte de demande croissante de viande et de pénurie des surfaces cultivables, la FAO intègre le développement de la production de protéines et notamment de "Matériaux Riches en Protéines", dits "PRM", issus des insectes pour l'élevage et l'agroalimentaire. En 2015, l'autorité européenne de sécurité des aliments évaluait les risques liés à la production, à la transformation et à la consommation d'insectes en alimentation humaine et animale. Pour la Commission Européenne, l'élevage d'insectes pourrait constituer une solution de substitution durable aux sources traditionnelles de protéines animales destinées à l'alimentation aquacole (Règlement CE 2017/893, 2017). La France produit plus de protéines végétales qu'elle n'en a besoin mais manque de certaines protéines spécifiques (Le Cadre, 2017). A noter que l'autonomie protéique est avant tout considérée par les acteurs des filières comme un levier pour améliorer la durabilité des productions animales françaises.

Depuis le 1er juillet 2017, le règlement européen 2017/893 modifie certaines dispositions relatives aux protéines animales transformées destinées à l'alimentation aquacole avec l'autorisation de protéines issues d'insectes d'élevage avec sept espèces autorisées dont les deux espèces concernées par notre étude ; la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) et le ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*).

Ces évolutions sociétales et réglementaires génèrent un certain engouement de la part de plusieurs acteurs qui n'hésitent pas communiquer régulièrement sur la substitution prochaine des farines de poissons indispensables dans l'alimentation des poissons d'élevage par de la farine d'insectes. Les premières études semblent montrer que malgré des perspectives intéressantes, le développement d'une telle filière pour l'alimentation aquacole n'est pas simple, au moins à court terme. Face à ces constats, le CIPA a donné un avis favorable le 03 octobre 2017 en Conférence Nationale à l'utilisation sous certaines conditions de protéines d'insectes (CIPA, 2017). Les éléments techniques, économiques, sanitaires et environnementaux relatif à l'utilisation des PAT d'insectes restent à valider pour objectiver leurs avantages et leurs inconvénients.

Au niveau régional, plusieurs acteurs piscicoles se posent la question de l'intérêt ou non d'avoir des PAT d'insectes dans l'alimentation aquacole. Des contacts entre les lycées aquacoles régionaux et des producteurs d'insectes étaient déjà pris, ces derniers souhaitant développer des expérimentations. Dans le même temps, la Région accompagne un projet R&D collaboratif AVENIR (Labellisation Valorial) impliquant plusieurs acteurs ligériens (dont les 2 producteurs partenaires) sur la structuration d'une filière « insectes » de qualité en Pays de la Loire. Cette étude viendrait du coup compléter le projet FEADER qui va plus concerner l'alimentation humaine (Le Food et non le Feed).

L'objectif de cette pré-étude est simple : établir un panorama le plus complet possible sur les connaissances actuelles sur la production et l'emploi d'insectes en alimentation aquacole puis faire une analyse AFOM adapté au contexte ligérien. Si le contexte est favorable, PERIFF permettrait aussi de travailler à la mise au point d'une future expérimentation qui n'était pas possible de mettre en place en 2018.

I. Rappels contextuels

Les éléments de contexte sur l'aquaculture d'une part et sur l'alimentation aquacole d'autre part, doivent être rappelés afin de mieux appréhender le sujet de l'incorporation des insectes dans l'alimentation aquacole.

I.A. Evolution de l'aquaculture et de la pêche au niveau mondial

Au cours des trente dernières années, l'aquaculture mondiale n'a cessé de croître pour répondre à la demande croissante de poisson pour la consommation humaine qui ne peut plus être satisfaite par les seules captures de pêche (Burel & Medale, 2014). L'aquaculture mondiale représentait en 2016 plus de 80 millions de tonnes de produits (Figure 1). La pisciculture représente environ 50 millions de tonnes (FAO, 2018). Dans l'hypothèse d'une hausse de la demande et d'une poursuite des progrès technologiques, la production mondiale totale du secteur de la pêche et de l'aquaculture (hors plantes aquatiques) devrait continuer de croître tout au long de la période de projection pour atteindre 201 millions de tonnes en 2030. La majeure partie de la croissance de la production devrait provenir du secteur de l'aquaculture, lequel devrait atteindre une production de 109 millions de tonnes en 2030, soit une hausse de 37% par rapport à 2016 (FAO, 2018).

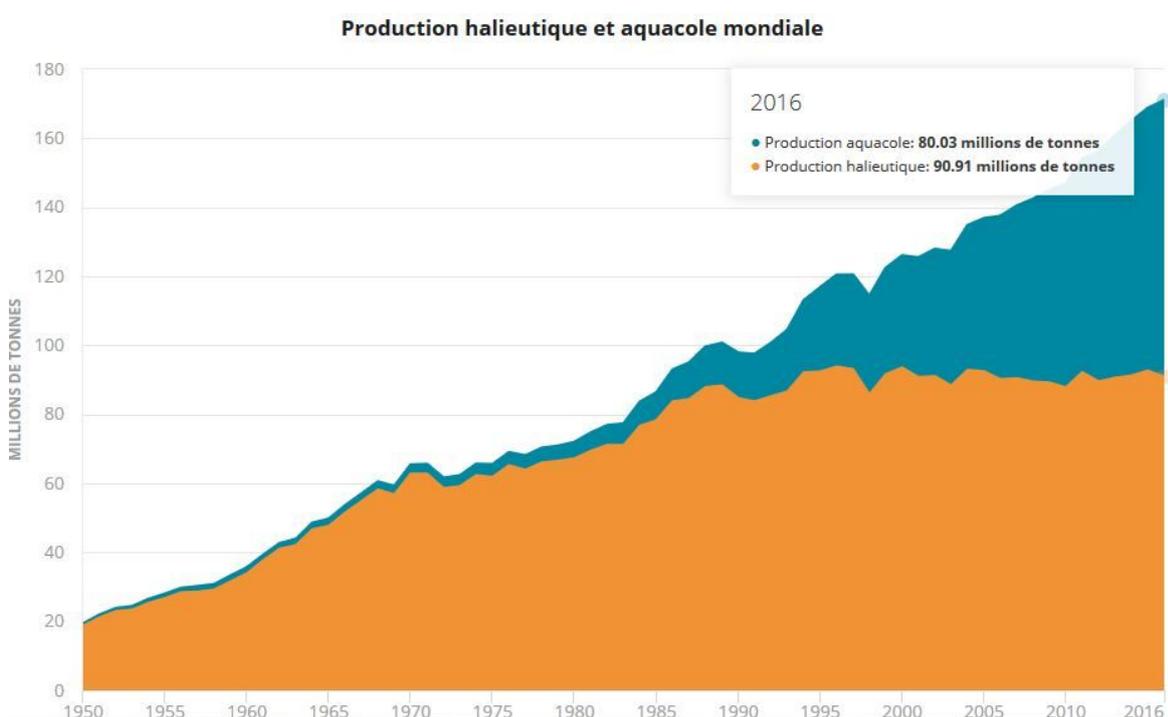


Figure 1 : évolution des captures de pêche et de l'aquaculture dans le monde (FAO, 2018)

Plus de la moitié des farines de poissons produites par la pêche minotière (57%) sont utilisées par l'aquaculture, 22% par les élevages de porcs et 14% par la filière volailles (Henry *et al.*, 2015). L'activité de pêche en mer atteint aujourd'hui un niveau élevé de surexploitation de quasi tous les océans (Watson *et al.*, 2013). Il faut rappeler que les besoins en protéines en aquaculture sont importants, les poissons carnivores élevés nécessitant des apports compris entre 45 et 55% et les espèces omnivores herbivores entre 35 et 45%, ce qui contraste avec les autres animaux d'élevage monogastriques qui ont des besoins compris entre 12 et 30% (Stamer, 2015). Les besoins protéiques des poissons d'élevage sont assez importants et peuvent varier de 30 à 55%. Les besoins en acides aminés essentiels sont comparables à ceux des vertébrés supérieurs (Vallod & Le Reste, 2017). Les besoins lipidiques sont aussi importants, de l'ordre de 10 à 28% avec certains acides gras nécessaires comme l'EPA ou le DHA. Les besoins protéiques des poissons sont strictement liés à leur profil d'acides aminés et ces exigences vont dépendre du profil de chaque espèce piscicole (Kaushik & Seiliez, 2010).

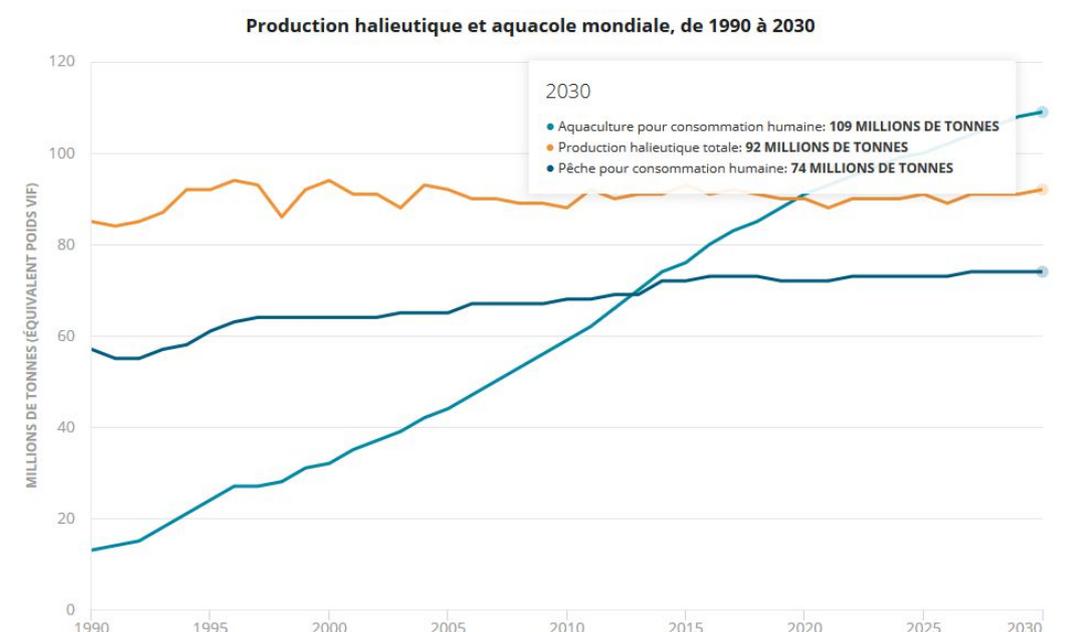


Figure 2 : production halieutique et aquacole mondiale, de 1990 à 2030 (FAO, 2018)

I.B. L'alimentation aquacole

La diminution de la disponibilité en farines, en huiles de poisson en raison de la surexploitation des stocks et l'augmentation des prix de ces ressources indispensables à la production d'aliments pour l'aquaculture stimulent la recherche d'alternatives durables, d'autant plus que 40 à 60% des coûts de production dans les systèmes aquacoles sont dus au poste alimentation (Kumar *et al.* 2017) (Figure 2). Cela a conduit à une substitution des ressources marines par des produits végétaux comme ingrédients pour les aliments pour poissons. La proportion de farine de poisson dans les aliments piscicoles a été réduite d'un tiers. Elle est remplacée par une combinaison de sources protéiques végétales qui

fournissent les acides aminés indispensables en quantité suffisante pour répondre aux besoins des poissons. Des acides aminés de synthèse sont néanmoins rajoutés. Les produits végétaux les plus utilisés en Europe sont des graines d'oléagineux (soja, colza, tournesol) sous forme de tourteaux ou de concentrés protéiques, des protéagineux (lupin, féverole, pois), des céréales (maïs, blé) ou des extraits de protéines obtenus à partir de céréales, comme par exemple les glutens. Néanmoins, les études ayant porté sur des taux de substitution très élevés (peu ou pas de farine de poisson) ont mis en évidence des verrous physiologiques bien que les régimes contenaient tous les nutriments nécessaires : une baisse de la consommation alimentaire, de l'efficacité alimentaire et du taux de croissance des poissons, ainsi que des modifications métaboliques (Burel & Medale, 2014 ; Parlement E., 2017). Une substitution partielle ou totale à partir de végétaux poserait aussi la question des terres arables disponibles (Stamer, 2015).

Depuis quelques années, les insectes commencent à jouer un rôle important en aquaculture comme sources de protéines (Stamer, 2015). En effet, ils présentent un taux élevé de protéines, par exemple certaines espèces comme la mouche soldat noire peuvent contenir jusqu'à 45% de protéines (larves). A noter aussi que certaines espèces de diptères offrent un profil en acides aminés proche de celui des poissons (Vallod & Le Reste, 2017).

La farine d'insectes peut être une importante source d'acides aminés essentiels tels que la méthionine. Ces valeurs sont supérieures à celles déclarées pour d'autres farines animales et végétales. En outre, les insectes sont également de bonnes sources de lipides, d'acides gras et les quantités et les types d'acides gras varient selon l'espèce, le stade de développement et le type d'aliment. (Nogales-Mérida *et al.*, 2018).

Les insectes présentent plusieurs avantages par rapport au végétal. Ils font partie du régime alimentaire naturel de plusieurs espèces de poissons. En France, un projet « Désirable » associant plusieurs équipes de recherche notamment de l'INRA et d'AgroParisTech a débuté en 2013 avec comme objectif de concevoir la bioraffinerie de demain, capable de fabriquer des tonnes de protéines d'insectes pour les poulets et poissons d'élevage (Mezdour, 2017).

Les insectes peuvent être nourris et produits à partir de matières organiques – déchets et/ou coproduits de l'agriculture et de l'industrie agro-alimentaire. Cependant, l'utilisation de protéines issues de ruminants, de déchets de cuisine et de table, de farines de viande, d'os et de lisier est interdite (Renard, 2017).

Autre avantage, leur production ne nécessite que peu de surface, peu de ressources et pas de terre arables.

Un colloque « Insectinov2 » s'est tenu à Paris en octobre 2017 animé, entre autres, par AgroParis Tech et avait pour but de présenter les avancées en recherche les plus récentes. Les présentations sont accessibles sur le site : <https://www.adebiotech.org/ins2/index.php?target=downloads>.

I.C. Les objectifs de PERIFF

Ces constats génèrent un certain engouement de la part de plusieurs acteurs qui n'hésitent pas communiquer régulièrement sur la substitution prochaine des farines de poissons indispensables dans l'alimentation des poissons d'élevage par de la farine d'insectes. Les premières études semblent montrer que malgré des perspectives intéressantes, le développement d'une telle filière pour l'alimentation aquacole n'est pas simple, au moins à court terme.

Plusieurs projets sont en cours actuellement sur cette thématique en Europe et dans le monde. Cette pré-étude va consister à réaliser une étude bibliographique et un benchmark afin de rédiger un état des connaissances sur l'emploi d'insectes dans l'alimentation aquacole. Plusieurs projets sont lancés ou vont débiter en France et en Europe, principalement pour l'alimentation des salmonidés dont la production reste majeure au niveau national avec plus de 38 700 tonnes (CIPA, 2018). D'autres travaux concernent les principales espèces marines d'élevage comme la dorade royale *Sparus aurata* (Cusimano *et al*, 2017).

PERIFF va s'intéresser principalement à deux espèces d'insectes qui semblent les plus prometteuses pour l'alimentation aquacole. Ce travail doit nous permettre dans un premier temps de mieux appréhender les enjeux pour les filières régionales de pisciculture et d'entomoculture. Dans un deuxième temps, si les conclusions sont favorables, cette pré-étude pourrait nous permettre de travailler sur une future expérimentation.

II. Etat des connaissances

II.1. La réglementation

Depuis le 1er juillet 2017, les PAT d'insectes sont autorisées dans l'alimentation des animaux d'aquaculture, les animaux familiers et les animaux à fourrure (Règlement (UE) 2017/893, 2017).

II.1.A. La liste des espèces autorisées

Les PAT d'insectes ne peuvent être préparées qu'à partir d'espèces d'insectes d'élevage. Sept espèces sont autorisées à l'élevage en Europe pour le moment.

Diptères : Mouche soldat noire (Black Soldier Fly – *Hermetia illucens*)
 Mouche domestique (Common Housefly – *Musca domestica*)

Coléoptères : Ténébrion meunier (Yellow Mealworm – *Tenebrio molitor*)
 Petit ténébrion mat (Lesser Mealworm – *Alphitobius diaperinus*)

Orthoptères : Grillon domestique (House cricket– *Acheta domesticus*)
 Grillon domestique tropical (Banded cricket– *Gryllodes sigillatus*)
 Grillon des steppes (Field cricket – *Gryllus assimilis*)

II.1.B. Les principales règles de production d'insectes

Depuis le 1er juillet 2017, les PAT d'insectes sont autorisées dans l'alimentation des animaux d'aquaculture et du Petfood. Elles sont interdites pour les autres filières animales. Un assouplissement de la réglementation pourrait intervenir pour la filière volaille en 2019. Des essais avaient montré de bons résultats techniques dans cette filière (Livet, 2015).

Le Règlement (UE) 2015/2283, qui abroge le Règlement (UE) n° 258/97 et qui est d'application depuis le 1er janvier 2018, définit que tous les produits à base d'insectes (pas seulement les parties d'insectes ou des extraits, mais aussi les insectes entiers et leurs préparations) sont considérés comme Novel Food, en raison de l'absence de preuve de consommation significative dans l'Union européenne avant le 15 mai 1997.

Comme le souligne la Note de service DGAL/SDSPA/2017-860 du 27/10/2017 en rappelant l'article 3.6 du règlement sanitaire relatif aux sous-produits animaux (CE) n°1069/2009 ; « tout animal détenu, engraisé ou

élevé par les êtres humains et utilisé pour la production d'aliments » est un animal d'élevage. En conséquence, l'élevage d'insectes en vue de la production de denrées alimentaires ou d'aliments pour animaux est soumis aux règles applicables à l'alimentation des animaux d'élevage destinés à l'alimentation humaine.

C'est pourquoi les insectes destinés à la production de denrées alimentaires ou d'aliments pour animaux ne peuvent pas être alimentés avec des matières premières interdites en alimentation animale telles que : le lisier, les déchets et cuisines de table et le bois traité. L'utilisation de protéines issues de ruminants, de déchets de cuisine et de table, de viande et d'os et de lisier est interdite dans l'alimentation des insectes. En revanche les insectes peuvent être nourris avec des matières premières végétales (biodéchets végétaux, résidus végétaux agroalimentaire et grande distribution...) et avec certains produits d'origine animale.

A noter que ce type d'élevage peut même relever de la nomenclature installation classée depuis 2018 (Arrêté du 21 novembre 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE).

Aucune exigence n'est formulée pour la mise à mort des animaux pour le moment, mais les usines de transformation doivent être dédiées à la production de PAT d'insectes et les usines de production d'aliments composés les utilisant doivent être dédiées à la production d'aliments composés pour animaux d'aquaculture.

A noter aussi qu'en application de l'article 14 du règlement (CE) n°1069/2009, il n'est pas autorisé d'utiliser des sous-produits animaux dans l'alimentation des animaux d'élevage destinés à la consommation humaine sans transformation préalable. L'alimentation directe des animaux d'élevage avec des insectes morts sans transformation préalable n'est donc pas autorisée. L'utilisation directe d'insectes sans transformation est néanmoins possible, en application de l'article 18 du règlement (CE) n° 1069/2009, pour certains animaux, dont la caractéristique commune est de ne pas être destinés à la consommation humaine, comme producteurs de fourrure et les animaux producteurs d'appâts de pêche (ex : verminières) mais du coup aussi pour les poissons d'ornements !!!

II.2. Les espèces ciblées

Deux espèces d'insectes issues d'élevage parmi les sept autorisées sont concernées par l'étude ; la mouche soldat noire (figure 4) dite Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) ou BSF ou plutôt sa larve et le vers de farine qui est la larve du Ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*) (figure 3). La BSF est produite dans les Pays de la Loire par les sociétés Greensoldier et Cycle Farms basés respectivement à Gétigné (44) et à Beaufort (49). Le Ténébrion est produit par la société Innoprotea basée à Nantes.

Elles font parties actuellement des espèces les plus testées pour l'alimentation aquacole (Mezdour, 2017 ; Vallod & Le Reste, 2017).

II.2.A. Le Ténébrion meunier : *Tenebrio molitor*

Embranchement: Arthropoda
Sous-embranchement: Hexapoda
Classe: Insecta
Ordre: Coleoptera
Famille: Tenebrionidae
Genre: *Tenebrio*
Espèce: *Tenebrio molitor* (Linnaeus, 1758)

Nom vernaculaire anglais: Yellow Mealworm.
Nom vernaculaire: Ver de farine, ténébrion meunier.



Figure 3: ténébrion meunier et sa larve

Les vers de farine sont des parasites des céréales et de la farine (*Ramos-Elorduy et al., 2002*). Le ver de farine est certainement l'insecte le plus vendu dans le monde pour nourrir toutes sortes d'animaux. Ce sont les larves qui présentent un intérêt alimentaire étant riches en protéines et en lipides et pauvres en cendres. Les larves de vers de farine sont généralement utilisées vivantes, mais peuvent également être utilisées comme farine (*Makkar et al., 2014*).

II.2.B. La Mouche soldat noir : *Hermetia illucens*

Embranchement: Arthropoda
Sous-embranchement: Hexapoda
Classe: Insecta
Ordre: Diptère
Famille: Stratiomyidae
Genre: *Hermetia*
Espèce: *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758)

Nom vernaculaire anglais: Black Soldier Fly ou BSF
Nom vernaculaire: Mouche soldat noir



Figure 4: mouche soldat noir et sa larve

C'est la larve de la mouche soldat noire qui a été bien étudiée en nutrition piscicole. Même si cette espèce est originaire d'Amérique du nord, elle est présente sur le continent européen et en France depuis plus de 50 ans. Elles se trouvent en abondance et naturellement autour des tas de fumier des volailles, porcs et bovins. Les larves sont également présentes dans des populations très denses de déchets organiques tels que la pulpe de café en grains, les légumes, les déchets de distillerie et les déchets de poisson (sous-produits de la transformation du poisson). La mouche soldat noire adultes n'est pas attirée par les habitats ou les aliments propres à l'homme et, pour cette raison, n'est pas considérée comme une nuisance. Ce sont les plus efficaces de toutes les espèces de mouches pour ce qui est de la digestion de matières organiques.

II.3. Les essais d'aliments contenant des insectes

Des essais intéressants ont été effectués sur des poissons d'eau douce, principalement du Tilapia ou du Clarias en testant des insectes entiers ou découpés vivants ou congelés en Afrique et en Asie avec de bons résultats de croissance (Ng *et al.*, 2002 ; Oyelese, 2007). Nourrir ces espèces de poissons avec des asticots ou des vers de farine vivants ou hachés est donc une bonne option, surtout dans les pays où les aliments disponibles sont de qualité irrégulière ou mauvaise (Ogunji & Awoke, 2017). La réglementation européenne n'autorise pas l'emploi d'insectes morts sans transformation préalable pour l'alimentation directe des animaux d'élevage. Les produits transformés potentiellement intéressants sont la farine d'insecte et l'huile d'insecte.

II.3.A. La farine de vers de farine

Un taux d'incorporation de 9% de farine (Taux de Supplément de Farine de Poisson TSFP de 20%) permet une croissance optimale du poisson-chat africain (Clarias). Cette farine pourrait même être incluse à plus de 26% dans l'aliment (TSFP de 60%) sans affecter significativement la croissance ou l'alimentation des poissons-chats africains, mais des taux d'incorporation plus élevés (35-43% correspondant à un TSFP de 80-100%) diminuent la performance de croissance des poissons, ainsi que l'efficacité alimentaire (Ng *et al.*, 2002). L'incorporation de farine de Ténébrion dans l'alimentation de l'élevage larvaire de Tilapia semble avoir donné de bon résultats de croissance selon une étude colombienne (Arroyave-Eusse *et al.*, 2018).

Ces farines ont également été utilisées avec succès pour l'alimentation de la Truite Arc-en-Ciel ou TAC *Oncorhynchus mykiss*, avec des taux d'incorporation allant de 19 à 38% dans l'aliment (soit 25 à 50% de TSFP) sans différence de croissance significative (Gasco *et al.*, 2014 ; Belforti *et al.*, 2016). Il serait même possible d'aller jusqu'à 66% de TSFP pour la TAC avec une croissance inchangée et un indice de conversion amélioré (IC de 1,2 avec le régime témoin et 1 avec le régime « insecte ») et un meilleur taux de survie qu'avec le régime témoin : ces meilleures performances en terme d'indice de conversion s'expliqueraient par le fait que les poissons ont atteint la satiété plus rapidement qu'avec le régime témoin en raison de la plus forte concentration en graisses dans l'aliment à base d'insectes (Belforti *et al.*, 2016). Toujours sur de la TAC, des travaux ont montré une meilleure survie, une meilleure croissance et une meilleure efficacité protéique avec un aliment contenant du vers de farine (25 et 50% taux d'inclusion) mais a contrario une moins bonne conversion alimentaire (Renna *et al.*, 2015). Une autre étude a montré un effet positif du remplacement partiel de la farine de poisson par de la farine de vers de farine sur la croissance de TAC avec un renforcement des activités enzymatiques intestinales antimicrobiennes (Henry *et al.*, 2018).

D'autres tests ont été menés sur la Daurade Royale : un taux d'incorporation de 12,5% (TSFP de 25%) n'a pas affecté la croissance des poissons juvéniles (poids initial de 45g) de manière significative par rapport au régime témoin, contrairement au taux d'incorporation de 25% (TSFP de 50%) qui a induit une moins bonne croissance qu'avec un régime témoin. Une autre étude a montré que l'on pouvait atteindre une meilleure croissance qu'avec un régime témoin chez la Daurade (poids initial de 105g) avec un taux d'incorporation de 25% (TSFP de 35%), et une croissance similaire avec un taux d'incorporation de 50% (TSFP de 71%) (Piccolo *et al.*, 2014 ; Piccolo *et al.*, 2017). De meilleures croissances ont aussi été montrées sur le poisson d'ornement, le Madarin Leopard *Siniperca scherzeri* (Sankian *et al.*, 2018)

Des tests ont été menés sur le Bar européen *Dicentrarchus labrax* et ont obtenu des performances de croissance similaires entre un régime témoin et un régime avec taux d'incorporation de 17,5% (TSFP de 25%), et de moins bonnes performances avec un régime avec taux d'incorporation de 25% (TSFP de 50%) (Gasco *et al.*, 2014). Comme certaines études sur la truite, les performances de croissance des poissons en termes de gain de poids ont augmenté chez le Sébaste Coréen *Sebastes schlegeli* avec l'augmentation de l'inclusion alimentaire jusqu'à 16%, puis ont eu tendance à diminuer avec la poursuite de l'augmentation des niveaux d'inclusion dans l'alimentation jusqu'à 32% mais avec des valeurs qui restaient comparables (Khosravi *et al.*, 2018).

Un taux de substitution de la farine de poissons (TSFP) supérieur à 25% semble donner de mauvais résultats pour les espèces carnivores marines (Daurades, Bar) tandis que pour la Truite un TSFP jusqu'à 66% serait possible sans dégrader les performances zootechniques (Tocher, 2003). Un TSFP de 75% semble donner de bons résultats pour les espèces omnivores comme le Tilapia et le Poisson-Chat, parfois même avec 100% TSFP pour le Poisson-Chat.

II.2.B. La farine de BSF

De nombreuses études ont été réalisées et largement décrites (Makkar *et al.*, 2014, Henry *et al.*, 2015): aucun niveau d'incorporation de BSF dans l'aliment piscicole n'a conduit à une meilleure performance des poissons que les poissons nourris avec des régimes témoins riches en farine de poisson.

Cependant, certains niveaux d'incorporation de larves de BSF ont montré des performances de croissance similaires à celles des poissons nourris avec des aliments à base de farines de poissons :

- 6% d'incorporation alimentaire chez le Poisson-Chat (TSFP de 25%), (Newton *et al.*, 2005)

-15% (TSFP de 25%) ou 18 - 36% (TSFP de 25-50%) d'incorporation alimentaire chez la truite arc-en-ciel, avec une teneur améliorée AGPI et AGHI Omega 3 dans les filets de poisson nourris avec de la BSF (Sealey *et al.*, 2011).

- 5-25% d'incorporation chez des Saumons Atlantiques (*Salmo salar*) de poids initial 250g (TSFP de 25% à 100%, car les régimes témoins ne présentaient à la base que 20% de farines de poissons ce qui induit que le témoin n'était pas représentatif des régimes conventionnels) sachant que les régimes BSF ont été « corrigés » avec des acides aminés essentiels (Lysine et Méthionine) et également que la farine était séchée à basse température et faiblement dégraissée ; les farines très dégraissées ont donné de mauvais résultats quel que soit le taux d'incorporation (Lock *et al.*, 2014).

-19,5% d'incorporation (45% TSFP) chez le Bar, qui présente des performances de croissance similaire avec un aliment témoin contenant 43% de farines de poissons, avec toutefois une baisse du coefficient d'efficacité protéique (Magalhães *et al.*, 2017). Des performances de croissances similaires aux aliments témoins ont été mesurés sur de la Daurade nourrit avec de l'aliment contenant de la farine de BSF (Cusimano *et al.*, 2017).

Des taux d'incorporation de 12-30% (TSFP de 50 à 100%) ont réduit significativement la croissance des poissons chez les Poissons-Chats. Le Turbot juvénile (*Psetta maxima*) accepterait des régimes contenant jusqu'à 33% de farine de BSF dégraissée. Cependant, le taux de croissance spécifique était significativement plus bas pour tous les niveaux d'incorporation testés. A des niveaux d'incorporation supérieurs à 33%, la palatabilité du régime alimentaire et la digestibilité des protéines ont diminué, ce qui a entraîné une augmentation de l'indice de conversion et une diminution de la croissance du Turbot (Kroeckel *et al.*, 2012).

Au contraire, les résultats de la digestibilité des protéines et des lipides de BSF étaient très bons chez le Saumon Atlantique (Lock *et al.*, 2014), et chez le bar nourris avec des aliments présentant un TSFP allant jusqu'à 19,5%, ce qui correspond à 22,5% des protéines alimentaires totales sans affecter les performances de croissance (Magalhães *et al.*, 2017). Chez le Saumon Atlantique, une étude a montré que la farine et l'huile de protéines provenant des larves de BSF ont un grand potentiel en tant que source de nutriments pour le Saumon Atlantique (Belghit *et al.*, 2018).

La TAC semble supporter jusqu'à 40% d'incorporation (TSFP de 50%) avec des divergences de résultats selon le processus de transformation des larves et selon le régime alimentaire des larves (Sealey *et al.*, 2011 ; Gasco *et al.*, 2014; Stadtlander *et al.*, 2017).

Plusieurs études montrent qu'un TSFP de 50% pour la Truite Arc en Ciel dans leur cas n'induisait pas de différences significatives de croissance, d'efficacité protéique et d'indice de conversion par rapport à un lot témoin et ce, avec un même taux de rationnement pour chaque modalité (Gasco *et al.*, 2014 ; Renna *et al.*, 2017 ; (Stadtlander *et al.*, 2017 ; Mancini *et al.*, 2018) même si une autre étude a montré que l'inclusion recommandée de farine de BSF dans le régime de la Truite serait de 13 % (Dumas *et al.*, 2018).

Chez l'Esturgeon Sibérien (*Acipenser Baeri*), des tests ont montré des performances de croissance équivalentes entre des lots nourris avec de la farine de poissons et des lots nourris avec TSFP de 25% de farine de BSF (Gasco *et al.*, 2018).

D'autres travaux ont montré que le remplacement de 30 % de la farine de poisson par de la farine de BSF n'a pas affecté les taux de croissance du Poisson Zèbre *Danio rerio* (Vlahos *et al.*, 2018) et que le remplacement de 50% n'a pas non plus modifié les performances de croissance du Tilapia *Oreochromis niloticus* (Muin *et al.*, 2016).

Chez des juvéniles de Carpe commune *Cyprinus carpio*, des régimes comprenant un TSFP de 25% à 75% n'ont pas influé sur les performances de croissance par rapport à un lot témoin. La teneur en lipides et en cholestérol sérique de l'hépatopancréas des groupes nourris avec la farine d'insectes était significativement inférieure à celle du groupe témoin. Un TSFP supérieur à 50% induisait des problèmes de digestibilité (Li *et al.*, 2017).

Tableau 1: composition en acides aminés (g/16 g d'azote) des farines d'insectes par rapport aux besoins en protéines alimentaires de référence de la FAO de la farine de soja et de la farine de poisson adaptée de Makkar *et al.*, 2014 ; Tran *et al.*, 2015.

Amino acids	Black soldier fly larvae	Housefly maggot meal	Mealworm	Locust meal	House cricket	Mormon cricket	Silkworm pupae meal	Silkworm pupae meal (defatted)	Fishmeal	Soymeal	FAO Reference protein ¹
Essential											
Methionine	2.1	2.2	1.5	2.3	1.4	1.4	3.5	3.0	2.7	1.32	2.50 ²
Cystine	0.1	0.7	0.8	1.1	0.8	0.1	1.0	0.8	0.8	1.38	
Valine	8.2	4.0	6.0	4.0	5.1	6.0	5.5	4.9	4.9	4.50	3.50
Isoleucine	5.1	3.2	4.6	4.0	4.4	4.8	5.1	3.9	4.2	4.16	2.80
Leucine	7.9	5.4	8.6	5.8	9.8	8.0	7.5	5.8	7.2	7.58	6.60
Phenylalanine	5.2	4.6	4.0	3.4	3.0	2.5	5.2	4.4	3.9	5.16	6.30 ³
Tyrosine	6.9	4.7	7.4	3.3	5.2	5.2	5.9	5.5	3.1	3.35	
Histidine	3.0	2.4	3.4	3.0	2.3	3.0	2.6	2.6	2.4	3.06	1.90
Lysine	6.6	6.1	5.4	4.7	5.4	5.9	7.0	6.1	7.5	6.18	5.80
Threonine	3.7	3.5	4.0	3.5	3.6	4.2	5.1	4.8	4.1	3.78	3.40
Tryptophan	0.5	1.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.9	1.4	1.0	1.36	1.10
Non-essential											
Serine	3.1	3.6	7.0	5.0	4.6	4.9	5.0	4.5	3.9	5.18	-
Arginine	5.6	4.6	4.8	5.6	6.1	5.3	5.6	5.1	6.2	7.64	-
Glutamic acid	10.9	11.7	11.3	15.4	10.4	11.7	13.9	8.3	12.6	19.92	-
Aspartic acid	11.0	7.5	7.5	9.4	7.7	8.8	10.4	7.8	9.1	14.14	-
Proline	6.6	3.3	6.8	2.9	5.6	6.2	5.2	-	4.2	5.99	-
Glycine	5.7	4.2	4.9	4.8	5.2	5.9	4.8	3.7	6.4	4.52	-
Alanine	7.7	5.8	7.3	4.6	8.8	9.5	5.8	4.4	6.3	4.54	-

¹Reference for the 2-5 year old child.

²Methionine plus cystine.

³Phenylalanine plus tyrosine.

Tableau 2 : composition en acides gras de lipides d'insectes adaptée de Makkar et al., 2014 (Tran *et al.*, 2015)

Constituents in (% fatty acids)	Black soldier fly larvae ¹	Housefly maggot meal	Mealworm	House cricket	Fish oil ²
Saturated fatty acids (%)					
Lauric, 12:0	21.4 [49.3] (42.6)	-	0.5	-	
Myristic, 14:0	2.9 [6.8] (6.9)	5.5	4.0	0.7	3.7-7.6
Palmitic, 16:0	16.1 [10.5] (11.1)	31.1	21.1	23.4	10.2-20.9
Stearic, 18:0	5.7 [2.78] (1.3)	3.4	2.7	9.8	1.1-4.7
Monosaturated fatty acids (%)					
Palmitoleic, 16:1n-7	[3.5]	13.4	4.0	1.3	8.7-12.5
Oleic, 18:1n-9	32.1 [11.8] (12.3)	24.8	37.7	23.8	11.4-18.6
Polyunsaturated fatty acids (%)					
Linoleic, 18:2n-6	4.5 [3.7] (3.6)	19.8	27.4	38.0	1.1-1.3
Linolenic, 18:3n-3	0.19 [0.08] (0.74)	2.0	1.2	1.2	0.3-0.8
Eicosapentaenoic (EPA), 20:5n-3	0.03 [0] (1.66)	-	-	-	3.7-16.9
Docosahexaenoic (DHA), 22:6n-3	0.006 [0] (0.59)	-	-	-	2-21.9

¹Values using cow manure as substrate. Round parentheses are the values obtained on using 50% of cow manure and 50% of fish offal as substrate. Square parentheses are values obtained on swine manure as substrate.

²Adapted from Sauvante *et al.*, 2004.

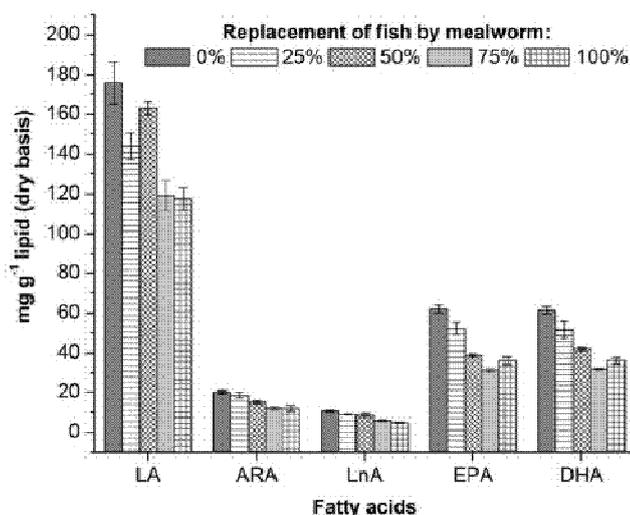
II.4. La qualité des poissons nourris avec les insectes

Un essai mené avec la Truite Arc-en-Ciel avec un TSFP de 25% a montré que la teneur en protéines augmentait et que la teneur en lipides des filets diminuait par rapport au témoin (Belforti *et al.*, 2015 ; Renna *et al.*, 2015). Différents taux d'inclusion ont un effet négatif sur la concentration d'adénosine monophosphate. Les acides gras saturés, principalement en C12: 0, ont augmenté leur teneur en relation avec l'inclusion aux dépens des acides gras monoinsaturés et polyinsaturés (n-3 et n-6) (Mancini *et al.*, 2018). Même si ces régimes n'affectent pas la texture générale des filets, ils peuvent considérablement influencer le profil sensoriel des filets (Borgogno *et al.*, 2016).

Les Poisson-Chats et les Tilapias nourris exclusivement de larves BSF entières auraient un arôme et une texture différents par rapport aux poissons nourris avec de l'aliment conventionnel ou avec un aliment seulement en partie substitué avec des larves de BSF (Bondari & Sheppard, 1981). D'autres études sur de la TAC, sur du Saumon Atlantique, sur du Poisson Chat africain et sur différents cyprinidés n'ont pas montré de différences organoleptiques avec des TSFP pouvant aller jusqu'à 100% malgré les différences constatées dans les profils en acides gras (Sealey *et al.*, 2011 ; Basto *et al.* 2018).

Une étude sur la Crevette blanche du Pacifique (*Litopenaeus vannamei*) a montré qu'une substitution partielle de farine de poisson par de la farine de Ténébrion n'avait pas altéré la texture et la couleur de la chair mais plutôt le profil d'acide gras (Panini *et al.*, 2017), ce qui n'est pas problématique pour le marché de l'alimentation humaine.

Figure 5 : Acides gras polyinsaturés mesurés dans le tissu musculaire de *Litopenaeus vannamei* élevé sur des régimes remplaçant la farine de poisson par le ver de farine après une période de culture de six semaines (LA, l'acide linoléique; ARA, acide arachidonique; LnA, acide linoléique; EPA, acide eicosapentaénoïque; DHA, acide docosahexaénoïque).



Une autre étude sur la Crevette blanche a montré un effet bénéfique sur la croissance avec un taux de remplacement de la farine de poisson pouvant atteindre les 50% (Choi *et al.* 2018)

D'autres travaux ont conclu que la BSF pouvait partiellement remplacer la farine de poisson comme source alternative de protéines dans l'alimentation de post-Larve de Chevrette *Macrobrachium. Rosenbergtii* (Rasid *et al.*, 2018).

Chez le Bar européen nourri avec un TSFP de 25%, est observé une forte diminution du taux d'acides gras hautement insaturés (AGHI) oméga 3 (EPA, DHA) dans les filets (Gasco *et al.*, 2014). Cela a également été noté pour la TAC qui a vu son taux d'oméga 3 diminuer de 73% par rapport au régime témoin à base de farines de poissons, et ce avec un TFSP de 66% , ce qui a pour effet de diminuer drastiquement les ratios oméga 3/oméga 6 et par la même l'intérêt nutritionnel des poissons (Belforti *et al.*, 2016). L'absence d'EPA et de DHA dans le profil des acides gras des insectes est également une limite à leur inclusion dans les l'alimentation des poissons marins (Tran *et al.*, 2015).

Pour la TAC, malgré les différences constatées dans les profils en acides gras, aucune différence organoleptique significative n'a été obtenue. Les régimes n'ont pas affecté la couleur des filets crus et cuits voire ont même amélioré la couleur des filets (Sealey *et al.*, 2011 ; Mancini *et al.*, 2018). La farine de larves BSF partiellement dégraissée est une source de protéines alternative valide et peut remplacer jusqu'à 50% de la farine de poisson dans l'alimentation pour Truite Arc-en-Ciel sans altération des indices organosomatiques ni du rendement en filets. (Bruni *et al.*, 2018). Dans une autre étude, l'incorporation de farine de Ténébrion dans l'alimentation de Sébastes Coréens a diminué les triglycérides mais n'a pas modifié les profils d'acides aminés (Khosravi *et al.*, 2018).

Chez des poissons nourris avec des larves de BSF, le profil d'acides gras évolue avec notamment remplacement des acides gras insaturés par de l'acide laurique et des acides gras saturés en général, conformément au profil en acides gras de cet insecte (Mancini *et al.*, 2018). Cet impact négatif sur la composition en AGPI semble être non significatif pour des TSFP de moins de 20% (Renna *et al.*, 2017). Même avec un remplacement de 85% des protéines alimentaires par de la protéine d'insectes, les fortes teneurs en acide laurique et en acides gras saturés semblent très digestibles pour le saumon atlantique sans impact mesuré sur la santé (Belghit *et al.*, 018).

Les peptides d'insectes ayant une activité contre la microflore pathogène fournissent des effets biologiques secondaires susceptibles d'améliorer considérablement la santé des animaux (Nogales-Mérida *et al.*, 2018).

Des différences non significatives de digestibilité ont pu être mesurées sur de la TAC nourries avec de la farine de poissons et de la farine contenant de la BSF (Langeland *et al.*, 2017). A noter que certaines études considèrent la chitine comme un facteur antinutritionnel pour la Truite (Kroeckel *et al.*, 2012 ; Burel *et al.* , 2016). La supplémentation avec de la chitinase et chitobiase permet d'améliorer la digestibilité. La chitine pourrait être aussi éliminée par extraction alcaline (Sanchez-Muros *et al.* 2014) mais tous ces procédés ont un coût. Cependant, d'autres études montrent que la chitine ne pose pas de problème de digestion et favoriserait même les défenses immunitaires de l'organisme (Lindsay *et al.*, 1984 ; Alegbeleye *et al.*, 2012).

Un régime contenant un fort taux d'inclusion de farine d'insectes (BSF) ne semble pas fragiliser la santé intestinal des saumons voire limiterait les dépôts lipidiques excessifs dans le caecum pylorique et pourrait stimuler le métabolisme des xénobiotiques (Li *et al.*, 2018). Les tests microbiologiques ont révélé que les bactéries intestinales de TAC nourries avec de la farine BSF étaient sensibles aux changements alimentaires, montrant une communauté modifiée et une biodiversité accrue (Bruni *et al.*, 2018). Une autre étude a montré une augmentation significative du microbiote intestinal chez de l'esturgeon nourrit avec un aliment contenant 15% d'inclusion de farine de BSF par rapport à ceux nourrit uniquement avec de la farine de poisson. Par contre cette différence n'est pas significative quand l'aliment contient de la farine de Ténébrion (Nogales-Mérida, Mazurkiewicz, *et al.*, 2018). Une alimentation de Bar, de Daurade et de Truite Arc en Ciel avec un aliment contenant de la farine de Ténébrion a eu pour conséquence un changement différentiel des bactéries dominantes

dans l'intestin de chaque espèce avant et après le remplacement de repas alimentaire, ce qui implique qu'une approche spécifique à chaque espèce dans les manipulations alimentaires (Antonopoulou *et al.*, 2018).

Les résultats d'une étude montrent que le ver de farine peut remplacer avec succès la farine de poisson dans l'alimentation des juvéniles de Truite Fario *Salmo trutta* à un taux d'inclusion de 10% sans effet négatif sur les fonctions hépatiques (Talibov *et al.*, 2018).

Sealey *et al.* 2011 ont constaté une différence de croissance entre la Truite Arc-en-Ciel nourrie avec un aliment contenant de la farine de BSF élevé dans un régime à base de fumier de vache et d'abats de poisson par rapport à un régime à base de fumier de vache uniquement. Une autre étude a montré sur du saumon atlantique des différences de croissance entre deux aliments contenant chacun de la farine de mouche soldat noir. Les performances d'un des régimes se rapprochaient de ceux de l'aliment témoin à l'inverse du deuxième régime qui avaient des performances moindres. Ces différences pouvaient s'expliquer par un profil lipidique différent directement imputable aux substrats d'élevage initiaux (Lock *et al.* 2015). Cependant, la composition du substrat et la teneur en lipide des insectes ne concordent pas nécessairement. Il existe donc une régulation physiologique de la composition des acides gras. D'autres conditions telles que la température, l'humidité et les stades de développement sont également des facteurs qui ont un impact sur les lipides et les acides gras (Bragd, 2017).

La composition des insectes et donc leur valeur nutritionnelle va dépendre fortement de l'espèce, du stade de développement et du substrat utilisé pour nourrir les insectes, même à l'intérieur d'un même taxon. Par exemple, la concentration lipidique rapportée dans la littérature varie de 15 à 35 % pour les larves de BSF. Tous ces résultats quelque fois contradictoires devront être confirmés par d'autres études car les protocoles, les méthodologies ne sont pas toujours comparables même si globalement une substitution partielle de farine de poissons par de la farine d'insecte semble prometteuse. Les travaux devront se focaliser sur la meilleure adéquation espèce piscicole espèce d'insecte voire un mélange d'insectes produits sous des conditions maîtrisées (Nogales-Mérida *et al.*, 2018).

II.5. Les aspects technico économiques

L'élevage massif d'insectes est d'ores et déjà répandu dans le monde entier, en particulier pour la production de soie, d'appâts et d'aliments pour animaux de compagnie (poissons, oiseaux et reptiles) et pour le contrôle biologique des espèces nuisibles (FAO, 2013a). De petites unités de production de BSF, de vers de farine, de criquets et de sauterelles sont en cours de création en Europe et dans le reste du monde (Ynsect, France ; Entomofeed ; France ; Greensoldier ; France ; Innoprotea ; France ; Protix, Pays-Bas ; Hermetia, Allemagne ; Insolv, USA ; Enviroflight, États-Unis ; Enterra Feed, Canada ; Entologics, Brésil) et une très grande unité de production de farine d'asticot a déjà été établie en Afrique du Sud produisant 3 t d'asticots par jour).

Peu de données technico économiques sont disponibles. L'augmentation supposée des prix de farine de poisson pourrait rendre les coûts de production en grand volume d'insectes compétitifs. Quand on regarde l'évolution des prix moyens de la tonne de farine de poisson depuis 20 ans, elle a augmenté de plus de 160 % (entre 500 et 1320 €) mais cette hausse a surtout concerné les dix premières années. Depuis 5 ans avec des fluctuations, le prix moyen de la tonne évolue peu soit entre 1 100€ et 1 400 € la tonne (figure 6). Depuis 1 an, il est constant soit entre 1280 et 1320 € la tonne (<https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/?marchandise=farine-de-poisson&mois=12>).

L'emploi de sous-produits peu coûteux et l'automatisation sont des pistes importantes pour la rentabilité des productions d'insectes (Heckmann *et al.*, 2018)

Avant que les insectes puissent être utilisés pour la production industrielle d'aliments pour poissons, la recherche et le développement sont nécessaires dans la faisabilité d'augmenter la production d'insectes à une échelle économique. Une entreprise viable capable de fournir des insectes en quantités industrielles doit être étudiée au-delà des unités expérimentales ou pilotes. Ce constat comprend la mise au point d'un régime alimentaire rentable pour les insectes et l'élaboration de l'ingénierie d'infrastructures spécifiques (Macombe *et al.*, 2017), y compris l'automatisation d'élevage pour réduire les coûts de main d'œuvre. Pour que les farines d'insectes soient compétitifs avec les sources de protéines traditionnelles, elles doivent avoir des caractéristiques distinctives avantages en termes de valeur nutritionnelle et de prix et devraient être disponibles toute l'année dans des qualités bien définies et constantes (Tran *et al.*, 2015).



Figure 6 : Evolution sur 20 ans de la Farine de poisson Prix Mensuel - Euro por Tonne métrique (<https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/>)

II.6. L'impact environnemental

Plusieurs études semblent montrer l'intérêt de la mouche soldat noir pour le traitement de bio déchet notamment sur les émissions de gaz à effets de serre. Les insectes pourraient constituer une solution de stockage du carbone sous forme organique (tout en constituant une source de protéines et de lipides pour l'alimentation animale), qui serait autrement émis dans l'atmosphère par la décomposition microbienne sous forme de méthane ou de CO₂ (Salomone *et al.*, 2016; Perednia *et al.*, 2017). Ces émissions pourraient être même quarante-sept fois moins élevées qu'avec le compostage de bio-déchets. Le remplacement de la production de farine de poisson par de la farine de larves de BSF peut réduire considérablement le potentiel de réchauffement planétaire (jusqu'à 30%) (Mertenat *et al.*, 2019). Une autre étude met en avant le rôle que pourrait avoir la mouche soldat noir pour le traitement d'une partie des effluents agricoles types lisiers ou fumiers (Newton *et al.*, 2005). Le plus prometteur parmi ceux-ci en termes de recyclage des déchets alimentaires est la mouche soldat noir (Stamer, 2015).

D'autres études ont travaillé sur l'analyse de cycle de vie du remplacement de protéine de poisson dans l'aliment par de la farine d'insecte. Les productions d'insectes comme sources de protéines ne sont pas aussi durables que ce qui est couramment annoncé. Tout va dépendre du régime alimentaire des insectes. La performance environnementale des aliments à base d'insectes pourrait être bénéfique, à condition de choisir un régime alimentaire approprié. Plusieurs facteurs vont avoir un effet direct sur les performances environnementales des régimes d'insectes, des technologies de culture et de transformation etc. Par exemple, l'impact environnemental de la poudre de protéine d'insecte (régime de haute qualité) était au moins deux fois supérieure à la poudre de protéine de lactosérum utilisée comme complément alimentaire sportif (Smetana, *et al.*, 2016). L'impact positif principal de la production de protéine d'insecte concerne la faible utilisation de terres arables. Par contre, le principal impact négatif est liée à la consommation d'énergie (Salomone *et al.*, 2016).

Des analyses ont été effectuées sur la performance environnementale de la production de farine de vers de farine en utilisant quatre paramètres que les experts ont identifiés comme étant essentiels à cette performance : la consommation d'électricité au stade de la ferme, la consommation d'électricité au stade de la transformation, le repas et le rendement en huile au stade de la transformation. Pour ces quatre critères, la production d'un kilo de vers de farine nécessite plus d'énergie que pour 1kg de soja ou de farine de poisson en lien avec les rendements en farine et en huile mais aussi la consommation électrique et l'apport alimentaire (tableaux 3, 4 et figure 7). L'étude précise quand même que l'amélioration notable des process devrait permettre de diminuer sensiblement cet impact environnemental (Thevenot *et al.*, 2018).

Tableau 3 : performance environnementale d'un kg de larves fraîches à la sortie de la ferme et d'un kg de farine de larves à la sortie de la transformation (Thevenot *et al.*, 2018).

CED cumulative energy demand ; CC climate change ; AP acidification, EP eutrophication ; LU land use.

Product and boundary	CED	CC	AP	EP	LU
	MJ	Kg CO ₂ eq	g SO ₂ eq	g PO ₄ eq	M ² a
1 kg fresh larvae at farm gate	24,29	0,99	7,81	5,17	1,60
1kg larvae meal at processing gate	141,29	3,75	25,60	14,97	4,13

Tableau 4 : comparaison de l'évaluation de l'impact sur le cycle de vie d'un kilogramme de protéines de farine, d'insecte, de farine de soja et de farine de poisson livrée en France (Thevenot *et al.*, 2018).

	Mealworm larvae meal	Soybean (Brazil)	Fish meal (Peru)
CED (MJ)	217,37	31,17	25,62
CC (Kg CO ₂ eq)	5,77	4,09	1,69
AP (g SO ₂ eq)	39,38	17,61	6,59
EP (g PO ₄ eq)	23,03	16,45	2,63
LU (M ² a)	6,35	4,34	0,01

Analyse du Cycle de Vie Pour 1 kg de protéine

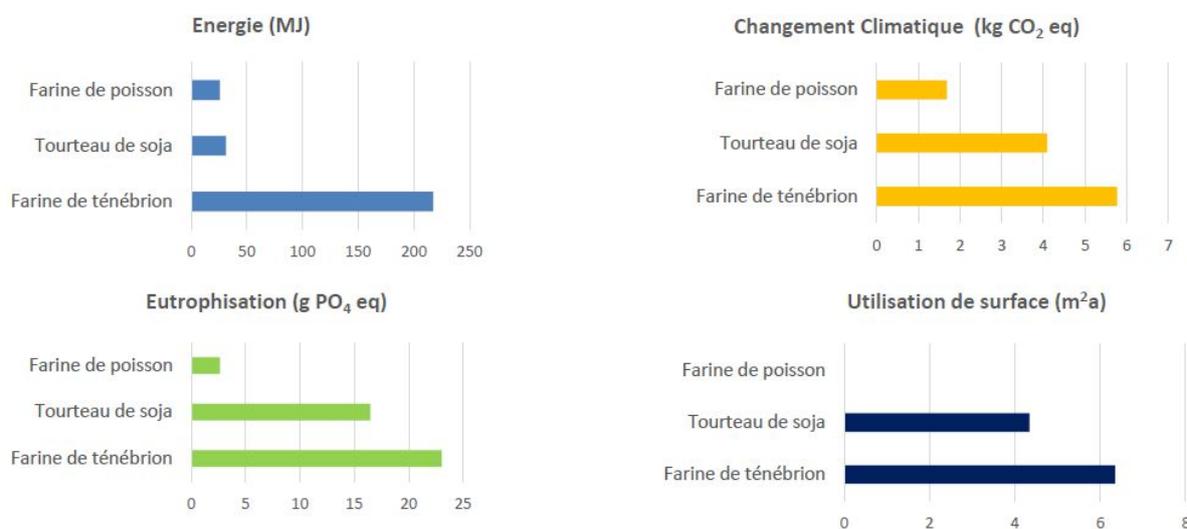


Figure 7 : comparaison de l'évaluation de l'impact sur le cycle de vie d'un kilogramme de protéines de farine, d'insecte, de farine de soja et de farine de poisson livrée en France (Aubin *et al.*, 2018)

II.7. Les alternatives potentielles

D'autres sources alternatives de protéines existent ou font l'objet d'études comme le tourteau de tournesol, les algues déshuilées, les protéines d'origines unicellulaires, les coproduits d'abattoirs de poulets ou encore les drêches (Aubin *et al.*, 2018). Les coproduits de la pêche et d'ateliers de transformation pourraient aussi devenir des sources de protéines et de lipides intéressants. Des programmes sont en cours

De la farine contenant des poissons non valorisés comme le Spratt (*Sprattus sprattus*), de la Moule (*Mytilus edulis*) et de la Levure (*Saccharomyces cerevisiae*) a été testée dans l'alimentation d'Omble Chevalier (*Salvelinus alpinus*). Les poissons nourris avec cet aliment ont eu des performances de croissance inférieures de 11,5 % que le groupe témoin. La digestibilité et l'analyse microscopique des fèces a suggéré une digestibilité plus faible de l'aliment d'essai, vraisemblablement causée par l'incapacité du poisson à utiliser les nutriments des cellules de levure (Carlberg *et al.*, 2017).

Plusieurs études ont montré l'intérêt d'incorporer des drêches de bière voire de la levure de bière dans l'alimentation aquacole, les tests portant sur de la Sole Sénégalaise (*Solea senegalensis*), de la Truite et du Pacu d'Amazonie *Piaractus brachypomus* (Huapaya-Davila *et al.*, 2018 ; San Martin *et al.*, 2018).

La société américaine KnipBio Inc a mis au point un aliment pour poissons, élaboré à partir d'un organisme unicellulaire, la bactérie méthanotrophe *Methylobacterium extorquens*. Cet aliment protéiné, nommé le « KnipBio Meal » et destiné à l'aquaculture, apporterait protéines et acides aminés en quantités similaires aux farines de poissons. Testé dans la composition des régimes alimentaires de Saumons Atlantique et de Crevettes à pattes blanches, le KnipBio Meal aurait donné des résultats probants sur la croissance des animaux. Au final, ce nouvel aliment pourrait constituer une solution alternative face aux farines de poissons (Tlusty *et al.*, 2017).

Une étude sur l'alimentation de daurade a montré de meilleures performances de croissance avec un aliment contenant de la protéine d'animaux terrestre qu'avec un aliment contenant à la fois de l'insecte (Ténébrion, des microalgues et de la levure (Cabano, 2017). Ces protéines sont ré-autorisées d'emploi dans l'alimentation aquacole en Europe depuis 2013 mais pour des raisons d'acceptabilité sociétale, la filière piscicole française a décidé de ne pas en utiliser jusqu'à maintenant (CIPA, 2013).

Les microalgues peuvent également présenter un intérêt, notamment pour leur richesse en acides gras polyinsaturés. A titre d'exemple la société Inalve produit de la farine de microalgues sous forme de biofilm pour le tester dans l'alimentation piscicole. Des essais sont en cours. Un programme européen pourrait aussi voir le jour ces prochains mois sur l'emploi d'huile de microalgues pour l'alimentation aquacole. Les coûts de revient sont aussi une problématique pour ce type de production.

III. Discussions et conclusion

III.1. Les insectes, une solution potentielle avec ses limites

Une alternative intéressante

Les travaux ont mis en évidence le potentiel de l'utilisation des insectes en tant que substitut partiel ou total de la farine de poissons dans les régimes alimentaires des poissons, grâce à leur teneur élevée en protéines et à des profils en acides aminés adéquats, avec peu de déficiences. Les insectes de l'ordre des Diptères semblent avoir le profil en acides aminés le plus proche de celui des poissons, celui des Coléoptères et des Orthoptères étant plus proche du profil du soja. Les vers de farine, les vers à soie, les BSF et les asticots semblent être les insectes les plus efficaces dans les expériences d'alimentation du poisson, avec de bons résultats de digestibilité et des performances de croissance du poisson qui correspondent voire dépassent la farine de poissons dans certains cas. Ce sujet semble trouver une bonne acceptabilité sociétale d'après plusieurs études. Les truites nourries avec un aliment contenant des insectes serait préférentiellement choisi par une majorité de consommateurs si ces derniers sont bien informés (Bazoche & Poret, 2017).

Une production limitée en volume et coûteuse

L'élevage d'insectes est d'ores et déjà répandu dans le monde entier, en particulier pour la production de soie, d'appâts et d'aliments pour animaux de compagnie (poissons, oiseaux et reptiles) et pour le contrôle biologique des espèces nuisibles.

La très grande majorité des publications et des travaux montrent que l'emploi d'insectes peut constituer une source de protéine complémentaire intéressante pour le nourrissage aquacole principalement de poissons et de crevettes. La réglementation européenne limite cette potentialité en fixant une liste d'insectes restreinte et en n'autorisant que les PAT d'insectes et non l'insecte entier (Le Feon *et al.*, 2018). Alternativement, les insectes aquatiques pourraient être utilisés dans l'alimentation des poissons marins (Henry *et al.*, 2015).

Cependant, les unités de production actuelles restent assez modestes, particulièrement en Europe et en France. La plus grosse unité de production identifiée en Afrique du Sud produirait quelques tonnes /jours d'asticots. Les besoins annuels en farine d'insectes pour la pisciculture française pourraient aller jusqu'à 20 000 tonnes par an selon les taux d'incorporation dans l'aliment aquacole. Ce constat ne tient pas compte des éventuels besoins d'autres marchés nationaux relatifs à l'alimentation des animaux domestiques voire de la volaille si la réglementation devait évoluer cette année.

Une des contraintes principales concerne les coûts de revient largement supérieurs à ceux de la production de farine de poisson. La main d'œuvre et l'énergie sont des paramètres importants en termes de charges.

Quelques carences nutritionnelles et de digestibilité

Dans leur alimentation, les poissons d'eau douce requièrent tout particulièrement des acides gras polyinsaturés (AGPI), les poissons marins des acides gras hautement insaturés (AGHI) ; or les insectes terrestres présentent une déficience en AGHI comparés aux insectes aquatiques (Rainuzzo *et al.*, 1997 ; (Sargent *et al.*, 2002 ; Tocher, 2010 ; Henry *et al.*, 2015)

Un remplacement total des farines de poisson avec des farines d'insectes n'est en général pas efficace chez les poissons (Henry *et al.*, 2015). (Différent avec insecte entier !!!). Le remplacement partiel (10 à 40%) de farines de poissons de haute qualité par des farines d'insecte semble possible, principalement pour les espèces herbivores / omnivores, mais aussi pour certains poissons carnivores comme la truite.

Le niveau de remplacement maximal des farines de poissons par les farines de BSF dépend de la qualité des insectes, et par la même de la composition de leur substrat nutritif. La question de la digestibilité nécessite également d'autres études, car la teneur en chitine peut ne pas être le seul facteur responsable de ces problèmes et pourrait même ne pas être impliquée du tout.

L'utilisation d'un mélange de différentes sources de protéines (différents insectes ou insectes avec des prébiotiques, avec des plantes ou avec d'autres protéines animales) ou une supplémentation alimentaire en acides aminés pourrait réduire les carences nutritionnelles potentielles et mieux équilibrer les profils en acides aminés des aliments aquacoles incorporant des farines d'insectes, et ainsi augmenter la substitution des farines de poissons. Le choix de l'insecte sera aussi important par rapport à l'espèce aquacole à nourrir.

L'amélioration et la standardisation des process d'élevage

Un des enjeux pour la filière insecte est d'arriver à optimiser leur process d'élevage pour d'une part standardiser la qualité nutritionnelle de leurs farines d'insectes, seule garantie pour une production à grande échelle pour l'alimentation aquacole. D'autre part, cette optimisation doit permettre aussi de diminuer leur empreinte écologique plutôt défavorable actuellement par rapport à la production de farine de poisson par exemple. L'éco-conception devrait être utilisée pour concevoir les processus et les usines (Le Feon *et al.*, 2018).

Des études complémentaires sur les process, sur les substrats, sur la digestibilité, sur les besoins riches en protéines etc. restent nécessaires (Vallod & Le Reste, 2017; Aubin *et al.*, 2018).

Les pistes potentielles

La substitution des farines de poissons partiellement par de la farine d'insectes est possible à court terme pour des types de production très spécifiques permettant de moins dépendre des contraintes principales présentées ci-dessus. Dans un contexte européen et français, deux types de production présenteraient des atouts ; la

production de poissons d'ornement et la production d'alevins. Ces deux types de production permettraient d'amortir partiellement les coûts de revient des insectes car ce sont des marchés à haute valeur ajoutée, certaines espèces se vendant même à l'unité. De plus, les cycles d'élevage ne nécessitent pas beaucoup d'alimentation en volume. En France, ce besoin serait estimé à au moins 2 000 tonnes de farine d'insectes par an. Les premières unités de production commerciale pourraient répondre rapidement en volume aux besoins de ces filières ciblées. Les premières commercialisations d'aliments contenant de la farine d'insectes (Hermetia) pour le poisson d'ornement sont déjà en cours, de la part de providiers comme Coppens ou Ynovea.

III.2. Le contexte ligérien

PERIFF aura permis d'identifier des entomoculteurs régionaux. Les retombées à court terme de l'utilisation de farine d'insectes dans l'alimentation aquacole restent limitées pour le moment à certaines petites productions régionales de poissons d'ornement.

Tableau 5 : matrice AFOM pour un bilan sur l'intérêt d'utilisation de PAT d'insectes dans l'alimentation aquacole dans un contexte ligérien

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Productions régionales d'alevins et de poissons d'ornement - Développement de l'aquaponie - Producteurs d'insectes locaux - Développement de la production locale - Moins de dépendance de ressources extérieures 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Volume de production - Coûts de production - Standardisation process d'élevage et qualité des insectes - Empreintes écologiques encore fortes
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de systèmes aquacoles en RAS (aquaponie) - Evolution sociétale - Développement des marchés locavores - Développement des productions durables 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Peu de données technico économiques - L'autorisation pour d'autres filières animales et alimentation humaine - Effet de mode ? - Incertitudes réglementaires

Poissons d'ornement

C'est potentiellement la production régionale la plus concernée à court terme. D'ailleurs un producteur de poissons d'ornement d'eaux chaudes utilise déjà un aliment contenant 50% de farines délipidées de BSF avec des résultats plutôt positifs. La majorité des producteurs régionaux de poissons d'ornement élèvent des poissons d'eaux froides type carpe koi. Cependant, cette production est en forte baisse depuis 2 à 3 ans principalement pour des raisons de concurrences par rapport à des poissons d'importation. Le marché national de l'aquariophilie a baissé de 7% entre 2012 et 2016 (FMNJ, 2016). Le principal marché pour les entomoculteurs concerne aujourd'hui plutôt le marché du particulier.

Production d'alevins

La région des Pays de la Loire est une zone de production et /ou de pré grossissement d'alevins de poissons marins tels que la Daurade, le Turbot et le Bar. Le Bar et la Daurade sont avec la Truite les espèces les plus testées en Europe. Des essais ont eu lieu également sur des juvéniles de Turbots. Comme précisé auparavant, les résultats sont généralement moins bons que pour les poissons d'eaux douces en raison principalement de carences en acides gras polyinsaturés à longues chaînes. Les producteurs régionaux n'utilisent pas actuellement d'aliments contenant des insectes.

Concernant les espèces d'eaux douces, la production de juvéniles deux espèces emblématiques des Pays de la Loire, la Carpe et le Sandre, et n'ayant fait l'objet que de très peu de publications, pourrait présenter un intérêt.

Le Sandre est essentiellement produit en région en étang comme la carpe. Cependant, avec le développement de systèmes hors sols type aquaponie et du marché de l'alimentation humaine, la production en conditions contrôlées de juvéniles de ces deux espèces pourrait se développer avec une bonne valeur ajoutée (Trintignac, *et al.*, 2016 ; Trintignac *et al.*, 2018).

Conclusion

Cette pré-étude a permis de réaliser un bilan des connaissances actuelles sur l'intérêt d'utiliser des farines d'insectes dans l'alimentation aquacole. Les essais ont montré des performances de croissance équivalentes à l'utilisation de farine de poissons pour certaines espèces comme la Truite ou le Tilapia. Les performances sont moindres chez les espèces marines pour des raisons principalement de carences d'acides gras. Le vers de farine et la mouche soldat noir (larve) sont parmi les espèces d'insectes les plus intéressantes. Un remplacement partiel de farines de poisson est possible sous certaines conditions. Les principales contraintes concernent la production d'insectes en volume, les coûts de production et les process d'élevage assurant un produit de qualité standard nécessaire pour une utilisation à grande échelle dans l'alimentation aquacole. La réglementation européenne impose plus de contraintes que la plupart des autres pays concernés principalement en Asie. L'utilisation de farine d'insectes ne peut être intéressante à court terme dans le contexte national et local que pour certaines productions à haute valeur ajoutés et ne nécessitant pas de grands volumes d'aliments comme la production de poissons d'ornement et la production d'alevins. Le développement de systèmes d'élevage « autonomes » en hors sol basés sur des cycles courts (aquaponie par exemple) pourraient constituer un débouché intéressant.

Des sites de productions commerciales sont en cours d'installation, notamment en France. Des travaux restent à faire pour diminuer à la fois les contraintes citées précédemment mais aussi l'empreinte écologique. Cependant, à plus long terme, l'ouverture du marché des insectes à d'autres filières animales telle que la volaille et à l'alimentation humaine pourrait limiter l'utilisation à grande échelle de cette voie alternative aux farines de poisson pour l'alimentation aquacole. D'autres recherches sont aussi menées sur des pistes alternatives comme par exemples l'utilisation de certains microorganismes ou la valorisation de certains coproduits de la pêche et de la transformation.

Bibliographie

- 2017/893, R. (UE). (2017). REGLEMENT (UE) 2017/893 de la Commission du 24 mai 2017 modifiant les annexes I et IV du règlement (CE) n° 999/2001 du Parlement européen et du Conseil et les annexes X, XIV et XV du règlement (UE) n° 142/2011 de la Commission concernant les dispositions . *Journal Officiel de La CE*.
- Al-Qazzaz, M., & Ismail, D. (2016). Insect Meal as a Source of Protein in Animal Diet. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 16, 527–547.
- Alegbeleye, W., Obasa, S., Olude, O., & Jimoh, W. (2012). Preliminary evaluation of the nutritive value of the variegated grasshopper (*Zonocerus variegatus* L.) for African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell. 1822) fingerlings. *Aquaculture Research*, 43, 412–420.
- Antonopoulou, E., Nikouli, E., Piccolo, G., & Gasco, L. (2018). Reshaping gut bacterial communities after dietary *Tenebrio molitor* larvae meal supplementation in three fish species. *Aquaculture*.
- Arroyave-Eusse, D., Cardona-Santiago, L., Restrepo-Zapata, D., Gaviria-Galeano, L., Calle-Velásquez, C., & Lenis-Sucerquia, G. (2018). ALIMENTACIÓN DE ALEVINOS DE TILAPIA *Oreochromis spp.* CON LARVAS DE GUSANO DE HARINA *Tenebrio molitor*.
- Aubin, J., Le Féon, S., Macombe, C., Maillard, F., & Thevenot, A. (2018). Des insectes pour l'alimentation animale : scénarios et empruntes environnementales (p. 11). Des insectes pour l'alimentation animale - JAS Phase-Désirable Insect Biorefinery.
- Basto, A., Iaconisi, V., Oliva-Telesa, A., Peres, H., & Parisi, G. (2018). Effect of dietary partial replacement of fishmeal by prepupae meal of black soldier fly *Hermetia illucens* in final quality of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (p. 3).
- Bazoche, P., & Poret, S. (2017). What do trout eat: Acceptance of insects in animal feed. *Livret Désirable Tâche 4 - Evaluer l'acceptation Des Consommateurs Pour Des Produits Issus d'animaux Nourris Avec de La Farine d'insectes, PROGRAMME*, 15.
- Belforti, M., Lussiana, C., Malfatto, V., Rotolo, L., Zoccarato, I., & Gasco, L. (2016). *Tenebrio Molitor* Meal in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Diets: Effects on Animal Performance, Nutrient Digestibility and Chemical Composition of Fillets,. *Italian Journal of Animal Science*, 14.
- Belforti, M., Lussiana, C., Renna, M., Malfatto, V., & Rotolo, L. (2015). *Tenebrio Molitor* Meal in Rainbow Trout(*Oncorhynchus Mykiss*) Diets: Effects on Animal Performance, Nutrient Digestibility and Chemical Composition of Fillets.
- Belghit, I., Liland, N., Waagbo, R., Biancarosa, I., Pelusio, N., Li, Y., ... Lock, E. (2018). Potential of insect-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 491, 72–81.
- Belghit, I., Waagbo, R., Lock, E.-J., & Liland, N. (2018). Insect-based diets high in lauric acid reduce liver lipids in freshwater Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition*, 1–15.
- Bondari, K., & Sheppard, D. (1981). Soldier fly larvae as feed in commercial fish production. *Aquaculture*, 24, 103*109.
- Borgogno, M., Dinnella, C., Iaconisi, V., & Fusi, R. (2016). Inclusion of *Hermetia illucens* larvae meal on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feed: Effect on sensory profile according to static and dynamic evaluations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97.

- Bragd, U. (2017). *The yellow mealworm Tenebrio molitor, a potential source of food lipids*.
- Bruni, B., Pastorelli, R., Viti, C., Gasco, L., & Parisi, G. (2018). Characterisation of the intestinal microbial communities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with *Hermetia illucens* (black soldier fly) partially defatted larva meal as partial dietary protein source. *Aquaculture*, 36.
- Burel, C., & Medale, F. (2014). Quid de l'utilisation des protéines d'origine végétale en aquaculture. *Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, 21.
- Burel, C., Surget, A., Aguirre, P., & Pégourrié, G. (2016). Valeur nutritionnelle de farines de Ténébrion (*Tenebrio molitor*) et d'herméti (*Hermetia illucens*) partiellement dégraissées pour la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). In *JRFP 2016 Paris*.
- Cabano, M. (2017). *Impact of fish meal replacement by alternative and sustainable ingredients in diets for gilthead seabream (Sparus aurata Linnaeus, 1758) juveniles*.
- Carlberg, H., Lundh, T., Cheng, K., Pickova, J., Langton, M., Vázquez Gutiérrez, J., ... Brännäs, E. (2017). In search for protein sources: Evaluating an alternative to the traditional fish feed for Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.). *Aquaculture*, 40.
- Choi, H., Kim, J., Kim, H., & Chung, T. (2018). Replacing fish meal by mealworm (*Tenebrio molitor*) on the growth performance and immunologic responses of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Acta Scientiarum Animal Sciences*, 40.
- CIPA. (2013). *Autorisation des protéines animales transformées (PAT) dans l'alimentation des poissons: la filière piscicole française rappelle son engagement dans une démarche responsable et durable*.
- CIPA. (2017). *Extrait relatif aux PAT d'insectes dans le PROCES-VERBAL de la CONFERENCE NATIONALE du 3 OCTOBRE 2017*.
- Cusimano, G., Gai, F., Gasco, L., Bonaccorso, I., Genovese, L., & Maricchiolo, G. (2017). PRELIMINARY Evaluation of dietary inclusion of defatted black soldier fly *Hermetia illucens* meal on the growth and feed utilization of gilthead sea bream *Sparus aurata*.
- Dumas, A., Raggi, T., Barkhouse, J., Lewis, E., & Weltzien, E. (2018). The oil fraction and partially defatted meal of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) affect differently growth performance, feed efficiency, nutrient deposition, blood glucose and lipid digestibility of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 41.
- FAO. (2013a). *Biannual Report on Global Food Markets*.
- FAO. (2013b). *La contribution des insectes à la sécurité alimentaire, aux moyens de subsistance et à l'environnement*.
- FAO. (2014). *Insectes comestibles: Perspectives pour la sécurité alimentaire et l'alimentation animale*.
- FAO. (2018). *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture*.
- FMNJ. (2016). les différents marchés.
- Gasco, L., Belforti, M., Rotolo, L., Lussiana, C., Parisi, G., Terova, G., ... Gai, A. (2014). Mealworm (*Tenebrio molitor*) as a potential ingredient in practical diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). In *In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, A. (Eds.), 1st International Conference "Insects to Feed the World". Wageningen University, Ede-Wageningen, The Netherlands (p. 69)*.

- Gasco, L., Gai, A., Piccolo, G., Rotolo, L., Lussiana, C., Molla, P., & Chatzifotis, S. (2014). Substitution of fishmeal by *Tenebrio molitor* meal in the diet of *Dicentrarchus labrax* juveniles. In *In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, A. (Eds.), 1st International Conference "Insects to Feed the World". Wageningen University, Ede-Wageningen, The Netherlands* (p. 69).
- Gasco, L., Schiavone, A., Mei, T., Meneguz, M., Gariglio, M., Caimi, C., ... Gai, A. (2018). Effects of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) meal in Sturgeon (*Acipenser baerii*) juveniles feeds: preliminary results.
- Heckmann, L., Andersen, J., Gianotten, M., & Calis, M. (2018). Sustainable Mealworm Production for Feed and Food (pp. 321–328). *Edible Insects in Sustainable Food Systems*.
- Henry, M., Gai, F., Enes, P., & Pérez-Jiménez, A. (2018). Effect of partial dietary replacement of fishmeal by yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae meal on the innate immune response and intestinal antioxidant enzymes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fish & Shellfish Immunology*, 83.
- Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., & Fountoulaki, E. (2015). Review on the use of insects in the diet of farmed fish : past and future. *Animal Feed Science and Technology*, 203, 1–22.
- Huapaya-Davila, E., Oliva-Paredes, R., Robles-Huaynate, R., Villegas-Panduro, P., Vargas -Flores, J., & Panduro-Tenazoa, N. (2018). INCLUSIÓN DE DIFERENTES NIVELES DE ORUJO DE CERVECERÍA EN LA ALIMENTACIÓN DE JUVENILES DE *Piaractus brachyomus* paco EN AMBIENTES CONTROLADOS.
- Kaushik, S., & Seiliez, I. (2010). Review Article. Protein and amino acid nutrition and metabolism in fish: current knowledge and future needs. *Aquaculture Research*, 41, 322–332.
- Khosravi, S., Kim, E., & Lee, Y. (2018). Dietary inclusion of mealworm (*Tenebrio molitor*) meal as an alternative protein source in practical diets for juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*): Mealworm meal in rockfish feed. *Entomological Research*, 48, 214–221.
- Kroeckel, S., Harjes, A. G. E., Roth, I., & Katz, H. (2012). When a turbot catches a fly: evaluation of a prepupae meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute – growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture*, 362, 345–352.
- Kumar, P., Munilkumar, S., & Sudhagar, S. (2017). Alternate feeding strategies for optimum nutrient utilization and reducing feed cost for semi-intensive practices in aquaculture system-A review. . . *Agricultural Reviews*, 38, 145–151.
- Langeland, M., Werner Hallgren, S., Huyben, D., Kiessling, A., & Vidakovic, A. (2017). COMPARATIVE DIGESTIBILITY OF 3 BLACK SOLDIER FLY PRODUCTS IN RAINBOW TROUT (p. 2). reserachgate.
- Le Cadre, P. (2017). Autonomie protéique des élevages : la durabilité avant tout. Conférence Céréopa in colloque Insectinov2 PARIS.
- Le Feon, S., Thevenot, A., Maillard, F., Macombe, C., Forteau, L., & Aubin, J. (2018). Life Cycle Assessment of fish fed with insect meal: Case study of mealworm inclusion in trout feed, in France. *Aquaculture*, 51, 1–8.

- Li, S., Ji, H., Zhang, B., Zhou, J., & Yu, H. (2017). Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure. *Aquaculture*, 51.
- Li, Y., Kortner, T., Chikwati, T., Mweemba Munang'andu, H., Lock, E.-J., & Krogdahl, A. (2018). Gut health and vaccination response in pre-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Fish & Shellfish Immunology*, 86, 1106–1113.
- Lindsay, G., Walton, M., Adron, J., Fletcher, T., Cho, C., & Cowey, C. (1984). The growth of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) given diets containing chitin and its relationship to chitinolytic enzymes and chitin digestibility. *Aquaculture*, 38, 315–334.
- Livet, A. (2015). *Larves d'insectes Etat des lieux et perspectives de développement d'une filière pour l'alimentation avicole biologique*.
- Lock, E.-J., Arsiwalla, T., & Waagbo, R. (2014). Insect meal: a promising source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*). In *In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, A. (Eds.), 1st International Conference "Insects to Feed the World". Wageningen University, Ede- Wageningen, The Netherlands*.
- Lock, E.-J., Arsiwalla, T., & Waagbo, R. (2015). Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquaculture Nutrition*.
- Macombe, C., Aubin, J., & Maillard, F. (2017). Valorisation scenarios for insect rearing designed in the DESIRABLE project. In *Insectinov2- Session 4: Environmental, economic and societal approach in order to assess the relevance of each sector* (p. 18).
- Magalhães, R., Sánchez-López, A., Leald Silva, R., Martínez-Llorens, S., Oliva-Telesa, A., & Peres, H. (2017). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture*, 476, 79–85.
- Makkar, H., Tran, G., Heuze, V., & Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol*, 197, 1–33.
- Mancini, S., Medina, L., Laconisi, V., Gai, F., Basto, A., & Parisi, G. (2018). Impact of black soldier fly larvae meal on the chemical and nutritional characteristics of rainbow trout fillets. *Animal*, 12, 1672–1681.
- Mertenat, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2019). Black Soldier Fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential. *Waste Management*, 84, 171–183.
- Mezdour, S. (2017). Transformation processes of insect larvae for ingredients preparation. in colloque Insectinov2 PARIS.
- Muin, H., Taufek, N., Kamarudin, M., & Razak, S. (2016). Growth performance, feed Utilization and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) fed with different levels of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) maggot meal diet. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 16(567–577).

- Newton, G., Sheppard, D., Watson, D., Burtle, G., Dove, C., Tomberlin, J., & Thelen, E. (2005). The black soldier fly, *Hermetia illucens* as a manure management/resource recovery tool. Symposium on the State of the Science of Animal Manure and Waste Management, San Antonio, TX, USA.
- Ng, W., Liew, F., Ang, L., & Wong, K. (2002). Potential of mealworm (*Tenebrio molitor*) as an alternative protein source in practical diets for African catfish, *Clarias gariepinus*. *Aquaculture Research*.
- Nogales-Mérida, S., Gobbi, P., Jozefiak, D., Mazurkiewicz, J., Dudek, K., Rawski, M., ... Jozefiak, A. (2018). Insect meals in fish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1–24.
- Nogales-Mérida, S., Mazurkiewicz, J., Rawski, M., Hoffmann, L., Józefiak, A., Talibov, S., ... Józefiak, D. (2018). Do full-fat insects meal improve siberian sturgeon *Acipenser baerii* microbiota (p. 1).
- Ogunji, J., & Awoke, J. (2017). Effect of environmental regulated water temperature variations on survival, growth performance and haematology of African catfish, *Clarias gariepinus*. *Our Nature*, 15, 1–2.
- Oyelese, S. (2007). Utilization of compounded ration and maggot in the diet of *Clarias gariepinus*. *Res. J. Appl. Sci*, 2, 301–306.
- Panini, R., Pinto, S., Nóbrega, R., Vieira, F., Fracalossi, D., Samuels, R., ... Amboni, R. (2017). Effects of dietary replacement of fishmeal by mealworm meal on muscle quality of farmed shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Food Research International*, 102, 445–450.
- Parlement, E. (2017). *L'aquaculture. Une vue d'ensemble pour l'Union Européenne*.
- Perednia, D., Anderson, J., & Rice, A. (2017). A Comparison of the Greenhouse Gas Production of Black Soldier Fly Larvae versus Aerobic Microbial Decomposition of an Organic Feed Material. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 5, 10–16.
- Piccolo, G., Iaconisi, V., S, M., Gasco, L., Loponte, R., Nizza, S., ... Parisi, G. (2017). Effect of *Tenebrio molitor* larvae meal on growth performance, in vivo nutrients digestibility, somatic and marketable indexes of gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Animal Feed Science and Technology*, 226, 12–20.
- Piccolo, G., Marono, S., Gasco, L., Iannaccone, F., Bovera, F., & Nizza, S. (2014). Use of *Tenebrio molitor* larvae meal in diets for Gilthead seabream *Sparus aurata* juveniles. In *In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, A. (Eds.), 1st International Conference "Insects to Feed the World". Wageningen University, Ede-Wageningen, The Netherlands* (p. 69).
- Rainuzzo, J., Reitan, K., & Olsen, Y. (1997). The significance of lipids at early stages of marine fish: a review. *Aquaculture*, 155, 103–115.
- Ramos-Elorduy, J., Avila Gonzalez, E., Rocha Hernandez, A., & Pino, J. (2002). Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. *J. Econ. Entomol*, 95, 214–220.
- Rasid, R., Fitrah Azmy, N., Rahmah Syed Muhammad, S., & Kuppusamy, G. (2018). The potential of black soldier fly *Hermetia illucens* prepupae larvae as an alternative protein source in diets of post larvae freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*.
- Renard, A. (2017). Des insectes autorisés en aquaculture. *Produits de La Mer*, 177, 32.

- Renna, M., Malfatto, V., Rotolo, L., De Marco, M., Dabbou, S., Schiavone, A., ... Gasco, L. (2015). Tenebrio Molitor Meal in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Diets: Effects on Animal Performance, Nutrient Digestibility and Chemical Composition of Fillets. *Journal of Animal Science*, 14.
- Renna, M., Schiavone, A., Gai, F., Dabbou, S., Lussiana, C., Malfatto, V., ... Gasco, L. (2017). RESEARCH Open Access Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*.
- Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., & Giannetto, A. (2016). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*.
- San Martin, D., Estévez, A., Fenollosa, R., García, C., De Smet, A., & Zufía, J. (2018). BREWERS BY-PRODUCTS AS ALTERNATIVE INGREDIENTS FOR PARTIAL SUBSTITUTION OF FISH MEAL IN AQUACULTURE FEED.
- Sanchez-Muros, M., Barroso, F., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *J. Clean. Prod*, 65, 16–27.
- Sankian, Z., Khosravi, S., & Kim, Y. (2018). Effects of dietary inclusion of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) meal on growth performance, feed utilization, body composition, plasma biochemical indices, selected immune parameters and antioxidant enzyme activities of mandarin fish (*Siniperca schenkleri*). *Aquaculture*, 496.
- Sargent, J., Tocher, D., & Bell, J. (2002). The lipids. In *Halver, J.E., Hardy, R.W. (Eds.), Fish Nutrition. Academic Press, USA* (pp. 181–257).
- Sealey, W., Gaylord, T., Barrows, F., Tomberlin, J., McGuire, M., Ross, C., & St-Hilaire, S. (2011). Sensory analysis of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fed enriched black soldier fly prepupae, *Hermetia illucens*. *J. World Aquacult. Soc.*, 42, 34–45.
- Smetana, S., Palanisamy, P., Mathys, A., & Heinza, V. (2016). Sustainability of insect use for feed and food: 1 life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*.
- Stadtlander, T., Stamer, A., Buser, A., Wohlfahrt, J., Leiber, F., & Sandrock, C. (2017). *Hermetia illucens* meal as fish meal replacement for rainbow trout on farm. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3, 165–175.
- Stamer, A. (2015). Insect proteins—a new source for animal feed. *EMBO Rep.*, 16, 676–680.
- Talibov, S., Mazurkiewicz, J., Merida, S., Rawski, M., & Jozefiak, D. (2018). Effect of hydrolyzed mealworm and superworm meals on serum biochemical indices of sea trout *Salmo trutta* Morpha *trutta* juveniles (p. 1).
- Thevenot, A., Rivera, J., Wilfart, A., Maillard, F., Hassouna, M., Senga-Kiesse, T., ... Aubin, J. (2018). Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects, 170, 1260–1267.

- Trusty, M., Rhyne, A., Szczebak, J., Bourque, B., Bowen, J., Burr, G., ... Feinberg, L. (2017). A transdisciplinary approach to the initial validation of a single cell protein as an alternative protein source for use in aquafeeds. *PeerJ*.
- Tocher, D. (2003). Metabolism and functions of lipids and fatty acids in Teleost fish. *Rev. Fish. Sci*, 11, 107–184.
- Tocher, D. (2010). Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish. *Aquac. Res*, 41, 717–732.
- Tran, G., Heuzé, V., & Makkar, H. (2015). Insects in fish diets. *Researchgate*, 9.
- Trintignac, P., Le Bihan, V., Benoit, J., Perrot, L., Garsi, P., & Ferré, A. (2018). *Etude de la faisabilité technico économique d'un pilote d'aquaponie dans les Pays de la Loire*.
- Trintignac, P., Le Bihan, V., & Lesage, C. (2016). *PETRA Etude technico-économique d'une production régionale de poissons en étangs pour le marché de l'alimentation humaine*.
- Vallod, D., & Le Reste, G. (2017). Insectes et aliment pour l'aquaculture. Présentation Journées techniques sur les résidus organiques et la production d'insectes pour la chaîne alimentaire 29 juin 2017.
- Vantomme, P. (2017). Opportunities and Constraints of Farming Insects for food : a global overview. Conférence FAO in colloque Insectinov2 PARIS.
- Vlahos, N., Devetzoglou, K., Mitsopoulos, I., Mpampouklis, K., & Mente, E. (2018). The effect of fish meal replacement with insect meal on growth performance and survival rate of zebrafish *Danio rerio*.
- Watson, R., Cheung, W., Anticamara, J., Sumaila, R., Zeller, D., & Pauly, D. (2013). Global marine yield halved as fishing intensity redoubles. *Fish and Fisheries*, 14, 493–503.

Sitographie

CIPA, 2018 Les chiffres clés ; <http://www.poisson-aquaculture.fr/les-chiffres-cles/>

Inalve : <https://inalve.com/>

Insectinov2 : <https://www.adebiotech.org/ins2/index.php?target=downloads>

Glossaire

AFOM : Atouts-Faiblesses-Opportunités-Menaces

AGPI : Acide Gras Polyinsaturés

AGHI : Acide Gras Hautement Insaturés

CIPA : Comité InterProfessionnel de l'Aquaculture

DHA : DocosaHexaénoïque Acid

EPA : EïcosaPentaénoïque Acid

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le DEveloppement Rural

PAT : Protéines d'Animaux Terrestres

TAC : Truite Arc en Ciel

TSFP : Taux de Supplément de Farine de Poisson

Figures

Figure 1 : évolution des captures de pêche et de l'aquaculture dans le monde (FAO, 2018)	9
Figure 2 : production halieutique et aquacole mondiale, de 1990 à 2030 (FAO, 2018)	10
Figure 3: Ténébrion meunier et sa larve	15
Figure 4: mouche soldat noir et sa larve	15
Figure 5 : Acides gras polyinsaturés mesurés dans le tissu musculaire de <i>Litopenaeus vannamei</i> élevé sur des régimes remplaçant la farine de poisson par le ver de farine après une période de culture de six semaines (LA, l'acide linoléique; ARA, acide arachidonique; LnA, acide linoléique; EPA, acide eicosapentaénoïque; DHA, acide docosahexaénoïque)	19
Figure 6 : Evolution sur 20 ans de la Farine de poisson Prix Mensuel - Euro por Tonne métrique (https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/)	22
Figure 7 : comparaison de l'évaluation de l'impact sur le cycle de vie d'un kilogramme de protéines de farine, d'insecte, de farine de soja et de farine de poisson livrée en France (Aubin <i>et al.</i> , 2018).....	24

Tableaux

Tableau 1: Composition en acides aminés (g/16 g d'azote) des farines d'insectes par rapport aux besoins en protéines alimentaires de référence de la FAO de la farine de soja et de la farine de poisson adaptée de Makkar <i>et al.</i> , 2014 (Tran <i>et al.</i> , 2015)	18
Tableau 2 : Composition en acides gras de lipides d'insectes adaptée de Makkar <i>et al.</i> , 2014 (Tran, <i>et al.</i> , 2015)	19
Tableau 3 : performance environnementale d'un kg de larves fraîches à la sortie de la ferme et d'un kg de farine de larves à la sortie de la transformation (Thevenot <i>et al.</i> , 2018).....	23
Tableau 4 : comparaison de l'évaluation de l'impact sur le cycle de vie d'un kilogramme de protéines de farine, d'insecte, de farine de soja et de farine de poisson livrée en France (Thevenot <i>et al.</i> , 2018).	23
Tableau 5: matrice SWOT pour un bilan sur l'intérêt d'utilisation de PAT d'insectes dans l'alimentation aquacole dans un contexte ligérien	27

Annexes

