



# Utilisation des insectes et produits à base d'insectes dans les filières aquacole et avicole

## Résumé

Le besoin de nouvelles sources de nutriments alternatifs pour la production d'aliments pour animaux (protéines essentiellement) a conduit à une augmentation des recherches sur les utilisations et les effets possibles des produits dérivés des insectes (farines et huiles). Les insectes semblent être une des alternatives prometteuses à d'autres sources de nutriments, telles que les farines de soja et de poisson couramment utilisées dans les aliments pour le bétail et l'aquaculture. Cet article passe en revue l'état de l'art de la recherche sur l'utilisation d'insectes, de farines et d'huiles d'insectes dans l'alimentation des espèces aquatiques et aviaires. Globalement, il semble que les produits à base d'insectes (larves, farines et huiles) offrent une bonne perspective pour se substituer en majorité aux farines de soja et de poisson, notamment en termes de propriétés nutritionnelles, de performances de production et qualité des produits, mais également en termes de santé et bien-être des animaux. Néanmoins, la généralisation de l'utilisation des insectes dans l'alimentation animale est sujette à de nombreux défis d'ordre technique, économique, et sanitaire principalement.

## 1. Contexte général

### 1.1. Les insectes, une source alternative de protéines prometteuse ?

Au cours des dernières décennies, la consommation de viandes de volailles et d'œufs a connu une hausse notable au niveau mondial, ce qui crée une tension sur les marchés des matières premières destinées à l'alimentation animale. Cependant, il est de plus en plus difficile de répondre à la **demande croissante en protéines**, causant de sérieuses répercussions sur les ressources de la planète, le développement socio-économique et la durabilité environnementale. La recherche de **sources alternatives de protéines durables** est donc un enjeu majeur pour l'alimentation animale, notamment pour les filières avicole et piscicole.

Chez les volailles, l'apport d'acides aminés essentiels est un facteur clé pour garantir une croissance rapide dans une courte période de temps ou pour la production d'œufs. Pour cette raison, le tourteau de soja, ainsi que les farines de poisson, principales sources de protéines dans l'aliment des volailles, sont privilégiés dans les rations. De même pour la filière piscicole, l'huile et la farine de poisson constituent des ingrédients incontournables dans la formulation d'aliment commercial. Malgré une diminution notable au cours la dernière décennie, leur taux d'incorporation reste stable autour de 15 à 20% de farines et 5 à 10% d'huile de poissons. Ces matières premières proviennent pour 1/3 des coproduits de la transformation des produits de la pêche dédiée à l'alimentation humaine et pour 2/3 de la pêche minotière.

Actuellement, l'autonomie protéique de l'aviculture française avoisine les 40%, l'Union Européenne (UE) étant fortement tributaire de l'importation de ces matières premières riches en protéines, et en particulier le soja. La filière volaille représente environ la moitié de la consommation totale de soja de l'UE. Toutefois, il y a une préoccupation croissante avec ces matières premières importées, en particulier pour celles produites en Amérique du Sud (Argentine, Brésil), puisque la production de soja est fortement associée à la déforestation, la perte de biodiversité, l'érosion des sols, l'eutrophisation l'utilisation de soja génétiquement modifié, l'utilisation intensive de pesticides, et à une forte empreinte carbone (Khan, 2018). De plus, l'amélioration constante du potentiel génétique des volailles a entraîné une augmentation de la densité nutritionnelle dans les aliments pour volailles, ce qui limite la possibilité d'inclure des ingrédients alimentaires moins concentrés en nutriments. Par conséquent, afin de réduire cette dépendance économique et d'améliorer la durabilité de l'élevage, de nouvelles sources de protéines hautement digestibles, locales et durables avec une composition d'acides aminés adaptée doivent se substituer au tourteau de soja importé.

De plus, en raison de l'envolée des prix liée à l'inadéquation de l'offre face à la demande pour ces matières premières (qui concerne non seulement la filière piscicole et avicole mais aussi porcine), la substitution des farines et des huiles de poisson par des matières premières alternatives est devenue une priorité économique mais aussi une nécessité pour espérer un développement durable de l'activité aquacole, notamment pour les poissons nécessitant un fort taux de protéines dans leur l'aliment comme les salmonidés. Le soja et d'autres plantes terrestres riches en protéines et en lipides ont été progressivement introduits dans le régime alimentaire des poissons d'aquaculture pour substituer en

partie les produits de la pêche minotière (Hardy, 2002, Espe et al., 2006, Gatlin et al., 2007). Cependant, la présence de facteurs antinutritionnels dans les matières premières végétales (Tacon, 1993, Francis et al., 2001, Ogunji, 2004, Collins, 2014), les problèmes potentiels d'inflammation du tube digestif (Merrifield et al., 2011) et la diminution de l'appétence de l'aliment (Papatryphon and Soares, 2001) sont des facteurs limitant leur incorporation. De plus, la croissance rapide de la population humaine exerce une pression croissance sur l'utilisation des terres arables (Doos, 2002), et l'empreinte écologique de ces plantes riches en protéines - liée à la quantité d'énergie et d'eau nécessaire à leur production - peut altérer la durabilité de ces alternatives (Naylor et al., 2009). Enfin, la substitution partielle des farines de poissons par des matières végétales n'a pas mené à une diminution du coût des aliments fabriqués. En effet, le prix de l'huile de soja, largement utilisée en tant que substituant de l'huile de poisson, présente une évolution similaire à celle de l'huile de poisson. De ce fait, le prix des aliments aquacoles continue d'augmenter.

Dans ce contexte, l'utilisation d'insectes pour nourrir les animaux d'élevage, en particulier les poissons, les porcs et les volailles, apparaît comme une alternative prometteuse dans de nombreux pays à travers le monde, en raison notamment (Figure 1) :

1. De leurs **propriétés nutritionnelles** (profil en acides aminés, teneurs en protéines proches du soja et des farines de poisson), qui répondent aux besoins des animaux
2. De leur **bénéfice sur la santé** (peptides antimicrobiens, acide laurique, chitine) et le **bien-être des animaux** (font partie du régime alimentaire naturel de plusieurs espèces)
3. De la **durabilité** de leur élevage (économie circulaire, faible niveau d'émission de gaz à effet de serre, faible superficie nécessaire pour la production d'un kilo de protéines, diminution de l'utilisation des terres, bioconversion des déchets...)
4. Du caractère « **naturel** » de leur présence dans le régime alimentaire de nombreux animaux d'élevage : poissons carnivores, poulets, porcs... (Howe et al., 2014 ; Whitley et Bollens, 2014). On peut donc supposer que ces animaux sont évolutivement adaptés à consommer des insectes dans leur alimentation régulière (Sogari et al., 2019).

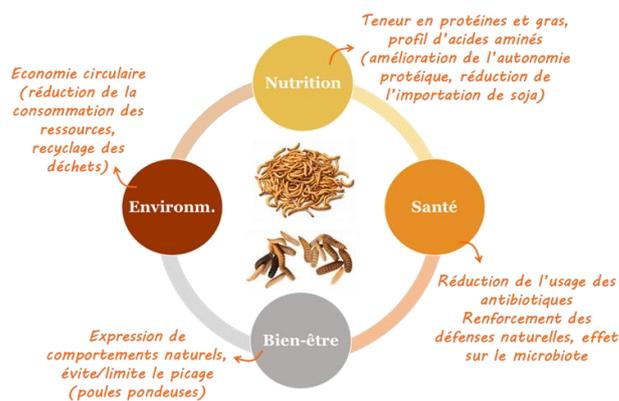


Figure 1 : Les insectes : une alternative prometteuse ?

## 1.2. Le marché des insectes et produits à base d'insectes

Du point de vue du marché, le secteur de l'élevage d'insectes pour l'alimentation animale et humaine connaît une très forte croissance. Cette industrie nouvelle pourrait un jour permettre l'intensification durable de la production aquacole. Si les prix actuels du marché des farines d'insectes sont généralement plus élevés que ceux des farines de poissons, le prix des farines d'insectes pourrait devenir compétitif avec celui des farines de poissons d'ici 2023 au rythme de la croissance de la filière à ce jour (Brabant Development Company, 2018).

Plusieurs espèces d'insectes ont été testés dans l'alimentation des animaux, dont les larves de **mouche soldat noire** (Black Soldier Fly, **BSF**, *Hermetia illucens*), le **ténébrion meunier ou ver de farine** (*Tenebrio molitor*, TM) et la mouche domestique (*Musca domestica*) (Figure 2). Ces dernières semblent les plus prometteuses en raison de leur composition nutritionnelle, la facilité de contrôle de leur cycle de vie et de leur production en masse. Ces espèces ont fait l'objet de multiples publications scientifiques et sont aujourd'hui celles qui sont pourrait générer à l'échelle européenne majoritairement produites pour l'alimentation animale.



Figure 2 : Principales espèces d'insectes à destination de l'alimentation animale

La croissance globale du secteur de l'élevage d'insectes est particulièrement liée à la croissance des entreprises productrices de mouche soldat noire. En effet, la production mondiale de larves de mouche soldat noire a augmenté rapidement, passant de 7000-8000 tonnes en 2014-2015, à 14000 tonnes en 2016 (Sogari et al., 2019). En Europe, plus de 6 000 tonnes de protéines d'insectes sont aujourd'hui produites annuellement pour l'alimentation humaine et animale (IPIFF). D'ici 2030, près de trois millions de tonnes de protéines d'insectes pourraient être générées à l'échelle européenne, environ neuf millions de tonnes d'engrais (déjections d'insectes, complétant la demande croissante de fertilisants), ainsi que 100000 emplois directs ou indirects (IPIFF). Selon la FAO, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, la production d'insectes, considérés à l'échelle mondiale comme une source durable de protéines, devrait augmenter de +20 % au cours des cinq prochaines années. La France est en bonne place sur le marché, aux côtés de l'Afrique du Sud, des Pays-Bas et du Canada. Sur le territoire, le nombre de startup qui ont pour ambition de réinventer l'alimentation des animaux de compagnie et d'élevage ne cesse de croître depuis quelques années. On en dénombre plus d'une dizaine à destination de l'alimentation animale, dont Ynsect (*Tenebrio molitor*), InnoVaFeed (*Hermetia illucens*), NextAlim (*Hermetia illucens*), Mutatec (*Hermetia illucens*), APPI (*Hermetia illucens*), Agronutris, Protifly (*Hermetia illucens*), Nextprotein (*Hermetia illucens*), etc.

Ces entreprises proposent différents produits à base d'insectes :

- larves entières vivantes,
- larves entières déshydratées,
- larves entières dégraissées,
- farines d'insectes (concentrés protéiques = PAT),
- huile/graisses d'insectes
- mais également amendement organique (fertilisant pour les sols).

La filière insectes est en plein essor aujourd'hui, bien que cette source de protéines ne représente aujourd'hui qu'une part très anecdotique dans les matières premières utilisées en alimentation animale, principalement **en raison de barrières réglementaires, techniques, et économiques.**

### 1.3. Réglementation européenne

#### 1.3.1. Les protéines d'insectes autorisées en alimentation aquacole

Les insectes et leurs produits dérivés destinés à être utilisés dans l'alimentation animale sont considérés comme des « **sous-produits animaux** », c'est-à-dire des animaux et des produits provenant d'animaux non destinés à la consommation humaine. Les insectes vivants ne sont pas couverts par cette définition. 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.

Les protéines dérivées d'animaux d'élevage ou **protéines animales transformées (PAT)** sont définies à l'annexe I du règlement (UE) n°142/2011 (définition 5) comme « *des protéines animales issues entièrement de matières de catégorie 3 traitées conformément à l'annexe X, chapitre II, section I (y compris les farines de sang et les farines de poisson) de manière à pouvoir être utilisées directement en tant que matières premières pour aliments des animaux ou à toute autre fin dans les aliments pour animaux, y compris les aliments pour animaux familiers (...); elles ne comprennent pas (...) les protéines hydrolysées (...)* ».

L'utilisation de PAT est **interdite dans l'alimentation des ruminants et des animaux monogastriques** (par exemple les porcs et les volailles) tandis que les animaux de compagnie (chiens, chats, oiseaux ou reptiles, par exemple) et les animaux à fourrure (par exemple les visons) peuvent être nourris avec ces produits. Cette interdiction a été introduite par les autorités publiques de l'Union Européenne en réaction à l'épidémie d'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB) au début des années 2000. Cette interdiction n'est **pas appliquée aux insectes vivants ou aux graisses/huiles dérivées d'insectes.**

**Depuis le 1er juillet 2017, les PAT d'insectes sont autorisées dans l'alimentation des animaux d'aquaculture.** Aucune exigence n'est formulée pour la mise à mort des animaux, 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.

Les services de la Commission européenne étudient actuellement les possibilités de proposer une nouvelle révision des règles d'interdiction des aliments pour animaux afin **d'autoriser les protéines d'insectes dans l'alimentation des porcs et des volailles.**

#### 1.3.2. Les insectes autorisés en alimentation aquacole

Le règlement n°2017/893, entré en vigueur le 1er juillet 2017, autorise l'utilisation de protéines d'insectes provenant de **sept espèces d'insectes** - à savoir la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*), la mouche domestique (*Musca domestica*), le ténébrion meunier ou ver de farine (*Tenebrio molitor*), le petit ténébrion mat (*Alphitobius diaperinus*), le grillon domestique (*Acheta domesticus*), le grillon domestique tropical (*Gryllodes sigillatus*) et le grillon des steppes (*Gryllus assimilis*) - **dans l'alimentation des animaux d'aquaculture.** Les

protéines des autres espèces ne sont donc pas autorisées à ce jour.

### 1.3.3. Les substrats autorisés pour nourrir les insectes d'élevage destinés à la fabrication d'aliment pour animaux

L'article 3.6 du règlement sanitaire relatif aux sous-produits animaux (CE) n°1069/2009 précise que « *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 ou fumier** (annexe III du règlement (CE) n°767/2009 et article 9 du règlement (CE) n°1069/2009) ; les insectes utilisés pour traiter les lisiers ne sont pas considérés comme des animaux d'élevage et le lisier ainsi traité n'est pas considéré comme du compost au sens de la réglementation relative aux sous-produits animaux car il s'agit de lisier non transformé ;

- **les déchets de cuisine et de table** (article 11.1.b du règlement (CE) n°1069/2009) ; définis comme suit par l'annexe 1 point 22 du règlement sanitaire européen 142/2011 « *tous les déchets d'aliments y compris les huiles de cuisson usagées provenant de la restauration et des cuisines, y compris les cuisines centrales et les cuisines des ménages* » ;

- **le bois traité** (annexe III du règlement (CE) n°767/2009)

En revanche les insectes peuvent être nourris avec des matières premières végétales autorisées en alimentation animale qui respectent la réglementation en substances indésirables (co-produits végétaux, co-produits de l'industrie agroalimentaire) et avec certains produits d'origine animale :

- **les produits dérivés autorisés** pour les non ruminants et mentionnés à l'annexe IV, chapitre II.b) du règlement (CE) n°999/2001 : farines de poisson, produits sanguins de non ruminants, phosphates bi et tricalciques d'origine animale, protéines hydrolysées de non ruminants, gélatine et collagène de non ruminants, lait et produits laitiers, œufs et ovoproduits ;

- **les anciennes denrées alimentaires** mentionnées à l'annexe X, chapitre II, section 10 du règlement (UE) n°142/2011 et contenant du lait et des produits laitiers, des œufs et ovoproduits, du miel, des graisses fondues, de la gélatine ou du collagène (liste fermée s'appliquant sans préjudice du point précédent et sous réserve du respect des autres prescriptions de cette section).

## 2. Etat des lieux des connaissances

Il existe un intérêt croissant pour l'utilisation des insectes dans l'alimentation humaine et animale, ce qui a conduit à un nombre accru de publications scientifiques ces dernières années. L'objectif ici est de faire un état des lieux des connaissances acquises et disponibles à ce jour sur l'utilisation des insectes et produits dérivés d'insectes (farine de protéines et huile/graisse) dans l'alimentation des volailles et des poissons. Parmi les différentes espèces d'insectes, nous avons fait le choix ici de faire un focus sur la mouche soldat noire (**BSF**) et le ténébrion meunier (**TM**), qui sont les plus couramment utilisés et les plus étudiés comme source de protéines pour l'alimentation des volailles et des poissons.

### 2.1. Valeur nutritionnelle des insectes et produits à base d'insectes

#### 2.1.1. Protéines et acides aminés

Les sources de protéines végétales actuellement disponibles pour les volailles (i.e. le tourteau de soja, le tourteau de colza, les légumineuses et différents sous-produits céréaliers) ont une composition en acides aminés inférieure à celle des protéines animales, notamment en ce qui concerne leur teneur en acides aminés soufrés (en particulier la méthionine). Les aliments aquacoles commerciaux quant à eux reposent traditionnellement sur la farine de poissons comme principale source de protéines, en raison de sa teneur élevée en protéines et de son profil EAA bien équilibré (Nguyen et al., 2009 ; Oliva-Teles, 2012) (NRC, 2011) avec des niveaux élevés d'EAA digestibles comme la lysine (Lys), la méthionine (Met) et la leucine (Hall, 1992). À titre de référence, **la teneur en protéines d'une farine de poissons de bonne qualité peut atteindre jusqu'à 73%, tandis que le tourteau de soja contient jusqu'à 50% de protéines** (Barroso et al., 2014). L'industrie de l'alimentation animale a besoin de nouvelles sources de protéines hautement digestibles avec une composition d'acides aminés souhaitable pour remplacer d'autres sources de protéines d'origine animale précieuses mais limitées, comme la farine de poisson. Récemment, les insectes ont été proposés comme source alternative de protéines et de graisses notamment pour les poulets de chair, les dindes et les poules pondeuses (Sanchez-Muros et al., 2014 ; Jozefiak et al., 2016 ; Kieronczyk et al., 2018 ; Benzertih et al., 2019c), en raison de leur forte valeur nutritionnelle (Tableau 1). Selon la littérature, **la teneur moyenne en protéines des insectes varie considérablement, entre 40 et 82%** (de matière sèche) (Rumpold and Schluter, 2013 ; Makkar et al., 2014 ; Sanchez-Muros et al., 2014 ; Jozefiak et al., 2016) selon l'espèce, le stade de développement et selon la méthode de traitement de l'insecte (Fasakin et al., 2003 ; Banjo et al., 2006). Nogales-Mérida et al (2018), à travers une revue de littérature, rapportent que les larves de TM

ont une teneur en protéines brutes qui varie de 77,0 à 598,1 g/kg. Cette même teneur varie de 307,5 à 588,0 g/kg dans le cas de la larve de BSF. Ces teneurs sont du même ordre que dans la farine de soja mais peut être légèrement inférieure à celle de la farine de poisson. Toutefois, après le dégraissage, la teneur en protéines des farines d'insectes devrait être supérieure à celle des deux ressources conventionnelles (Tableau 1).

Les insectes sont également riches en acides aminés essentiels (Makkar et al., 2014 ; De Marco et al., 2015). En

général, les profils des insectes en acides aminés dépendent des taxons, le profil des Diptères (mouche soldat noire par exemple) étant considérés comme le plus proche du profil de la farine de poissons, et les profils des Coléoptères (ver de farine par exemple) et des Orthoptères étant eux plus proches du profil du soja, avec des déficiences potentielles en lysine ou méthionine (Barroso et al., 2014). Le Tableau 2 présente la composition en acides aminés (g/16 g d'azote) des farines d'insectes par rapport aux sources de protéines conventionnelles : farine de soja et farine de poisson (Makkar et al., 2014).

Tableau 1 : Principaux constituants (% de MS) des farines d'insectes vs. farines de soja et de poisson (adapté de Makkar et al., 2014)

Composant (% matière sèche)	Farines de larves de mouches soldats noires	Farines de larves de ténébrion meunier	Farines de poisson	Farines de soja
Protéines brutes	41,1 (56,9)	52,8 (82,6)	70,6	51,8
Lipides	26,0	36,1	9,9	2,0
Calcium	7,56	0,27	4,34	0,39
Phosphore	0,90	0,78	2,79	0,69
Ratio Ca:P	8,40	0,35	1,56	0,57

Les valeurs pour les farines dégraissées sont indiquées entre parenthèse

Tableau 2 : Composition en acides aminés essentiels (g / 100 g de protéines) dans des farines d'insectes au regard de celle des farines de poisson et de soja (adapté de Makkar et al., 2014)

	Farines de larves de mouches soldats noires	Farines de larves de ténébrion meunier	Farines de poisson	Farines de soja
<b>Acides aminés essentiels</b>				
Méthionine	2,1	1,4	2,7	1,3
Cystéine	0,1	0,8	0,8	1,4
Valine	8,2	6,0	4,9	4,5
Isoleucine	5,1	4,6	4,2	4,2
Leucine	7,9	8,6	7,2	7,6
Phénylalanine	5,2	4,0	3,9	5,2
Tyrosine	6,9	7,4	3,1	3,4
Histidine	3,0	3,4	2,4	3,1
Lysine	6,6	5,4	7,5	6,2
Thréonine	3,7	4,0	4,1	3,8
Tryptophane	0,5	0,6	1,0	1,4
<b>Acides aminés non-essentiels</b>				
Sérine	3,1	4,6	3,9	5,2
Arginine	5,6	6,1	6,2	7,6
Acide glutamique	10,9	10,4	12,6	19,9
Acide aspartique	11,0	7,7	9,1	14,1
Proline	6,6	5,6	4,2	6,0
Glycine	5,7	5,2	6,4	4,5
Alanine	7,7	8,8	6,3	4,5

Pour les poulets de chair comme pour les poissons d'élevage, les principaux acides aminés limitants sont la méthionine et la lysine. Les niveaux de méthionine dans les farines d'insectes sont plus élevés que dans la farine de soja. Cependant, les niveaux d'acides aminés soufrés (méthionine + cystine) sont plus faibles. Les niveaux de lysine sont plus faibles dans le ver de farine que dans la farine de soja, alors qu'ils sont supérieurs dans les larves de mouche soldat noire. **De manière générale, les niveaux globaux d'acides aminés essentiels dans les farines d'insectes sont bons et les niveaux d'acides aminés essentiels dans les larves de mouches soldat noire sont similaires voire plus élevés que ceux de la farine de soja, à l'exception du tryptophane.** L'arginine est également considérée comme un acide aminé essentiel pour les poules pondeuses. Le niveau de cet acide aminé dans toutes les farines d'insectes était plus faible que dans la farine de soja, ce qui suggère une supplémentation en arginine (acides aminés synthétiques) dans les régimes des poules pondeuses contenant ces farines d'insectes. A noter également que **la digestibilité des protéines et des acides aminés des farines d'insectes sont élevées, généralement supérieures à 70% (et 80% pour les acides aminés) et proches de celles du tourteau de soja** (De Marco et al., 2015 ; Schiavone et al., 2017b ; Lessire et al., 2019). Elles peuvent varier selon l'espèce, le niveau d'inclusion dans l'aliment et le processus de transformation (Gasco et al., 2019). Parfois, la présence de chitine peut entraîner une diminution de la digestibilité de certains nutriments (Gasco et al., 2019).

### 2.1.2. Lipides et acides gras

La teneur en lipides des farines de poissons (8,2%) et des farines de soja (3,0%) est inférieure à celle des insectes (Tableau 1), qui varie généralement entre 10 et 43% (Makkar et al., 2014 ; Khan, 2018) (DeFoliart, 1991). Nogales-Mérida et al (2018) à travers une revue de littérature rapporte que les larves de *Tenebrio molitor* ont une teneur en lipides qui varie de 166,0 à 403,1 g/kg. Cette même teneur varie de 113 à 407 g/kg dans le cas de la larve de BSF. La composition du substrat dans lequel est élevé les insectes (i.e. le régime alimentaire des insectes) est le principal facteur de variation de la composition des insectes en lipides et acides gras, ainsi que l'espèce et le procédé d'élaboration de la farine (extraction des lipides) (Barroso et al., 2014 ; Makkar et al., 2014 ; Lessire et al., 2019).

Certaines farines d'insectes ont un profil en acides gras très spécifique car présentant une concentration en acide laurique supérieure à 40% des acides gras totaux (Lessire et al., 2019). En effet, les lipides dans **les farines de mouches soldat noires sont particulièrement riches en acide laurique (C12 :0) qui peut représenter plus de la moitié des acides gras totaux, au détriment des acides**

**insaturés et polyinsaturés (n-3 et n-6).** Ce profil particulier, déjà mentionné par ailleurs (Cullere et al., 2018) a un impact fort sur la composition des dépôts lipidiques de volailles qui sont enrichis en cet acide gras (Schiavone et al., 2017b).

Une préoccupation récurrente des études menées sur les poissons et sur les volailles est liée au fait que la supplémentation en larves de mouche soldat noire dans l'alimentation des animaux dégrade souvent les profils d'acides gras des produits, diminuant le taux d'acides gras polyinsaturés et / ou augmentant le taux de graisses saturées et monoinsaturées. Ce problème n'est pas spécifique à la BSF, car les larves de coléoptères sont également riches en graisses monoinsaturées, mais les BSF ont cependant des taux d'acides gras polyinsaturés les plus faibles (Wang and Shelomi, 2017). Ce problème pourrait être surmonté en faisant varier le taux d'acides gras dans leurs substrats.

### 2.1.3. Minéraux et vitamines

Tout comme les acides gras, la teneur en minéraux des insectes dépend de leur stade de vie, de l'espèce, des conditions d'élevage et de la composition des substrats utilisés pour la production d'insectes (Makkar et al., 2014). **Les niveaux de calcium et de phosphore sont habituellement plus bas que ceux des farines de poissons, à l'exception du calcium et du ratio Ca:P dans les larves de mouche soldat noire** (Tableau 1) (Makkar et al., 2014 ; De Marco et al., 2015).

Les insectes contiennent également plusieurs vitamines (Schabel, 2010). Cependant, les profils en vitamines - tous comme les profils en minéraux, acides aminés et acides gras - des insectes dépendent dans une large mesure de la composition de leur régime alimentaire (Ramos-Elorduy et al., 2002).

Il est difficile de se prononcer de manière définitive sur l'intérêt nutritionnel des insectes, tant **les variations peuvent être importantes entre espèces, stades de développement, substrat nourricier et conditions de culture.** Compte tenu de l'hétérogénéité des produits, il est nécessaire d'avoir une **bonne connaissance de la composition et du procédé d'obtention des farines pour évaluer correctement sa valeur nutritionnelle avant la formulation.** Le **Tableau 3** présente des données comparatives de la composition corporelle des larves ou pré-pupes des trois espèces d'insectes les plus étudiées pour l'alimentation animale (à savoir les ténébrions, les mouches soldats noires et les mouches domestiques) selon le type de substrat nourricier considéré. Il est évident qu'un travail de fond est à faire sur la **définition et normalisation de la composition des insectes d'intérêt pour l'alimentation avicole et piscicole, notamment en utilisant des substrats autorisés par la réglementation européenne.**

Tableau 3 : Tableau comparatif de la composition corporelle (matière sèche, lipides totaux, protéines en g/kg) des insectes selon leur substrat nourricier (adapté de Nogales-Mérida, 2018)

Espèces d'insectes	Stade d'élevage	Substrat nourricier	Composition corporelle (g/kg)			Auteurs
			Matière sèche	Protéines	Lipides	
Ténébrion ( <i>Tenebrio molitor</i> )	Larves	Blé, céréales, carottes	371,0	83,0	311,0	Barker et al. (1998)
	Larves	Sons de blé, suppléments inconnus	417,0	77,0	403,0	
	Larves	Acides gras, vitamine E et bêta carotène	311,0	598,1	263,7	
	Larves	Inconnu, animaux provenant de différentes entreprises: Gaobeidian Shannon Biology Co., Ltda., Shandong, China; Kreca, the Netherlands; EnviroFlight LCC, OH, USA	960,0	522,0	284,0	Marono et al. (2015)
	Larves		958,0	518,0	298,0	
	Larves		990,0	590,0	166,0	
	Larves		992,0	588,0	171,0	
	Larves		982,0	576,0	289,0	
	Larves		990,0	574,0	289,0	
	Larves	Son de céréales	349,6	584,2	300,9	Sánchez-Muros et al. (2016)
Prépuces	Lisier porcin	916,0	436,0	331,0	St-Hilaire et al. (2007)	
Larves	Inconnu, animaux provenant de différentes entreprises: Enviroflight LCC, OH, USA; Laboratory of Entomology, Wageningen University, the Netherlands.	951,0	520,0	113,0	Marono et al. (2015)	
Larves		948,0	518,0	113,0		
Larves		988,0	588,0	129,0		
Larves		989,0	584,0	290,0		
Larves		959,0	499,0	284,0		
Larves		959,0	505,0	249,0		
Larves	Déchets organiques provenant d'aliments destinés à la consommation humaine (différentes méthodes d'obtention du produit final)	965,0	522,0	255,0	Lock et al. (2016)	
Larves		956,0	583,0	170,0		
Mouche soldat noire ( <i>Hermetia illucens</i> )	Larves	Aliment pour poulets	387,0	412,0	336,0	Spranghers et al. (2017)
	Larves	Digestat	386,0	422,0	218,0	
	Larves	Déchets végétaux	410,0	399,0	371,0	
	Larves	Déchets de restaurants	381,0	431,0	386,0	
	Larves	Déchets de brasserie, eau, son de blé, bouillie de levure, déchets issus d'usine de fabrication d'aliment pour poissons	950,3	416,4	234,4	
	Larves	Déchets végétaux / Fruits	219,6	418,8	262,8	Meneguz et al. (2018)
	Larves	Déchets de fruits	282,9	307,5	407,0	
	Larves	Sous produits de l'industrie du vin	265,4	344,3	322,2	
	Larves	Sous produits de brasserie	290,8	529,6	298,7	
	Larves	Lisier de poulets	/	470,0	177,0	
Mouche domestique ( <i>Musca domestica</i> )	Larves	Chutes de volailles	947,0	480,0	149,0	Ajani et al. (2004)
	Larves	Fumier de bovins	881,0	704,0	161,0	St-Hilaire et al. (2007a)
	Larves	Sang de bœuf, son de blé	927,0	471,0	253,0	Aniebo et al. (2008)
	Larves	Chutes de volailles	942,4	286,3	233,0	Ogunji et al. (2008)
	Larves	Son de blé et sang de porc (1: 2)	/	310,0	78,8	Pieterse and Pretorius (2014)
	Prépuces	Son de blé et sang de porc (1: 2)	/	371,9	70,6	
	Larves	Tourteaux de soja et viscères de volailles	/	584,0	/	Djissou et al. (2016)
	Larves	Fumier de poulets	/	570,0	/	Kovtunova et al. (2017)
	Larves	Fumier de poulets, selenium 5 mg kg <sup>-1</sup>	/	550,0	/	
	Larves	Fumier de poulets, selenium 15 mg kg <sup>-1</sup>	/	510,0	/	
	Larves	Fumier de poulets, selenium + cobaltum 5 mg kg <sup>-1</sup>	/	594,2	/	
	Larves	Fumier de poulets, selenium + cobaltum 15 mg kg <sup>-1</sup>	/	617,2	/	
	Larves	Son de blé humide	934,3	566,1	205,0	

## 2.2. Effets sur les performances des animaux (production, qualité technologique et organoleptique des produits)

Plusieurs études ont mis en évidence la possibilité d'inclure des larves d'insectes, des farines d'insectes ou encore des huiles d'insectes dans les aliments pour poissons et volailles, en remplacement partiel ou total des sources de protéines conventionnelles. Afin d'évaluer correctement l'intérêt de l'utilisation des insectes dans le régime des poissons d'élevage ou des volailles, il est nécessaire de procéder à une comparaison d'un régime 'de contrôle' - qui couvre tous les besoins de l'animal - avec un régime expérimental - isoazoté (isoprotéine et isoacides aminés digestibles) et isoénergétique - contenant des farines, des larves ou des huiles d'insectes.

### 2.2.1. Performances de production

#### 2.2.1.1 Volailles

La majorité des études sur les poulets de chair nourris avec des produits à base d'insecte (farine ou huile), en comparaison aux animaux nourris avec des sources de protéines conventionnelles, ont montré qu'il n'y avait **pas d'influence sur les performances de croissance** (Tableau 4). De plus, il a été observé dans quelques études sur les poulets standard une amélioration du poids vif et de la consommation d'aliment, avec une incorporation de 1 à 10% de farine de larves de BSF ou de TM (Ballitoc and Sun, 2013 ; Dabbou et al., 2018), ainsi qu'une amélioration de l'efficacité alimentaire avec une incorporation de farine ou d'huile de TM (Ballitoc and Sun, 2013 ; Bovera et al., 2015 ; Bovera et al., 2016 ; Kieronczyk et al., 2018). Cependant, quelques études montrent une augmentation de l'IC chez les poulets de chair nourris avec de la farine de larves de TM non dégraissées (Biasato et al., 2017 ; Biasato et al., 2018b ; Jozefiak et al., 2018). À noter également que de manière générale, **la substitution de l'huile de soja par de l'huile d'insecte dans l'alimentation des poulets de chair n'affecte pas leur performance de production** (Schiaivone et al., 2017a ; Kieronczyk et al., 2018 ; Schiaivone et al., 2018 ; Benzertiha et al., 2019c ; Kieronczyk et al., 2020 ; Kim et al., 2020).

Chez les cailles, comme chez les poulets de chair, la majorité des études ne **montrent pas d'effet de l'utilisation des produits à base d'insectes sur les performances de croissance** (Tableau 4), sauf, semble-t-il, quand les insectes sont élevés sur des abats de poisson (Cullere et al., 2019b). Une étude en revanche, la moins récente et réalisée sur les cailles, a montré une amélioration de l'IC et de la consommation d'aliment lorsqu'elles sont nourries avec des farines de larves BSF qui substituent 25% à 50% de la farine de poisson dans la ration (Widjastuti et al., 2014).

Très peu d'étude portent sur l'utilisation des insectes dans l'alimentation des dindes, des canards et des perdrix (Tableau 4). Globalement, ces études ne montrent **pas d'effet sur les performances de production** (Gariglio et al., 2019 ; Sypniewski et al., 2020) ou montrent seulement une augmentation du poids vif chez les animaux nourris avec des farines de larves BSF partiellement ou totalement dégraissées (Loponte et al., 2017 ; Gariglio et al., 2019).

Enfin, chez les poules pondeuses, les résultats sont **plus contrastés**. Globalement, il apparaît que l'utilisation des farines d'insectes **n'affecte pas ou améliore les performances de production** (Tableau 4). En effet, plusieurs études montrent une amélioration du taux de ponte (Bovera et al., 2018), de l'IC (Marono et al., 2017 ; Mwaniki et al., 2020), de la consommation d'aliment (Star et al., 2020) et du poids vif (Mwaniki et al., 2020). Toutefois, plusieurs dénotent un effet négatif, notamment sur le taux de ponte (Park et al., 2017 ; Mwaniki et al., 2018). **L'utilisation de larves entières, que ce soit sous forme déshydratées et distribuées ad libitum (Ruhnke et al., 2018) ou vivantes (Star et al., 2020) n'affecte pas les performances de production des poules pondeuses.**

#### 2.2.1.2 Poissons

Au regard de la littérature existante sur l'utilisation des farines de larves TM en alimentation piscicole, **il semble qu'un taux de substitution des farines de poissons (TSFP) allant jusqu'à 50% donne des résultats de croissance satisfaisants pour la truite arc en ciel et la daurade royale** (Gasco et al., 2014a, Belforti et al, 2015 ; Piccolo et al, 2014 et Piccolo et al, 2017). **Au-delà de 50%, cela entraîne généralement une dégradation de la digestibilité des protéines** et des baisses de performance notamment pour le bar. Une seule publication évoquant un remplacement total des farines de poissons a été référencée (Chemello et al, 2020) : l'impact de ce régime étant positif sur la croissance de la truite arc en ciel sous condition d'enrichir l'aliment avec des huiles de poisson ; à noter cependant que l'aliment témoin contenait une part de farines de poissons peu élevée (20%) en comparaison avec les standards.

Des conclusions similaires peuvent être faite vis-à-vis de l'utilisation des farines de larves de BSF en alimentation piscicole, **les performances de croissance n'étant pas significativement différentes pour des TSFP allant jusqu'à 50%** pour la truite arc en ciel (Sealey et al, 2011 ; Stadlander et al, 2017 ; Renna et al ; 2017 ; ITAVI, 2019) et le bar européen (Magalhaes et al, 2017). Quelques publications vont à contre-courant de ces conclusions (Saint Hilaire et al, 2007) ce qui laisse penser que **la valeur nutritionnelle des insectes a son importance et par la même celle des substrats nourriciers** comme le montre une publication comparant des régimes à base de farines de mouche soldats noires nourries avec du fumier enrichi

ou non en déchets de poissons (Sealey et al, 2011). Deux publications portant sur le remplacement des farines de poissons dans le régime alimentaire du saumon atlantique ont incorporé le TSFP jusqu'à 100% (Lock et al, 2016 ; Belghit et al, 2019) sans impact notable sur les performances zootechniques (gain de poids, indice de conversion, digestibilité des protéines) nutritionnels et sensoriels : des réserves peuvent être émises sur ces résultats en raison **du faible taux d'inclusion de farines de poissons dans l'aliment témoin et/ou des apports complémentaires en acides aminés essentiels et/ou d'AGPI** dans l'aliment expérimental de manière proportionnelle au TSFP. Il est à noter que **la méthode de transformation de la farine pourrait avoir également une importance** pour les résultats zootechniques, Lock et al (2016) ayant obtenu des résultats satisfaisants jusqu'à un TSFP de 100% avec des farines d'insectes faiblement dégraissées, les performances ayant été dégradées avec des farines d'insectes fortement dégraissées ce qui rejoint les résultats de Kroeckel et al (2012) ayant également procédé à un dégraissage élevé des farines d'insectes pour des tests zootechniques menés sur des turbots.

Retenons qu'il est réaliste d'affirmer qu'un **taux de substitution des farines de poissons par des farines d'insectes allant jusqu'à 40-50% dans l'aliment piscicole permet des performances de croissance, des IC et des taux de survie satisfaisants pour diverses espèces de poissons**, et qu'il est possible d'aller jusqu'à un remplacement total des farines de poissons sans impact majeur sur les performances de croissance (mis à part la digestibilité protéique) sous réserve d'apporter des compléments en huiles de poisson (et parfois en certains acides aminés limitants), ce qui soulève des interrogations sur la trajectoire à tenir pour s'affranchir totalement des ressources marines pour l'aquaculture.

## 2.2.2. Qualité technologique, nutritionnelle et organoleptiques des produits

### 2.2.2.1 Volailles

Les effets de l'inclusion de farines d'insectes sur les caractéristiques de la carcasse et la qualité de la viande de volaille ont été étudiés en testant différents niveaux d'inclusion de farines et d'huiles de BSF et de TM (Tableau 6).

**Les caractéristiques de carcasse des poulets de chair, des cailles et des dindes ne semblent pas être affectées par l'inclusion de farine ou d'huile d'insectes** (Bovera et al., 2015 ; Bovera et al., 2016 ; Cullere et al., 2016 ; Leiber et al., 2017 ; Schiavone et al., 2017a ; Cullere et al., 2018 ; Onsongo et al., 2018 ; Pieterse et al., 2019). Cependant, Schiavone et al. (2019) ont montré qu'une inclusion jusqu'à 10% de farine de larves BSF, en substitution partielle de la farine de soja, a amélioré le poids carcasse des poulets de chair. Ballitoc et Sun (2013)

ont également constaté de meilleurs rendements à l'abattage, chez les poulets de chair nourris avec des farines de TM à un taux d'inclusion de 2%. Loponte et al. (2017) ont signalé des poids de carcasse plus élevés chez les perdrix nourries avec des farines de BSF et de TM en remplacement partiel (25% ou 50%) des farines de soja que dans le groupe témoin. De même, Biasato et al. (2017, 2018b) ont évalué les effets d'un remplacement partiel de soja, de farine de gluten de maïs et d'huile de soja par de la farine de larve de TM sur les caractéristiques de carcasse des poulets de chair femelles. Ils ont constaté une augmentation du poids carcasse, du poids et du rendement en gras abdominal avec l'augmentation des niveaux d'inclusion de farine de TM dans les régimes (de 5 à 15%).

À l'instar des caractéristiques de la carcasse, **les paramètres de qualité de la viande de volaille (pH, couleur, exsudat, pertes à la cuisson) ne semblent pas être affectés par l'inclusion de farine de larves d'insectes** (Bovera et al., 2015 ; Bovera et al., 2016 ; Schiavone et al., 2017a ; Altmann et al., 2018 ; Cullere et al., 2019a ; Cullere et al., 2019b ; Mbhele et al., 2019 ; Pieterse et al., 2019 ; Sypniewski et al., 2020). Leiber et al. (2017) et Cullere et al. (2016, 2018) observent toutefois une augmentation des pertes à la cuisson des filets issus respectivement de poulets de chair et de dindes nourris avec des farines de BSF. Une modification de la couleur jaune des filets a également été observée chez les poulets de chair, les perdrix (Secci et al., 2018 ; Schiavone et al., 2019). Les études concernant **les paramètres de qualité d'œuf sont en revanche plus contrastées**. Alors que la majeure partie d'entre elles observent une augmentation du poids d'œuf, de l'épaisseur et de la résistance à la fracture de la coquille des poules pondeuses ayant reçu un régime à base d'insectes (Park et al., 2017 ; Mwaniki et al., 2018 ; Mwaniki et al., 2020 ; Secci et al., 2020), d'autres montrent l'inverse (Ruhnke et al., 2018), ou bien encore une absence d'effet significatif sur ces paramètres (Maurer et al., 2015 ; Star et al., 2020). Certaines études ont également mis en évidence une augmentation du poids (Secci et al., 2020) et de la couleur du jaune d'œuf (Mwaniki et al., 2018 ; Secci et al., 2019 ; Mwaniki et al., 2020).

Alors qu'il existe peu d'informations sur le profil protéique des viandes de volailles nourries avec des farines ou des huiles d'insectes, de nombreuses études montrent **une modification importante de leur profil en acides gras (AG)**. En effet, en raison notamment de la **forte teneur en acides gras saturés des larves de BSF (acide laurique principalement)**, il a été observé de manière générale une **augmentation de la teneur en AG saturés et monoinsaturés au détriment des AG polyinsaturés (oméga 6 et oméga 3) dans les filets de volailles nourries avec des produits d'insectes en comparaison**

**aux filets des animaux nourris avec des sources de protéines conventionnelles** (Cullere et al., 2016 ; Schiavone et al., 2017a ; Cullere et al., 2018 ; Kieronczyk et al., 2018 ; Secci et al., 2018 ; Cullere et al., 2019a ; Cullere et al., 2019b ; Loponte et al., 2019 ; Schiavone et al., 2019 ; Kim et al., 2020). Certaines études ont démontré que **le substrat d'élevage des insectes peut avoir un fort impact sur la composition chimique des larves** (Tableau 3). Le profil en AG des larves de BSF pourrait être amélioré en les élevant dans un substrat enrichi en oméga 3, en recyclant par exemple une source de nutriments pertinente considérée comme sous-produit (i.e. abats de poisson) (Cullere et al., 2019b). Les seules recherches sur ce sujet publiées à ce jour ont trouvé des résultats prometteurs respectivement en aquaculture et en volailles (St-Hilaire et al., 2007 ; Cullere et al., 2019b).

Enfin, concernant les propriétés sensorielles de la viande et des œufs, peu d'informations sont disponibles sur l'effet des farines et des huiles d'insectes (Gasco et al., 2019). **Le profil sensoriel de la viande (odeur, saveur, arôme, texture, jutosité et tendreté) ne semble pas être affecté chez les cailles** (Cullere et al., 2016 ; Cullere et al., 2018 ; Cullere et al., 2019b) et les poulets (Onsongo et al., 2018 ; Cullere et al., 2019a ; Pieterse et al., 2019) nourris avec des farines de larves BSF. Cependant, Altmann et al. (2018) ont montré que les filets de poulets de chair nourris avec des régimes contenant de la farine de BSF avaient une saveur plus intense qui diminuait au cours du stockage. Dans une étude de Pieterse et al. (2019), les poulets de chair qui étaient nourris avec des larves de BSF produisaient des filets avec un arôme métallique et un arrière-goût plus soutenu, ainsi que des valeurs de jutosité plus durables que ceux nourris avec des régimes à base de soja et de farine de poisson. Enfin, Al-Qazzaz et al. (2016) ont observé une amélioration significative de l'apparence, de la texture, du goût et de l'odeur des œufs de poules pondeuses pour des niveaux croissants de farine de larves de BSF.

### 2.2.2.2 Poissons

En raison de l'intérêt croissant envers l'utilisation de la farine d'insectes dans l'alimentation aquacole, diverses études nutritionnelles ont été menées sur les poissons produits avec ce type de farines expérimentales en remplacement partiel ou total des farines de poissons. Les principaux insectes testés dans ce cadre sont : la larve de mouche soldat noire et la larve de ténébrion meunier. Le remplacement des farines de poissons par des farines d'insectes ne provoque en général pas ou peu de différence en termes de composition protéique et acides aminés, même si certains auteurs précisent que les régimes expérimentaux sont parfois enrichis en acides aminés limitants. Le constat n'est pas le même pour les acides gras : étant donné que la richesse des poissons marins et salmonidés en acides gras polyinsaturés (AGPI)

et hautement insaturés (AGHI) oméga 3 constituent un bénéfice pour la santé des consommateurs, **modifier leur profil en acides gras pourrait affecter la perception de ces consommateurs et par conséquent la valeur marchande du poisson** (Amberg et Hall, 2008). De plus, la modification du spectre lipidique des filets et de la composition des acides gras **affecte directement la composition en composés volatils totaux et par là même l'arôme et la saveur des poissons** (Turchini et al., 2003).

En ce qui concerne les **paramètres de qualité de chair**, les études menées sur la dorade rose, la dorade royale et la truite arc-en-ciel nourries avec différents niveaux d'inclusion de farines de TM n'ont **révélé aucune différence significative sur divers paramètres de qualité du filet, tels que la capacité de rétention d'eau et les caractéristiques de texture** (Laconisi et al., 2017, 2018 ; Piccolo et al., 2017). En ce qui concerne la couleur du poisson, les régimes TM peuvent affecter les couleurs du filet et de la peau de la dorade rose, avec en particulier, une hausse de l'indice de rouge dans la région ventrale cutanée, et de l'indice de jaune dans la région épaxiale du filet ont été décrits (mesures réalisées avec un colorimètre spectral) chez les poissons nourris avec un niveau d'inclusion élevé (50%) de farine de TM (Laconisi et al., 2017). Inversement, les résultats rapportés par Mancini et al. (2018) mettent en évidence une diminution de l'indice de jaune (mesures réalisées par photo-radiométrie) des filets chez les truites arc-en-ciel nourries avec un régime à 50% de TSFP.

En termes de profil lipidique, **les larves d'insectes se caractérisent par une faible teneur en AGPI, comme pour la plupart des ressources d'origine terrestre** qui contiennent en général peu ou pas d'EPA et DHA. Elles contiennent également en général un taux élevé d'acides gras saturés. Le profil de ces farines est donc très différent des farines de poissons, ressource marine riche en EPA/DHA. **Le profil en acides gras des farines d'insectes peut varier considérablement selon l'espèce d'insectes, le substrat utilisé pour leur élevage** (Gasco et al., 2018) **mais également la méthode de transformation (dégraissage ou non des farines), affectant par la même la composition des poissons d'aquaculture nourris avec ces farines**. En raison de la teneur naturellement élevée en acides gras saturés dans les tissus des farines de BSF, la truite arc-en-ciel nourrie avec un taux d'inclusion croissant montre une **augmentation croissante en acides gras saturés (principalement de l'acide laurique, C12:0) et une teneur corrélée négativement en AGPI** (Gasco et al., 2014 ; Renna et al., 2017 ; Stadlander et al., 2017 ; Mancini et al., 2018 ; Secci et al., 2018a ; Zhou et al., 2018). En revanche, la farine de TM se caractérise par des teneurs élevées en acides oléique, linoléique et palmitique (Gasco et al., 2018). **Les régimes alimentaires comprenant des**

**niveaux élevés de farine de TM ont montré une augmentation de la teneur en AGPI n-6 au détriment de la teneur en polyinsaturés n-3** (Belforti et al., 2015 ; laconisi et al., 2017, 2018), avec une réduction conséquente du ratio oméga 3/oméga 6 et une dégradation des indices d'athérogénicité et de thrombogénicité. Ainsi, si les insectes offrent une **bonne opportunité de remplacer en grande partie les farines de poissons, il en va différemment pour les huiles de poissons**, surtout pour l'alimentation des poissons marins et les salmonidés dont le taux d'oméga 3 doit répondre aux attentes de bénéfices sur la santé humaine. Une solution serait **de recourir uniquement à des régimes de finition riches en huiles de poissons**, à la fin des périodes d'élevage pour améliorer le profil en oméga 3 des poissons avant abattage. Toutefois, l'effet prolongé de carences en acides gras polyinsaturés pourrait avoir des effets délétères sur la santé des poissons. Une autre piste de travail réside dans la culture et la valorisation de certaines micro algues riches en DHA et EPA en alimentation animale.

Comme déjà évoqué, les qualités sensorielles des poissons peuvent être affectées par l'évolution des profils en acides gras, en particulier pour l'arôme et la saveur, qui sont directement liés aux composants lipidiques volatils (Turchini et al. 2007 ; Borgogno et al. 2017). **Plusieurs études mentionnent une absence d'effets sur les qualités sensorielles des truites arc-en-ciel** (Sealey et al., 2011 ; Lock et al., 2016) **et des saumons atlantiques** (Belghit et al., 2019). Stadlander et al. (2017) notent toutefois une tendance à la coloration plus sombre des filets de truite arc-en-ciel nourries avec des farines de BSF tandis que Borgogno et al. (2017) notent des **changements significatifs dans l'intensité perçue des descripteurs d'arôme, de saveur et de texture de la truite arc-en-ciel nourrie avec de la farine de BSF**, qui ont utilisé des panels « experts », avec plus précisément une dominance de saveur métallique. Néanmoins, les auteurs ont conclu que l'inclusion de farines d'insectes dans l'alimentation des poissons d'élevage n'induisait pas d'impact sur la perception du goût « off-flavor ». Les résultats sont ainsi mitigés selon les auteurs, et davantage de tests sont nécessaires pour statuer sur l'effet ou non de l'inclusion des farines d'insectes sur la qualité sensorielle des poissons d'élevage.

### 2.3. Effets sur la santé et le bien-être des animaux

#### 2.3.1. Santé des volailles et des poissons

Les insectes sont des matières premières prometteuses pour l'alimentation animale car ils contiennent non seulement des nutriments précieux mais aussi des composés particuliers qui **semblent capables de moduler le microbiote du tractus digestif et d'optimiser la santé de animaux, tels que la chitine, l'acide laurique et les peptides antimicrobiens** (Jozefiak and Engberg, 2017 ; Gasco et al., 2018 ; Sogari et al., 2019). Jusqu'à

présent, il y a eu peu de travaux sur les effets de ces composés dérivés d'insectes, mais les premières études montrent des résultats prometteurs.

La **chitine**, qui provient de l'exosquelette des insectes, n'est pas digestible chez la plupart des animaux. Plusieurs études ont démontré qu'elle **modulait le microbiote intestinal en favorisant la croissance de certains groupes de bactéries, avec des effets positifs sur la santé intestinale** (Lee et al., 2008 ; Jozefiak and Engberg, 2017 ; Gasco et al., 2018 ; Sogari et al., 2019). La chitine aurait également des **effets antioxydants et antimicrobiens, ce qui pourrait permettre de réduire l'usage des antibiotiques** (Gasco et al., 2018 ; Lee et al., 2018 ; Benzertiha et al., 2019a). Chez le poulet de chair, il a été démontré que l'apport de farines de larves de TM réduisait la teneur en bactéries pathogènes (i.e. E. coli et Salmonella spp) dans le caecum et augmentait les niveaux de certains anticorps (i.e. IgA et IgG) (Islam and Yang, 2017). Les animaux nourris avec des aliments contenant des farines de larves de TM avaient également le rapport albumine / globuline le plus bas, ce qui suggère une réponse immunitaire améliorée et une meilleure résistance aux maladies, probablement en raison des effets prébiotiques de la chitine (Bovera et al., 2015). Des résultats similaires ont été trouvés pour des poules pondeuses nourries avec environ 1,02 g par jour de chitine, fournie par l'inclusion de farine de BSF (Marono et al., 2017).

**L'acide laurique** est un AG saturé à chaîne moyenne, présent en forte concentration dans les larves de BSF. Les acides gras à chaîne moyenne sont connus pour leurs effets antimicrobiens sur le microbiote intestinal, tandis que l'acide laurique est connu pour avoir une **activité antivirale et antibactérienne** et pour être particulièrement actif contre les bactéries à Gram positif (Gasco et al., 2018). Ces effets antimicrobiens pourraient fournir une **valeur ajoutée importante** aux larves d'insectes principalement utilisées comme source de protéines dans l'alimentation des monogastriques (Spranghers et al., 2017). Il a également été démontré chez les saumons que les graisses d'insectes sont un substrat rapide pour l'énergie et favorisent moins de stockage des lipides dans le foie (Belghit et al., 2019). Cependant, à l'heure actuelle, il n'y a que très peu de littérature sur les bienfaits de l'acide laurique sur la santé des volailles et d'autres recherches sont nécessaires afin de démontrer et valider leur valeur ajoutée.

**Les peptides antimicrobiens (AMP)** sont un facteur clé du système immunitaire inné de nombreux organismes et jouent un rôle important dans les mécanismes de protection de l'hôte contre l'invasion de bactéries pathogènes. Les peptides antimicrobiens des insectes peuvent également protéger contre les virus et les

champignons. La plus grande diversité de peptides antimicrobiens se trouve chez les insectes (Tonk and Vilcinskis, 2017). Jusqu'à présent, plus de 150 protéines d'insectes à activité antimicrobienne ont été identifiées. Park et al. (2014) ont révélé que les extraits de larves de mouche soldat noire présentent des activités antimicrobiennes potentielles contre *Staphylococcus aureus*, un *S. aureus* résistant à la méthicilline et *Pseudomonas aeruginosa*. Park et al. (2017) ont récemment identifié un nouvel AMP de 40 acides aminés. Fait intéressant, cet AMP présente une activité bactéricide pour les souches bactériennes à Gram positif. D'autres ont montré que certains AMP de larves BSF présentent une activité inhibitrice variée sur divers agents pathogènes, notamment la bactérie Gram positive *Staphylococcus aureus*, la bactérie Gram négative *Escherichia coli*, le champignon *Rhizoctonia solani* et le champignon *Sclerotinia sclerotiorum* (Elhag et al., 2017). De plus, chez les porcs et les poulets de chair, les peptides antimicrobiens **améliorent les performances de croissance, favorisent la digestibilité des nutriments et la santé intestinale, modifient positivement le microbiote intestinal et renforcent la fonction immunitaire** (Wang et al., 2016). Les peptides antimicrobiens offrent un grand espoir en raison du problème mondial lié à la résistance croissante des bactéries aux antibiotiques. Bien qu'ils n'aient pas encore été introduits sur le marché, selon Józefiak et Engberg (2017), les perspectives sont prometteuses, mais beaucoup de travail reste à faire afin d'arriver à une production à grande échelle pour une application en élevage.

Une santé et une fonctionnalité gastro-intestinale optimales sont essentielles pour une production animale durable car elles ont des répercussions directes sur la santé et les performances des animaux (Kogut and Arsenault, 2016 ; Biasato et al., 2020). Récemment, il a été démontré que l'inclusion de farines ou d'huiles de larves d'insectes, en remplacement partiel ou total des sources conventionnelles de protéines, permettait de moduler la composition du microbiote du tractus digestif des volailles (Borrelli et al., 2017 ; Park et al., 2017 ; Biasato et al., 2018a ; Józefiak et al., 2018 ; Moula et al., 2018a ; Biasato et al., 2019 ; Józefiak et al., 2020), notamment en **inhibant le développement de bactéries potentiellement pathogènes** (Park et al., 2014 ; Benzertiha et al., 2019b ; Sypniewski et al., 2020), en **sélectionnant les bactéries potentiellement bénéfiques** (Biasato et al., 2020) et en stimulant le microbiote digestif à produire des enzymes (i.e. enzymes glycolytiques) (Benzertiha et al., 2019b).

Concernant les poissons, Henry et al (2018) ont montré un intérêt des farines de mouches soldats noires en termes **d'amélioration du système immunitaire des bars européens** avec non seulement un **effet anti-**

**inflammatoire**, mais aussi une amélioration des **défenses naturelles des poissons vis-à-vis de certaines bactéries pathogènes et parasites**. L'inclusion alimentaire de mouche domestique (*Musca domestica*) à de faibles niveaux (entre 0,75 et 7,5%) pourrait également stimuler le système immunitaire inné et la résistance aux maladies de la dorade japonaise (*Pagrus major*) (Ido et al, 2015) et de la carpe noire (Ming et al, 2013). De plus, le remplacement partiel de farine de poissons par des farines de ténébrions (*Tenebrio molitor*) pourrait **diminuer les réponses inflammatoires dans le sérum du bar européen** (*Dicentrarchus labrax*) (Henry et al, 2018), mais aussi augmenter la réponse immunitaire innée et acquise ainsi que la réponse immunitaire contre les pathogènes du poisson-chat jaune (*Pelteobagrus fulvidraco*) (Su et al, 2017). Ido et al, 2019 ont également montré - lors d'un challenge test avec la bactérie pathogène *Edwardsiella tarda* - que le taux de survie des dorades japonaises (*Pagrus major*) nourries avec un régime partiellement substitué avec des farines de larves de ténébrions était significativement plus élevé. Ces résultats encourageants révèlent un nouveau champ de recherche à explorer, même si une étude plus approfondie impliquant des challenges bactériens ou parasitaires reste nécessaire pour confirmer que les effets constatés sur le système immunitaire se traduisent par une meilleure résistance de différentes espèces de poissons vis-à-vis de diverses maladies responsables de la mortalité des poissons d'élevage. D'ores et déjà, Motte et al, 2019, ont montré des **effets significatifs de l'utilisation de farines de ténébrions sur la résistance des crevettes blanches** (*Penaeus vannamei*) **vis-à-vis du syndrome de nécrose hépatopancréatique aiguë** (AHPNS).

### 2.3.2. Bien-être des volailles

Actuellement, il n'y a **pas/peu de littérature** traitant sur l'effet de l'utilisation d'insectes ou produits à base d'insectes sur le bien-être des animaux et plus précisément sur l'expression des comportements naturels.

Dans la nature, les poules passent beaucoup de temps à rechercher et à manger des insectes vivants. Ceci est considéré comme leur **comportement naturel et peut contribuer positivement au bien-être animal**. Certains auteurs ont indiqué que l'incapacité des poules à exprimer leur comportement naturel peut entraîner un comportement agressif et un picage accru (Blokhuis and Wiepkema, 1998). Ce dernier est un défi majeur pour le bien-être des poules pondeuses. La distribution de larves vivantes pourrait fournir une **solution possible pour exprimer le comportement naturel des poules et ainsi réduire le picage**. Star et al. (2020) ont étudié les effets de la distribution de larves vivantes de BSF à des poules pondeuses âgées non épouillées sur le comportement et le bien-être. À la fin de l'essai, les poules nourries avec des larves présentaient un meilleur état des plumes par rapport

aux poules témoins. Les observations comportementales ont également indiqué que l'apport de larves entraînait un comportement naturel de fouille et influençait le nombre d'oiseaux au sol au moment de la distribution. Des effets similaires ont également été observés chez les jeunes dindonneaux (Veldkamp and van Niekerk, 2019). Les animaux nourris avec des larves de BSF vivantes a permis de réduire le picage des plumes sur le dos et la base de la queue.

D'autres études sont nécessaires à l'avenir pour ajouter une plus-value aux larves d'insectes. Il pourrait également être intéressant d'optimiser le temps d'approvisionnement des larves vivantes (distribution à différents pas de temps) pour inciter les poules à exprimer leur comportement naturel tout au long de la journée.

#### 2.4. Acceptabilité sociale des insectes dans le cadre de l'alimentation animale

La plupart des études, qui visent à étudier la contribution des insectes comme source de protéines dans l'alimentation animale, se concentrent principalement sur les performances de croissance, les implications microbiologiques et sanitaires, la composition et l'utilisation des nutriments, alors que la réponse du consommateur n'a été que très peu étudiée. Cependant, **l'acceptabilité sociale est un des nombreux challenges auxquels devront faire face les producteurs et les utilisateurs d'insectes, notamment pour le développement de l'industrie des protéines d'insectes dans l'alimentation animale.**

Quelques enquêtes auprès des consommateurs ont été réalisées dans le but **d'évaluer l'intérêt/assentiment d'un panel représentatif de consommateurs quant à la consommation de porc, volaille ou de poissons nourris avec des insectes** (Smith, 2015 ; Verbeke et al., 2015 ; Mancuso et al., 2016). De manière générale, **la majorité des répondants seraient prêts à manger du poisson, du poulet ou du porc ayant été nourris avec une alimentation contenant des insectes ou protéines d'insectes.** En effet, dans le cadre du projet PROteINSECT, environ 1 300 personnes de 71 pays (Royaume-Uni, Mali, Chine, Pologne, France, etc.) ont répondu à ce type de sondage. Environ 73 % des répondants seraient prêts à manger du poisson, du poulet ou du porc ayant été nourris avec une alimentation contenant des protéines d'insectes (Smith, 2015). D'autres sondages ont été menés, en Belgique (Verbeke et al., 2015), en Italie (Mancuso et al., 2016) et en France (CLCV, ITAVI), avec des échantillons toutefois plus petits et limités à la population nationale. Ces résultats sont donc plus critiquables et moins généralisables à la population européenne, mais donnent toutefois des orientations importantes et qui tendent à se recouper. Dans le sondage de Verbeke et al., (2015), sur un échantillon global de 415

personnes (agriculteurs, consommateurs et professionnels du secteur agricole), 2/3 des participants étaient enclins à accepter l'utilisation d'insectes en alimentation animale. Mancuso et al. (2016) ont testé un échantillon de 277 consommateurs en Italie du Nord pour mesurer l'acceptabilité de l'utilisation de farines d'insectes pour la filière piscicole spécifiquement : près de 90% des consommateurs ont une attitude positive envers les farines d'insectes (près de 50% des consommateurs sont entièrement d'accord, tandis que 40% sont partiellement d'accord). Un autre sondage mené par la CLCV (Consommation, logement et cadre de vie) pour le compte de l'ADEME a montré que sur un panel de 188 personnes, environ 70 % des participants seraient ainsi prêts à manger de la volaille, du porc et du poisson d'élevage nourris avec des farines à base d'insectes. Enfin, une enquête réalisée par les étudiants de l'Université de Tours en partenariat avec l'ITAVI a montré que sur un panel de 376 consommateurs, 63% d'entre eux seraient prêts à consommer des produits de volailles (viandes, œufs) nourries avec des insectes vivants ou des farines d'insectes. Il ressort également de ces enquêtes, que les participants semblent prêts à accepter de consommer ces produits, à condition **d'avoir des informations concernant cette pratique (plus d'informations disponibles sur l'utilisation des insectes en alimentation animale et humaine, et étiquetage des produits renseignant que l'animal a été nourris avec des insectes) ainsi que des garanties notamment sanitaires.** Bazoche et Poret (2016) - dans une étude menée sur 327 consommateurs français - ont également conclu à la nécessité d'informer le consommateur sur l'impact environnemental lié aux méthodes d'alimentation des poissons d'élevage, ce critère étant susceptible d'influencer positivement leur propension à acheter des filets de truites nourries avec de la farine d'insectes.

Ces premières études suggèrent que l'acceptation sociale ne sera pas un obstacle au développement de l'industrie des protéines d'insectes pour l'alimentation animale. Cependant, il sera aussi intéressant, à l'instar de Bazoche et Poret (2016), de comprendre si l'utilisation d'une source alimentaire plus durable pourrait inciter les consommateurs à payer plus chers des produits animaux nourris avec des insectes. Il faudra également identifier les risques et les avantages associés à l'introduction de ce nouvel aliment.

#### 2.5. Impact environnemental de la production d'insectes

L'élevage d'insectes contribue à apporter des réponses au défi environnemental lié à l'alimentation animale, en produisant des insectes avec des coproduits des industries agroalimentaires (son, céréales de distillerie, fruits et légumes invendus, biscuits...) et avec des ressources qui ne sont actuellement pas utilisées ou plus destinées à la

consommation humaine et/ou animale. Ces produits ont une faible empreinte environnementale car ils ne nécessitent pas de nouveaux procédés pour leur production. Généralement, le substrat utilisé dans les fermes d'insectes est un mélange de différents ingrédients, fournissant un régime alimentaire équilibré pour les différentes étapes de la vie des larves. De plus, les insectes sont extrêmement efficaces pour convertir la matière organique en protéines animales et énergie. En **transformant des ingrédients à faible teneur en protéines et à faible impact environnemental en produits de haute valeur protéique**, les insectes destinés à l'alimentation humaine et animale pourraient être une piste d'intérêt pour valoriser les MP inexploitées ou sous-exploitées.

Selon l'IPIFF (International Platform of Insects for Food and Feed), les producteurs européens d'insectes contribuent déjà au développement d'une économie circulaire en sélectionnant des substrats auprès de partenaires locaux ou en s'implantant à proximité de gisements de coproduits. Perednia et al (2017) ont cherché à quantifier expérimentalement l'impact potentiel de l'élevage de mouches soldats noirs sur les émissions de gaz à effet de serre, lorsque ces insectes sont utilisés pour « digérer » les déchets organiques, et à comparer ces rejets de gaz à ceux engendrés par le processus simple de compostage. Le postulat de base étant que 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 CO<sub>2</sub>. Les résultats semblent indiquer que le compostage libérerait 48,62% du carbone présent dans la matière organique apportée, tandis que l'élevage d'insectes libérerait seulement 28,54% de ce carbone sous forme de gaz : le recyclage des matières organiques par la voie du compostage produirait donc 70% de gaz à effet de serre de plus que le recyclage effectué par des insectes pour une quantité de matière organique donnée. De plus, la vitesse de dégradation de ces déchets par les insectes serait 6 à 7 fois plus rapide qu'avec le compostage. Les conclusions de l'étude suggèrent alors que le recyclage par les insectes devrait être la méthode de choix pour recycler de manière responsable les déchets alimentaires et autres matières organiques.

Toutefois, il est également **important de regarder les impacts environnementaux d'un tel système de production dans sa globalité, de la production des ressources qui vont servir de substrats aux insectes jusqu'à la production de larves vivantes ou encore jusqu'à la transformation en huile, concentrés protéiques ou engrais.**

Actuellement, trop peu de littérature fait état des performances environnementales des systèmes de production d'insectes, et pour cause, les modèles d'élevage sont loin d'être standardisés et stabilisés. Une étude examine les performances environnementales des larves de TM par une démarche d'analyse du cycle de vie (ACV), appliquée de l'extraction des ressources à la production de larves vivantes (Oonincx and de Boer, 2012) ; plusieurs études ont utilisé les données qui en sont issues (van Huis, 2013 ; Halloran et al., 2016 ; Smetana et al., 2016). D'autres études portent spécifiquement sur l'impact de la production de vers de farines sur le critère « ressource en eau » (Miglietta et al., 2015) ou sur les émissions de gaz des insectes (Oonincx et al., 2010). De la même manière, peu d'études ACV ont été réalisés sur la production de larves de BSF (van Zanten et al., 2015 ; Halloran et al., 2016 ; Smetana et al., 2016 ; Salomone et al., 2017).

En comparaison avec d'autres productions (volailles, porcs...), il apparaît de manière générale que les insectes sont plus efficaces que les autres animaux d'élevage car ils ont le sang-froid, et de nombreuses espèces peuvent se développer rapidement. En particulier, la BSF qui arrête de s'alimenter avant de devenir adulte, et qui est donc très efficace pour stocker les nutriments. C'est la raison pour laquelle la BSF est souvent privilégiée dans les fermes d'insectes. Certaines études ont montré que les insectes sont considérés comme une source de protéines ayant un impact environnemental moindre que les productions de viande, notamment en termes d'émission de gaz à effet de serre (GES) (Oonincx et al., 2010 ; Oonincx and de Boer, 2012 ; Smetana et al., 2016) et d'utilisation des terres (Oonincx and de Boer, 2012). Cependant, quelques recherches ont également montré que dans certains cas, leur impact environnemental pourrait être similaire aux viandes de poulet et de porc, en termes d'émission d'azote (van Huis and Oonincx, 2017) et d'utilisation des terres (Smetana et al., 2016) voire moins bon lorsque l'on considère la consommation d'énergie (Salomone et al., 2017).

**Qu'en est-il de la durabilité des farines d'insectes par rapport à d'autres sources de protéines telles que la farine de poisson et les protéines végétales ?** La production de farine de poisson est nettement différente de la production de protéines terrestres car sa production ne nécessite pas d'intrants supplémentaires, de terre ou d'eau. Cependant, la farine de poisson est connue pour ses dommages sur la biodiversité et les écosystèmes. Cela rend difficile la comparaison avec les protéines terrestres. Dans l'ensemble, **les études ACV indiquent que les protéines d'insectes présentent des impacts plus importants que la farine de poisson et le soja sur la plupart des types d'impact (consommation d'énergie, émissions de GES, acidification, eutrophisation, etc.)**

(van Zanten et al., 2015 ; Thevenot et al., 2018 ; Smetana et al., 2019). **À moyen et long terme (2 à 5 ans), les protéines d'insectes pourraient être compétitives sur le plan environnemental pour la plupart des types d'impact, mais le passage à une alimentation durable et à une production ou à une utilisation plus efficace des énergies renouvelables est nécessaire** (Smetana et al., 2019). Il faut noter toutefois que la plupart des analyses d'impacts environnementaux sont réalisées pour des entreprises pilotes ou à petite échelle de production (0,02 à 1 tonne de biomasse d'insectes transformée (poids sec) par jour) (Salomone et al., 2017 ; Thevenot et al., 2018). Même si ces évaluations sont importantes pour déterminer les enjeux environnementaux de la production d'insectes, elles ne sont pas représentatives de l'ampleur du potentiel industriel et, par conséquent, ne peuvent être référées comme pertinentes pour la modélisation de futurs scénarios ou pour une comparaison fiable avec les sources de protéines traditionnelles (Smetana et al., 2019).

De manière générale, ces études ont montré que **le niveau d'impact dépend fortement du substrat (régime alimentaire des insectes), du système de production (notamment consommation d'énergie pour la croissance des insectes) et des espèces d'insectes** (Oonincx and de Boer, 2012 ; van Zanten et al., 2015 ; Smetana et al., 2016 ; Salomone et al., 2017). Pour la farine de BSF par exemple, 55% de tous les impacts environnementaux étaient associés à la production d'électricité utilisée tout au long de la chaîne de production et 38% des impacts ont été attribués à la production des substrats (Smetana et al., 2019).

**Deux approches pourraient permettre d'améliorer la durabilité environnementale des élevages d'insectes :**  
 (1) utiliser des substrats plus durables pour les insectes et  
 (2) intégrer des énergies renouvelables dans le processus de production.

En effet, Smetana et al (2016) ont montré que les régimes alimentaires pour insectes qui sont les plus riches en protéines (farines de soja ou de seigle) entraînent des rendements élevés en biomasse d'insectes mais aussi des impacts environnementaux élevés. L'utilisation de fumier quant à elle est bénéfique pour l'environnement mais n'aboutit pas à un rendement élevé de la biomasse des insectes (sans compter l'interdiction réglementaire de cette ressource pour l'alimentation de insectes). La performance environnementale des ingrédients à base d'insectes pourrait être positive à condition de choisir un régime alimentaire « *low cost* » et peu valorisable par d'autres moyens : les scénarios d'utilisation de sous-produits de transformations alimentaire de faible valeur (drêches de distillerie avec solubles) et les flux de déchets à fort impact (fumiers et lisiers...) ont été confirmés parmi les meilleurs régimes d'insectes pour une production alimentaire et animale plus durable.

## 2.6. Risques sanitaires

### 2.6.1. Risques liés à la bioaccumulation de composés toxiques dans les insectes

L'UE a fixé des normes en termes de limites maximales pour les substances indésirables dans les matières premières utilisées pour formuler des aliments destinés aux animaux d'élevage. **Ces normes définies dans la directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 7 mai 2002 couvrent plusieurs composés comme les métaux lourds, l'arsenic, les mycotoxines et les polluants organiques persistants (POPs) (par ex. dioxines et biphényles polychlorés)**. Les ingrédients alimentaires produits à partir d'insectes peuvent contenir des substances indésirables ; celles-ci peuvent être naturellement présentes dans les insectes ou peuvent être accumulées pendant les processus d'élevage. Cependant, les connaissances sur les dangers potentiels associés aux insectes d'élevage sont rares comme le souligne l'avis de l'EFSA publié le 8 octobre 2015 dans un rapport concernant l'utilisation d'insectes en tant qu'alimentation humaine ou animale.

Les larves de mouche soldat noire sont réputées bio accumulatrices de cadmium (Purschke et al, 2017) tandis que la larve de ténébrion tend plutôt à accumuler de l'arsenic (Van der Fels-Klerx, 2016). Biancarosa et al (2019) ont noté un taux élevé d'arsenic dans une farine de mouche soldat noire nourrie avec un substrat enrichi avec des algues marines (connues pour bioaccumuler ce composé), dépassant la limite réglementaire des 2mg/kg d'arsenic pour les matières premières utilisées en alimentation des animaux d'élevage. **Dans cette même étude, les taux de cadmium et de mercure dans la farine de mouche soldat noire ne dépassaient pas les limites autorisées.**

Une étude portant sur l'intégration d'un fort taux de farine d'asticots (> 35%) obtenue à partir de larves nourries de fientes de volailles a montré des niveaux accrus de glutathion s-transférase hépatique (TSG) dans le filet de tilapia du Nil, une enzyme détoxifiante suggérant la présence de résidus toxiques dans les fientes des volatiles (Ogunji et al., 2007). Biancarosa et al (2019) dans une étude portant sur des larves de mouche soldat noire nourries avec un mélange de blé et d'algues (qui respectait les normes 2002/32/CE) ont montré que **les taux de polluants organiques persistants (dioxines, PCDD/F, DL-PCBs, NDL-PCBs and PBDEs) étaient tous en dessous des normes européennes.**

Biancarosa et al (2019) **ont détecté les mycotoxines suivantes : Desoxynivalénol, Fumonisine B1, Fumonisine B2, Zéaralénone, Beauvericine et Enniatine B** dans des aliments piscicoles formulés à partir d'insectes (nourris avec un mélange de blé et d'algues), à des **taux inférieurs aux recommandations**

européennes, et sans différence significative avec les taux pouvant être détecté dans les aliments conventionnels. Le remplacement des farines de poissons par des farines d'insectes n'impacte donc pas ce risque sanitaire, le risque provenant généralement plutôt des matières premières végétales intégrées dans la formulation alimentaire. Par ailleurs, les insectes seraient capables de facilement métaboliser et excréter les mycotoxines venant des substrats contaminés (Biancarosa et al, 2019), évitant ainsi tout risque de bioaccumulation dans leurs tissus. **Les données de la littérature sur la contamination des insectes par les mycotoxines et les voies métaboliques associées étant encore très limitées, des recherches supplémentaires sur cet aspect seraient nécessaires** (Schrögel et Wätjen, 2019).

D'après Schrögel et Wätjen (2019), il est à retenir que **les espèces d'insectes destinées à être utilisées pour l'alimentation humaine ou animale ne présentent pas en elles même un risque sanitaire imminent pour les animaux ou les humains** : le principal risque a été identifié comme provenant du **substrat d'élevage utilisé** dans l'élevage d'insectes. Les substrats contaminés par des mycotoxines ou des métaux lourds pourraient (1) avoir des effets néfastes sur la capacité de survie et la croissance des insectes (2) mais également avoir un impact négatif sur la chaîne alimentaire qui en découle (animal, humain). Ces différents éléments soulignent **l'importance de connaître les dangers potentiels afin de garantir la sécurité sanitaire des aliments dans une approche au cas par cas**. En ce qui concerne le substrat d'élevage des insectes, une surveillance régulière des contaminants est un élément essentiel de la sécurité sanitaire des aliments.

### 2.6.2. Risques liés aux contaminants microbiens

Il a été noté que **les larves de mouches soldats noires pouvaient réduire la charge microbienne des substrats** (Erickson et al., 2004, Liu et al., 2008), les composts traités présentant des concentrations plus faibles de bactériophages et de bactéries telles que *Salmonella enteritidis* et *Enterococcus coli* (Wang, 2017). De nombreux insectes (lépidoptères, diptères, hyménoptères, coléoptères, trichoptères, hémiptères, odonates) montrent également une activité antifongique et/ou antibactérienne (Ravi et al., 2011) qui peut **augmenter la durée de conservation des aliments contenant des insectes** (Zhao et al., 2010).

Cependant, **les larves peuvent être contaminées par des bactéries pathogènes si elles restent trop longtemps sur un substrat contaminé** (Wang, 2017). Par mesure de précaution, la **décontamination des larves d'insectes doit donc être incorporée** dans tout plan d'installation de production industrielle, en particulier si elles sont élevées dans du fumier ou des déchets solides

de mammifères (ce qui est de toute manière interdit actuellement en Europe). **Le traitement des insectes (UV, micro-ondes, pasteurisation, acidification, antimicrobien, séchage à chaud...)** réduirait les risques de contamination microbienne par rapport aux insectes entiers non traités (Wang, 2017).

## 3. Conclusion et perspectives

L'élevage industriel d'insectes existe dans le monde entier, en particulier pour la production de soie, d'appâts et d'aliments pour animaux de compagnie (poissons, oiseaux et reptiles) ainsi que pour le contrôle biologique en maraichage (Schabel, FAO, 2013). De petites unités de production de mouches soldats noires, de ténébrions, de criquets et de sauterelles sont actives ou en cours de création en Europe et dans le reste du monde (Kroeckel et al., 2012, Rumpold et Schluter, 2013) pour des applications d'alimentation, humaine ou animale. Le prix des farines de poissons augmente régulièrement (FAO, 2018), rendant envisageable à moyen terme que les farines d'insectes produites à grande échelle puissent devenir compétitives pour l'aquaculture (Drew et al., 2014). Du côté de la filière avicole, il semble plus illusoire de réussir à rendre un jour les farines d'insectes plus compétitives que les farines de soja, toutefois les farines d'insectes revêtent un intérêt potentiel pour des questions « santé » et « bien-être » qu'il est intéressant d'explorer.

Il apparaît que les produits à base d'insectes (larves, farines, et huiles) offrent une bonne opportunité de remplacer en grande partie les farines de poissons et de soja. Les farines d'insectes sont considérées comme l'une des sources les plus prometteuses de protéines alternatives pour l'avenir durable des aliments pour animaux. Des découvertes récentes ont montré comment les insectes pouvaient également être des sources de composés précieux capables d'exercer des effets positifs sur le système immunitaire animal, favorisant la santé et réduisant l'usage d'antibiotiques dans la production animale. Néanmoins, il existe encore de nombreux challenges pour une utilisation des insectes à plus large échelle dans l'alimentation animale :

1. La filière aura besoin de se développer considérablement pour obtenir des **volumes de production plus importants** et des prix **plus compétitifs** (volumes de production de farine de poisson et tourteau de soja des centaines voire des milliers de fois plus grands)<sup>1</sup>. Cela devra passer par une optimisation des coûts de production des insectes grâce aux économies d'échelle qu'entraînera le passage à des échelles industrielles (notamment avec le développement de fermes verticales à plusieurs étages), par l'optimisation de certains enjeux techniques (notamment la dispersion et la valorisation de la chaleur produite par ces élevages « verticaux », très

consommateurs en énergie) mais aussi par le biais d'une diversification de la production et la vente de molécules d'intérêt et de co-produits à haute valeur ajoutée à destination de l'industrie cosmétique, de la chimie verte (avec les biocarburants issus des lipides de farines dégraissées), ou encore les biomatériaux (avec du chitosan ou encore des bioplastiques issus de la chitine).

2. Approfondissement des connaissances liées à **l'acceptabilité des consommateurs** à consommer et acheter des produits issus d'animaux nourris avec des insectes.

3. Répondre aux attentes des consommateurs en matière de produits sûrs et de bonne qualité nutritionnelle et sensorielle. En outre, ils doivent essayer de répondre à des défis sociétaux tels que la **réduction de l'usage des antibiotiques**. Une plus grande attention devra être accordée à l'utilisation d'insectes comme **additifs alimentaires pour moduler et améliorer la santé (santé intestinale notamment) et le bien-être des animaux**, encore peu exploité à ce jour.

4. L'optimisation des performances zootechniques et de la qualité des insectes (nutritionnelle, sensorielle, sanitaire), par la **maîtrise et le contrôle de leurs substrats nourriciers, l'amélioration de la connaissance de leur biologie (habitats, stades de développement, habitudes alimentaires, conditions d'élevage**

**optimales) et optimisation des process de transformation des insectes** en farines (séchage, dégraissage, réduction de la chitine, ensilage...)

5. **Levée des contraintes réglementaires** sur l'utilisation des insectes en alimentation animale (autorisation des protéines d'insectes en porcs et volailles) et l'alimentation des insectes. Aujourd'hui, les insectes ne peuvent pas être nourris avec une ancienne denrée alimentaire contenant de la viande ou du poisson, ou avec des déchets alimentaires (pertes, chutes...) provenant de restaurants ou d'établissements de restauration.

6. Levée des interrogations sur les **bienfaits environnementaux réels de l'élevage d'insectes**. L'industrialisation et l'optimisation de l'alimentation des insectes doit être en mesure d'aboutir à de meilleures performances pour que ce substitut au soja et farines de poissons soit compétitif sur ce critère.

7. Approfondissement des connaissances actuelles sur les **risques liés aux contaminations microbienne ou chimique** des farines d'insectes en fonction du substrat distribué.

8. Nécessité de trouver des alternatives aux huiles de poissons pour la filière piscicole, afin de pouvoir se passer en totalité des ressources marines, les farines d'insectes ne permettant aujourd'hui de répondre qu'à la problématique des « farines de poisson

#### **1'Évaluation des stratégies d'approvisionnement en France réalisée par le Céréopa dans le cadre du projet CASDAR Vocalim (2016-2019) piloté par l'ITAVI :**

Selon le scénario proposé par le Céréopa, la demande totale de farines d'insectes pour le petfood, l'aquaculture et l'aviiculture, en remplacement de la farine de poisson ou de soja (2%, 10% et 2% de remplacement respectivement) pourrait être de 179000 tonnes (36000t, 13000t et 130000t respectivement). La principale hypothèse avancée par le Céréopa dans le cadre du projet Vocalim est qu'à l'horizon 2023, la disponibilité de la farine d'insectes française pour l'alimentation des volailles sera faible, du fait de la concurrence forte des productions où il y a une plus forte valeur ajoutée (aquaculture et petfood). Entre 2023-2028, la production de farines d'insectes est estimée à 25 000t, dont 5000t seulement seront disponibles pour l'alimentation animale, autre que l'aquaculture et le petfood. Concernant le prix d'intérêt de la protéine d'insectes, il a été estimé à 1 200€/t en 2023 pour une production totale de 5 000t, et passerait à 600€/t si la production était multipliée par 10 (50 000t). De ce fait, bien que la farine d'insectes reste une matière première très intéressante pour la volaille, sa valeur protéique coûte plus cher que celle d'un tourteau de soja. Il a également été estimé dans le scénario à 5 000t de farines d'insectes produites que 70% serait consommé par la production de dinde, et que dans le scénario à 50 000t, ce serait la production de poulet de chair la plus consommatrice, à hauteur de 59%. L'entrée des protéines d'insectes dans l'alimentation animales n'exclut pas nécessairement la farine de soja importée et peut nécessiter d'autres produits d'importation, ou réduire l'utilisation de certaines matières premières françaises. Par exemple, pour une production de 5 000t de farine d'insecte, il n'y a aucun impact sur la farine de soja et une petite augmentation de la farine de tournesol HP (10 000t, importée). Avec 50 000t, la farine de tournesol HP passe à 80 000t, la farine de soja baisse de 100 000t et les céréales de près de 4 000t. Il y a donc un faible impact sur l'autosuffisance en protéines : aucun impact réel pour 5 000t, et un petit impact pour 50 000t avec +1,6 point dans Vocalim. En conclusion, l'offre de farines d'insectes françaises pour le secteur de la volaille dans 5 à 10 ans est susceptible d'être trop faible pour avoir un réel impact sur celui-ci, en termes de coûts ou d'amélioration de la souveraineté protéique.

Tableau 4 : Effet de l'utilisation des produits à base d'insectes sur les performances de production des volailles (complété et adapté de Gasco et al. (2019) et Gasco et al. (2020)).

Volaille	Insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation (jours)	Effet sur les performances de croissance par rapport au témoin conventionnel				Références
							Poids-Gain de poids	Consommation	Indice de conversion	Taux de ponte	
Poulet standard	BSF	Farine de larves séchées	Mélange de déchets de cuisine	11%, 37,2% et 55,5% (farines de soja et de poisson)	5%, 10% et 15%	49	inchangé	inchangé	inchangé	/	Onsongo et al. (2018)
Poulet de chair race locale	BSF	Larves décongelées	Fumier de cheval	8%		50	amélioré	inchangé	inchangé	/	Moula et al. (2018b)
Poulet standard	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Sous-produit végétal	pas de substitution particulière	5%, 10% et 15%	35	amélioré durant la période de démarrage (jusqu'à 10% d'inclusion)	amélioré durant la période de démarrage (jusqu'à 10% d'inclusion)	inchangé	/	Dabbou et al. (2018)
Poulet standard (femelles)	BSF, TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	pas de substitution particulière	0,05%-0,2%	35	inchangé	dégradé	dégradé	dégradé	Jozefiak et al. (2018)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	100% (soja)	29,65%	62	inchangé	inchangé	amélioré	/	Bovera et al. (2015) ; Bovera et al. (2016)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	0,5%, 1%, 2% et 10% de l'aliment classique	non indiqué	35	amélioré à taux d'inclusion 1%	amélioré à taux d'inclusion 1%	amélioré à taux d'inclusion 1%	/	Ballitoc and Sun (2013)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	Différents déchets organiques (fruits, légumes, céréales...)	pas de substitution particulière	5% et 10%	15	inchangé	inchangé	inchangé	/	Ramos-Elorduy et al. (2002)
Poulet standard (femelles)	TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	Remplacement partiel de la farine de soja et de gluten de maïs et de l'huile de soja	5%, 10% et 15%	40	amélioré	amélioré	dégradé	/	Biasato et al. (2017)
Poulet standard (femelles)	TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	pas de substitution particulière	0,2% et 0,3%	35	amélioré	dégradé	dégradé	/	Benzertih et al. (2019a)
Poulet standard (mâles)	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	pas de substitution particulière	2%, 4% et 8%	42	amélioré	/	amélioré avec une inclusion à 4% sur la période de démarrage	/	Elahi et al. (2020)
Poulet standard (mâles)	TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	Remplacement partiel de la farine de soja et de gluten de maïs et de l'huile de soja	5%, 10% et 15%	53	amélioré	amélioré	dégradé	/	Biasato et al. (2018b)
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50% et 100% (huile de soja)	3,43% et 6,87%	27 (finition)	inchangé	inchangé	inchangé	/	Schiavone et al. (2018)

Volaille	Insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation (jours)	Effet sur les performances de croissance par rapport au témoin conventionnel				Références
							Poids-Gain de poids	Consommation	Indice de conversion	Taux de ponte	
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50% et 100% (huile de soja)	3,45% et 6,9%	35	inchangé	inchangé	inchangé	/	Schiavone <i>et al.</i> (2017a)
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50% et 100% (huile de soja)		35	inchangé	inchangé	inchangé	/	Kim <i>et al.</i> (2020)
Poulet standard (femelles)	BSF	Huile	Mélange de déchets de légumes	25, 50, 75 et 100% (huile de soja)		35	inchangé	inchangé	inchangé	/	Kieronczyk <i>et al.</i> (2020)
Poulet standard (femelles)	TM	Huile	non indiqué	100% (huile de palme)	5%	30	inchangé	inchangé	inchangé	/	Benzertiha <i>et al.</i> (2019c)
Poulet standard (femelles)	TM	Huile	non indiqué	5% de l'aliment classique		28	inchangé	amélioré	amélioré	/	Kieronczyk <i>et al.</i> (2018)
Poulet label (femelles)	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	100% (farine de gluten de maïs)	7,50%	54	inchangé	inchangé	inchangé	/	Biasato <i>et al.</i> (2016)
Poulet bio	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	50% (soja)	7,80%	75	inchangé	inchangé	inchangé	/	Leiber <i>et al.</i> (2017)
Caille	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	28,4% (huile soja) et 16,1% (farine de soja) ; 100% (huile de soja) et 24,8% (farine de soja)	10% et 15%	28	inchangé	inchangé	inchangé	/	Cullere <i>et al.</i> (2016)
Caille	BSF	Farine de larves séchées	100% lisier de poulet ou 50:50 lisier poulet/abats de poissons	pas de substitution particulière	10%	19	dégradé si insectes élevés sur abats de poisson	inchangé	inchangé	/	Cullere <i>et al.</i> (2019b)
Caille jumbo	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Déchets organiques	Substitution partielle du soja	2,5%, 5%, 7,5% et 10%	42	inchangé	inchangé	inchangé	/	Mbhele <i>et al.</i> (2019)
Caille japonaise (femelles)	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	25%, 50%, 75% et 100% (farine de poisson)		108	/	amélioré (avec 25 et 50% de substitution) ou inchangé (avec 75 et 100% de substitution)	amélioré (avec 25 et 50% de substitution) ou inchangé (avec 75 et 100% de substitution)	inchangé	Widjastuti <i>et al.</i> (2014)
Caille japonaise	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué		10% et 15%	42	inchangé	inchangé	inchangé	/	Dalle Zotte <i>et al.</i> (2019)
Perdrix	BSF, TM	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	25% et 50% (soja)		57	amélioré	inchangé	amélioré	/	Loponte <i>et al.</i> (2017)
Dindes (femelles)	BSF	Huile		50 et 100% (huile de soja)			inchangé	inchangé	inchangé	/	Sypniewski <i>et al.</i> (2020)
Canard (femelles)	BSF	Farine de larves séchées et	non indiqué	33,6%, 66,6% et 100% (farine de gluten)	3%, 6% et 9%	47	amélioré	inchangé	inchangé	/	Gariglio <i>et al.</i> (2019)

Volaille	Insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation (jours)	Effet sur les performances de croissance par rapport au témoin conventionnel				Références
							Poids-Gain de poids	Consommation	Indice de conversion	Taux de ponte	
		partiellement dégraissées									
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	pas de substitution particulière	0,5% et 1%	non indiqué	inchangé	inchangé	inchangé	inchangé	Al-Qazzaz <i>et al.</i> (2016)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	pas de substitution particulière	3,5%, 5%, et 6,5%	112	/	/	/	dégradé	Park <i>et al.</i> (2017)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et partiellement dégraissées	non indiqué	25% et 50% (soja)	7,3% et 14,6%	140	/	inchangé	inchangé	amélioré (avec inclusion 25%)	Bovera <i>et al.</i> (2018)
Poules pondeuses (accès plein air)	BSF	Larves déshydratées	Drêches de brasserie	pas de substitution particulière	ad libitum	42	inchangé	inchangé	inchangé	inchangé	Ruhnke <i>et al.</i> (2018)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et partiellement dégraissées	Sous-produits végétariens de l'industrie des pâtes alimentaires et des plats cuisinés	50% et 100% (soja)	12% et 36%	21	inchangé	inchangé	inchangé	inchangé	Maurer <i>et al.</i> (2015)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	100% (soja)		147	/	amélioré	amélioré	dégradé	Marono <i>et al.</i> (2017)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Aliments recyclés collectés dans les fermes, les transformateurs et les épicerie locaux	pas de substitution particulière	5% et 7,5%	56	/	dégradé	dégradé	dégradé (à 5% d'inclusion)	Mwaniki <i>et al.</i> (2018)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Aliments recyclés collectés dans les fermes, les transformateurs et les épicerie locaux	Substitution partielle ou totale (soja)	10% et 15%	105	amélioré	inchangé	amélioré	inchangé	Mwaniki <i>et al.</i> (2020)
Poules pondeuses	BSF	Larves vivantes	non indiqué	100% (soja)	10%	84	inchangé	amélioré	/	/	Star <i>et al.</i> (2020)

BSF: *Hermetia illucens* (mouche Soldat noire)

TM: *Tenebrio molito* (ténébrion)

Tableau 5 : Effet de l'utilisation des produits à base d'insectes sur les performances de production de différentes espèces de poissons

Espèce de poisson	Insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier des insectes	% de substitution (TS) des farines de poisson par des farines d'insectes	% d'inclusion (TI) des farines d'insecte dans la ration	Période d'alimentation (jours)	Poids initial - Poids final pour le lot témoin (g)	Quantité d'huiles de poisson apportées dans la ration (g/kg MS)	Effet sur les performances de croissance par rapport au témoin conventionnel				Références
									Gain de poids	Indice de conversion	Digestibilité des protéines	Taux de survie	
Truite arc en ciel	BSF	Farines de prépuces séchées à l'étuve	Lisier de porc	25%	15%	63	342 - 2396	83	inchangé	inchangé			St-Hilaire et al., 2007
				50%	30%			36	dégradé	dégradé			
Truite arc en ciel	BSF	Farines de prépuces, congelées et broyées, non dégraissées	Fumier de bovins	25%	16%	56	146 - 250	32,0	dégradé	inchangé			Sealey et al., 2011
				50%	32%			26,0	dégradé	inchangé			
Truite arc en ciel	BSF	Farines de prépuces, congelées et broyées, non dégraissées	50% fumier de bovins + 50% abats de poissons	25%	18%	56	146 - 250	32,0	inchangé	inchangé			
				50%	36%			38,0	inchangé	inchangé			
Truite arc en ciel	TM	Farines de larves séchées à l'étuve	?	25%	19%	75	116 - 313	?	inchangé				Gasco et al., 2014
				50%	38%			?	inchangé				
Truite arc en ciel	TM	Farines de larves séchées à l'étuve, non dégraissées	Son de blé	33%	25%	84	116 - 313	39,0	inchangé	amélioré	inchangée	amélioré	Belforti et al, 2015
				66%	50%			0	inchangé	amélioré	dégradée	amélioré	
Truite arc en ciel	BSF	Farines séchées dégraissées à 28%	?	46%	28%	49	67 - 125	?	inchangé	inchangé	inchangée	dégradé	Stadtlander et al, 2017
Truite arc en ciel	BSF	Farines de larves séchées, partiellement dégraissées	Déchets végétaux	25%	20%	78	179 - 539	70,0	inchangé	inchangé	inchangée	inchangé	Renna et al., 2017
				50%	40%			50,0	inchangé	inchangé	dégradée	inchangé	
Truite arc en ciel	BSF	Farines de larves séchées et dégraissées	Origine végétale	52%	8%	98	172 - 463	?	inchangé	amélioré		inchangé	ITAVI (2019) - Rapport final d'expérimentation site 1 -Programme POP-IN
Truite arc en ciel	BSF	?	?	45%	13%	78	126 - 332	?	inchangé	inchangé		inchangé	
	TM	?	?					10%	?	inchangé	inchangé		
Truite arc en ciel	BSF	?	?	50%	8%	124	1462 - 2719	?	inchangé	inchangé		inchangé	
Truite arc en ciel	TM	Farines de larves séchées, partiellement dégraissées	Déchets végétaux	25%	5%	154	78 - 390	42,6	amélioré	inchangé	inchangée	inchangé	Chemello et al, 2020
				50%	10%			42,0	amélioré	inchangé	dégradée	inchangé	
				100%	20%			41,0	amélioré	inchangé	dégradée	amélioré	

Espèce de poisson	Insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier des insectes	% de substitution (TS) des farines de poisson par des farines d'insectes	% d'inclusion (TI) des farines d'insecte dans la ration	Période d'alimentation (jours)	Poids initial - Poids final pour le lot témoin (g)	Quantité d'huiles de poisson apportées dans la ration (g/kg MS)	Effet sur les performances de croissance par rapport au témoin conventionnel				Références
									Gain de poids	Indice de conversion	Digestibilité des protéines	Taux de survie	
Saumon atlantique	BSF	Farines de larves, séchées à faible température faiblement dégraissées	Déchet alimentaires	25%	5%	105	251 - 563	111,2	inchangé	inchangé	inchangée	Lock et al., 2016	
				50%	10%			111,4	inchangé	inchangé	inchangée		
				100%	25%			93,3	inchangé	inchangé	inchangée		
Saumon atlantique	BSF	Farines de larves, séchées à l'étuve à 55°C, hautement dégraissées	Déchet alimentaires	25%	5%	114	1398 - 3702	110,8	dégradé	amélioré	inchangée	Belghit et al., 2019	
				100%	25%			105,5	dégradé	dégradé	inchangée		
Saumon atlantique	BSF	Farines de larves séchées, partiellement dégraissées	Algues ( <i>Ascophyllum nodosum</i> ) et déchets végétaux	33%	5%	70	5 - 22	117,0	inchangé	inchangé	inchangée	Gasco et al, 2016	
				66%	10%			132,3	inchangé	inchangé	inchangée		
				100%	15%			147,6	inchangé	inchangé	inchangée		
Bar européen	TM	Farines de larves séchées à l'étuve, non dégraissées	Son de blé	33%	25%	62	50 - 130	54,0	dégradé	amélioré	améliorée	inchangé	Magalhaes et al, 2017
				66%	50%			20,0	inchangé	dégradé	améliorée	inchangé	
Bar européen	BSF	Farines de larves séchées à l'étuve 55°C 24H + apport de phosphore en supplément	?	15%	7%	163	105 - 239	132,0	inchangé	inchangé	inchangée	Piccolo et al., 2017	
				30%	13%			135,0	inchangé	inchangé	inchangée		
				45%	20%			137,0	inchangé	inchangé	inchangée		
Daurade royale	TM	Farines de larves séchées à l'étuve, non dégraissées	Son de blé	33%	25%	56	55 - 139	95,0	amélioré	amélioré	inchangée	Kroeckel et al., 2012	
				74%	50%			60,0	inchangé	inchangé	dégradée		
Turbot	BSF	Farines de larves congelées, séchées à l'étuve et dégraissées	Déchets végétaux	20%	17%	105	105 - 239	?	dégradé	inchangé		Kroeckel et al., 2012	
				40%	33%			?	dégradé	inchangé	dégradée		
				55%	49%			?	dégradé	inchangé			
				74%	64%			?	dégradé	dégradé			
				88%	76%			?	dégradé	dégradé			

BSF: *Hermetia illucens* (mouche Soldat noire)

TM: *Tenebrio molito* (ténébrion)

Tableau 6 : Effet de l'utilisation des produits à base d'insectes sur la qualité des produits de volailles (viande, œuf).

Volaille	Insectes	Forme apport d'insecte	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation	Effet sur la qualité des produits (viande, œuf) par rapport au témoin conventionnel				Références
							qualité carcasse/œuf	qualité technologique	qualité nutritionnelle	qualité sensorielle	
Poulet standard	BSF	Farine de larves séchées	Mélange de déchets de cuisine	11%, 37,2%, 55,5% (farines de soja et de poisson)	5%, 10%, 15%	49	inchangé	/	/	inchangé	Onsongo <i>et al.</i> (2018)
Poulet standard	BSF	Farine de pré-pupes	Déchets organiques de cuisine, fruits et légumes		5%, 10%, 15%	32	inchangé	inchangé	/	inchangé	Pieterse <i>et al.</i> (2019)
Poulet de chair race locale	BSF	Larves décongelées	Fumier de cheval	8%		50	inchangé		inchangé	/	Moula <i>et al.</i> (2018b)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	100% (soja)		32	/	/	augmentation de C12:0 et C14:0 dans le gras abdominal	/	Loponte <i>et al.</i> (2019)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	0,5%, 1%, 2%, 10% de l'aliment classique	non indiqué	35	augmentation du rendement à l'abattage (inclusion à 2%)	/	augmentation la teneur en lipides des filets	/	Ballitoc and Sun (2013)
Poulet standard (mâles)	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Sous-produits végétaux (céréales)		5%, 10%, 15%	35	meilleur poids de carcasse	diminution b*	teneur en protéines, en AG monoinsaturés et C12:0, C14:0 et C:16 plus élevées, teneur plus faible en AG polyinsaturés	/	Schiavone <i>et al.</i> (2019)
Poulet standard (mâles)	TM	Farine de larves séchées	non indiqué		2%, 4%, 8%	42	pas d'effet sur le poids carcasse et le rendement en filet, augmentation du gras abdominal	inchangé	/	/	Elahi <i>et al.</i> (2020)
Poulet standard (mâles)	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	50% (soja)	11,9% et 14,5%	34	/	inchangé	/	filet avec saveur plus intense	Altmann <i>et al.</i> (2018)
Poulet standard (femelles)	TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	remplacement partiel de la farine de soja, de la farine de gluten de maïs et de l'huile de soja	5%, 10%, 15%	40	augmentation du poids de carcasse, du poids et du rendement en gras abdominal	/	/	/	Biasato <i>et al.</i> (2017)

Volaille	Insectes	Forme apport d'insecte	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation	Effet sur la qualité des produits (viande, œuf) par rapport au témoin conventionnel				Références
							qualité carcasse/œuf	qualité technologique	qualité nutritionnelle	qualité sensorielle	
Poulet standard (mâles)	TM	Farine de larves séchées, non dégraissées	non indiqué	remplacement partiel de la farine de soja, de la farine de gluten de maïs et de l'huile de soja	5%, 10%, 15%	53	augmentation du poids de carcasse, du poids et du rendement en gras abdominal	/	/	/	Biasato <i>et al.</i> (2018b)
Poulet standard	TM	Farine de larves séchées	non indiqué	100% (soja)	29,65%	62	inchangé	inchangé	/	/	Bovera <i>et al.</i> (2015) ; Bovera <i>et al.</i> (2016)
Poulet standard (femelles)	TM	Huile	non indiqué	5% de l'aliment classique		28	/	/	augmentation de la teneur en AG insaturés, monoinsaturés, et rapport n-6/n-3	/	Kieronczyk <i>et al.</i> (2018)
Poulet standard (femelles)	TM	Huile	non indiqué	100% (huile de palme)	5%	30	/	/	diminution de la teneur en AG monoinsaturés, augmentation des AG polyinsaturés, n-6 et n-3	/	Benzertiha <i>et al.</i> (2019c)
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50%, 100% (huile soja)	3,45% et 6,9%	35	inchangé	inchangé	augmentation de la teneur en AG saturés au détriment des polyinsaturés dans les filets	/	Schiavone <i>et al.</i> (2017a)
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50%, 100% (huile soja)		35	/	/	augmentation de la teneur en AG saturés, monoinsaturés et diminution des AG polyinsaturés	inchangé	Kim <i>et al.</i> (2020)
Poulet standard (mâles)	BSF	Huile	non indiqué	50%, 100% (huile soja)		28	/	inchangé	augmentation des AG saturés au détriment des AG polyinsaturés, augmentation du ratio n-6/n-3. Augmentation des AG monoinsaturés dans les filets mais pas dans les cuisses	inchangé	(Cullere <i>et al.</i> , 2019a)
Poulet bio	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	50% (soja)	7,80%	75	inchangé	augmentation des pertes à la cuisson	/	/	Leiber <i>et al.</i> (2017)
Caille	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	28,4% (huile soja) et 16,1% (farine de soja) ; 100% (huile de soja) et 24,8% (farine de soja)	10% et 15%	28	inchangé	diminution du pH, augmentation des pertes à la cuisson,	augmentation de la teneur en AG saturés et diminution de la teneur en polyinsaturés dans les filets	inchangé	Cullere <i>et al.</i> (2016) ; Cullere <i>et al.</i> (2018)

Volaille	Insectes	Forme apport d'insecte	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation	Effet sur la qualité des produits (viande, œuf) par rapport au témoin conventionnel				Références
							qualité carcasse/œuf	qualité technologique	qualité nutritionnelle	qualité sensorielle	
Caille	BSF	Farine de larves séchées	100% lisier de poulet ou 50% lisier de poulet and 50% abats de poisson		10%	19	/	inchangé	augmentation des AG saturés et monoinsaturés, diminution des AG polyinsaturés. Différence sur la teneur en n-6 et n-3 entre les différents substrats, ratio n-6/n-3 plus faible avec substrat 50:50 que dans le régime témoin et le substrat 100%,	jutosité qui est diminuée avec BSF nourrie avec substrat 50:50	Cullere <i>et al.</i> (2019b)
Caille jumbo	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Déchets organiques	substitution partielle du soja	2,5%, 5%, 7,5% et 10%	42	/	inchangé	/	/	Mbhele <i>et al.</i> (2019)
Caille japonaise (femelles)	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	25%, 50%, 75%, 100% (farine de poisson)		108	diminution du poids d'œuf	/	/	/	Widjastuti <i>et al.</i> (2014)
Caille japonaise	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué		10% et 15%	42	augmentation du poids de la coquille, de la couleur du jaune	/	Diminution de la teneur en protéines du jaune et augmentation des cendres. Pas d'effet sur la teneur en cholestérol. Augmentation de la teneur en AG saturés et diminution des AG polyinsaturés.	inchangé	Dalle Zotte <i>et al.</i> (2019)
Perdrix	BSF, TM	Farine de larves séchées	non indiqué	25%, 50% (soja)		64	/	augmentation de b* de la viande cuite	Augmentation de la teneur en AG saturés et monoinsaturés, et diminution en AG polyinsaturés	/	Secci <i>et al.</i> (2018)
Perdrix	BSF, TM	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	25%, 50% (soja)		57	augmentation du poids carcasse	/	/	/	Loponte <i>et al.</i> (2017)
Dindes (femelles)	BSF	Huile		50, 100% (huile de soja)			/	inchangé	/	/	Sypniewski <i>et al.</i> (2020)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	pas de substitution particulière	0,5% et 1%	non indiqué	/	/	/	amélioration de l'apparence, de la texture, du goût et de l'odeur des œufs	Al-Qazzaz <i>et al.</i> (2016)

Volaille	Insectes	Forme apport d'insecte	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation	Effet sur la qualité des produits (viande, œuf) par rapport au témoin conventionnel				Références
							qualité carcasse/œuf	qualité technologique	qualité nutritionnelle	qualité sensorielle	
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	non indiqué	100% (soja)	17%	147	plus grande proportion de jaune, jaune plus foncé	/	jaune riche en $\gamma$ -tocophérol, lutéine, $\beta$ -carotène et caroténoïdes totaux	/	Secci <i>et al.</i> (2019)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et partiellement dégraissées	non indiqué	25%, 50% (protéines végétales)		95	augmentation du poids et de la masse d'œuf, du poids du jaune et de l'épaisseur de la coquille	/	/	/	Secci <i>et al.</i> (2020)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées	non indiqué	pas de substitution particulière	3,5%, 5% et 6,5%	112	augmentation du poids d'œuf, de l'unité Haugh et de l'épaisseur de la coquille	/	/	/	Park <i>et al.</i> (2017)
Poules pondeuses (accès plein air)	BSF	Larves déshydratées	Drêches de brasserie	pas de substitution particulière	ad libitum	42	diminution du poids d'œuf, poids et épaisseur de coquille et de la couleur du jaune	/	/	/	Ruhnke <i>et al.</i> (2018)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et partiellement dégraissées	Sous-produits végétariens de l'industrie des pâtes alimentaires et des plats cuisinés	50%, 100% (soja)	12% et 36%	21	inchangé	/	/	/	Maurer <i>et al.</i> (2015)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Aliments recyclés de pré-consommation, collectés dans les fermes, les transformateurs et les épiceries locaux		5% et 7,5%	56	augmentation de la couleur du jaune, de la résistance et de l'épaisseur de la coquille	/	/	/	(Mwaniki <i>et al.</i> , 2018)
Poules pondeuses	BSF	Farine de larves séchées et dégraissées	Aliments recyclés de pré-consommation, collectés dans les fermes, les transformateurs et les épiceries locaux	substitution partielle ou totale (soja)	10% et 15%	105	pas d'effet sur l'unité Haugh, diminution de la masse d'œuf, augmentation de la couleur du jaune, de la force à la fracture et de l'épaisseur de la coquille.	/	/	/	Mwaniki <i>et al.</i> (2020)

Volaille	Insectes	Forme apport d'insecte	Substrat nourricier	% de substitution	% inclusion insecte	Période d'alimentation	Effet sur la qualité des produits (viande, œuf) par rapport au témoin conventionnel				Références
							qualité carcasse/œuf	qualité technologique	qualité nutritionnelle	qualité sensorielle	
Poules pondeuses	BSF	Larves vivantes	non indiqué	100% (soja)	10%	84	inchangé	/	/	/	Star <i>et al.</i> (2020)

BSF: *Hermetia illucens* (mouche Soldat noire)

TM: *Tenebrio molito* (ténébrion)

Tableau 7: Effet de l'utilisation des produits à base d'insectes sur la qualité des poissons

Espèce de poisson	Espèce d'insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier	% de substitution (TS) des farines de poisson par des farines d'insectes	% d'inclusion (TI) des farines d'insecte dans la ration	Période d'alimentation (jours)	Quantité d'huiles de poisson apportées dans la ration (g/kg MS)	Effet sur la qualité des produits (filets) par rapport au témoin conventionnel			Références
								qualité nutritionnelle	qualité technologique	qualité sensorielle	
Saumon atlantique	BSF	Farines de larves séchées, partiellement dégraissées	Algues ( <i>Ascophyllum nodosum</i> ) et déchets végétaux	33%	5%	114	117	Pas d'effet sur le taux d'AGPI (filets cru) [avec suppléments dans la ration]; Pas d'effet sur la composition proxmale		Pas de différence d'odeur, de goût, de texture, de couleur (filet cuit)	Belghit et al., 2019
				66%	10%		132				
				100%	15%		148				
Saumon atlantique	BSF	Farines de larves, séchées à l'étuve à 55°C, hautement dégraissées	Déchets alimentaires	25%	5%	105	111			Pas de différence d'odeur, de goût, de texture (filet cuit)	Lock et al., 2016
				100%	25%		106				
Truite arc en ciel	BSF	Farines de larves séchées, partiellement dégraissées	Déchets végétaux	25%	20%	78	70	Pour TS-50%, baisse de taux d'AGPI (filet cru), hausse du taux d'acides gras saturés	Pas d'effets sur le pH, fermeté de la chair, capacité de rétention en eau (filet congelé ou cuit)	Effet significatif sur la perception de l'intensité de l'arôme, du goût et de la texture. Présence d'un goût métallique pour les régimes "insectes (filet cuit)"	Renna et al., 2017; Mancini et al., 2018; Borgogno et al., 2017; Secci et al., 2019
				50%	40%		50				
Truite arc en ciel	BSF	Farines de larves, partiellement dégraissées	?	46%	28,10%	49	?	Augmentation du taux d'acides gras saturés, baisse du taux d'AGPI		Pas de différence organoleptique, à part une coloration plus sombre des filets (filet cuit)	Stadtlander et al., 2017
Truite arc en ciel	BSF	Farines de pré-pupes, congelées et broyées, non dégraissées	Fumier de bovins	25%	16%	56	32			Pas de différence d'odeur, de goût, de texture (filet cuit)	Sealey et al., 2011
				50%	32%		26				
Truite arc en ciel	BSF	Farines de pré-pupes, congelées et broyées, non dégraissées	50% fumier de bovins + 50% abats de poissons	25%	18%	56	32	Augmentation du taux d'AGPI (filets cru)			
				50%	36%		38				
Truite arc en ciel	TM	Farines de larves séchées à l'étuve, non dégraissées	Son de blé	33%	25%	90	39	Augmentation du taux de protéines mais diminution de 73% du taux d'AGPI par rapport au témoin (filet cru)	Pas d'impact sur le pH, rétention en eau, pertes à la cuisson, fermeté de la chair (filet cru ou cuit)	Pas d'impact sur la coloration (filet cru ou cuit)	Belforti et al., 2015; Iaconisi et al., 2018
				66%	50%		0				

Espèce de poisson	Espèce d'insectes	Forme d'apport des insectes	Substrat nourricier	% de substitution (TS) des farines de poisson par des farines d'insectes	% d'inclusion (TI) des farines d'insecte dans la ration	Période d'alimentation (jours)	Quantité d'huiles de poisson apportées dans la ration (g/kg MS)	Effet sur la qualité des produits (filets) par rapport au témoin conventionnel			Références
								qualité nutritionnelle	qualité technologique	qualité sensorielle	
Daurade royale	TM	Farines de larves séchées à l'étuve, non dégraissées	Son de blé	33%	25%	163	95	Pas d'impact sur la composition proximale	Pas d'impact sur le rendement filet		<i>Piccolo et al., 2017</i>
				74%	50%		60		Impact sur le rendement filet	Coloration jaune du filet	
Truite arc en ciel	TM	Farines de larves séchées à l'étuve	?	25%	19%	75	?	Diminution du taux d'AGPI (filet cru)			<i>Gasco et al., 2014</i>
				50%	38%		?				

BSF: *Hermetia illucens* (mouche Soldat noire)

TM: *Tenebrio molito* (ténébrion)

## Références bibliographiques

- Ajani EK, Nwanna LC, Musa BO (2004). Replacement of fishmeal with maggot meal in the diets of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *World Aquaculture* 35: 52– 54.
- Al-Qazzaz M. F. A., Ismail D., Akit H. and Idris L. H., 2016. Effect of using insect larvae meal as a complete protein source on quality and productivity characteristics of laying hens. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science*, 45(9): 518-523.
- Altmann B. A., Neumann C., Velten S., Liebert F. and Morlein D., 2018. Meat Quality Derived from High Inclusion of a Micro-Alga or Insect Meal as an Alternative Protein Source in Poultry Diets: A Pilot Study. *Foods*, 7(3).
- Aniebo AO, Erundu ES, Owen OJ (2008). Proximate composition of housefly larvae (*Musca domestica*) meal generated from mixture of cattle blood and wheat bran. *Livestock Research for Rural Development* 20: 12.
- Ballitoc D. A. and Sun S., 2013. Ground Yellow Mealworms (*Tenebrio molitor* L.) Feed Supplementation Improves Growth Performance and Carcass Yield Characteristics in Broilers. *Open Science Repository Agriculture*, e23050425.
- Banjo A. D., Lawal O. A. and Songonuga E. A., 2006. The nutritional value of fourteen species of edible insects in southwestern Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 5(3): 298-301.
- Barker D, Fitzpatrick MP, Dierenfeld ES (1998). Nutrient composition of selected whole invertebrates. *Zoo Biology* 17: 123– 134.
- Barroso F. G., de Haro C., Sanchez-Muros M. J., Venegas E., Martinez-Sanchez A. and Perez-Banon C., 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. *Aquaculture*, 422: 193-201.
- Bazoche P., Poret S., 2016. What do trout eat: Acceptance of insects in animal feed. *Journées de la recherche en sciences sociales*. 2016 :1–14. Accessible en ligne : <https://www.sfer.asso.fr/source/jr2017/jr2017-article-bazoche.pdf> consulté le 18/05/2020
- Belforti, M., Lussiana, C., Malfatto, V., Rotolo, L., Zoccarato, I., Gasco, L., 2015. *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*, 14:4, 4170, DOI: 10.4081/ijas.2015.4170
- Belghit I., Liland N. S., Gjesdal P., Biancarosa I., Menchetti E., Li Y. X., Waagbo R., Krogdahl A. and Lock E. J., 2019. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 503: 609-619.
- Benzeriha A., Kieronczyk B., Kolodziejcki P., Pruszyńska-Oszmalek E., Rawski M., Jozefiak D. and Jozefiak A., 2019a. *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* full-fat meals as functional feed additives affect broiler chickens' growth performance and immune system traits. *Poult Sci*.
- Benzeriha A., Kieronczyk B., Rawski M., Jozefiak A., Kozłowski K., Jankowski J. and Jozefiak D., 2019b. *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* Full-Fat Meals in Broiler Chicken Diets: Effects on Nutrients Digestibility, Digestive Enzyme Activities, and Cecal Microbiome. *Animals*, 9(12).
- Benzeriha A., Kieronczyk B., Rawski M., Kolodziejcki P., Bryszak M. and Jozefiak D., 2019c. Insect Oil as An Alternative to Palm Oil and Poultry Fat in Broiler Chicken Nutrition. *Animals*, 9(3).
- Biancarosa. I., Sele V., Belghit I., Ørnsrud R., Lock EJ, Amlund H., 2019. Replacing fish meal with insect meal in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) does not impact the amount of contaminants in the feed and it lowers accumulation of arsenic in the fillet, *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36:8, 1191-1205, DOI: 10.1080/19440049.2019.1619938
- Biasato I., De Marco M., Rotolo L., Renna M., Lussiana C., Dabbou S., Capucchio M. T., Biasibetti E., Costa P., Gai F., Pozzo L., Dezzutto D., Bergagna S., Martinez S., Tarantola M., Gasco L. and Schiavone A., 2016. Effects of dietary *Tenebrio molitor* meal inclusion in free-range chickens. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 100(6): 1104-1112.
- Biasato I., Gasco L., De Marco M., Renna M., Rotolo L., Dabbou S., Capucchio M. T., Biasibetti E., Tarantola M., Bianchi C., Cavallarin L., Gai F., Pozzo L., Dezzutto D., Bergagna S. and Schiavone A., 2017. Effects of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) inclusion in diets for female broiler chickens: implications for animal health and gut histology. *Animal Feed Science and Technology*, 234: 253-263.
- Biasato I., Ferrocino I., Biasibetti E., Grego E., Dabbou S., Sereno A., Gai F., Gasco L., Schiavone A., Cocolin L. and Capucchio M. T., 2018a. Modulation of intestinal microbiota, morphology and mucin composition by dietary insect meal inclusion in free-range chickens. *BMC Vet Res*, 14(1): 383.
- Biasato I., Gasco L., De Marco M., Renna M., Rotolo L., Dabbou S., Capucchio M. T., Biasibetti E., Tarantola M., Sterpone L., Cavallarin L., Gai F., Pozzo L., Bergagna S., Dezzutto D., Zoccarato I. and Schiavone A., 2018b. Yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) inclusion in diets for male broiler chickens: effects on growth performance, gut morphology, and histological findings. *Poult Sci*, 97(2): 540-548.
- Biasato I., Ferrocino I., Grego E., Dabbou S., Gai F., Gasco L., Cocolin L., Capucchio M. T. and Schiavone A., 2019. Gut Microbiota and Mucin Composition in Female Broiler Chickens Fed Diets including Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*, L.). *Animals*, 9(5).

## Références bibliographiques

- Biasato I., Ferrocino I., Dabbou S., Evangelista R., Gai F., Gasco L., Coccolin L., Capucchio M. T. and Schiavone A., 2020. Black soldier fly and gut health in broiler chickens: insights into the relationship between cecal microbiota and intestinal mucin composition. *J Anim Sci Biotechnol*, 11: 11.
- Blokhuis H. J. and Wiepkema P. R., 1998. Studies of feather pecking in poultry. *Vet Q*, 20(1): 6-9.
- Borgogno, M.; Dinnella, C.; Iaconisi, V.; Fusi, R.; Scarpaleggia, C.; Schiavone, A.; Monteleone, E.; Gasco, L.; Parisi, G., 2017. Inclusion of *Hermetia illucens* larva meal on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feed: Effect on sensory profile according to static and dynamic evaluations. *J. Sci. Food Agric.* 2017, 97, 3402–3411
- Borrelli L., Coretti L., Dipineto L., Bovera F., Menna F., Chiariotti L., Nizza A., Lembo F. and Fioretti A., 2017. Insect-based diet, a promising nutritional source, modulates gut microbiota composition and SCFAs production in laying hens. *Sci Rep*, 7(1): 16269
- Bovera F., Piccolo G., Gasco L., Marono S., Loponte R., Vassalotti G., Mastellone V., Lombardi P., Attia Y. A. and Nizza A., 2015. Yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*, L.) as a possible alternative to soybean meal in broiler diets. *Br Poult Sci*, 56(5): 569-575
- Bovera F., Loponte R., Marono S., Piccolo G., Parisi G., Iaconisi V., Gasco L. and Nizza A., 2016. Use of larvae meal as protein source in broiler diet: Effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits. *J Anim Sci*, 94(2): 639-647.
- Bovera F., Loponte R., Pero M. E., Cutrignelli M. I., Calabro S., Musco N., Vassalotti G., Panettieri V., Lombardi P., Piccolo G., Di Meo C., Siddi G., Fliegerova K. and Moniello G., 2018. Laying performance, blood profiles, nutrient digestibility and inner organs traits of hens fed an insect meal from *Hermetia illucens* larvae. *Res Vet Sci*, 120: 86-93.
- Brabant Development Company, 2016. *Insectenkweek: Kleine Sector, Grote Kansen*; Brabant Development Company: Tilburg, Netherlands, 2016
- Chemello G., Renna M., Caimi C., Guerreiro I., Oliva-Teles A., Enes P., Biasato I., Schiavone A., Gai F., Gasco L., 2020. Partially Defatted *Tenebrio molitor* Larva Meal in Diets for Grow-Out Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum): Effects on Growth Performance, Diet Digestibility and Metabolic Responses. *Animals* 2020, 10, 229; doi:10.3390/ani10020229
- Cullere M., Tasoniero G., Giaccone V., Miotti-Scapin R., Claeys E., De Smet S. and Dalle Zotte A., 2016. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. *Animal*, 10(12): 1923-1930.
- Cullere M., Tasoniero G., Giaccone V., Acuti G., Marangon A. and Dalle Zotte A., 2018. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: meat proximate composition, fatty acid and amino acid profile, oxidative status and sensory traits. *Animal*, 12(3): 640-647.
- Cullere M., Schiavone A., Dabbou S., Gasco L. and Dalle Zotte A., 2019a. Meat Quality and Sensory Traits of Finisher Broiler Chickens Fed with Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* L.) Larvae Fat as Alternative Fat Source. *Animals (Basel)*, 9(4).
- Cullere M., Woods M. J., van Emmenes L., Pieterse E., Hoffman L. C. and Dalle Zotte A., 2019b. *Hermetia illucens* Larvae Reared on Different Substrates in Broiler Quail Diets: Effect on Physicochemical and Sensory Quality of the Quail Meat. *Animals (Basel)*, 9(8).
- Dabbou S., Gai F., Biasato I., Capucchio M. T., Biasibetti E., Dezzutto D., Meneguz M., Placha I., Gasco L. and Schiavone A., 2018. Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: Effects on growth performance, blood traits, gut morphology and histological features. *J Anim Sci Biotechnol*, 9: 49.
- Dalle Zotte A., Singh Y., Michiels J. and Cullere M., 2019. Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*) as Dietary Source for Laying Quails: Live Performance, and Egg Physico-Chemical Quality, Sensory Profile and Storage Stability. *Animals (Basel)*, 9(3).
- De Marco M., Martinez S., Hernandez F., Madrid J., Gai F., Rotolo L., Belforti M., Bergero D., Katz H., Dabbou S., Kovitvadi A., Zoccarato I., Gasco L. and Schiavone A., 2015. Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. *Animal Feed Science and Technology*, 209: 211-218.
- DeFoliart, G., 1992. Insects as human food. *Crop Prot*, 11, 395–399.
- Devic E, Leschen W, Murray F, Little DC (2018). Growth performance, feed utilization and body composition of advanced nursing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Aquaculture Nutrition* 24: 416– 423.
- Djissou ASM, Adjahouinou DC, Koshio S, Fiogbe ED (2016). Complete replacement of fish meal by other animal protein sources on growth performance of *Clarias gariepinus* fingerlings. *International Aquaculture Research* 8: 333– 341.

## Références bibliographiques

- Doos B. R., 2002. Population growth and loss of arable land. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 12(4): 303-311.
- EFSA Scientific Committee, 2015. Scientific Opinion on a risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal*;13(10):4257, 60 pp. Disponible en ligne : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2015.4257>, consulté le 19/05/2020
- Elahi U., Wang J., Ma Y. B., Wu S. G., Wu J., Qi G. H. and Zhang H. J., 2020. Evaluation of Yellow Mealworm Meal as a Protein Feedstuff in the Diet of Broiler Chicks. *Animals (Basel)*, 10(2).
- Elhag O., Zhou D., Song Q., Soomro A. A., Cai M., Zheng L., Yu Z. and Zhang J., 2017. Screening, Expression, Purification and Functional Characterization of Novel Antimicrobial Peptide Genes from *Hermetia illucens* (L.). *PLoS One*, 12(1): e0169582.
- Erickson, M.C., Islam, M., Sheppard, C., Liao, J., Doyle, M.P., 2004. Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella entericasero* var *Enteritidis* in chicken manure by larvae of the black soldier fly. *J. Food Prot.* 67, 685–690.
- Espe, M., Lemme, A., Petri, A., El-Mowafi, A., 2006. Can Atlantic salmon (*Salmo salar*) grow on diets devoid of fishmeal? *Aquaculture* 255, 255–262.
- Fasakin E. A., Balogun A. M. and Ajayi O. O., 2003. Evaluation of full-fat and defatted maggot meals in the feeding of clariid catfish *Clarias gariepinus* fingerlings. *Aquaculture Research*, 34(9): 733-738.
- Finke MD (2002). Complete nutrient composition of commercially raise invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biology* 21: 269– 285.
- Francis, G., Makkar, H.P.S., Becker, K., 2001. Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feeding ingredients and their effects in fish. *Aquaculture*, 199, 197–227.
- Gariglio M., Dabbou S., Biasato I., Capucchio M. T., Colombino E., Hernandez F., Madrid J., Martinez S., Gai F., Caimi C., Oddon S. B., Meneguz M., Trocino A., Vincenzi R., Gasco L. and Schiavone A., 2019. Nutritional effects of the dietary inclusion of partially defatted *Hermetia illucens* larva meal in Muscovy duck. *J Anim Sci Biotechnol*, 10: 37.
- Gasco, L., Gai, F., Piccolo, G., Rotolo, L., Lussiana, C., Molla, P., Chatzifotis, S., 2014b. Substitution of fishmeal by *Tenebrio molitor* meal in the diet of *Dicentrarchus labrax* juveniles. In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, (Eds.), 1st International Conference “Insects to Feed the World”. Wageningen University, Ede-Wageningen, The Netherlands, p. 70.
- Gasco, L., Henry M., Piccolo, G., Marono S., Gai F., Renna M., Lussiana, C., Antonopoulou E., Mola P., Chatzifotis S. 2016. *Tenebrio molitor* meal in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) juveniles: Growth performance, whole body composition and in vivo apparent digestibility, *Animal Feed Science and Technology* 220 34–45
- Gasco L., Finke M. and van Huis A., 2018. Can diets containing insects promote animal health? *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(1): 1-4.
- Gasco L., Biasato I., Dabbou S., Schiavone A. and Gai F., 2019. *Animals Fed Insect-Based Diets: State-of-the-Art on Digestibility, Performance and Product Quality*. *Animals (Basel)*, 9(4).
- Gasco L., Biancarosa I. and Liland N. S., 2020. From waste to feed: a review of recent knowledge on insects as producers of protein and fat for animal feeds. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*.
- Gatlin, D.M., FT, B., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T.G., Hardy, R.W., Herman, E., Hu, G.S., Krogdahl, A., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E.J., Stone, D., Wilson, R., Wurtele, E., 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture research* 38, 551–579.
- Hall, G.M., 1992. Fish processing technology. In: Ockerman, H.W. (Ed.), *Fishery Byproducts*. VCH Publishers, New York, USA, pp. 155–192.
- Halloran A., Roos N., Eilenberg J., Cerutti A. and Bruun S., 2016. Life cycle assessment of edible insects for food protein: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4).
- Hardy, R.W., 2002. Rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss*. In: Webster, C.D., Lim, C.E. (Eds.), *Nutrient Requirements and Feeding of Finfish for Aquaculture*. Harworth Press, Binghampton, New York, USA, pp. 184–202.
- Howe, E.R., Simenstad, C.A., Toft, J.D., Cordell, J.R., Bollens, S.M., 2014. Macroinvertebrate prey availability and fish diet selectivity in relation to environmental variables in natural and restoring north San Francisco bay tidal marsh channels. *San Franc. Estuary Waters. Sci.* 12, 1–46.
- Iaconisi, V.; Marono S., Parisi G., Gasco L., Genovese L., Maricchioli G., Bovera F., Pivcollo G., 2017. Dietary inclusion of *Tenebrio molitor* larvae meal: Effects on growth performance and final quality traits of blackspot sea bream (*Pagellus bogaraveo*). *Aquaculture*, 476, 49-58.
- Iaconisi, V.; Bonelli, A.; Pupino, R.; Gai, F.; Parisi, G., 2018. Mealworm as dietary protein source for rainbow trout: Body and fillet quality traits. *Aquaculture*, 484, 197–204.
- Islam M. M. and Yang C. J., 2017. Efficacy of mealworm and super mealworm larvae probiotics as an alternative to antibiotics challenged orally with *Salmonella* and *E. coli* infection in broiler chicks. *Poult Sci*, 96(1): 27-34.
- Jozefiak A. and Engberg R. M., 2017. Insect proteins as a potential source of antimicrobial peptides in livestock production. A review. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 26(2): 87-99.

## Références bibliographiques

- Jozefiak A., Kieronczyk B., Rawski M., Mazurkiewicz J., Benzertiha A., Gobbi P., Nogales-Merida S., Swiatkiewicz S. and Jozefiak D., 2018. Full-fat insect meals as feed additive - the effect on broiler chicken growth performance and gastrointestinal tract microbiota. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 27(2): 131-139.
- Jozefiak A., Benzertiha A., Kieronczyk B., Lukomska A., Wesolowska I. and Rawski M., 2020. Improvement of Cecal Commensal Microbiome Following the Insect Additive into Chicken Diet. *Animals (Basel)*, 10(4).
- Jozefiak D., Jozefiak A., Kieronczyk B., Rawski M., Swiatkiewicz S., Dlugosz J. and Engberg R. M., 2016. Insects - a Natural Nutrient Source for Poultry - a Review. *Annals of Animal Science*, 16(2): 297-313.
- Khan S. H., 2018. Recent advances in role of insects as alternative protein source in poultry nutrition. *Journal of Applied Animal Research*, 46(1): 1144-1157.
- Kieronczyk B., Rawski M., Jozefiak A., Mazurkiewicz J., Swiatkiewicz S., Siwek M., Bednarczyk M., Szumacher-Strabel M., Cieslak A., Benzertiha A. and Jozefiak D., 2018. Effects of replacing soybean oil with selected insect fats on broilers. *Animal Feed Science and Technology*, 240: 170-183.
- Kieronczyk B., Sypniewski J., Rawski M., Czekala W., Swiatkiewicz S. and Jozefiak D., 2020. From Waste to Sustainable Feed Material: The Effect of *Hermetia Illucens* Oil on the Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Gastrointestinal Tract Morphometry of Broiler Chickens. *Annals of Animal Science*, 20(1): 157-177.
- Kim B., Bang H. T., Kim K. H., Kim M. J., Jeong J. Y., Chun J. L. and Ji S. Y., 2020. Evaluation of black soldier fly larvae oil as a dietary fat source in broiler chicken diets. *J Anim Sci Technol*, 62(2): 187-197.
- of Fish Diseases, 35(2): 83-108
- Kogut M. H. and Arsenault R. J., 2016. Editorial: Gut Health: The New Paradigm in Food Animal Production. *Front Vet Sci*, 3: 71.
- Kovtunova A, Drevko Y, Faust E, Bannikova A, Larionova O (2017). Dynamics of amino acid profile of *Musca domestica* larva during cultivation on substrate enriched with microelements. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* 1– 8.
- Kroeckel, S., Harjes, A.G.E., Roth, I., Katz, H., Wuertz, S., Susenbeth, A., Schulz, C., 2012. When a turbot catches a fly: evaluation of a pre-pupae meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute – growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture* 364-365, 345– 352
- Lee C. G., Da Silva C. A., Lee J. Y., Hartl D. and Elias J. A., 2008. Chitin regulation of immune responses: an old molecule with new roles. *Curr Opin Immunol*, 20(6): 684-689.
- Lee J., Kim Y. M., Park Y. K., Yang Y. C., Jung B. G. and Lee B. J., 2018. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae enhances immune activities and increases survivability of broiler chicks against experimental infection of *Salmonella Gallinarum*. *J Vet Med Sci*, 80(5): 736-740.
- Leiber F., Gelencser T., Stamer A., Amsler Z., Wohlfahrt J., Fruh B. and Maurer V., 2017. Insect and legume-based protein sources to replace soybean cake in an organic broiler diet: Effects on growth performance and physical meat quality. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(1): 21-27.
- Lessire M., Hallouis J. M., Rousseau P., Sabourin D. and Hervé J. (2019). Composition, valeur energetique et digestibilité des farines d'insectes chez le poulet. 13èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras.
- Liu, Q., Tomberlin, J.K., Brady, J.A., Sanford, M.R., Yu, Z., 2008. Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae reduce *Escherichia coli* in dairy manure. *Environ. Entomol.* 37, 1525–1530.
- Lock, E.-R., Arsiwalla, T., Waagbo, R., 2014. Insect meal: a promising source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*). In: Vantomme, P., Munke, C., van Huis, A. (Eds.), 1st International Conference "Insects to Feed the World". Wageningen University, Ede-Wageningen, The Netherlands, p. 67.
- Lock ER, Arsiwalla T, Waagbø R (2016). Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquaculture Nutrition* 22: 1202– 1213.
- Loponte R., Nizza S., Bovera F., De Riu N., Fliegerova K., Lombardi P., Vassalotti G., Mastellone V., Nizza A. and Moniello G., 2017. Growth performance, blood profiles and carcass traits of Barbary partridge (*Alectoris barbara*) fed two different insect larvae meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*). *Res Vet Sci*, 115: 183-188.
- Loponte R., Bovera F., Piccolo G., Gasco L., Secci G., Iaconisi V. and Parisi G., 2019. Fatty acid profile of lipids and caeca volatile fatty acid production of broilers fed a full fat meal from *Tenebrio molitor* larvae. *Italian Journal of Animal Science*, 18(1): 168-173.
- Magalhaes R, Sanchez Lopez A., Leal RS, Martinez-Lloresn S., Oliva-Teles 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. P. S., Tran G., Henze V. and Ankers P., 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197: 1-33.
- Mancuso T., Baldi L. and Gasco L., 2016. An empirical study on consumer acceptance of farmed fish fed on insect meals: the Italian case. *Aquaculture International*, 24(5): 1489-1507.

## Références bibliographiques

- Marono S, Piccolo G, Loponte R, Di Meo C, Attia YA, Nizza A et al. (2015). In vitro crude protein digestibility of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* insect meals and its correlation with chemical composition traits. *Italian Journal of Animal Science* 14: 3889.
- Marono S., Loponte R., Lombardi P., Vassalotti G., Pero M. E., Russo F., Gasco L., Parisi G., Piccolo G., Nizza S., Di Meo C., Attia Y. A. and Bovera F., 2017. Productive performance and blood profiles of laying hens fed *Hermetia illucens* larvae meal as total replacement of soybean meal from 24 to 45 weeks of age. *Poult Sci*, 96(6): 1783-1790.
- Maurer V., Holinger M., Amsler Z., Fruh B., Wohlfahrt J., Stamer A. and Leiber F., 2015. Replacement of soybean cake by *Hermetia illucens* meal in diets for layers. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2(2): 83-90.
- Mbhele F. G. T., Mnisi C. M. and Mlambo V., 2019. A Nutritional Evaluation of Insect Meal as a Sustainable Protein Source for Jumbo Quails: Physiological and Meat Quality Responses. *Sustainability*, 11(23).
- Meneguez M, Schiavone A, Gai F, Dama A, Lussiana C, Renna M et al. (2018). Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Merrifield, D.L., Olsen, R.E., Myklebust, R., Ringo, E., El-Shemy, H., 2011. Dietary effect of soybean (*Glycine max*) products on gut histology and microbiota of fish. In: El-Shemy, H. (Ed.), *Soybean and Nutrition*. InTech.
- Miglietta P. P., De Leo F., Ruberti M. and Massari S., 2015. Mealworms for Food: A Water Footprint Perspective. *Water*, 7(11): 6190-6203.
- Moula N., Hornick J. L., Cabaraux J. F., Korsak N., Daube G., Dawans E., Antoine N., Taminiou B. and Detilleux J., 2018a. Effects of dietary black soldier fly larvae on performance of broilers mediated or not through changes in microbiota. *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(1): 31-41.
- Moula N., Scippo M. L., Douny C., Degand G., Dawans E., Cabaraux J. F., Hornick J. L., Medigo R. C., Leroy P., Francis F. and Detilleux J., 2018b. Performances of local poultry breed fed black soldier fly larvae reared on horse manure. *Animal Nutrition*, 4(1): 73-78.
- Mwaniki Z., Neijat M. and Kiarie E., 2018. Egg production and quality responses of adding up to 7.5% defatted black soldier fly larvae meal in a corn-soybean meal diet fed to Shaver White Leghorns from wk 19 to 27 of age. *Poult Sci*, 97(8): 2829-2835.
- Mwaniki Z., Shoveller A. K., Huber L. A. and Kiarie E. G., 2020. Complete replacement of soybean meal with defatted black soldier fly larvae meal in Shaver White hens feeding program (28-43 wks of age): impact on egg production, egg quality, organ weight, and apparent retention of components. *Poult Sci*, 99(2): 959-965.
- Naylor R. L., Hardy R. W., Bureau D. P., Chiu A., Elliott M., Farrell A. P., Forster I., Gatlin D. M., Goldberg R. J., Hua K. and Nichols P. D., 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 106(36): 15103-15110.
- Nguyen T. N., Davis D. A. and Saoud I. P., 2009. Evaluation of Alternative Protein Sources to Replace Fish Meal in Practical Diets for Juvenile Tilapia, *Oreochromis* spp. *Journal of the World Aquaculture Society*, 40(1): 113-121.
- Nogales-Mérida S., Gobbi P., Józefiak D., Mazurkiewicz J., Dudek K., Rawski M., Kierończyk B., Józefiak A., 2018. Insect meals in fish nutrition. *Reviews in Aquaculture* 11(4)
- NRC, 2011. *Nutrient Requirements of Fish and Shrimp*. The National Academies Press, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.17226/13039>.
- Ogunji, J.O., 2004. Alternative protein sources in diets for farmed tilapia. *Aquaculture*, 179 : 1–4
- Ogunji, J.O., Nimptsch, J., Wiegand, C., Schulz, C., 2007. Evaluation of the influence of housefly maggot meal (maggot meal) diets on catalase, glutathione S-transferase and glycogen concentration in the liver of *Oreochromis niloticus* fingerling. *Comp. Biochem. Physiol. A* 147, 942–947.
- Ogunji J, Summan Toor R-U-A, Schulz C, Kloas W (2008). Growth performance, nutrient utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fed housefly maggot meal (Maggot meal) diets. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 8: 141– 147.
- Oliva-Teles A., 2012. Nutrition and health of aquaculture fish. *Journal*
- Onsongo V. O., Osuga I. M., Gachui C. K., Wachira A. M., Miano D. M., Tanga C. M., Ekesi S., Nakimbugwe D. and Fiaboe K. K. M., 2018. Insects for Income Generation Through Animal Feed: Effect of Dietary Replacement of Soybean and Fish Meal With Black Soldier Fly Meal on Broiler Growth and Economic Performance. *J Econ Entomol*, 111(4): 1966-1973.
- Oonincx D. G. A. B., van Isterbeek J., Heetkamp M. J. W., van den Brand H., van Loon J. J. A. and van Huis A., 2010. An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *PLoS One*, 5(12).
- Oonincx D. G. A. B. and de Boer I. J. M., 2012. Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment. *PLoS One*, 7(12).
- Papatryphon E. and Soares J. H., 2001. Optimizing the levels of feeding stimulants for use in high-fish meal and plant feedstuff-based diets for striped bass, *Morone saxatilis*. *Aquaculture*, 202(3-4): 279-288.

## Références bibliographiques

- Park B. S., Um K. H., Choi W. K. and Park S. O., 2017. Effect of feeding black soldier fly pupa meal in the diet on egg production, egg quality, blood lipid profiles and faecal bacteria in laying hens. *European Poultry Science*, 81.
- Park S. I., Chang B. S. and Yoe S. M., 2014. Detection of antimicrobial substances from larvae of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Entomological Research*, 44(2): 58-64.
- Piccolo, G., Iaconisi V., Marono, S., Gasco, L. F., Bovera, F., Nizza, A., 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.
- Pieterse E, Pretorius Q (2014). Nutritional evaluation of dried larvae and pupae meal of the housefly (*Musca domestica*) using chemical and broiler-based biological assays. *Animal Production Science* 54: 347– 355.
- Pieterse E., Erasmus S. W., Uushona T. and Hoffman L. C., 2019. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a dietary protein source for broiler production ensures a tasty chicken with standard meat quality for every pot. *J Sci Food Agric*, 99(2): 893-903.
- Purschke B., Scheibelberger R., Axmann S., Adler A., Jäger H., 2017. Impact of substrate contamination with mycotoxins, heavy metals and pesticides on the growth performance and composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for use in the feed and food value chain. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*. 2017 Aug;34(8):1410-1420. doi: 10.1080/19440049.2017.1299946.
- Schiavone A., De Marco M., Martinez S., Dabbou S., Renna M., Madrid J., Hernandez F., Rotolo L., Costa P., Gai F. and Gasco L., 2017b. Nutritional value of a partially defatted and a highly defatted black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) meal for broiler chickens: apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility. *J Anim Sci Biotechnol*, 8: 51.
- Schiavone A., Dabbou S., De Marco M., Cullere M., Biasato I., Biasibetti E., Capucchio M. T., Bergagna S., Dezzutto D., Meneguz M., Gai F., Dalle Zotte A. and Gasco L., 2018. Black soldier fly larva fat inclusion in finisher broiler chicken diet as an alternative fat source. *Animal*, 12(10): 2032-2039.
- Schiavone A., Dabbou S., Petracci M., Zampiga M., Sirri F., Biasato I., Gai F. and Gasco L., 2019. Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: effects on carcass traits, breast meat quality and safety. *Animal*, 13(10): 2397-2405.
- Sealey, W.M., Gaylord, T.G., Barrows, F.T., Tomberlin, J.K., McGuire, M.A., 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.
- Secci G., Moniello G., Gasco L., Bovera F. and Parisi G., 2018. Barbary partridge meat quality as affected by *Hermetia illucens* and *Tenebrio molitor* larva meals in feeds. *Food Res Int*, 112: 291-298.
- Secci G., Bovera F., Nizza S., Baronti N., Gasco L., Conte G., Serra A., Bonelli A. and Parisi G., 2019. Quality of eggs from Lohmann Brown Classic laying hens fed black soldier fly meal as substitute for soya bean - CORRIGENDUM. *Animal*, 13(9): 2110.
- Secci, G.; Mancini, S.; Iaconisi, V.; Gasco, L.; Basto, A.; Parisi, G., 2019. Can the inclusion of black soldier fly (*Hermetia illucens*) in diet affect the flesh quality/nutritional traits of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after freezing and cooking? *Int. J. Food Sci. Nutr.* 70: 161–171.
- Secci G., Bovera F., Parisi G. and Moniello G., 2020. Quality of Eggs and Albumen Technological Properties as Affected by *Hermetia Illucens* Larvae Meal in Hens' Diet and Hen Age. *Animals (Basel)*, 10(1).
- Smetana S., Palanisamy M., Mathys A. and Heinz V., 2016. Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 137: 741-751.
- PROteINSECT (2016). Whitepaper "Insect Protein – feed for the future: addressing the need for feeds of the future today. Accessible en ligne [http://www.proteinsect.eu/fileadmin/user\\_upload/press/proteinsect-whitepaper-2016.pdf](http://www.proteinsect.eu/fileadmin/user_upload/press/proteinsect-whitepaper-2016.pdf) - Consulté le 18/05/2020
- Ramos-Elorduy J., Gonzalez E. A., Hernandez A. R. and Pino J. M., 2002. Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. *J Econ Entomol*, 95(1): 214-220.
- Ravi, C., Jeyashree, A., Renuka Devi, K., 2011. Antimicrobial peptides from insects: an overview. *Res. Biotechnol.* 2, 1–7.
- Renna M., Schiavone A., Gai F., Dabbou S., Lussiana C., Malfatto V., Prearo M., Capucchio M.T., Biasato I., Biasibetti E., De Marco M., Brugiapaglia A., Zoccarato I., Gasco L. 2017. 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* 8:57
- Ruhnke I., Normant C., Campbell D. L. M., Iqbal Z., Lee C., Hinch G. N. and Roberts J., 2018. Impact of on-range choice feeding with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) on flock performance, egg quality, and range use of free-range laying hens. *Animal Nutrition*, 4(4): 452-460.
- Rumpold B. A. and Schluter O. K., 2013. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol Nutr Food Res*, 57(5): 802-823.

## Références bibliographiques

- Salomone R., Saija G., Mondello G., Giannetto A., Fasulo S. and Savastano D., 2017. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140: 890-905.
- Sanchez-Muros M. J., Barroso F. G. and Manzano-Agugliaro F., 2014. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65: 16-27.
- Sánchez-Muros M, De Haro C, Sanz A, Trenzado CE, Vilareces S, Barroso FG (2016). Nutritional evaluation of *Tenebrio molitor* meal as fishmeal substitute for tilapia (*Oreochromis niloticus*) diet. *Aquaculture Nutrition* 22: 943– 955.
- Schabel, H.G., 2010. Forests insects as food: a global review. In: Durst, P.B., Johnson, D.V., Leslie, R.N., Shono, K. (Eds.). *Forests Insects as food: Humans Bite Back*. FAO, Bangkok, Thailand, pp. 37–64.
- Schiavone A., Cullere M., De Marco M., Meneguz M., Biasato I., Bergagna S., Dezzutto D., Gai F., Dabbou S., Gasco L. and Zotte A. D., 2017a. Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality. *Italian Journal of Animal Science*, 16(1): 93-100
- Schrögel P., Wätjen W., 2019. Insects for Food and Feed-Safety Aspects Related to Mycotoxins and Metals. *Foods*. 2019 Aug; 8(8): 288.
- Smetana S., Schmitt E. and Mathys A., 2019. Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources Conservation and Recycling*, 144: 285-296.
- Smith R., Barnes E., 2015. PROteINSECT Consensus Business Case Report: 'Determining the contribution that insects can make to addressing the protein deficit in Europe', Minerva Health & CCare Communication Ltd
- Sogari G., Amato M., Biasato I., Chiesa S. and Gasco L., 2019. The Potential Role of Insects as Feed: A Multi-Perspective Review. *Animals (Basel)*, 9(4).
- Spranghers T., Ottoboni M., Klootwijk C., Owyn A., Deboosere S., De Meulenaer B., Michiels J., Eeckhout M., De Clercq P. and De Smet S., 2017. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *J Sci Food Agric*, 97(8): 2594-2600.
- St-Hilaire S., Cranfill K., McGuire M. A., Mosley E. E., Tomberlin J. K., Newton L., Sealey W., Sheppard C. and Irving S., 2007. Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in omega-3 fatty acids. *Journal of the World Aquaculture Society*, 38(2): 309-313.
- 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(3): 165-175
- Star L., Arsiwalla T., Molist F., Leushuis R., Dalim M. and Paul A., 2020. Gradual Provision of Live Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae to Older Laying Hens: Effect on Production Performance, Egg Quality, Feather Condition and Behavior. *Animals (Basel)*, 10(2).
- Sypniewski J., Kieronczyk B., Benzertiha A., Mikolajczak Z., Pruszyńska-Oszmialek E., Kolodziejcki P., Sassek M., Rawski M., Czekala W. and Jozefiak D., 2020. Replacement of soybean oil by *Hermetia illucens*
- fat in turkey nutrition: effect on performance, digestibility, microbial community, immune and physiological status and final product quality. *British Poultry Science*.
- Tacon, A.G.J., 1993. *Feed Ingredients for Warmwater Fish: Fish Meal and Other Processed Feedstuffs*. FAO Fisheries Circular No. 856 856.
- Thevenot A., Rivera J. L., Wilfart A., Maillard F., Hassouna M., Senga-Kiesse T., Le Feon S. and Aubin J., 2018. Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 170: 1260-1267.
- Tonk M. and Vilcinskis A., 2017. The Medical Potential of Antimicrobial Peptides from Insects. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 17(5): 554-575.
- van der Fels-Klerx, H.J.; Camenzuli, L.; van der Lee, M.K.; Oonincx, D.G., 2016. Uptake of Cadmium, Lead and Arsenic by *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from Contaminated Substrates. *PLoS ONE* 2016, 11, e0166186.
- van Huis A., 2013. Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. *Annual Review of Entomology*, Vol 58, 58: 563-583.
- van Huis A. and Oonincx D. G. A. B., 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5).
- van Zanten H. H. E., Mollenhorst H., Oonincx D. G. A. B., Bikker P., Meerburg B. G. and de Boer I. J. M., 2015. From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed. *Journal of Cleaner Production*, 102: 362-369.
- Veldkamp T. and van Niekerk T. G. C. M., 2019. Live black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for turkey poults. *Journal of Insects as Food and Feed*, 5(4): 301-311.

## Références bibliographiques

- Verbeke W., Spranghers T., De Clercq P., De Smet S., Sas B. and Eeckhout M., 2015. Insects in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. *Animal Feed Science and Technology*, 204: 72-87.
- Wang S., Zeng X. F., Yang Q. and Qiao S. Y., 2016. Antimicrobial Peptides as Potential Alternatives to Antibiotics in Food Animal Industry. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(5).
- Wang Y. S. and Shelomi M., 2017. Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food. *Foods*, 6(10).
- Wang L, Li J, Jin JN, Zhu F, Roffeis M, Zhang XZ (2017). A comprehensive evaluation of replacing fishmeal with housefly (*Musca domestica*) maggot meal in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): growth performance, flesh quality, innate immunity and water environment. *Aquaculture Nutrition* 23: 983– 993.
- Whitley, S.N., Bollens, S.M., 2014. Fish assemblages across a vegetation gradient in a restoring tidal freshwater wetland: Diets and potential for resource competition. *Environ. Biol. Fishes* 97, 659–674.
- Widjastuti T., Wiradimadja R. and Rusmana D., 2014. The effect of substitution of fish meal by black soldier fly (*Hermetia illucens*) maggot meal in the diet on production performance of quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Animal Science*, LVII.
- Xiao X, Jin P, Zheng L, Cai M, Yu Z, Yu J et al. (2018). Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal protein as a fishmeal replacement on the growth and immune index of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquaculture Research* 49: 1569– 1577.
- Zhao, W., Lu, L., Tang, Y., 2010. Research and application progress of insect antimicrobial peptides on food industry. *Int. J. Food. Eng.* 6, Article 10.

## Abstract: Use of insects and insect-based products in aquaculture and poultry industries

The need of new alternative nutrient sources for feed production has led to an increase in research on the possible uses and effects of insect-derived products (meals and oils). Insects seem to be one of the most promising alternatives to other nutrient sources, such as the soybean and fish meals commonly used in feeds for livestock and aquaculture. This paper reviews the state-of-the-art of research on the use of insects and insects meals and oils in aquatic and avian species diets. Overall, it seems that insects and insect-based products (meals and oils) offer a good perspective to majority replace soybean and fishmeal, especially in terms of nutritional properties, production performances and products quality, but also in terms of animal health and welfare. However, the widespread use of insects in animal feed is subjects to many challenges (mainly technical, economic, and sanitary).