

UTILISATION DES INSECTES DANS L'ALIMENTATION DES VOLAILLES : UN POTENTIEL REEL MAIS DES VEROUS TECHNIQUES ET ORGANISATIONNELS A LEVER

**Pampouille Eva¹, Belloir Pauline², Trespeuch Christophe³,
Bressac Christophe², Méda Bertrand⁴**

¹*Institut Technique de l'Aviculture, 37380 Nouzilly, France*

²*IRBI, UMR 7261 CNRS, Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Tours, 37000 Tours, France*

³*MUTATEC, 84300 Cavaillon, France*

⁴*INRAE, Université de Tours, BOA, 37380, Nouzilly, France*

pampouille@itavi.asso.fr ; bertrand.meda@inrae.fr

RÉSUMÉ

L'aviculture européenne est aujourd'hui fortement dépendante de l'importation de tourteau de soja. Dans ce contexte, les insectes, en particulier les larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*, HI) et du ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*, TM) représentent une nouvelle source de protéines pour nourrir les volailles. Ces larves sont en effet riches en acides aminés et matières grasses très digestibles. De plus, leur profil en acides aminés est proche de celui du tourteau de soja, classiquement utilisé dans les rations. Ainsi, l'utilisation de farines issues de HI et TM dans l'alimentation des volailles est possible jusqu'à une inclusion de 10-15% sans effet négatif sur les performances zootechniques. Des effets sur la qualité des produits peuvent cependant être observés, en particulier un enrichissement en acides gras saturés avec l'utilisation de HI. Par ailleurs, les larves d'insectes constituent une source de composés bioactifs permettant de moduler la composition du microbiote et de stimuler certaines fonctionnalités « santé », notamment au niveau digestif. Elles permettent également, lorsqu'elles sont distribuées entières aux volailles d'enrichir le milieu de vie, de stimuler l'activité des animaux et de favoriser l'expression de comportements naturels. Toutefois, la filière entomocole n'est pas arrivée à maturité. Des défis environnementaux, sociétaux et économiques doivent être relevés. En particulier, les volumes disponibles sur le marché sont encore limités et les coûts de production élevés, ce qui freine l'utilisation des insectes en aviculture. La filière se développe néanmoins rapidement, grâce sa contribution à l'économie circulaire, en recyclant des biomasses non valorisables par d'autres filières, et tisse des liens étroits avec les filières avicoles pour se structurer.

ABSTRACT

Insects to feed poultry: A real potential but technical and organizational hurdles to overcome.

European poultry production is heavily dependent on imported soybean meal. In this context, insects, among which, the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*, HI) and the mealworm (*Tenebrio molitor*, TM), represent new protein sources to feed poultry. These larvae are indeed rich in highly digestible amino acids and fats. Furthermore, their amino acid profile is close to that of soybean meal, traditionally used in poultry diets. Thus, the use of HI and TM meals in poultry feed is possible up to an inclusion of 10-15% without impairing animal performance. However, some effects on product quality can be observed, such as an enrichment in saturated fatty acids with the use of HI. In addition, insect larvae are a source of bioactive compounds that can modulate the composition of the gut microbiota and stimulate some "health" functions, in particular along the gastro-intestinal tract. Whole larvae can also be used as an environmental enrichment, in order to stimulate animal activity and the expression of natural behaviors. However, the insect sector has not yet reached its maturity. Environmental, societal and economic challenges must still be tackled. In particular, the volumes available on the market are still limited, and production costs are high, which is holding back the use of insects by the poultry sector. Nevertheless, the insect sector is quickly developing, thanks to its contribution to circular economy, by recycling biomass that cannot be used by other sectors. This young value chain is forging close links with the poultry industry to structure itself.

INTRODUCTION

Chez les volailles, et en particulier les volailles de chair, l'apport d'acides aminés essentiels est un facteur clé pour garantir de bonnes performances zootechniques (vitesse de croissance, efficacité alimentaire, rendements en viande). Pour cette raison, le tourteau de soja, riche en protéines digestibles et avec un bon équilibre en acides aminés, est la principale matière première riche en protéines (MPRP) utilisée pour l'alimentation des volailles (Recoules *et al.*, 2016). Cependant, l'Union Européenne (UE) est fortement dépendante de l'importation de tourteau de soja d'Amérique du Sud, si bien qu'au niveau national, l'autonomie de l'aviculture française n'est que d'environ 40% (Pampouille *et al.*, 2021).

Aussi, face à cette très forte dépendance au soja importé, mais également aux critiques émises sur les conditions de production du soja (*e.g.* déforestation, utilisation de semences OGM... ; Castellari *et al.*, 2018 ; de Visser *et al.*, 2014), les filières avicoles sont à la recherche de nouvelles MPRP.

Dans ce contexte, l'utilisation de certaines espèces d'insectes comme la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*, HI) et le ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*, TM ; couramment appelé « ver de farine ») pour nourrir les volailles, apparaît comme une alternative prometteuse au soja, notamment depuis leur autorisation récente dans l'UE (Règlement UE 2021/1372). Ce sont les formes larvaires de ces insectes qui sont utilisées, car elles contiennent des protéines et des graisses de grande qualité (Makkar *et al.*, 2014). Si ces espèces sont principalement élevées pour séparer les fractions protéiques (*i.e.* « farines », plus ou moins délipidées) et lipidiques (« graisses » ou « huiles » d'insectes) par séchage et pressage des larves, des utilisations « alternatives » des larves entières (vivantes ou séchées) sont également proposées par les producteurs d'insectes.

L'objectif de cette synthèse est donc de faire un état des lieux des connaissances sur l'intérêt (composition chimique, digestibilité), les effets *in vivo* de l'utilisation de TM et HI en aviculture (poulets de chair et poules pondeuses) et les enjeux auxquels que les filières entomocoles devront répondre.

1. COMPOSITION CHIMIQUE ET VALEUR NUTRITIONNELLE

1.1. Protéines et profil en acides aminés

La richesse en protéines des insectes est le principal facteur ayant conduit à considérer leur utilisation pour l'alimentation animale. En effet, la teneur en protéines brutes (PB) des larves de HI et TM représente entre 30 et 60% de la matière sèche (Belhadj Slimen *et al.*, 2023 ; Makkar *et al.*, 2014). Au sein d'une espèce, il existe cependant une variabilité en fonction du substrat d'élevage et du stade physiologique ou de développement (Barragan-Fonseca *et al.*, 2017).

Néanmoins, en raison de la chitine présente dans la cuticule des insectes, les travaux de digestibilité disponibles dans la littérature montrent que la digestibilité apparente des PB est faible (généralement entre 50 et 60% ; Belloir *et al.*, 2024 ; Benlhadj Slimen *et al.*, 2023 ; De Marco *et al.*, 2015). Toutefois, Belloir *et al.* (2024) ont récemment montré que la digestibilité des PB dans des larves entières de HI (distribuées vivantes ou séchées) était supérieure d'environ 20 points par rapport à une farine dégraissée où la chitine est davantage concentrée.

Cependant, la teneur en PB est classiquement estimée à partir de la teneur en azote, multipliée par un coefficient (généralement N×6,25). Or, bien que la chitine contienne de l'azote, ce polysaccharide formé par polymérisation du N-acétylglucosamine, n'est pas un composant des protéines (*i.e.* acides aminés ; AA). De plus, elle est mal digérée par les oiseaux (<35% ; Akaki et Duke, 1999 ; Belloir *et al.*, données non publiées). Aussi, certains auteurs ont proposé d'autres facteurs de conversion, adaptés à TM et HI (entre 4,4 et 5,4 selon l'espèce et le stade larvaire ; Boulos *et al.*, 2020 ; Janssen *et al.*, 2017 ; Smets *et al.*, 2021). Sur la base de ces valeurs, une surestimation de la teneur en PB de 15 à 40% serait possible, avec également une incidence probable sur l'estimation de la digestibilité.

Aussi, comme pour les MPRP classiquement utilisées en alimentation animale (*i.e.* tourteaux et protéagineux), il convient de considérer les teneurs en AA digestibles. Ainsi, les larves de HI et TM sont très riches en AA, et lorsque ceux-ci sont concentrés dans des farines (par séchage puis extraction des graisses), les teneurs peuvent égaler voire dépasser les teneurs observées dans le tourteau de soja. Comme pour ce dernier, la digestibilité iléale des AA chez TM et HI est bonne voire excellente (généralement entre 70 et 90% ; Belhadj Slimen *et al.*, 2023 ; Makkar *et al.*, 2014 ; Oonincx et Finke, 2021), y compris dans les larves entières (Belloir *et al.*, 2024). De fait, les teneurs en AA digestibles des farines de TM et HI sont élevées et leur permettent, sur le plan nutritionnel, de rivaliser avec celles du tourteau de soja. De plus, l'équilibre entre les différents AA (*i.e.* profil en AA) est assez similaire à celui du soja (Oonincx et Finke, 2021), même si une supplémentation en AA libres peut parfois être nécessaire pour combler certains déficits (*e.g.* tryptophane ou AA soufrés ; Makkar *et al.*, 2014 ; Oonincx et Finke, 2021).

1.2. Lipides, acides gras et énergie métabolisable

Chez HI et TM, le stade larvaire est généralement associé à des teneurs élevées en matières grasses (MG). Ainsi selon Makkar *et al.* (2014), la teneur totale en MG chez ces deux espèces peut représenter entre 7 et 35% de la matière sèche (Barragan-Fonseca *et al.*, 2017 ; Belhadj Slimen *et al.*, 2023 ; Makkar *et al.*, 2014). Comme pour la teneur en protéines, la teneur en MG des larves peut varier en fonction de la composition du substrat d'élevage (Ewald *et al.*,

2020 ; Riekkinen *et al.*, 2022), même si d'autres facteurs existent, notamment le stade physiologique. Ceci souligne l'importance d'une standardisation des produits issus des larves de HI et TM, lorsque celles-ci sont élevées sur des substrats avec une composition variable. Toutefois, alors que la digestibilité des protéines semble être diminuée par la teneur en chitine, la digestibilité des MG est généralement très élevée, et ce pour TM et HI (Belloir *et al.*, 2024 ; Belhadj Slimen *et al.*, 2023 ; De Marco *et al.*, 2015). Afin de concentrer la fraction protéique (*i.e.* farines), les larves de HI et de TM sont généralement pressées (après séchage) pour extraire les graisses. Aussi, la teneur finale en MG est plus réduite, même si, comme pour le tourteau de soja, il existe une diversité de produits avec des farines plus ou moins dégraissées (*e.g.* de Marco *et al.*, 2015 ; Schiavone *et al.*, 2017). En conséquence, il peut donc être difficile pour les formulateurs de considérer la valeur énergétique (*i.e.* énergie métabolisable) de ces farines au quotidien. Pour répondre à ce problème, Martínez Marín *et al.* (2023) ont récemment proposé une équation prédisant l'Energie Métabolisable Apparente à bilan azoté nul (EMAn) des farines de larves de HI, en fonction de leurs teneurs en énergie brute et en MG. Enfin, le profil en acides gras (AG) varie grandement entre HI et TM. Ainsi, chez HI, les AG saturés peuvent représenter une très grande part des AG totaux (75%). En particulier, l'acide laurique (C12:0), peut représenter à lui seul jusqu'à la moitié des AG totaux (Ewald *et al.*, 2020 ; Makkar *et al.*, 2014), avec pour conséquence un enrichissement en AG saturés de la viande et des œufs (*cf.* section 2.2.). A l'inverse, il semble que l'acide laurique soit présent en faible proportion chez TM et que chez cette espèce, les AG soient majoritairement présents sous forme insaturée (jusqu'à 80% des AG totaux ; Hong *et al.*, 2020 ; Makkar *et al.*, 2014).

1.4. Effet du substrat d'élevage sur la composition des insectes : vers une nutrition adaptée aux besoins des filières avicoles ?

Au sein de l'UE, les insectes peuvent être élevés sur des substrats dont l'origine et la composition sont réglementés (Règlement CE 1069/2009). Aujourd'hui, le principal « gisement » de substrats pour l'entomoculture provient des sous- et co-produits de l'industrie agroalimentaires (*e.g.* épluchures, co-produits de meunerie ou de brasserie...). Cependant, la composition de ces ressources peut varier au cours du temps (*e.g.* effet « saison » ; Barbi *et al.*, 2020), et cette variabilité peut se répercuter sur la composition finale des larves de HI et TM (Barragan-Fonseca *et al.*, 2019 ; Mancini *et al.*, 2019). Aussi, la gestion de cette variabilité par les entreprises entomocoles est un défi pour satisfaire les besoins spécifiques des filières avicoles (*cf.* section 4.1.). Toutefois, la relative « plasticité » des insectes peut également représenter une opportunité pour proposer des produits adaptés aux attentes. Par exemple, bien

que le profil en AG des larves de HI soit très riche en acide laurique, certains auteurs ont montré qu'un enrichissement en Ω -3 des larves était possible en enrichissant le substrat d'élevage (Barroso *et al.*, 2017 ; Oonincx *et al.*, 2020). De même, Hopkins *et al.* (2021) suggèrent que la teneur en protéines et le profil en AA pourraient être également modulés par la composition du substrat, même si davantage d'études sont nécessaires pour distinguer les effets propres de la composition chimique du substrat d'autres effets (*e.g.* pH, paramètres environnementaux). Enfin, un enrichissement en micronutriments (*e.g.* vitamines) semble également possible selon la nature du substrat utilisé (Borel *et al.*, 2021).

2. EFFETS SUR LES PERFORMANCES ET LA QUALITE DES PRODUITS

2.1. Performances de production

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 (Onsongo *et al.*, 2018 ; Schäfer *et al.*, 2023 ; Sedgh-Gooya *et al.*, 2021, 2022). Dans quelques études, il a même été observé une amélioration du poids vif et/ou de la consommation d'aliment chez le poulet standard, avec une incorporation jusqu'à 15% de farine de larves de HI ou de TM dans l'aliment (Biasato *et al.*, 2017, 2018 ; Dabbou *et al.*, 2018 ; Martínez Marín *et al.*, 2023), ainsi qu'une amélioration de l'efficacité alimentaire avec une incorporation de farine ou d'huile de TM (Elahi *et al.*, 2020 ; Kieronczyk *et al.*, 2018). Cependant, plusieurs études montrent une augmentation de l'indice de consommation chez les poulets de chair nourris avec de la farine de larves de HI ou de TM non dégraissées ou partiellement dégraissées (Attia *et al.*, 2023 ; Benzertiha *et al.*, 2019b ; Biasato *et al.*, 2017, 2018 ; Facey *et al.*, 2023 ; Fruci *et al.*, 2023). Concernant l'huile d'insectes, la substitution de l'huile de soja ou de palme dans l'alimentation des poulets de chair n'affecte pas leurs performances (Benzertiha *et al.*, 2019c ; Kieronczyk *et al.*, 2018, 2020 ; Kim *et al.*, 2020 ; Schäfer *et al.*, 2023).

Chez les poules pondeuses, les résultats sont plus contrastés. En effet, plusieurs études montrent une amélioration du taux de ponte (Bovera *et al.*, 2018 ; Yan *et al.*, 2023), de l'indice de consommation (Marono *et al.*, 2017 ; Mwaniki *et al.*, 2020 ; Yan *et al.*, 2023), de la consommation d'aliment (Marono *et al.*, 2017 ; Star *et al.*, 2020) et du poids vif (Mwaniki *et al.*, 2020 ; Zhao *et al.*, 2022). Toutefois, d'autres rapportent un effet négatif, notamment sur le taux de ponte (Marono *et al.*, 2017 ; Mwaniki *et al.*, 2018 ; Park *et al.*, 2017). Enfin, chez la poule pondeuse, la distribution de larves entières, qu'elles soient vivantes ou déshydratées, n'a pas d'effet sur les performances zootechniques (Chu *et al.*, 2020 ; Ruhnke *et al.*, 2018 ; Star *et al.*, 2020).

2.2. Qualité technologique, nutritionnelle et organoleptique des viandes et des œufs

De manière générale, les caractéristiques des carcasses des poulets de chair semblent être peu affectées par l'inclusion de farine ou d'huile d'insectes (Onsongo *et al.*, 2018 ; Pieterse *et al.*, 2019 ; Sedgh-Gooya *et al.*, 2021). Certains auteurs démontrent même une amélioration du poids de carcasse (Biasato *et al.*, 2017, 2018 ; Schiavone *et al.*, 2019), du rendement à l'abattage (Ballitoc *et al.*, 2013), et du poids de filet (Schäfer *et al.*, 2023) avec l'inclusion d'huile ou de farine de larves d'insectes (HI, TM), respectivement en substitution partielle de l'huile ou du tourteau de soja. Toutefois, dans certaines études, l'engraissement des carcasses (*i.e.* gras abdominal) était également augmenté (Baéza *et al.*, 2024 ; Biasato *et al.*, 2017, 2018 ; Mlaga *et al.*, 2022). Enfin, récemment, Baéza *et al.* (2024) ont montré que la consommation de larves vivantes de HI (distribution représentant 15% de la matière sèche ingérée quotidiennement) permettrait d'améliorer le rendement en filet (+1,1 point).

À l'instar des caractéristiques de la carcasse, les paramètres de qualité de la viande de volaille (pH, couleur, exsudat, pertes à la cuisson) sont peu affectés par l'inclusion d'huile ou de farine d'insectes (Altmann *et al.*, 2018 ; Cullere *et al.*, 2019 ; Elahi *et al.*, 2020 ; Pieterse *et al.*, 2019). Certains auteurs observent toutefois une augmentation des pertes à la cuisson et/ou de l'exsudat des filets de poulets de chair nourris avec de l'huile ou de la farine de HI (Aprianto *et al.*, 2023 ; Leiber *et al.*, 2017). Une modification de la couleur rouge et/ou jaune (a^* , b^*) des filets est également possible (Aprianto *et al.*, 2023 ; 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 (Mwaniki *et al.*, 2018, 2020 ; Zhao *et al.*, 2022), d'autres montrent l'inverse (Ruhnke *et al.*, 2018), ou bien encore une absence d'effet significatif sur ces paramètres (Heuel *et al.*, 2021 ; Star *et al.*, 2020). Certaines études ont également mis en évidence une augmentation du poids (Zhao *et al.*, 2022) et de la couleur du jaune (Mwaniki *et al.*, 2018, 2020 ; Secci *et al.*, 2018).

De nombreuses études montrent par ailleurs une modification importante du profil en acides gras (AG) de la viande et des œufs. En effet, en raison notamment de la forte teneur en acides gras saturés des larves de HI (acide laurique principalement ; cf. section 1.2.), il a été observé une augmentation de la teneur en AG saturés et monoinsaturés au détriment des AG polyinsaturés dans la viande et les œufs de volailles nourries avec des farines d'insectes et ou des larves entières (*e.g.* Baéza *et al.*, 2024 ; Cullere *et al.*, 2019 ; Secci *et al.*, 2018).

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 de filet (odeur, saveur, arôme, texture, jutosité et tendreté) ne semble pas être affecté chez les poulets nourris avec des farines ou des graisses de larves de HI (Cullere *et al.*, 2019 ; Onsongo *et al.*, 2018 ; Pieterse *et al.*, 2019). De même, Baéza *et al.* (2024) ont récemment montré que l'inclusion de 10% de farine de HI ou la distribution de larves vivantes (distribution représentant 15% de la matière sèche ingérée quotidiennement) à des poulets avaient peu d'effet sur les propriétés sensorielles de la viande de cuisson, par rapport à une alimentation sans insecte.

A l'inverse, 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 HI, par rapport à un régime contrôle contenant 3% de farine de poissons.

3. EFFETS SUR LA SANTE ET LE BIEN-ETRE DES VOLAILLES

3.1. Intérêt de la chitine, de l'acide laurique et des peptides antimicrobiens

Les insectes sont des matières premières prometteuses pour l'alimentation animale car, outre des nutriments essentiels, ils contiennent également des composés bioactifs (chitine, acide laurique et peptides antimicrobiens). Ces derniers semblent notamment capables de moduler la composition du microbiote intestinal et de stimuler certaines fonctionnalités « santé » (Gasco *et al.*, 2018 ; Jozefiak et Engberg, 2017 ; Sogari *et al.*, 2019) même si l'âge des animaux (jeunes vs. adultes) et les doses offertes aux animaux sont probablement des facteurs de variation importants pour l'efficacité de ces composés.

La chitine, qui provient de l'exosquelette des insectes, est peu 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 des poulets de chair (Jozefiak et Engberg, 2017 ; Lee *et al.*, 2008 ; Sogari *et al.*, 2019). La chitine aurait également des effets antioxydants et antimicrobiens, ce qui pourrait permettre de réduire l'usage des antibiotiques (Benzertiha *et al.*, 2019a ; Gasco *et al.*, 2018 ; Lee *et al.*, 2018). En effet, chez le poulet de chair, Islam et Yang (2017) ont montré que l'apport de farines de larves de TM, lors d'un challenge sanitaire, réduisait la teneur en bactéries pathogènes (*Escherichia coli* et *Salmonella spp.*) dans les caeca et augmentait les niveaux de certains anticorps plasmatiques (IgA et IgG). Les animaux nourris avec des aliments contenant des farines de larves de TM avaient également un rapport albumine / globuline réduit, suggérant une stimulation de la réponse immunitaire

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 chez la poule pondeuse avec l'inclusion d'une farine de HI (Marono *et al.*, 2017).

L'acide laurique est un AG saturé à chaîne moyenne, présent en forte concentration dans les larves de HI. Il est connu pour avoir une activité antivirale et antibactérienne et être particulièrement actif contre les bactéries à Gram positif (Gasco *et al.*, 2018). Wu *et al.* (2021) ont ainsi démontré que chez les poulets de chair supplémentés en acide laurique en conditions challengées, les fonctions immunitaires étaient améliorées (amélioration de la fonction barrière de la muqueuse intestinale, augmentation des immunoglobulines IgA, IgM et IgY et diminution des cytokines inflammatoires dans le plasma). En outre, l'acide laurique pourrait également jouer un rôle antiparasitaire. Sedano *et al.* (2024) ont en effet montré que des extraits lipidiques produits à partir de larves de HI limitaient *in vitro* le développement intracellulaire d'*Eimeria tenella*, parasite responsable de la coccidiose.

Enfin, les peptides antimicrobiens présents dans les insectes font l'objet d'une grande attention en tant qu'antibiotiques naturels à large spectre, susceptibles de limiter l'apparition d'antibiorésistances (Wang *et al.*, 2016). Ces peptides présents en grand nombre chez les insectes (plus de 150 ont déjà été identifiés ; Tonk et Vilcinskas, 2017) pourraient également offrir une certaine défense contre les virus et les champignons. Par exemple, Park *et al.* (2014) ont montré que des extraits de larves de HI présentaient des activités antimicrobiennes potentielles contre *Staphylococcus aureus*, et *Pseudomonas aeruginosa*, tandis que d'autres auteurs ont montré une activité inhibitrice variée sur divers agents pathogènes, notamment *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, et les champignons *Rhizoctonia solani* et *Sclerotinia sclerotiorum* (e.g. Elhag *et al.*, 2017). Quelques travaux semblent également montrer la présence de peptides antimicrobiens chez TM (Moon *et al.*, 1994 ; Park *et al.*, 2019).

3.2. Les insectes comme enrichissement du milieu de vie des volailles

Les poulets de chair à croissance rapide, souvent confrontés à une stimulation limitée de leur environnement d'élevage, passent la plupart de leur temps inactifs et sont donc susceptibles de souffrir de problèmes de pattes (Tainika *et al.*, 2023). L'enrichissement de leur milieu de vie peut permettre d'atténuer ces problèmes en stimulant l'expression de comportements naturels et l'activité des animaux. L'utilisation d'enrichissements, tels que les larves d'insecte, ressource naturelle de l'alimentation des volailles à l'état sauvage, pourrait donc permettre de stimuler le comportement de recherche de nourriture. Ainsi, Ipema *et al.* (2020a, 2020b) ont montré que plusieurs distributions journalières de larves vivantes

de HI (7 à 10 fois par jour représentant de 5 à 10% de la matière sèche ingérée), directement dans la litière ou dans un tube perforé, permettaient d'augmenter l'activité des poulets de chair tout au long du cycle de production (de J0 à J42). De même, alors que la distribution de blé entier n'a pas eu d'effet, la distribution de larves de TM ou HI 1 à 2 fois par jour a permis d'augmenter considérablement l'activité des poulets de chair, du moins à court terme (Pampouille *et al.*, 2022 ; Pichova *et al.*, 2016). Par ailleurs, outre une augmentation de l'activité générale des animaux, Biasato *et al.* (2022) ont également rapporté une augmentation des comportements exploratoires (grattements, fourragement) et des battements d'ailes chez des poulets nourris avec des régimes complétés par 5 % de larves vivantes de TM ou de HI. Enfin, il semble que les larves vivantes soient plus attractives pour les animaux que les larves séchées, probablement car les poulets préfèrent interagir avec des objets en mouvement (Pampouille *et al.*, 2022).

Les effets bénéfiques des larves d'insectes sur le comportement et l'état du plumage ont été également mis en évidence chez les poules pondeuses (Kliphuis *et al.*, 2023 ; Star *et al.*, 2020 ; Tahamtani *et al.*, 2021). Par exemple, Star *et al.* (2020) ont étudié les effets de la distribution de larves vivantes de HI à des poules pondeuses âgées non époinçonnées sur le comportement et le bien-être. À la fin de l'essai, les poules ayant accès à des larves présentaient un meilleur état des plumes par rapport aux poules témoins. Les observations comportementales indiquaient que l'apport de larves stimulait le comportement naturel d'exploration (*i.e.* fouille).

Toutefois, une fréquence importante de distribution (*i.e.* nombre de « repas ») et des doses élevées (e.g. 10% de la matière sèche ingérée) ne semblent pas très réalistes en conditions de production (*i.e.* distribution chronophage, coût très élevé des larves). Aussi, d'autres études sont nécessaires à l'avenir pour ajouter une plus-value aux larves d'insectes, en particulier en étudiant la faisabilité technique d'une distribution à grande échelle (*i.e.* dans un bâtiment commercial entier), via des possibilités d'automatisation de la distribution et si possible en plusieurs « repas » pour stimuler les animaux tout au long de la journée.

4. L'AVENIR DE LA FILIERE INSECTES : VERROUS ET LEVIERS

4.1. Volumes disponibles, marchés, prix d'intérêt et standardisation des produits

Malgré un intérêt évident pour les filières avicoles, les insectes produits aujourd'hui dans l'UE pour l'alimentation animale sont principalement utilisés par le *petfood* et l'aquaculture, marchés davantage capables de supporter le prix très élevé des protéines d'insectes, que l'aviculture. En effet, de Jong et Nikolik (2021) estiment que le prix des farines d'insectes se situe entre 3500 et 5500 €/tonne, si bien

que la protéine d'insectes est nettement plus chère que celle de soja, classiquement utilisée en aviculture (Shah *et al.*, 2021 ; Veldkamp *et al.*, 2022).

Le prix élevé des protéines d'insectes est aujourd'hui expliqué par deux facteurs : d'une part des coûts de production élevés (énergie, main d'œuvre, alimentation des insectes ; Niyonsaba *et al.*, 2021) mais également des faibles volumes actuellement disponibles sur le marché européen ($\approx 10\,000$ tonnes selon de Jong et Nikolik, 2021). Cependant, le marché n'est pas arrivé à maturité et la rentabilité des entreprises n'est pas complètement assurée (Niyonsaba *et al.*, 2021), si bien que la santé financière des opérateurs présents sur le marché repose encore largement sur des capitaux extérieurs (de Jong et Nikolik, 2021) et sur la valorisation économique des frass, *i.e.* les effluents composés du mélange du substrat d'élevage, des déjections des insectes et des insectes morts.

Aussi, le développement de cette filière au sein de l'UE, avec l'augmentation des capacités de production (agrandissement et nouvelles usines) et les évolutions réglementaires attendues (*e.g.* nouveaux substrats d'élevage ; de Jong et Nikolik, 2021) devrait permettre, à l'horizon 2030, d'accroître les volumes disponibles ($\approx 260\,000$ tonnes ; IPIFF, 2020) et de faire baisser les prix. Toutefois, un dernier élément déterminant pour l'avenir de cette filière est la maîtrise de la variabilité de la composition des produits mis sur le marché (*i.e.* standardisation). Cet enjeu sera probablement encore plus important dans le futur si la diversification des substrats pour élever les insectes se poursuit (Veldkamp *et al.*, 2022).

4.2. Impacts environnementaux

La production d'insectes est souvent présentée comme une production respectueuse de l'environnement. Toutefois, les effets sur l'environnement sont contrastés, selon l'impact considéré, l'espèce élevée et les pratiques d'élevage (Smetana *et al.*, 2021, 2023 ; van Huis et Oonincx, 2017). En particulier, les élevages d'insectes sont de grands consommateurs d'énergie, pour le chauffage des bâtiments d'élevage et le séchage des insectes avant leur transformation (*i.e.* extraction des graisses et broyage ; Smetana *et al.*, 2021, 2023 ; van Huis et Oonincx, 2017). Par exemple, Thévenot *et al.* (2018) ont montré que la quantité d'énergie requise pour produire 1 kg de protéines de TM était 7 fois plus importante que celle nécessaire à la production d'1 kg de protéines de tourteau de soja (217 vs. 31 MJ/kg), les étapes d'élevage et de transformation des insectes représentant respectivement 29 et 56% de la consommation totale d'énergie.

Cependant, des marges de progrès existent pour améliorer ce bilan énergétique, avec notamment le recours à davantage d'énergies renouvelables, et l'insertion des élevages entomocoles dans des « symbioses industrielles ». Ainsi, Phan Van Phi *et al.* (2020) ont montré une réduction de 83% de la

consommation d'énergies fossiles si la production de HI était réalisée dans un tel contexte, avec notamment des dispositifs de récupération de chaleur des industries proches et l'utilisation de ressources renouvelables (*i.e.* chaudière à biomasse). Ces évolutions des modes de production contribueront également à améliorer le bilan carbone de l'entomoculture (*e.g.* réduction d'environ 80 % des émissions de gaz à effet de serre réduites dans l'étude de Phan Van Phi *et al.* (2020)).

4.3. Contribution à l'économie circulaire

Malgré un bilan environnemental encore « en demi-teinte », l'entomoculture dispose d'un réel potentiel pour s'insérer pleinement dans les territoires grâce à sa participation à l'économie circulaire. En effet, outre sa contribution directe à la production MPRP à destination de l'alimentation animale (*cf.* sections 1. et 2.), la capacité de certaines espèces comme HI (et TM dans une moindre mesure) à valoriser / recycler des biomasses d'origine agricole (*e.g.* fruits et légumes abimés non commercialisables, coproduits de meunerie/biscuiterie...) est mise en avant par les entreprises du secteur entomocole et confirmée par la communauté scientifique (Kee *et al.*, 2023 ; Ojha *et al.*, 2020). En pratique, cette capacité à valoriser des biomasses et biodéchets n'est pas encore exploitée à son maximum. En effet, le cadre réglementaire européen actuel concernant l'utilisation de ces ressources pour la production d'insectes est très strict, puisque les insectes sont considérés comme des animaux d'élevage (Règlement CE 1069/2009). Aussi, certaines biomasses ne sont aujourd'hui pas utilisables par les producteurs d'insectes, en dépit de l'existence de volumes disponibles considérables et de leur pertinence pour l'élevage d'insectes (Chen *et al.*, 2017 ; Kawasaki *et al.*, 2019), comme par exemple les déchets alimentaires domestiques, ceux de la distribution et de la restauration hors foyer (≈ 90 kg/habitant dans l'UE en 2021 ; Eurostat, 2023). Des évolutions réglementaires seront donc nécessaires pour permettre au secteur entomocole d'accéder à ces nouvelles ressources organiques. Ces évolutions seront néanmoins conditionnées à des garanties de sécurité sanitaire des produits issus des insectes (*e.g.* concentrations en métaux lourds ou en bactéries pathogènes ; Purschke *et al.*, 2017 ; Van Looveren *et al.*, 2023). Le secteur devra aussi gérer la compétition pour les ressources organiques avec les filières de valorisation énergétique (*i.e.* méthanisation). Enfin, en sortie d'élevage entomocole, les frass peuvent également être valorisés pour la fertilisation organique des cultures (Règlement UE 2021/1925 ; y compris en Agriculture Biologique), lorsqu'ils respectent les mêmes normes que les effluents d'élevages « classiques » (*i.e.* traitement à 70°C pendant 1 heure ; Règlement UE 142/2011). Les frass constituent ainsi une excellente source de nutriments (en particulier l'azote) pour les plantes cultivées et certains auteurs mettent également en avant des

bénéfices « santé » pour les plantes (Lopes *et al.*, 2022 ; Poveda, 2021). Leur composition chimique (N, P et K) et les volumes produits dépendent en grande partie de l'espèce élevée et des caractéristiques initiales du substrat d'élevage (Lopes *et al.*, 2022 ; Poveda, 2021).

4.4. Perceptions sociétales

Depuis leur autorisation en tant que matière première pour l'alimentation des porcs et des volailles, les insectes sont devenus des animaux au point de vue législatif. L'élevage des insectes doit donc suivre les mêmes règles que les élevages « classiques » en termes de traçabilité, de garanties sanitaires, de rejets dans l'environnement. Ces aspects conditionnent de fait l'acceptabilité sociale des élevages d'insectes et de leur utilisation en alimentation animale (CLVL, 2015 ; Verbeke *et al.*, 2015).

En particulier, avec les attentes sociétales grandissantes autour du bien-être animal des animaux d'élevage, la question du bien-être des insectes (*i.e.* conditions d'élevage et de mise à mort) est également posée, par la science (Barrett et Fischer, 2022 ; Delvendahl *et al.*, 2022) mais également par des organisations non gouvernementales (ONG ; *e.g.* Eurogroup for Animals). En effet, bien que l'utilisation d'insectes pour nourrir les volailles soit perçue comme « naturelle » et favorable au bien-être des volailles (Verbeke *et al.*, 2015), il semble que cette pratique ne puisse pas se faire sans la prise en compte du bien-être des insectes eux-mêmes. Ainsi, Bunker et Zscheischler (2023) ont montré que la perception des ONG et des citoyens quant à l'utilisation des insectes dans l'alimentation des monogastriques était majoritairement négative, en raison notamment d'interrogation sur le bien-être des insectes d'élevage. A l'inverse, la perception des « professionnels » des secteurs animaux était globalement positive (Azlaf *et al.*, 2022).

Par ailleurs, similairement aux résultats de Delanoue et Roguet (2015) pour les productions animales « classiques », les conditions de production et la taille

des élevages d'insectes interrogent également les consommateurs et les citoyens. Ainsi, ils semblent assez réticents au développement d'élevages qualifiés « d'industriels » ou produits dans des « usines » (CLCV, 2015 ; Macombe *et al.*, 2019). Il est donc probable que pour répondre à ces attentes, des modèles de production « alternatifs » ou « familiaux » se développent dans l'avenir.

CONCLUSION

Les insectes en Europe représentent un réel potentiel pour les filières avicoles. Ils constituent en effet une nouvelle source de nutriments, en particulier de protéines, de grande qualité (digestibilité, équilibre en acides aminés...) pour l'alimentation des volailles. Leurs utilisations dans les aliments (farines, graisses) ou en élevage (larves entières) représentent également une nouvelle opportunité pour l'amélioration de la santé et du bien-être des animaux.

Toutefois, les volumes disponibles et le prix des produits à base d'insectes freinent encore leur utilisation par les opérateurs des filières avicoles. Aussi, le développement des filières entomocolles dans les années à venir est un enjeu crucial. Elles pourront notamment faire valoir leur rôle important dans l'économie circulaire, avec le recyclage de biomasses variées permis par des évolutions réglementaires attendues (*cf.* tri des biodéchets à partir du 1^{er} janvier 2024).

Dans ce contexte, la filière entomocolle naissante a de nombreux points communs avec les filières avicoles (structuration en maillons successifs, sélection génétique s'appuyant sur des outils développés pour la sélection avicole, valorisation des frass similaire à celles des litières...). Les coopérations entre les opérateurs des deux filières commencent ainsi à porter leurs fruits et constituent un levier majeur pour le développement de l'entomoculture au service des filières avicoles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akaki C., Duke G.E., 1999. J. Exp. Zool., (283), 387-393.
- Al Qazzaz M.F.A., Ismail D., Akit H., Idris L.H., 2016. J. Anim. Sci., (45), 518-523.
- Altmann B.A., Neumann C., Velten S., Liebert F., Morlein D., 2018. Foods, (7), 34.
- Aprianto M.A., Muhlisin, Kurniawati A., Hanim C., Ariyadi B., Al Anas M., 2023. Poult. Sci., (102), 102984.
- Attia Y.A., Bovera F., Asiry K.A., Alqurashi S., Alrefaei M.S., 2023. Animals, (13), 2759.
- Azlaf M.A., Pampouille E., Méda B., Rousset N., 2022. TeMA, (63), 1-11.
- Baéza E., Belloir P., Bordeau T., Gérard C., Même N., Guidou C., Trespeuch C., Berri C., Méda B., 2024. 16th European Poultry Conference, *sous presse*.
- Ballitoc D.A., Sun S., 2013. Open Science Repository Agriculture, e23050425.
- Barbi S., Macavei L.I., Fuso A., Luparelli A.V., Caligiani A., Ferrari A.M., Maistrello L., Montorsi M., 2020. Sci. Total Env., (709), 136209.
- Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J.A., 2017. J. Insects Food Feed, (3), 105-120.
- Barragan-Fonseca K.B., Gort G., Dicke M., van Loon J.J.A., 2019. Physiol. Entomol., (44), 148-159.
- Barrett M., Fischer B., 2023. Anim. Welfare, (32), e4.
- Barroso F.G., Sánchez-Muros M.-J., Segura M., Morote E., Torres A., Ramos R., Guil J.-L., 2017. J. Food Compos. Anal., (62), 8-13.
- Belhadj Slimen I., Yerou H., Manel Ben Larbi M., M'Hamdi N., Najjar T., 2023. Front. Vet. Sci., (10), 1200031.

Belloir P., Hervo F., Gambier E., Lardic L., Guidou C., Trespeuch C., Mème N., Recoules E., Méda B., 2024. 15^{èmes} JRA-PFG, *sous presse*.

Benzertiha A., Kieronczyk B., Kolodziejcki P., Pruszyńska Osmałek E., Rawski M., Józefiak D., Józefiak A., 2019a. *Poult. Sci.*, (99), 196-206.

Benzertiha A., Kieronczyk B., Rawski M., Józefiak A., Kozłowski K., Jankowski J., Józefiak D. 2019b. *Animals*, (9), 1128.

Benzertiha A., Kieronczyk B., Rawski M., Kolodziejcki P., Bryszak M., Józefiak D., 2019c. *Animals*, (9), 116.

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., Schiavone A., 2017. *Anim. Feed Sci. Tech.*, (234), 253-263.

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., Schiavone A., 2018. *Poult. Sci.*, (97), 540-548.

Biasato I., Bellezza Oddon S., Chemello G., Gariglio M., Fiorilla E., Dabbou S., Pipan M., Dekleva D., Macchi E., Gasco L., Schiavone A., 2022. *Front. Physiol.*, (13), 930158.

Borel P., Hammaz F., Morand-Laffargue L., Creton B., Halimi C., Sabatier D., Desmarchelier C., 2021. *Food Chem.*, (359), 129911.

Boulos S., Tännler A., Nyström L., 2020. *Front. Nutr.*, (7), 89.

Bovera F., Piccolo G., Gasco L., Marono S., Loponte R., Vassalotti G., Mastellone V., Lombardi P., Attia Y.A., Nizza A., 2015. *Brit. Poult. Sci.*, (56), 569-575.

Bovera F., Loponte R., Pero M. E., Cutrignelli M. I., Calabrò S., Musco N., Vassalotti G., Panettieri V., Lombardi L., Piccolo G., Di Meo C., Siddi G., Fliegerova K., Moniello G., 2018. *Res. Vet. Sci.*, (120), 86-93.

Bunker I., Zscheischler J., 2023. *J. Agr. Environ. Ethic.*, (36), 23.

Castellari E., Soregaroli C., Venus T.J., Wesseler J., 2018. *Food Policy*, (78), 26-37.

Chen J.Y.K., Chiu S.L.H., Lo I.M.C., 2017. *Waste Manage.*, (67), 315-323.

Chu X., Li M., Wang G., Wang K., Shang R., Wang Z., Li L., 2020. *Front. Vet. Sci.*, (7), 585843.

CLCV, 2015. Etude de la perception des consommateurs sur les projets de bio-raffineries d'insectes sous l'angle de leur valorisation en alimentation animale. 52 p.

Cullere M., Schiavone A., Dabbou S., Gasco L., Dalle Zotte A., 2019. *Animals*, (9), 140.

Dabbou S., Gai F., Biasato I., Capucchio M.T., Biasibetti E., Dezzutto D., Meneguz M., Plachà I., Gasco L., Schiavone A., 2018. *J. Anim. Sci. Biotech.*, (9), 49.

de Jong B., Nikolik G., 2021. No Longer Crawling: Insect Protein to Come of Age in the 2020s, RaboResearch, Amsterdam, The Netherlands, 9 p.

Delanoue E., Roguet C., 2015. *INRA Prod. Anim.*, (28), 39-50.

Delvendahl N., Rumpold B.A., Langen N., 2022. *Insects*, (13), 121.

De Marco M., Martínez S., Hernandez F., Madrid J., Gai F., Rotolo L., Belforti M., Bergero D., Katz H., Dabbou S., Kovitvadhi A., Zoccarato I., Gasco L., Schiavone A., 2015. *Anim. Feed Sci. Tech.*, (209), 211-218.

de Visser C.L.M., Schreuder R., Stoddard F., 2014. *OCL*, (21), D407.

Elahi U., Wang J., Ma Y.B., Wu S.G., Wu J., Qi G.H., Zhang H.J., 2020. *Animals*, (10), 224.

Elhag O., Zhou D., Song Q., Soomro A.A., Cai M., Zheng L., Yu Z., Zhang J., 2017. *PLoS One*, (12), e0169582.

Eurostat, 2023. Food waste and food waste prevention – Estimates. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates

Ewald N., Vidakovic A., Langeland M., Kiessling A., Sampels S., Lalander C., 2020. *Waste Manage.*, (102), 40-47.

Facey H., Kithama M., Mohammadigheisar M., Huber L.-A., Shoveller A.K., Kiarie E.G., 2023. *Poult. Sci.*, (102), 102293.

Fruci M., Kithama M., Kiarie E., Shao S., Liu H., Topp E., Diarra M.S., 2023. *Poult. Sci.*, (102), 102463.

Gasco L., Finke M., van Huis A., 2018. *J. Insects Food Feed*, (4), 1-4.

Gasco L., Biasato I., Dabbou S., Schiavone A., Gai F., 2019. *Animals*, (9), 170.

Heuel M., Sandrock C., Leiber F., Mathys A., Gold M., Zurbrugg C., Gangnat I.D.M., Kreuzer M., Terranova M., 2021. *Poult. Sci.*, (100), 101034.

Hong J., Han T., Kim Y.Y., 2020. *Animals*, (10), 2068.

Hopkins I., Newman L.P., Gill H., Danaher J., 2021. *Insects*, (12), 608.

Ipema, A.F., Bokkers, E.A.M., Gerrits, W.J.J., Kemp, B., Bolhuis, J.E., 2020a. *Sci. Rep.* (10), 17428.

Ipema, A.F., Gerrits, W.J.J., Bokkers, E.A.M., Kemp, B., Bolhuis, J.E., 2020b. *Appl. Anim. Beh. Sci.*, (230), 105082.

International Platform of Insects for Food and Feed (IPIFF), 2020. Edible insects on the European market. <https://ipiff.org/wp-content/uploads/2020/06/10-06-2020-IPIFF-edible-insects-market-factsheet.pdf>

Islam M.M., Yang C.J., 2017. *Poult. Sci.*, (96), 27-34.

Janssen R.H., Vincken J.-P., van den Broek L.A.M., Fogliano V., Lakemond C.M.M., 2017. *J. Agri. Food Chem.*, (65), 2275-2278.

Józefiak A., Engberg R.M., 2017. *J. Anim. Feed Sci.*, (26), 87-99.

Kawasaki K., Hashimoto Y., Hori A., Kawasaki T., Hirayasu H., Iwase S.-I., Hashizume A., Ido A., Miura C., Miura T., Nakamura S., Seyama T., Matsumoto Y., Kasai K., Fujitani Y. 2019. *Animals*, (9), 98.

Kee P.E., Cheng Y.-S., Chang J.-S., Yim H.S., Tan J.C.Y., Lam S.S., Chi-Wei Lan J., Ng H.S., Khoo K.S., 2023. *Environ. Res.*, (221), 115284.

Kieronczyk B., Rawski M., Józefiak A., Mazurkiewicz J., Świątkiewicz S., Siwek M., Bednarczyk M., Szumacher-Strabel M., Cieślak A., Benzertiha A., Józefiak D., 2018. *Anim. Feed Sci. Techn.*, (240), 170-183.

Kieronczyk B., Sypniewski J., Rawski M., Czekala W., Sylwester Świątkiewicz S., Józefiak D., 2020. *Ann. Anim. Sci.*, (20), 157-177.

Kim B., Bang H.T., Kim K.H., Kim M.J., Jeong J.Y., Chun L.C., Ji S.Y., 2020. *J. Anim. Sci. Tech.*, (62), 187-197.

Kliphuis S., Manet M.W.E., Goerlich V.C., Nordquist R.E., 2023. *Poult. Sci.*, (102), 120801.

Lee C.G., Da Silva C.A., Lee J.Y., Hartl D., Elias J.A., 2008. *Curr. Opin. Immunol.*, (20), 684-689.

Lee J., Kim Y.M., Park Y.K., Yang Y.C., Jung B.G., Lee B.J., 2018. *J. Vet. Med. Sci.*, (80), 736-740.

Leiber F., Gelencser T., Stamer A., Amsler Z., Wohlfahrt J. Früh B., Maurer V., 2017. *Renew. Agric. Food Syst.*, (32), 21-27.

Lopes I.G., Yong J.W.H., Lalander C., 2022. *Waste Manage.*, (142), 65-76.

Macombe C., Le Feon S., Aubin J., Maillard F., 2019. *J. Insects Food Feed*, (5), 215-224.

Makkar H.P.S., Tran G., Heuzé V., Ankers P., 2014. *Anim. Feed Sci. Tech.*, (197), 1-33.

Mancini S., Fratini F., Turchi B., Mattioli S., Dal Bosco A., Tuccinardi T., Nozic S., Paci G., 2019. *Animals*, (9), 484.

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., Bovera F., 2017. *Poult. Sci.*, (96), 1783-1790.

Martinez Marín A.L., Gariglio M., Biasato I., Gasco L., Schiavone A., 2023. *Ital. J. Anim. Sci.*, (22), 379-387.

Mlaga K.G., Agboka K., Attivi K., Tona K., Osseyi E. 2022. *Heliyon*, (8), e11718.

Moon H.J., Lee S.Y., Kurata S., Natori S., Lee B.L., 1994. *J. Biochem.*, (116), 53-58.

Mwaniki Z., Neijat M., Kiarie E., 2018. *Poult. Sci.*, (97), 2829-2835.

Mwaniki Z., Shoveller A.K., Huber L.A., Kiarie E.G., 2020. *Poult. Sci.*, (99), 959-965.

Niyonsaba-van den Hoorn H.H., Höhler J., Kooistra J., van der Fels H.J., Meuwissen M.P.M., 2021. *J. Insects Food Feed*, (7), 923-934.

Ojha S., Bußler S., Schlüter O.K., 2020. *Waste Manage.*, (118), 600-609.

Onsongo V.O., Osuga I.M., Gachui C.K., Wachira A.M., Miano D.M., Tanga C.M., Ekesi S., Nakimbugwe D., Fiaboe K.K.M., 2018. *J. Econ. Entomol.*, (111), 1966-1973.

Oonincx D.G.A.B., Laurent S., Veenenbos M.E., van Loon J.J.A., 2020. *Insect. Sci.*, (27), 500-509.

Oonincx D.G.A.B., Finke M.D., 2021. *J. Insects Food Feed*, (7), 639-659.

Pampouille E., Dusart L., Bonnouvrier A., Danel J., Dauguet S., Désolé M., Heuzé V., Lambert W., Le Bourhis C., Le Cadre P., Martin N., Méda B., Michaud C., Mignon-Grasteau S., Narcy A., Peyronnet C., Quinsac A., Recoules E., Schouler C., Tormo E., Tran G., Vilariño M., Wilfart A., Bouvarel I., 2021. *Innov. Agron.*, (82), 425-440.

Pampouille E., Thomas C., Warin L., Souchet C., Guidou C., Trespeuch C., Bernard J., Méda B., Quentin M., 2022. 14^{èmes} JRA-PFG, 19-23.

Park S.I., Chang B.S., Yoe S.M., 2014. *Entomol. Res.*, (44), 58-64.

Park B.S., Um K.H., Choi W.K., Park S.O., 2017. *Eur. Poult. Sci.*, (81), 202.

Park S., Jo Y.H., Park K.B., Ko H.J., Kim C.E., Bae Y.M., Kim B., Jun S.A., Bang I.S., Lee Y.S., Kim Y.J., Han Y.S., 2019. *Front. Immunol.*, (10), 310.

Phan Van Phi C., Walraven M., Bézagu M., Lefranc M., Ray C., 2020. *Sustainability*, (12), 10333.

Pieterse E., Erasmus S.W., Ushona T., Hoffman L.C., 2019. *J. Sci. Food Agric.*, (99), 893-903.

Pichova K., Nordgreen J., Leterrier C., Kostal L., Moe R.O., 2016. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, (174), 83-89.

Poveda, 2021. *Agron. Sustain. Dev.*, (41), 5.

Purschke B., Scheibelberger R., Axmann S., Adler A., Jäger H., 2017. *Food Addit. Contam. A*, (34), 1410-1420.

Recoules E., Brevault N., Le Cadre P., Peyronnet C., Bouvarel I., Lessire M., 2016. *INRA Prod. Anim.*, (29), 129-140.

Riekkinen K., Väkeväinen K., Korhonen J., 2022. *Insects*, (13), 590.

Ruhnke I., Normant C., Campbell D.L.M., Iqbal Z., Lee C., Hinch G.N., Roberts J., 2018. *Anim. Nutr.* (4), 452-460.

Schäfer L., Grundmann S.M., Friedrichs S., Lütjohann D., Höring M., Liebisch G., Most E., Ringseis R., Eder K., 2023. *Arch. Anim. Nutr.*, (77), 121-140.

Schiavone A., De Marco M., Martínez S., Dabbou S., Renna M., Madrid J., Hernandez F., Rotolo L., Costa P., Gai F., Gasco L., 2017. *J. Anim. Sci. Biotech.*, (8), 51.

Schiavone A., Dabbou S., Petracci M., Zampiga M., Sirri F., Biasato I., Gai F., Gasco L., 2019. *Animal*, (13), 2397-2405.

Secci G., Bovera F., Nizza S., Baronti N., Gasco L., Conte G., Serra A., Bonelli A., Parisi G., 2018. *Animal*, (12), 2191-2197.

Sedano L., Bussière F., Vian M., Guidou C., Trespeuch C., Silvestre A., 2024. 15^{èmes} JRA-PFG, *sous presse*.

Sedgh-Gooya S., Torki M., Darbemamieh M., Khamisabadi H., Torshizi M.A.K., Abdolmohamadi A., 2021. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, (105), 119-128.

Sedgh-Gooya S., Torki M., Darbemamieh M., Khamisabadi H., Abdolmohamadi A., 2022. *Vet. Med. Sci.*, (8), 2050-2058.

Shah A.A., Totakul P., Matra M., Cherdthong A., Hanboonsong Y., Wanapat M., 2022. *Anim. Biosci.*, (35), 317-331.

Smetana S., Spykman R., Heinz R., 2021. *J. Insects Food Feed*, (7), 553-571.

Smetana S., Bhatia A., Batta U., Mouhrim N., Tonda A., 2023. *Anim. Front.*, (13), 112-120.

Smets R., Claes J., Van Der Borgh M., 2021. *Anal. Bioanal. Chem.*, (413), 6365-6377.

Sogari G., Amato M., Biasato I., Chiesa I., Gasco L., 2019. *Animals*, (9), 119.

Star L., Arsiwalla T., Molist F., Leushuis R., Dalim M., Paul A., 2020. *Animals*, (10), 216.

Tahamtani F.M., Ivarsson E., Wiklicky V., Lalander C., Wall H., Rodenburg T.B., Tuytens F.A.M., Hernandez C.E., 2021. *Poult. Sci.*, (100), 101400.

Tainika B., Şekeroğlu A., Akyol A., Waithaka Ng'ang'a Z., 2023. *World's Poult. Sci. J.*, (79), 1-45.

Thévenot A., Rivera J.L., Wilfart A., Maillard F., Hassouna M., Senga-Kiesse T., Le Féon S., Aubin J., 2018. *J. Clean. Prod.*, (170), 1260-1267.

Tonk M., Vilcinskas A., 2017. *Curr. Trop. Med. Chem.*, (17), 554-575.

Van Huis A., Oonincx D.G.A.B., 2017. *Agron. Sustain. Dev.*, (37), 43.

Van Looveren N., Verbaet L., Frooninckx L., Van Miert S., Van Campenhout L., Van Der Borgh M., Vandeweyer D., 2023. *Waste Manage.*, (164), 209-218.

Veldkamp T., Meijer N., Alleweldt F., Deruyter D., Van Campenhout L., Gasco L., Roos N., Smetana S., Fernandes A., van der Fels-Klerx H.J., 2022. *Insects*, (13), 281.

Verbeke W., Sprangers T., De Clercq P., De Smet S., Sas B., Eeckhout M., 2015. *Anim. Feed Sci. Tech.*, (204), 72-87.

Wang S., Zeng X.F., Yang Q., Qiao S.Y., 2016. *Int. J. Mol. Sci.*, (17), 603.

Wu Y., Zhang H., Zhang R., Cao G., Li Q., Zhang B., Wang Y., Yang C., 2021. *Poult. Sci.*, (100), 101315.

Yan Y., Zhang J., Xiaochen C., Zhanbin W., 2023. *Vet. Sci.*, (10), 364.

Zhao J., Kawasaki K., Miyawaki H., Hirayasu H., Izumo A., Iwase S.-I., Kasai K., 2022. *Poult. Sci.*, (101), 101986.