Série Sources alternatives de protéines dans l'alimentation animale

Les insectes comme alternative aux protéines importées

Annelies Bracher
Agroscope, 1740 Posieux, Suisse
Renseignements: Annelies Bracher, e-mail: annelies.bracher@agroscope.admin.ch

Les larves saprophages de la mouche soldat noire sont des recycleurs de déchets polyvalents avec un grand potentiel comme source alternative de protéines (sources: feedipedia.com; Enterrafeed.com)

Introduction

Environ un quart de l'approvisionnement en protéines du cheptel d'animaux de rente suisse est couvert par des sources de protéines importées (Bracher 2019a). Alors que 86,5 % des besoins des bovins proviennent de la production fourragère et des grandes cultures suisses, cette part n'est que de 34,5 % pour les porcs et de 13,8 % pour la volaille. Par conséquent, la production porcine et avicole dépend de l'importation de protéines de haute qualité. La forte dépendance à l'égard des importations et l'origine en partie problématique de celles-ci, la surface restreinte des terres arables en Suisse et l'objectif d'une production primaire économisant les ressources justifient l'urgence de la recherche de sources alternatives de protéines. Dans les deux articles précédents de la série Sources alternatives de protéines dans l'alimentation animale (Bracher 2019a, 2019b), il a été démontré que les légumineuses et les sous-produits des graines oléagineuses apportent déjà une contribution précieuse à l'autonomie alimentaire ou pourraient y contribuer encore davantage. Toutefois, en raison des possibilités limitées d'extension des cultures (motifs: rotation des cultures, ventes d'huile, rendement modeste en protéines par hectare, terres arables limitées, concurrence avec les surfaces céréalières), il n'est pas possible de combler le déficit en protéines de manière substantielle. De ce point de vue, seules les sources de protéines produites indépendamment des terres cultivables offrent des avantages supplémentaires. Les in-

sectes saprophages en particulier, c'est-à-dire qui se nourrissent de matières organiques en décomposition, remplissent cette condition. Le recyclage des déchets organiques de toutes sortes par les insectes, y compris les excréments d'animaux, transforme les substrats de moindre qualité en matières premières de haute qualité destinées à l'industrie des aliments pour animaux et à l'industrie alimentaire. Les difficultés à venir en matière d'approvisionnement en viande et en protéines pour une population mondiale toujours plus nombreuse exigent des solutions innovantes. Le recyclage et la valorisation des nutriments issus des déchets génèrent des protéines d'insectes qui peuvent être une alternative au soja et à la farine de poisson sans concurrencer la production des grandes cultures. Ces innovations favorisent les systèmes de production agricole économes en ressources, tant au niveau local qu'au niveau mondial. Selon une étude de la FAO (2011), un tiers de la production alimentaire se perd entre la récolte et la consommation. Les pertes sont particulièrement élevées (jusqu'à 50 %) dans le cas des fruits et légumes. Les insectes peuvent contribuer à valoriser les déchets organiques et à mettre ainsi un frein au gaspillage alimentaire.

Les insectes sont une source traditionnelle de nourriture dans de nombreux pays subtropicaux et tropicaux (Asie, Afrique, Amérique latine, Océanie), où environ 2000 espèces comestibles différentes, la plupart récoltées, mais aussi produites à petite échelle, complètent le menu alimentaire des consommateurs-trices (van Huis *et al.* 2013; Akhtar et Isman 2018). En Europe et dans les cultures occidentales, on ne connaît pas cette tradition alimentaire. Or, les insectes font partie du menu naturel des poissons, des reptiles, des oiseaux, de la volaille ainsi que dans une certaine mesure des porcs et constituent une source alternative de protéines. Les ruminants quant à eux en sont exclus. Dans l'Union européenne, les insectes sont soumis à une législation stricte, car ils sont considérés comme des animaux de rente ou comme protéines animales. Depuis 2018, les protéines d'insectes transformées de sept espèces d'insectes sont autorisées en Suisse dans les aliments pour poissons, mais les excréments d'animaux et les déchets alimentaires contenant de la viande sont interdits comme substrat nutritif. Cette restriction limite considérablement à l'heure actuelle le potentiel de recyclage des déchets. L'extension de l'utilisation des protéines d'insectes aux porcs et à la volaille et les substrats nutritifs autorisés est l'objectif déclaré de l'IPIFF (*International Platform of Insects for Food and Feed* 2019). Les potentiels et les risques qui y sont associés sont examinés ci-après.

Résumé

Les insectes saprophages valorisent la matière organique des déchets et produisent une biomasse d'insectes riche en protéines et en matière grasse sans concurrencer les terres cultivables. Depuis 2017, l'UE a autorisé dans un premier temps sept espèces d'insectes pour l'alimentation des poissons. Les plus prometteuses sont: la mouche soldat noire (MSN; *Hermetia illucens*), la mouche domestique (MD; *Musca domestica*), le ténébrion meunier ou ver de farine (VF; *Tenebrio molitor*) et le grillon domestique (GD; *Acheta domesticus*). Les larves et les nymphes sont les stades les plus riches en éléments nutritifs avec des teneurs en matière azotée (MA) allant de 400 g/kg MS pour la MSN à 665 g/kg MS pour le GD. La teneur en matière grasse varie considérablement et peut atteindre en moyenne 300 g/kg MS dans le cas des larves de la MSN ou du VF. Les produits du commerce à base de larves d'insectes sont souvent commercialisés sous forme de farines dégraissées présentant une teneur en MA d'environ 620 g/kg de MS, ce qui est proche de celle de la farine de poisson. La qualité des protéines varie selon l'espèce d'insectes et le substrat nutritif. Comparées aux protéines de soja, les protéines d'insectes contiennent systématiquement moins de cystine, de phénylalanine et d'arginine. Avec 6,5 g lys/100 g MA, les protéines de la MD dépassent le profil du soja, tandis que la MSN, le VF et le GD ont des teneurs légèrement inférieures à 6 g Lys/100 g MA. La digestibilité des acides aminés chez les porcelets et les poulets de chair est généralement supérieure à 80 %. Les profils d'acides gras des graisses d'insectes dépendent de l'espèce et peuvent être modulés en fonction du substrat alimentaire. La graisse de la MSN se caractérise par un haut degré de saturation, dû à la teneur élevée en acide laurique (C12:0) de plus de 40 %. Il en résulte un indice IPI faible et favorable pour les porcs à l'engrais. La graisse du VF est riche en acide oléique (C18:1), tandis que celle du GD se caractérise par des proportions élevées en C16:1. Les insectes disposent d'un mécanisme de défense efficace grâce à la production de peptides antimicrobiens (PAM), ce qui garantit leur survie dans des environnements à forte charge microbienne. Les insectes sont considérés comme un réservoir pour de futurs antibiotiques. Les larves de la MSN sont particulièrement adaptées à la valorisation des déchets organiques. Leurs protéines représentent une alternative écologique au soja et à la farine de poisson et réduisent la dépendance aux importations. La graisse pressée convient à la production de biodiesel. Des lacunes dans les connaissances sur l'utilisation des protéines d'insectes dans l'alimentation des porcs indiquent un besoin de recherches.

Matériel et méthodes

La base de données pour établir les profils nutritionnels provient exclusivement d'articles publiés entre 1997 et 2019 et, dans la mesure du possible, des articles originaux cités dans les articles de synthèse. Les teneurs en éléments nutritifs se réfèrent à la matière sèche (MS) et, si nécessaire, ont été converties à partir de la matière fraîche. Pour des raisons de comparabilité, les profils d'acides aminés ont été convertis en g/100 g de matière azotée (MA), la teneur en MA ayant été dérivée de N × 6,25. Toute la gamme des substrats nutritifs possibles pour l'alimentation des insectes a été prise en compte afin d'estimer l'étendue complète de la variabilité des éléments nutritifs et les possibilités d'influence.

Comme dans les articles précédents, l'évaluation de la qualité alimentaire des insectes en tant que source de protéines est basée sur le profil d'exigences idéal, qui prend comme référence le profil nutritionnel des produits à base de soja. Les exigences en matière de qualité protéique sont basées sur les besoins de porcelets exigeants (Bracher 2019a). Vu que les insectes sont un nouveau type d'aliments, l'accent est mis sur les informations nutritionnelles disponibles à ce jour, y compris les profils d'acides gras.

Résultats et discussion

Insectes – un terme générique

Le profil de risques établi par l'EFSA (2015) classe douze espèces d'insectes à fort potentiel d'utilisation en Europe comme denrées alimentaires ou aliments pour animaux. Il s'agit notamment d'espèces de mouches, de coléoptères (ver de farine), de mites, de grillons et de sauterelles. Depuis 2017, sept espèces (tabl. 1) ont été autorisées pour l'alimentation des poissons avec des restrictions dans l'utilisation de certains substrats nutritifs. Les insectes passent par plusieurs stades de développement au cours d'une métamorphose (fig. 1), dont la durée dépend de l'espèce, du substrat nutritif, de l'humidité de l'air et de la température. Les larves de mouches et de coléoptères riches en éléments nutritifs sont le stade de récolte idéal pour la transformation ultérieure en aliments pour animaux et autres produits, tandis que dans le cas des grillons et des sauterelles, ce sont les stades de nymphe et d'adulte que l'on privilégie. Des informations détaillées sur les processus de production se trouvent dans les travaux et instructions de Makkar *et al.* (2014), van Huis et Tomberlin (2017), Dortmans *et al.* (2017) et Gold *et al.* (2018). Certains aspects importants pour la production sont présentés ci-après.

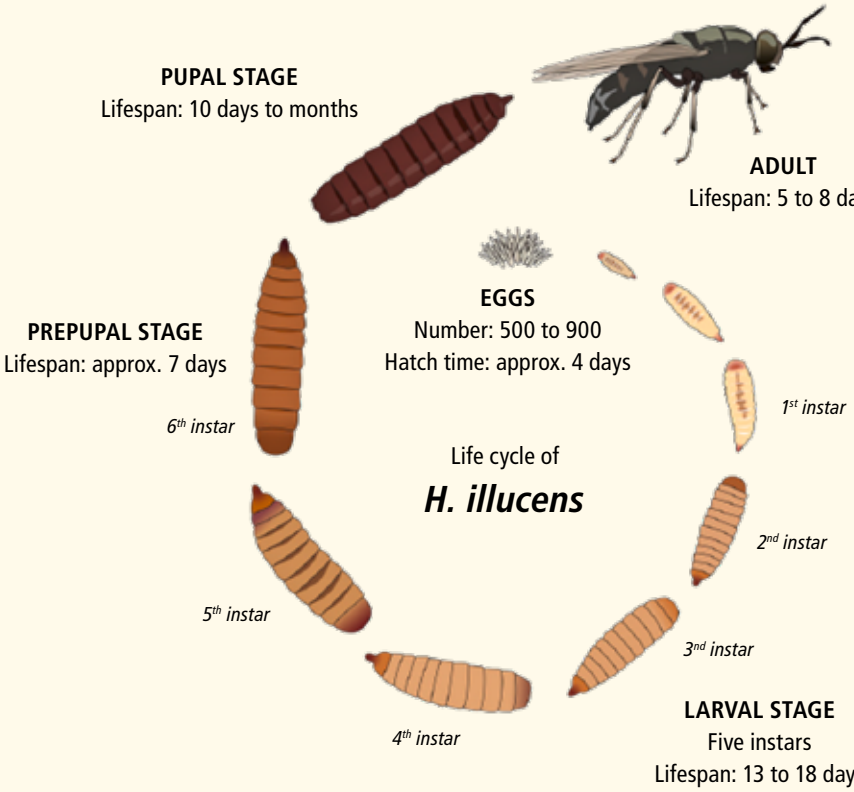

Figure 1 | Métamorphose de la mouche soldat noire *Hermetia illucens*. Source: (De Smets *et al.* 2018).

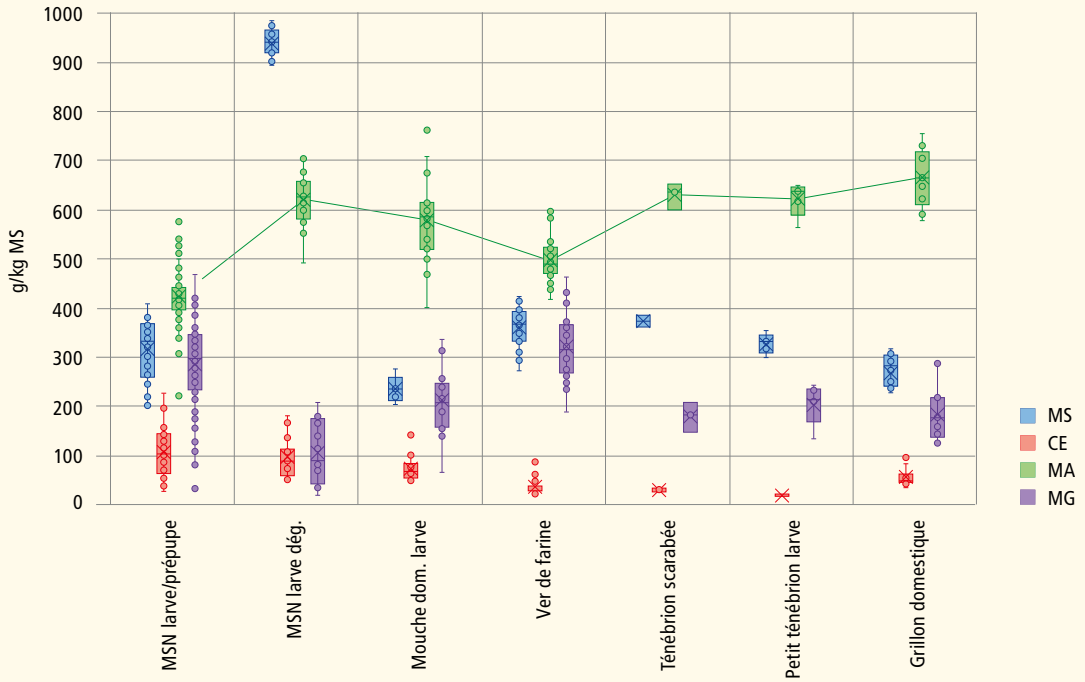

Figure 2 | Teneurs en nutriments de base des larves ou des formes adultes de la mouche soldat noire (n = 100), de la mouche domestique (n = 19), du ver de farine (n = 42), du petit ténébrion (n = 6) et du grillon domestique (n = 17) tirées des ouvrages cités dans la liste bibliographique (MSN = mouche soldat noire; dég.: dégraissée; dom. = domestique; MS = matière sèche; CE = cendres brutes; MA = matière azotée; MG = matière grasse).

La **mouche soldat noire** (*Hermetia illucens*) est originaire des régions tropicales et subtropicales, mais elle s'est également répandue en Europe du Sud. Une température d'environ 28 °C est nécessaire pour la ponte et le développement larvaire. À une température inférieure à 20 °C, l'activité métabolique est fortement limitée, la durée du développement se prolonge de plus de 200 jours et la ponte peut s'arrêter presque complètement (Shumo *et al.* 2019). Dans les régions climatiques tempérées, l'efficacité de la production dépend d'une source de chaleur. La capacité des larves à survivre sur une large gamme de matières organiques (déchets) justifie le grand potentiel qui leur est attribué comme source alternative de protéines. Les substrats nutritifs doivent avoir une teneur en eau d'environ 70 %; autrement dit, les larves ne dépendent d'aucun apport supplémentaire en eau. Le cycle générationnel est de 5 à 7 semaines si la base alimentaire et la température sont suffisantes. L'une des particularités de la mouche soldat noire est que les mouches adultes ne mangent ni ne piquent et se comportent de manière inoffensive. Elles vivent des réserves de graisse constituées au stade larvaire et ne sont donc pas des vecteurs de maladies. Un autre comportement avantageux de cette espèce de mouche est le fait que, par instinct, les prépupes cherchent un endroit sec pour leur métamorphose. À l'aide de récipients équipés de rampes, les prépupes, qui ont en plus l'intestin vide, peuvent être facilement récoltées. Le stade larvaire – la «phase d'engraissement» proprement dite – dure de 15 à 55 jours selon le substrat; elle peut toutefois se prolonger jusqu'à quatre mois lors de conditions défavorables. Les larves mangent de 25 à 500 mg de matière fraîche par jour. Durant cette phase, elles croissent de façon impressionnante, car elles se nourrissent constamment. Dans l'étude de Tschirner et Simon (2015), les larves étudiées ont augmenté leur poids initial de plus de cent fois en 15 jours.

La **mouche domestique** (*Musca domestica*) est un compagnon cosmopolite et agaçant des humains, des animaux de rente et pullule sur les déchets. Elle peut transmettre des maladies, car les mouches adultes mangent partout et la ponte a lieu directement dans la matière organique en décomposition. Le cycle générationnel est extrêmement court (une à deux semaines). L'intérêt d'élever des larves de mouches réside dans le fait qu'elles valorisent le fumier de poules et d'autres déchets.

Tableau 1 | Insectes les plus prometteurs (larves, nymphes) actuellement autorisés dans la nourriture pour poissons.

Espèce d'insectes	Production	Substrats nutritifs
Mouche soldat noire (*Hermetia illucens*)	Stade de récolte: larves et prépupes, 30–300 mg Cycle larvaire: 15–55 jours Température idéale: 25–31 °C.	Omnivore; déchets organiques de toutes sortes, excréments Exemples: excréments animaux et humains, ordures ménagères, boues d'épuration, déchets d'abattoirs, déchets de fruits et légumes, sous-produits de meunerie, marc, déchets de poisson, pulpe de betterave sucrière, algues, mélasse, huile de lin, farine de luzerne, okara
Mouche domestique (*Musca domestica*)	Stade de récolte: larves Cycle larvaire: 5 jours Température idéale: 25–30 °C	Omnivore; déchets organiques de toutes sortes, excréments Exemples: fumier de poulailler, de porcherie et d'étable, fruits avariés, abats de poissons, sang
Ténébrion meunier ou ver de farine (*Tenebrio molitor*)	Stade de récolte: larves, 130–160 mg Cycle larvaire: 3–5 mois Température idéale: 18–25 °C	Omnivore; matières organiques végétales et animales Exemples: son, farine, miettes de pain et de biscuits, drêches de brasserie, pelures de pommes de terre, fruits et légumes, pelures de fruits, levure de bière, farine de soja, drêches de distillerie, mélasse, graines de lin
Petit ténébrion (*Alphitobus diaperinus*)	Stade de récolte: larves Cycle larvaire: 1–3 mois	Omnivore; Exemples: farine, miettes de pain et de biscuits, drêches de brasserie, pelures de pommes de terre, fruits et légumes frais, levure, drêches de distillerie, aliments pour volaille, huile de lin Parasite les stocks de denrées alimentaires, est capable de voler
Grillon domestique (*Acheta domesticus*)	Stade de récolte: nymphes et adultes, 190–390 mg De l'éclosion au stade adulte: 32–49 jours Température idéale: 26–32 °C Sensible aux densovirus Denrées alimentaires traditionnelles	Omnivore; matières organiques végétales et animales Exemples: aliments pour volaille, sous-produits céréaliers, pelures de pommes de terre, drêches, mélasse, miettes de biscuits, levure de bière, déchets alimentaires, ensilage de maïs, paille, fruits, restes de légumes, riz, herbe, huile de lin

Le **ténébrion meunier ou ver de farine** (*Tenebrio molitor*) est originaire d'Europe et est désormais connu dans le monde entier comme parasite des denrées alimentaires stockées. Vu que les adultes ne peuvent pas voler, leur propagation peut être contrôlée et le potentiel de ravage est considéré comme modéré. Leur élevage et leur détention sont faciles. Le cycle de développement est variable et dure de 280 à 630 jours. Les larves se transforment en pupes en l'espace de trois à quatre mois. Les exigences de température (18–25 °C) sont moins élevées que pour la mouche soldat. Le ver de farine est omnivore et se nourrit de matières végétales et animales. En plus des sous-produits céréaliers, les déchets de l'industrie alimentaire ont été inclus dans les rations d'essai. Les fruits et les légumes frais fournissent un approvisionnement en eau dans le cas d'une base alimentaire sèche.

Le **grillon domestique** (*Acheta domestica*) fait partie des insectes dont la métamorphose est incomplète. Des nymphes éclosent des œufs; elles ressemblent beaucoup aux grillons adultes. Seules les ailes se développent dans la dernière phase de la nymphose. La période optimale de récolte est atteinte lorsque 85 % des nymphes ont développé leurs ailes. En Asie du Sud-Est, les grillons sont une denrée appréciée et une délicatesse. En Thaïlande en particulier, les producteurs se sont tournés vers un élevage de grillons à petite échelle avec des matériaux simples. Les grillons adultes pèsent entre 190 à 390 mg; ils atteignent ce poids en 32 à 49 jours. Dans des conditions de température optimales (26 à 32 °C), il est possible de produire six à sept générations par an.

Les grillons sont certes omnivores, mais dans l'élevage de grillons, on utilise souvent des aliments pour volaille. Des résultats médiocres avec de faibles taux de survie ont été obtenus avec les déchets et sous-produits de l'industrie alimentaire (Lundy et Parella 2015; Oonincx *et al.* 2015b). Même si l'on obtient une meilleure conversion que les poulets de chair avec des aliments pour volaille, l'alimentation par phases est une stratégie appropriée pour permettre une valorisation judicieuse des déchets, au moins pendant la phase finale. Dobermann *et al.* (2019) ont réussi à mettre en œuvre cette stratégie avec succès dans l'élevage du grillon provençal (*Gryllus bimaculatus*).

Figure 3 | Profil des acides aminés essentiels dans les protéines d'insectes tirés des ouvrages cités dans la liste bibliographique par rapport au tourteau d'extraction/de presse du soja (MSN = mouche soldat noire; dom. = domestique).

Les insectes sont efficaces en cas de…

Comme les insectes sont des animaux à sang froid, ils n'ont pas besoin d'énergie pour maintenir leur température corporelle, ce qui leur permet d'obtenir une valorisation alimentaire principalement bonne jusqu'à moins de 2 kg d'aliments/kg de croissance. En pratique, les résultats varient en fonction de la base alimentaire (Oonincx *et al.* 2015; Lundy et Parella 2015; Tschirner et Simon 2015; van Broekhoven *et al.* 2015; Meneguz *et al.* 2018). Il existe différentes définitions et façons de calculer l'efficience. Les entomologistes utilisent le terme ECI (= *efficiency of ingested feed*) calculé en tant que (kg de croissance/kg d'aliments) * 100 en utilisant comme base la MF ou MS pour les aliments. La question est de savoir si l'ingestion peut être mesurée avec précision. Souvent, on part simplement de l'offre en substrat. Des valeurs ECI de 3 à 45 % ont été déterminées. Dans la gestion des déchets, on parle d'efficience de conversion de la biomasse calculée comme suit (rendement en insectes (MS)/offre en déchets (MS)) * 100. Dans les études de Lalander *et al.* (2018), des larves de la mouche soldat noire (MSN) ont été produites sur divers déchets avec un rendement de 0,2–15,2 %. Des protéines ont été générées avec un rendement pouvant atteindre 80 %.

Les larves sont riches en protéines et en matière grasse

Les concentrations d'éléments nutritifs changent de façon dynamique au cours d'une métamorphose, comme l'ont montré Liu *et al.* (2017) à l'exemple de la mouche soldat noire. Les stades larvaire et prépupal tardifs comptent parmi les phases les plus riches en nutriments et il est judicieux de faire la récolte à ces stades. En plus du stade de développement, la composition nutritionnelle dépend de l'espèce d'insectes, avec une variation considérable au sein de l'espèce même (fig. 2). La teneur en matière grasse varie davantage que la teneur en protéines. La plupart des données sont disponibles pour la mouche soldat. Même avec une faible teneur en protéines inférieure à 100 g/kg MS dans le substrat nutritif, les larves accumulent les protéines jusqu'à atteindre le niveau habituel pour l'espèce. La formation de la matière grasse, par contre, dépend du rapport protéines/glucides dans le substrat nutritif. En particulier, les sources de glucides facilement digestibles favorisent le stockage de la matière grasse (Barragan-Fonseca *et al.* 2018a, b, 2019; Danieli *et al.* 2019). La teneur moyenne en protéines est supérieure à 400 g/kg MS. Le grillon domestique est champion en la matière, puisque qu'avec une teneur d'environ 660 g MA/kg MS, il se situe dans la gamme des farines de poisson. D'autres types de grillons

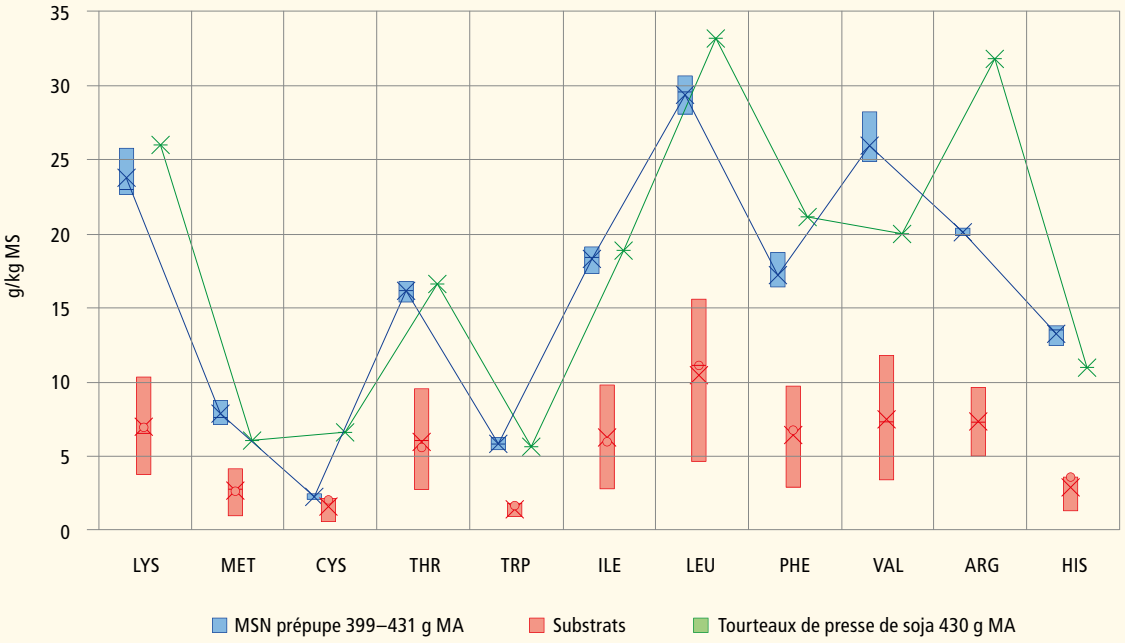

Figure 4 | Teneur absolue en acides aminés de la mouche soldat (prépupes) nourrie avec des déchets végétaux et des résidus de biogaz, par rapport au tourteau de presse du soja (selon Spranghers *et al.* 2017).

atteignent les mêmes valeurs. La teneur en protéines des insectes permet de nombreuses possibilités d'application. D'autres sources de protéines comme le tourteau d'extraction du soja et la farine de poisson peuvent être partiellement remplacés. C'est en particulier dans l'alimentation riche en protéines (MA >40 %) des poissons carnivores que la farine de poisson peut être largement remplacée par des protéines d'insectes (Rumpold *et al.* 2018, Nogales-Merida *et al.* 2018).

La teneur élevée en matière grasse (MG) des larves de la mouche soldat noire et du ver de farine (environ 250–400 g/kg MS) et la faible teneur en MS limitent leur utilisation dans les mélanges. De plus, les besoins en MG des animaux monogastriques seraient rapidement dépassés. La teneur en MG dans les mélanges est généralement inférieure à 10 %. Les produits à base de larves de la mouche soldat noire disponibles dans le commerce sont donc vendus sous la forme de farine dégraissée et séchée, ce qui augmente la teneur moyenne en protéines à 620 g/kg MS (fig. 2). Avec le dégraissage mécanique, la teneur en MG obtenue oscille entre 100–200 g/kg MS, ce qui correspond à la teneur en MG des tourteaux de presse des graines oléagineuses. Les teneurs en MG inférieures à 100 g/kg MS sont obtenues par extraction au solvant. Les produits à base de mouches soldat présentent une teneur relativement élevée en cendres.

L'analyse classique des nutriments atteint certaines limites dans le cas des insectes. Les insectes ne contiennent pas de fibres, mais une enveloppe externe contenant de la chitine (squelette externe). La chitine est un polysaccharide contenant de l'azote (acétyle-glucosamine) qui est très semblable à la cellulose. La chitine est donc incluse dans la fraction ADF. Lors de la détermination de l'azote total et de la conversion usuelle en protéines par un facteur de 6,25, la teneur en protéines est surestimée. 100 g de chitine contiennent 6,897 g de N. Selon les études de Caligiani *et al.* (2018) et de Janssen *et al.* (2017), la teneur en chitine des larves de la mouche soldat et du ver de farine varie entre 4,4 et 9,1 % (en MS), ce qui représente 3 à 9,4 % de l'azote total. Comme la proportion de matière azotée non protéique peut s'élever de 11 à 26 %, la chitine n'est pas la seule raison de la surestimation des protéines. Les auteurs proposent un facteur de conversion de l'azote de 4,76 pour les protéines d'insectes. Comme alternative, on peut estimer la teneur en chitine à partir des concentrations d'ADF et d'ADL (Hahn *et al.* 2018) et corriger ainsi la teneur en protéines. Une autre option est l'analyse directe des acides aminés. Les animaux monogastriques ont principalement besoin d'acides aminés et non de MA.

Qualité des protéines

Une première évaluation de la qualité des protéines résulte des valeurs du profil des acides aminés essentiels, qui sont toutes dérivées de la MA = N × 6,25 et comparées aux protéines de soja présentées dans la figure 3. La

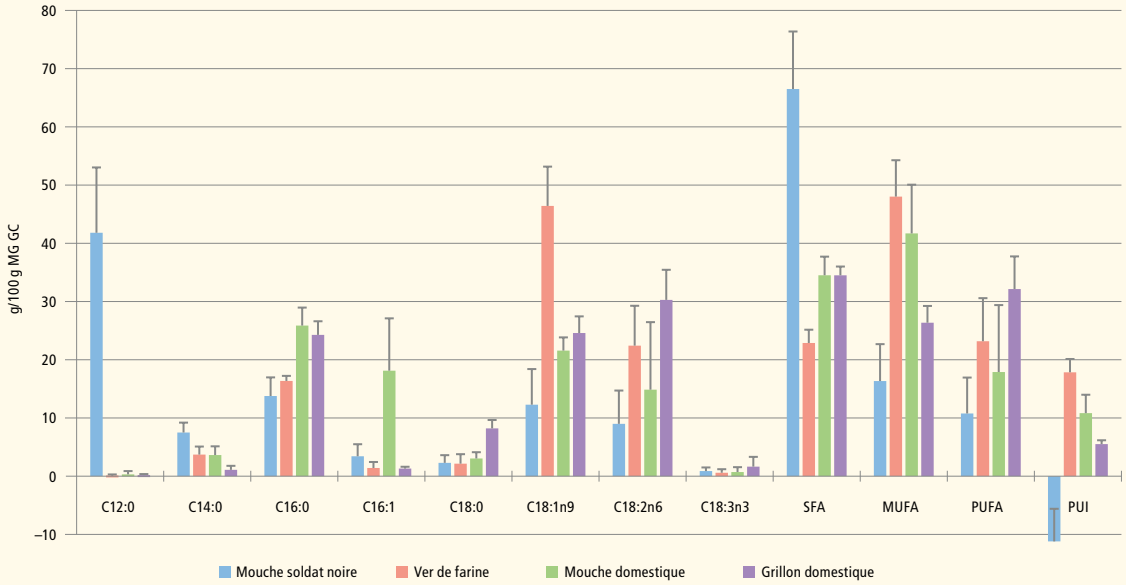

Figure 5 | Composition en acides gras et indice de graisse de la matière grasse des insectes (larves, prépupes, nymphes) tirés des ouvrages cités dans la liste bibliographique (valeurs moyennes et écarts types; GC = chromatographie en phase gazeuse; SFA = acides gras saturés, MUFA = acides monoénoïques, PUFA = acides polyéniques; IPI = 0,3 * SFA + 0,457 * MUFA + 0,119 * PUFA).

variance des différents acides aminés est généralement plus élevée dans les protéines d'insectes que dans les protéines de soja. Les différences en matière d'analyse en sont une cause. D'autres raisons possibles sont les substrats nutritifs variables avec une qualité protéique partiellement inférieure. Par rapport au profil du soja, les protéines d'insectes contiennent en moyenne moins de cystine (acide aminé contenant du S), de phénylalanine et d'arginine. En revanche, la part relative de tyrosine et de valine (à l'exception de la mouche domestique) est plus élevée que dans les protéines de soja. Les autres teneurs en acides aminés varient selon l'espèce d'insectes. Avec 6,5 g de lysine/100 g MA, la mouche domestique dépasse le profil du soja, tandis que chez la mouche soldat, le ver de farine et le grillon domestique, cette valeur est légèrement en dessous de 6 g de lysine/100 g MA, ce qui a été défini comme profil idéal (Bracher 2019a). Les teneurs en thréonine, en isoleucine et en histidine sont le plus souvent similaires à celles du soja. La protéine de la mouche domestique se distingue par ses teneurs relativement faibles en isoleucine, en leucine et en valine. Dans le cas de la cystine, le profil idéal n'est dans l'ensemble pas atteint. La part relative en tryptophane chez le ver de farine et le grillon domestique est faible avec des valeurs inférieures à 1 g/100 g MA.

Du point de vue de la valorisation des déchets, les travaux de Spranghers *et al.* (2017) ont montré que les larves de la mouche soldat sont capables de transformer des substrats de qualité inférieure en protéines d'insectes de qualité élevée (fig. 4). On obtient les mêmes quantités d'acides aminés que dans les tourteaux de presse du soja avec une teneur en protéines comparable. Seule la teneur en cystine n'est pas accumulée. Cette capacité de valorisation est un argument important en faveur des protéines d'insectes.

En plus de la quantité et du profil des acides aminés, la qualité des protéines dépend également de leur digestibilité. Chez les poulets de chair, une digestibilité moyenne des acides aminés essentiels de 77,6 à 79,2 % a été mesurée avec des larves de la mouche soldat dégraissées, de 84,3 à 95 % avec des larves de la mouche domestique et de 84 % avec des larves du ver de farine (DeMarco *et al.* 2015, Hall *et al.* 2918, Pretorius 2011, Schiavone *et al.* 2017b). Dans l'étude de synthèse sur les protéines d'insectes dans l'alimentation des poissons (Nogales-Merida *et al.* 2018), les valeurs de la digestibilité de la MA varient généralement entre 80 et 95 %. Les acides aminés des larves de la mouche soldat ont été digérés à 84,96 % dans le cas des porcelets après un dégraissage mécanique et à 73,13 % après un dégraissage au solvant (Kortelainen *et al.* 2014). Une digestibilité de plus de 80 % peut être considérée comme bonne. Chez les porcs à l'engrais, 10 % de larves du ver de farine dans la ration ont amélioré la digestibilité des éléments nutritifs par rapport aux farines de poisson ou de viande (Yoo *et al.* 2019). L'influence des procédés de transformation

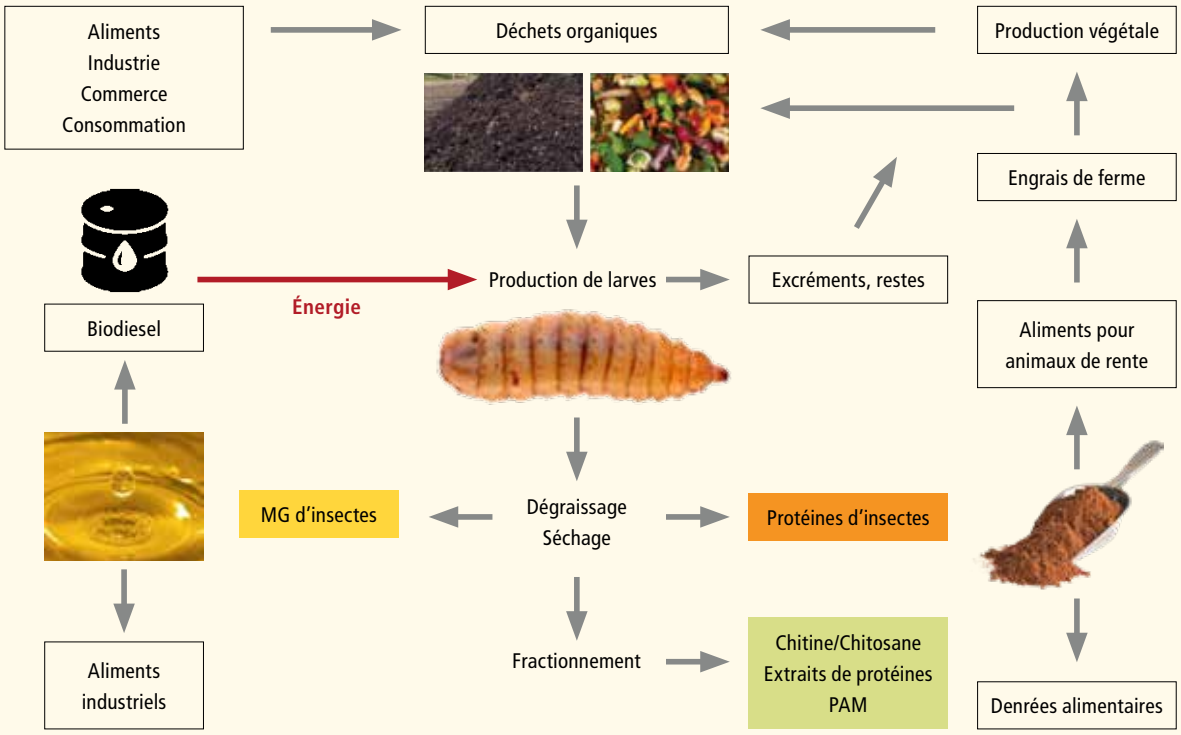

Figure 6 | Schéma de recyclage pour une production durable de protéines d'insectes, de graisse d'insectes et d'autres produits à l'exemple de la mouche soldat (PAM = peptides antimicrobiens).

tels que le dégraissage et le traitement thermique doit être étayée par des essais supplémentaires. Les données disponibles pour l'évaluation de la qualité des protéines dans l'alimentation des porcs sont encore globalement incomplètes. Étant donné que les besoins en acides aminés digestibles en Suisse sont exprimés par rapport à l'énergie, une évaluation énergétique fiable des protéines d'insectes est nécessaire. Or, ces informations font encore défaut.

Qualité de la graisse

Comme le montre la figure 2, les larves d'insectes sont riches en matière grasse, leur teneur pouvant cependant varier considérablement. Même les produits dégraissés auront une influence considérable sur la qualité de la matière grasse dans la ration totale des animaux monogastriques. Les profils d'acides gras de la matière grasse d'insectes dépendent de l'espèce (fig. 5) et présentent une certaine plasticité par rapport à la composition de la matière grasse présente dans le substrat nutritif, comme le montrent les écarts types. Les profils d'acides gras sont donnés en g/100 g MG-GC (somme des acides gras avec teneur en glycérides). Avec une teneur en acides gras saturés (SFA) de 66,5 %, la matière grasse des larves de la mouche soldat présente un degré de saturation élevé, ce qui est principalement dû à la teneur très élevée en acide laurique (C12:0) de plus de 40 %. En cela, la graisse des larves de la mouche soldat diffère très nettement de celle des autres espèces d'insectes. Il en résulte un indice de graisse (valeur IPI) de –10 très favorable pour l'alimentation des porcs à l'engrais. Cependant, l'acide laurique est également responsable d'un goût de savon dans la graisse des animaux monogastriques et peut donc avoir une influence négative sur la qualité du produit final (produits carnés et produits à base de matière grasse, œufs). L'acide laurique est rapidement absorbé par les animaux et utilisé efficacement comme source d'énergie. C'est probablement la raison principale qui explique la teneur élevée en acide laurique de la MG de la mouche soldat qui, rappelons-le, ne se nourrit pas à l'état adulte et vit uniquement des réserves de graisse constituées pendant son développement. Le remplacement de l'huile de soja par la graisse de la mouche soldat dans l'alimentation des poulets de chair a fait passer la teneur en acide laurique dans la matière grasse de la viande de poitrine de 0,09 % à 8,5 % (Schiavone *et al.*

2017a). Aucune dégustation n'a été effectuée dans cet essai. L'effet antimicrobien de l'acide laurique (Spranghers *et al.* 2018), qui pourrait rendre intéressante son utilisation comme substitut antibiotique chez les porcelets sevrés, est une autre propriété souhaitable dans le cas présent. La composition en acides gras des larves de la mouche soldat répond également très bien aux exigences de la production de biodiesel (Surendra *et al.* 2016), la graisse qui résulte du dégraissage des larves pouvant être utilisée judicieusement à cet effet.

La concentration d'acide oléique (C18:1) est très élevée dans la graisse du ver de farine oléique et atteint une proportion d'environ 45 %. Il en résulte – ce qui n'est pas souhaitable – l'indice IPI le plus élevé de toutes les graisses d'insectes; autrement dit, son utilisation est limitée dans les rations des porcs à l'engrais. La proportion relativement élevée d'acide palmitoléique (C16:1) caractérise la composition de la matière grasse des larves de la mouche domestique. Quant à la graisse du grillon domestique, elle se distingue de celle des autres insectes par sa teneur comparativement élevée en acide linoléique (C18:2) d'environ 30 %. Tous les insectes ont en commun une très faible proportion d'acide linolénique (C18:3). Les acides gras ayant plus de 18 atomes de carbone ne sont présents qu'en très petites quantités. Les déchets de poissons (St. Hilaire *et al.* 2007), l'alimentation à base d'algues (Liland *et al.* 2017) et l'huile de lin (Oonincx *et al.* 2019) ont été utilisés pour enrichir de façon ciblée la composition de la matière grasse des insectes avec des acides gras n-3 polyinsaturés, ce qui s'est avéré une réussite jusqu'à un certain degré. La graisse d'insectes peut être modulée en fonction du domaine d'application.

Composés bioactifs: peptides antimicrobiens, chitine

Les insectes saprophages survivent sur des substrats à forte charge microbienne grâce à des mécanismes de défense robustes et adaptables. En produisant des peptides antimicrobiens (PAM), les larves ont développé la capacité de faire face à une charge variable de bactéries, virus et champignons. Plus de 50 gènes ont été identifiés chez la mouche soldat qui codent un large spectre de classes de PAM (attacine, cécropine, défensine, diptericine). Selon le substrat, ces PAM sont renforcés (Müller *et al.* 2017; Vogel *et al.* 2018). Les PAM réduisent entre autres la charge en salmonelles et en *E. coli* dans le fumier de poulets et de bovins ainsi que dans les fèces humaines en présence de larves de la mouche soldat. Certains PAM agissent même contre les germes pathogènes résistants aux antibiotiques comme *S. aureus* (Park *et al.* 2015). La poursuite de l'isolement et de la caractérisation des PAM ouvre des champs de recherche totalement nouveaux et un large éventail d'applications dans la gestion des déchets, l'alimentation animale (Wang *et al.* 2016; Jozefiak et Engberg 2017) et la médecine humaine (Tonk et Vilcinskas 2017). Les insectes sont considérés comme le réservoir d'une nouvelle génération d'antibiotiques. La distribution de larves d'insectes aux animaux de rente a des effets bénéfiques sur leur santé, dont les effets ne sont pas détruits par le traitement thermique.

La chitine, composant de l'exosquelette des insectes, a des propriétés bioactives, c'est-à-dire probiotiques et antimicrobiennes (Gasco *et al.* 2018). La chitine peut être enrichie par fractionnement et transformée en chitosane par désacétylation (Caligiani *et al.* 2018). Le chitosane a lui aussi des effets antimicrobiens et anti-inflammatoires et lie les lipides très efficacement (Müller *et al.* 2017). Il est utilisé en médecine, en cosmétique et dans l'industrie textile.

Réduction et valorisation durable des déchets

Les larves de la mouche soldat sont particulièrement adaptées à la production de protéines d'insectes à partir de déchets organiques de toutes sortes (Gold *et al.* 2018; Lalander *et al.* 2019; Liu *et al.* 2019). Elles peuvent traiter efficacement de nombreux substrats grâce à une activité enzymatique élevée et à une flore intestinale adaptable, elles contribuent à l'hygiénisation des substrats initiaux microbiologiquement contaminés par la production de PAM (De Smet *et al.* 2018), réduisent la quantité de déchets et génèrent par ce biais des protéines, de la matière grasse et des substances bioactives (fig. 6).

La durabilité du système de production dépend des optimisations à chaque étape du processus et de la disponibilité régulière des substrats, ce qui constitue également un défi logistique. Dans une étude récemment publiée, il a été démontré que dans les conditions de l'Indonésie, la valorisation des déchets organiques par la mouche soldat permet de réduire de plus de la moitié les émissions de gaz à effet de serre par rapport au compostage direct et qu'en plus elle génère une source de protéines disponible à l'échelle locale (Mertenat *et al.* 2019). En Europe centrale, l'élevage des larves nécessite certes davantage d'énergie thermique, mais les protéines d'insectes sont produites de manière plus écologique que la viande de poulet, sur la base de sous-produits alimentaires utilisés pour nourrir les insectes (Smetana *et al.* 2019). Dans la production de larves du ver de farine, Grau *et al.* (2017) arrivent à des conclusions similaires.

La durabilité de la production de protéines (et de graisse) d'insectes à partir de déchets organiques a été certes démontrée, mais certains risques doivent être pris en

compte. D'une part, la sécurité microbiologique des produits à base d'insectes doit être garantie. L'IPIFF (2019a) a rédigé un guide de bonnes pratiques en matière d'hygiène. D'autre part, la surveillance des substrats utilisés est recommandée, afin de prévenir une éventuelle accumulation de métaux lourds et de composés toxiques (Diener *et al.* 2015; van der Fels-Klerx *et al.* 2016; Purschke *et al.* 2017). Les mycotoxines ne s'accumulent pas dans les larves de la mouche soldat ni dans celles du ver de farine, même si les substrats sont fortement contaminés (Purschke *et al.* 2017; Sanabria *et al.* 2019).

Les effets sur les performances lors de l'utilisation de protéines d'insectes dans les rations distribuées aux poissons, à la volaille et aux porcs sont résumés dans des études récentes (Gasco *et al.* 2019; Moula et Detilleux 2019). Les protéines d'insectes utilisées dans des proportions allant jusqu'à 30 % dans les rations sont une alternative aux autres sources de protéines. Les limites d'application pour la volaille et les poissons résultent d'un déficit en acides gras n-3 dans la graisse d'insectes. Selon la situation, la qualité des protéines nécessite une complémentation en acides aminés soufrés, en tryptophane et en thréonine. Étant donné qu'il existe encore des lacunes dans les données disponibles en ce qui concerne l'utilisation des protéines d'insectes dans l'alimentation des porcs, il est nécessaire de mener des recherches sur la valeur énergétique et protéique, les performances et la qualité de la viande. Le succès et le potentiel des protéines d'insectes en tant que source alternative dépendent notamment aussi du cadre juridique et des prix pratiqués.

Conclusions

Les arguments en faveur de l'utilisation des insectes sont nombreux:

- Les insectes font partie du menu alimentaire naturel des poissons, des reptiles, des oiseaux et de la volaille et en partie des porcs. Ils sont également une source de nourriture traditionnelle dans de nombreux pays (sub)tropicaux.
- Les insectes ont des taux de croissance et de reproduction élevés et des cycles de reproduction courts.
- Faisant partie du groupe des animaux à sang froid, les insectes présentent non seulement une bonne conversion alimentaire avec une température ambiante suffisante, mais ont aussi une faible empreinte écologique.
- Grâce au mode alimentaire saprophage des insectes, il est possible d'obtenir une valorisation durable des déchets organiques de toutes sortes, y compris les excréments humains et animaux. En transformant les déchets, on génère de la biomasse d'insectes riche en matière grasse et en protéines tout en réduisant la quantité de déchets.
- Les larves d'insectes sont riches en protéines et en graisse. La composition en acides aminés et en acides gras varie selon l'espèce d'insectes et le substrat nutritif.
- La graisse d'insecte peut être transformée en biodiesel.
- Les protéines d'insectes sont une alternative au soja et à la farine de poisson dans l'alimentation des animaux monogastriques et des poissons, ce qui réduit la dépendance aux importations.
- Les insectes produisent des substances bioactives, telles que l'acide laurique, la chitine, les peptides antimicrobiens.
- La production d'insectes requiert un faible besoin en surface et une faible consommation d'eau. Il n'y a aucune concurrence en matière de terres cultivables.
- Les insectes peuvent être produits dans le monde entier à petite échelle ou à une échelle industrielle. ■

Bibliographie

La bibliographie peut être obtenue auprès de l'auteur.

Riassunto

Insetti come fonte alternativa di proteine alle proteine importate

Gli insetti saprofagi utilizzano materiale organico proveniente da rifiuti e generano biomassa ricca di proteine e grassi. Rappresentano una fonte proteica ecologica, indipendente dalla terra coltivabile. Dal 2017, nell'UE sono state approvate 7 specie di insetti per l'alimentazione dei pesci. Le specie con i risultati più promettenti sono: «mosca soldato nera» (MS; *Hermetia illucens*), mosca domestica (MD; *Musca domestica*), tarma della farina (TF; *Tenebrio molitor*) e grillo domestico (GD; *Acheta domesticus*). Le larve e le ninfe sono gli stadi più nutrienti con gradi di proteina grezza (PG) che vanno da 400 g/kg sostanza secca (SS) per la MS a 665 g/kg SS per il GD. Il tenore di grasso varia notevolmente e può raggiungere in media 300 g/kg SS nel caso di larve di MS e TF. I prodotti in commercio di larve di insetti sono spesso commercializzati come farine sgrassate con un contenuto di PG di circa 620 g/kg SS. La qualità delle proteine varia a seconda della specie di insetti e della base dell'alimentazione. Rispetto alle proteine della soia, quelle degli insetti contengono sistematicamente percentuali inferiori di cistina, fenilalanina e arginina. Con 6,5 g Lys/100 g PG, la proteina MD supera il profilo della soia, mentre MS, TF e GD si attestano a poco meno di 6 g Lys/100 g PG. La digeribilità degli aminoacidi nei suinetti e nei polli ruspanti è solitamente superiore all'80 %. I profili degli acidi grassi dei grassi di insetti dipendono dalla specie e possono essere modulati tramite la base di alimentazione. Il grasso MS è caratterizzato da un alto grado di saturazione. Ciò è dovuto all'elevato tenore di acido laurico (C12:0) superiore al 40 %. Ne risulta un basso indice di insaturazione favorevole per i suini da ingrasso. Il grasso del TF è ricco di acido oleico (C18:1), mentre il grasso GD si distingue per l'elevata proporzione di C16:1, che aumenta l'indice di insaturazione. La produzione di peptidi antimicrobici (PAM) fornisce agli insetti un efficiente meccanismo di difesa che garantisce la loro sopravvivenza in ambienti con elevate cariche germinali. Gli insetti sono considerati come un serbatoio per antibiotici futuri. Le larve della «mosca soldato nera» sono particolarmente adatte al riciclaggio dei rifiuti. Le sue proteine rappresentano un'alternativa ecologica alla farina di soia e di pesce e riducono la dipendenza dalle importazioni. Il grasso spremuto è adatto alla produzione di biodiesel. Le lacune nelle conoscenze sull'uso delle proteine degli insetti nell'alimentazione dei suini richiedono però ulteriori studi.

Summary

Insects as alternative protein sources for imported protein-rich feed.

Saprophage insects convert diverse biowaste streams into protein- and fat-rich insect biomass generated independently of arable land. Since 2017, 7 insect species have been approved for fish feed in the EU so far. The most promising species are: black soldier fly (SF; *Hermetia illucens*), house fly (HF; *Musca domestica*), mealworm (MW; *Tenebrio molitor*), and house cricket (HC; *Acheta domesticus*). The larvae and nymphs are the most nutritious stages with crude protein (CP) contents ranging from 400 g/kg DM for SF to 665 g/kg DM for HC. The fat contents vary considerably and can reach on average 300 g/kg DM in the case of SF and MW larvae. Commercial products of insect larvae are often marketed as defatted meals with a CP content of around 620 g/kg DM. Protein quality varies with insect species and substrate. Compared to soy protein, insect proteins systematically contain lower proportions of cystine, phenylalanine and arginine. With 6.5 g Lys/100 g CP, protein from HF exceeds the soy profile, while SF, MW and HC are slightly below 6 g Lys/100 g CP. The amino acid digestibility of insect protein fed to piglets and broilers is usually over 80 %. The fatty acid profiles of insect fats are species-dependent and can be modulated via the feed basis. Fat from SF is characterized by a high degree of saturation mainly caused by the high content of lauric acid (C12:0) of more than 40 %. This results in a favorable low PUI index (fat quality index) for fattening pigs. The fat of MW is rich in oleic acid (C18:1), while HG fat stands out for its high percentage of C16:1. The production of antimicrobial peptides (AMP) provides insects with an efficient defense mechanism that guarantees their survival in environments with high germ loads. Insects are regarded as a reservoir for future antibiotics. Soldier fly larvae are particularly qualified for the recycling of biowaste. Their protein is a sustainable alternative to soya and fish meal and thus increases feed autonomy. In addition, the extracted fat can be converted to biodiesel. Knowledge gaps on the use of insect protein in pig feeding indicate a need for further research.

Key words: Insect protein, animal feed, nutrient profile, protein quality, fat quality.