

Caractéristiques et utilisations des frass de larves de Mouches Soldats Noir (*Hermetia illucens*) dans la production du plancton: Revue de littérature

[Characteristics and uses of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass for plankton production: A review]

S. A. Rodrigue TONOUKOUEN¹⁻², Théophile GODOME², Arnauld Sedjro Martin DJISSOU³, Dogbè Clément ADJAHOUINOU¹⁻²,
and Diane N. S. KPOGUE GANGBAZO¹⁻²

¹Laboratoires des Sciences Animales et Halieutiques, Unité de Recherche en Aquaculture et Gestion des Pêches, Ecole d'Aquaculture, Université Nationale d'Agriculture, Benin

²Laboratoire d'Hydrobiologie et de Recherche sur les Zones Humides, Unité de Recherche en Biologie Marine et Diversification en Aquaculture, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Benin

³Département de Pêche et Aquaculture, Institut Supérieur des Sciences et de Médecine Vétérinaire de Dalaba (ISSMV), Guinea

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Global population growth and the concomitant increase in biodegradable waste demand sustainable solutions for food production and waste management. Black soldier fly larvae (BSFL, *Hermetia illucens*) represent a promising approach by converting organic waste into protein-rich biomass and frass, a nutrient- and organic-matter-rich by-product. Frass contains nitrogen, phosphorus, potassium, micronutrients, chitin, and a beneficial microflora, and exhibits favorable physicochemical properties (pH 7-8, temperature 24-27 °C, low heavy metal content). Its nutritional composition varies according to the rearing substrate, thereby influencing the concentrations of N, P, K, and other mineral elements. BSFL frass has demonstrated fertilizing potential comparable to that of traditional organic amendments and can be used to stimulate plant growth, improve soil fertility, and enhance plant defense mechanisms through chitin and antimicrobial peptides. In aquaculture systems, frass promotes plankton production, including Chlorophyta and Chrysophyta, which serve as nutritional sources for fish larvae. However, application rates must be carefully optimized to avoid phytotoxicity or microbial imbalance. Overall, BSFL frass represents a multifunctional, environmentally friendly, and cost-effective organic resource that can be integrated into circular production chains, contributing simultaneously to waste valorization, reduced fertilizer costs, and the sustainability of agricultural and aquaculture systems.

KEYWORDS: frass, *Hermetia illucens*, organic fertilizer, plankton, aquaculture, circular bioeconomy.

RESUME: La croissance démographique mondiale et l'augmentation concomitante des déchets biodégradables imposent des solutions durables pour la production alimentaire et la gestion des déchets. Les Larves de Mouche Soldat Noire (LMSN, *Hermetia illucens*) constituent une approche prometteuse, transformant les déchets organiques en biomasse protéique et en frass, un sous-produit riche en nutriments et en matière organique. Le frass contient notamment de l'azote, du phosphore, du potassium, des micronutriments, de la chitine et une microflore bénéfique, et présente des caractéristiques physico-chimiques favorables (pH 7–8, températures 24–27 °C, faible teneur en métaux lourds). Sa composition nutritionnelle varie selon le substrat d'élevage, influençant les concentrations de N, P, K et autres éléments minéraux. Le frass a montré un potentiel fertilisant comparable aux amendements organiques traditionnels et peut être utilisé pour stimuler la croissance végétale, améliorer la fertilité des sols et renforcer les mécanismes de défense des plantes via la chitine et les peptides antimicrobiens.

Dans les systèmes aquacoles, le frass favorise la production de plancton, comme les Chlorophyta et Chrysophyta, servant de source nutritive pour les larves de poissons. Les applications optimales doivent cependant être ajustées pour éviter la phytotoxicité ou le déséquilibre microbien. Ainsi, le frass de LMSN représente une ressource organique multifonctionnelle, écologique et économique, intégrable dans les chaînes de production circulaires, et contribue simultanément à la valorisation des déchets, à la réduction des coûts en fertilisants et à la durabilité des systèmes agricoles et aquacoles.

MOTS-CLEFS: frass, *Hermetia illucens*, fertilisant organique, plancton, aquaculture, bioéconomie circulaire.

1 INTRODUCTION

Selon les données statistiques des Nations Unies, la population mondiale a atteint un nouveau sommet de 8 milliards de personnes en novembre 2022 [1]. Si cette tendance se poursuit, on estime qu'environ 10,4 milliards de personnes peupleront la terre à la mi-2080 [1]. Dans ce contexte, pour qu'il y ait une alimentation sûre et suffisante, il faut une production alimentaire de 60 % d'ici 2050 par rapport à 2005 [2].

Par ailleurs, d'ici 2050, la production mondiale de déchets devrait atteindre 3,4 milliards de tonnes, dont 44 % sont actuellement composés de matériaux biodégradables. Ces derniers sont plus présents dans les pays à faible ou moyen revenu, où 37 % des déchets sont éliminés en décharge contrôlée et 33 % en décharge à ciel ouvert [3]. Ces modes d'élimination des déchets biodégradables sont considérés comme des menaces majeures pour l'environnement, car ils entraînent le rejet de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et de la contamination du sol et de l'eau par des composés toxiques et des nutriments provenant des lixiviats, entre autres facteurs [4]. Les gouvernements ont ainsi la responsabilité de reconnaître les risques ainsi que les impacts socio-économiques et environnementaux liés à la mise en décharge inadéquate des déchets. Ils doivent également promouvoir des méthodes de traitement plus efficaces afin d'assurer l'habitabilité des milieux tout en s'inscrivant dans une transition vers une bioéconomie circulaire [5], [6]. L'augmentation de la population mondiale entraîne non seulement une augmentation de la production de déchets, mais aussi la nécessité d'accroître considérablement la production alimentaire mondiale dans un avenir proche [7].

Selon ces auteurs, une méthode prometteuse de traitement des déchets biodégradables qui pourrait contribuer aux trois défis que sont: la sécurité environnementale, la production de déchets et l'augmentation de la production alimentaire est le traitement des déchets par les larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) [8], [9]. Dans ce traitement à base d'insectes, les déchets biodégradables sont convertis en deux produits: une biomasse larvaire riche en protéines et en lipides ([10], [11]) qui peut être utilisée dans l'alimentation animale [12] et un résidu de traitement, également appelé frass, qui peut être considéré comme un engrais à utiliser à de nombreuses fins [13]. Étant donné que les deux produits de valeur sont générés, cette technologie est conforme aux principes d'une bioéconomie circulaire, dans laquelle les déchets d'un processus deviennent la ressource d'un autre processus [14]. Cependant, signalons que les frass dérivés de la conversion des biodéchets à l'aide de LMSN sont des produits fertilisant à forte teneur en matière organique et dont le profil nutritionnel est comparable à celui des fumiers animaux et des composts conventionnels couramment utilisés en agriculture [15].

Les frass sont des produits résiduels de la croissance des larves de la mouche soldat noire (LMSN), généralement nourries de drêches de distillerie avec solubles, et contenant donc environ 20 % de protéines et d'abondants nutriments bénéfiques. Outre sa valeur prometteuse en tant qu'ingrédient alimentaire pour plusieurs espèces de poissons telles que le poisson-chat et le tilapia, la frass contient des nutriments abondants, de la chitine (un biopolymère naturel provenant des exosquelettes d'invertébrés) et des microbes bénéfiques ([16], [17], [18]). Donc leur utilisation comme substrat pour la production du zooplancton s'avère indispensable pour l'élevage larvaires des poissons d'eau douce.

De nombreuses études renseignent sur l'intérêt que revêt l'utilisation de la farine de LMSN dans l'alimentation animale et halieutique ([19], [20], [21], [22]). Quant aux frass, elles sont souvent jetées après la récolte des LMSN. Très peu d'études ont été menées sur leur valorisation en aquaculture. Ce manuscrit qui présente une synthèse sur les utilisations des frass de larves de mouches soldats noirs dans la production du plancton a été alors rédigé afin de combler ce gap. En effet, le plancton constitue la base de la chaîne alimentaire aquatique. Il constitue un aliment indispensable pour le développement du zooplancton et des larves de poissons.

2 MÉTHODES ET APPROCHE DE LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE

L'étude s'est basée sur la collecte et l'exploitation des documents scientifiques disponibles en ligne en utilisant les moteurs de recherche de Google, Google scholar, Scopus, PubMed, <https://link.springer.com>, www.science.gov, www.bioline.org.br, www.pdfdrive.com, www.Base-search.net, et www.fao.org. Les critères d'inclusion des documents concernaient ceux publiés en français ou en anglais comportant les mots clés liés au thème d'étude. Les mots clés importants en français et en anglais ont porté sur larve de mouche soldat noire, aquaculture, aliment naturel pour poissons, industries de production de larves de mouches soldats noires, substrats de production de larves de mouches soldats noires, utilisation de larves de mouches soldats noires, Biotechnologie, fertilisant organique, biostimulants, plancton, recyclage des nutriments, compost, excréments, efficacité du processus, maturité, stabilité, chitine dérivée d'insectes, rendement des pommes de terre, nématodes, agriculture régénérative, économie circulaire. Comme l'a eu à faire [23] dans une analyse bibliographique, toutes les publications ont été passées à une vérification de la pertinence de la publication sur la base du titre, à la lecture des résumés afin d'apprécier leur pertinence avant de télécharger et de lire l'article complet. Au total, 153 articles et autres documents scientifiques ont été consultés, mais seuls 72 documents et articles scientifiques ont été retenus dans la synthèse, soit 47,06 % de documents et articles scientifiques acceptés contre 52,94 % d'articles/documents scientifiques rejetés. De plus, le rejet a été aussi organisé par filtration des documents selon leurs aspects d'articles scientifiques et la clarté des données dans le document. Il reste tout de même d'autres documents sur le sujet qui n'ont pas été exploités dans le contexte de ce travail. Les histogrammes de la figure 1 illustrent l'évolution du nombre de documents scientifiques exploités par année entre 2001 et 2025. De 2001 à 2012, le nombre de documents exploités demeure faible, variant généralement entre un et deux documents par an. À partir de 2015, une augmentation progressive est observée, avec une hausse marquée entre 2017 et 2020. L'année 2020 constitue le pic de la période étudiée avec le nombre le plus élevé de documents exploités. Après ce maximum, une baisse est enregistrée à partir de 2021, suivie d'une fluctuation modérée entre 2022 et 2025, où le nombre de documents exploités reste relativement faible malgré une légère reprise en fin de période.

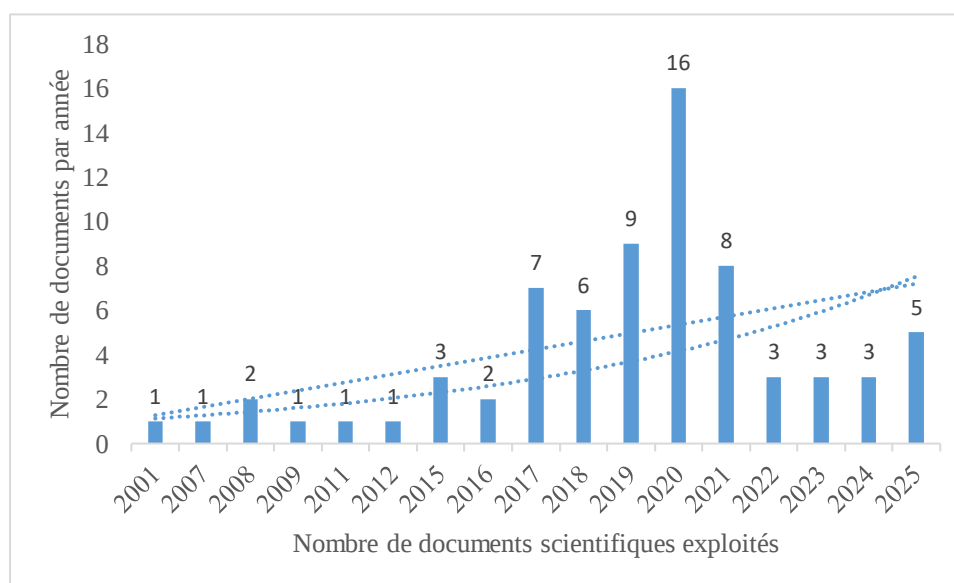


Fig. 1. Evolution des articles et autres documents scientifiques publiés par année

3 ORIGINE DES FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

Selon [24], le frass est le second sous-produit du traitement par les larves de LMSN et est dénommé le résidu ou digestat de LMSN. Par contre, selon [25], [26] et [27], le frass correspond aux déjections excrétées par les larves LMSN lors du compostage. Le frass est un matériau semblable au compost [28] présentant toutefois les caractéristiques d'un compost immature ([29], [30], [31]). Dans un contexte commercial, le frass fait souvent référence à un mélange composé principalement de fèces de LMSN, de résidus de substrat et d'exuvies – exosquelettes rejetés [32]. Selon [33], le frass constitue un mélange de matière organique non consommée, de résidus d'insectes (tels que les exuvies et les fèces), ainsi que d'une communauté microbienne impliquée dans les processus de fermentation.

4 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

4.1 TEMPÉRATURE

La température du frass des LMSN est comprise entre 24 °C et 27 °C ([31], [34]). Le compostage rapide des larves de mouche soldat noire (LMSN) s'effectue principalement durant la phase mésophile, caractérisée par une température comprise entre 20 °C et 45 °C. Pendant cette phase, les LMSN poursuivent la dégradation du substrat. Une bonne aération du système de compostage permet de maintenir la température des déchets autour de 30 °C, ce qui favorise une consommation optimale de ces derniers par les larves [35]. L'élevage des LMSN à la température optimale améliore leur capacité à réduire *Escherichia coli* [36].

4.2 PH DU FRASS DES LMSN

Le pH des frass de LMSN varie généralement en fonction du substrat utilisé pour l'élevage des larves, du stade de décomposition du résidu, et des conditions de traitement (température, humidité, aération). Selon [37], le pH du frass des LMSN provenant de déchets alimentaires varie de 5,6 pour les fruits et légumes à 8,0 pour le mélange de déchets alimentaires, de fiente de poulet et de sciure de bois (rapport 3: 2: 1), ainsi que pour les substrats de paille de maïs. Le pH du frass de LMSN se situe généralement entre 7 et 8, ce qui constitue la plage optimale pour favoriser la croissance des plantes [37] et fournir un environnement propice aux communautés bactériennes bénéfiques de la sciure de LMSN [38].

4.3 TENEUR EN HUMIDITÉ DU FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

Selon [39], le frass de LMSN le plus sec provient des drêches de brasserie avec un taux d'humidité de 30 %, et le plus humide avec un taux d'humidité de 72 % provenant des déchets alimentaires, des fientes de poulet et du mélange de sciure de bois (rapport 3: 2: 1). La forte teneur en eau de la sciure rend la récolte difficile car la sciure a une texture argileuse, ce qui rend difficile la collecte de la biomasse LMSN sous la sciure humide. Une façon de récolter la biomasse LMSN du frass humide est de la rincer à l'eau courante [39]. Cependant, cette méthode entraîne l'élimination du frass, ce qui constitue un gaspillage, car ce dernier peut être valorisé en produits bénéfiques pour l'agriculture. L'utilisation d'un substrat prétraité de manière appropriée dans le processus de traitement par les larves de mouche soldat noire (BSFL), en tenant compte des paramètres de traitement et des stratégies d'alimentation, permet de produire un frass plus sec, comparable à de la sciure. Il convient de noter que le frass sec est considéré comme un compost immature, car les déchets organiques doivent subir un processus de compostage rapide d'environ deux semaines. Ce compost peut contenir des composés phytotoxiques susceptibles d'inhiber la croissance des plantes. C'est pourquoi de nombreux chercheurs recommandent un post-traitement du frass sec afin d'en garantir la maturité et la stabilité [7].

4.4 MÉTAUX LOURDS DANS LE FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

La LMSN est l'un des micro-organismes capables d'accumuler biologiquement les métaux lourds dans leurs tissus, laissant leur frass avec une faible concentration de métaux lourds. Plusieurs études ont montré que même lorsque d'importantes quantités de mercure sont ajoutées à la matière première destinée à l'élevage des LMSN, les concentrations de mercure dans le frass restent faibles. Une expérience menée sur 13 jours a révélé que les niveaux de mercure dans le frass de LMSN étaient inférieurs aux seuils fixés par l'Union européenne (0,7 à 10 mg Hg/kg) [31]. L'évaluation des teneurs en métaux lourds dans le frass de larves de mouche soldat noire (LMSN) a révélé une élimination significative de l'arsenic (As), du cadmium (Cd), du plomb (Pb) et du fer (Fe) [34]. Les résultats indiquent des taux d'élimination de 92 à 98 % pour l'As (0,0002–0,0008 mg/kg), de 99 à 100 % pour le Cd (0,00029–0,00170 mg/kg) et de 80 à 90 % pour le Pb (0,001–0,002 mg/kg). Quant au Fe, il a été éliminé à hauteur de 31 à 69 % (1,70–2,56 mg/kg) par rapport au substrat initial. Le nickel (Ni), en revanche, n'a montré aucune élimination significative (0,01–0,03 mg/kg). Malgré cela, les concentrations en Fe et Ni dans le frass restent conformes aux limites maximales autorisées pour les métaux lourds dans les engrais organiques [34].

Selon [40], les concentrations de métaux toxiques et essentiels dans le frass de larves de mouche soldat noire nourries avec des déchets alimentaires sont restées inférieures aux seuils fixés par la réglementation italienne en matière d'engrais. Cette faible teneur s'explique par la capacité des larves à capter et à accumuler différents métaux lourds au cours du processus de traitement. Néanmoins, la présence de métaux lourds dans la biomasse des larves soulève des inquiétudes, notamment en raison de la possible accumulation de cadmium, de plomb, de mercure, de zinc ou d'arsenic issus des matières organiques utilisées. Ces concentrations peuvent, dans certains cas, dépasser les limites autorisées pour les aliments destinés aux animaux

[41]. Le tableau 1 présente les caractéristiques physico-chimiques du frass de larves de mouche soldat noire (LMSN) issu de différents types de déchets alimentaires.

Tableau 1. *Caractéristiques physico-chimiques du frass de larves de mouche soldat noire (LMSN) issu de différents types de déchets alimentaires*

Type de déchet alimentaire	pH	C/N Ratio	Humidité (%)	Température (°C)	Références
Déchets de cuisine	7,0	8:1	50	-	[42]
Déchets de cuisine	7,4	17:1	63	-	[43]
Déchets alimentaires municipaux	7,3–7,4	8:1–9:1	63–65	26,3–26,5	[34]
Déchets alimentaires ménagers	7,4	17:1	56	-	[44]
Déchets alimentaires, fientes de poulet et sciure (rapport 3:2:1)	6,1–8,0	-	72	27,0	[31]
Fruits et légumes	5,6	27:1	-	-	[32]
Paille de maïs	8,0	-	38	-	[45]
Okara et son de blé	7,5	8:1	-	-	[46]
Okara et son de blé	7,7	10:1	-	-	[46]
Drêche de brasserie	7,7	17:1	30	-	[47]

* Frass obtenu après un traitement par compostage thermophile. Les références sans astérisque indiquent que l'étude citée a utilisé un frass fraîchement récolté

5 COMPOSITION NUTRITIONNELLE DES FRASS DE LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

Les caractéristiques nutritionnelles des frass des LMSN varie sensiblement selon le substrat alimentaire fourni aux larves (Tableau 2) ([48], [49], [50]). Les concentrations en C total et en N total ne semblent pas varier beaucoup et sont respectivement autour de 37 % et 3 %. En revanche, les concentrations de P total (1-5%) et de K total (0,5-4,1%) varient de manière significative et semblent dépendre du substrat utilisé pour nourrir les larves. En outre, les micronutriments varient également en fonction du substrat d'alimentation, tandis que le pH (environ 7,5) et le rapport C/N (environ 15) semblaient varier moins en fonction du substrat. Par ailleurs, [51] ont fourni un régime standard de laboratoire aux LMSN (régime « Gainesville House Fly ») et ont ensuite obtenu un frass contenant 44 g/kg N, 52 g/kg P et 41 g/kg K. De même, [32] ont nourri des LMSN séparément avec des aliments pour poulets, des déchets d'herbe et des déchets de fruits/légumes, et ont enregistré des concentrations de N comprises entre 18,3 (fruits et légumes) et 25,9 g/kg (aliments pour poulets). Un essai réalisé par [7], montre que les LMSN nourries exclusivement avec une source d'hydrates de carbone (déchets de pain) génère de frass contenant 15,2 g/kg de N, tandis que de petites additions (5-15 %) d'un flux de déchets riches en protéines (déchets de poisson) entraîne des augmentations de la teneur en nutriments, allant de 18,4 à 23,8 g/kg, démontrant que le régime alimentaire des LMSN peut être ajusté pour modifier la composition du produit final.

D'après [52], les larves de mouche soldat noire nourries avec divers sous-produits d'amandes produisent un frass dont la teneur en azote varie de 12,3 à 22,3 g/kg, en potassium de 17,9 à 44,6 g/kg et en phosphore de 0,22 à 0,82 g/kg. Les auteurs attribuent ces variations aux différences de composition des substrats, notamment en glucides, protéines et fibres. Une alimentation plus riche en sucres ou en amidon et en protéines, mais plus pauvre en fibres, favoriserait une accumulation plus importante de nutriments dans le frass. [34] ont utilisé des déchets solides municipaux de composition variable pour alimenter des LMSN et ont observé une augmentation significative des teneurs en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) après la consommation du substrat par les larves, atteignant respectivement 4,8 g/kg, 0,9 g/kg et 0,6 g/kg dans la sciure. Cette hausse serait attribuable à la réduction progressive de la matière sèche du substrat et à l'action des micro-organismes libérés par les larves dans le milieu de culture. Par ailleurs, [46] ont utilisé un mélange d'okara de soja et de son de blé comme substrat, produisant un frass contenant 47,8 g/kg de N et 0,98 g/kg de K. De leur côté, [47] ont analysé un frass issu de LMSN nourries avec des drêches de brasserie, révélant des concentrations de 21 g/kg en N, 11,6 g/kg en P et 1,7 g/kg en K. [49] ont quant à eux, montré que les frass des LMSN sont riche en éléments minéraux et en matière organique, issu de la dégradation microbienne et enzymatique de différents substrats. La composition nutritionnelle dépend strictement de la nature du substrat utilisé pour l'élevage des larves. Après 14 jours d'élevage des LMSN, les analyses réalisées sur les frass révèlent que les frass offrent des teneurs remarquables en azote total (1,70 à 2,66 %), en phosphore assimilable (16,30 à 17,47 ppm) et en potassium échangeable (0,28 à 0,47 meq/100 g). Aussi, il contient une forte proportion de matière organique (environ 95 %) et une teneur en matière sèche comprise entre 34,89 et 39,43 %, avec une proportion de cendres avoisinant 4,5 à 4,7 % [49]. De manière

générale, le frass issu des (LMSN) présente des teneurs en potassium (K) inférieures à celles des autres macronutriments. Dans certaines formulations commerciales de frass de LMSN, dont l'origine n'a pas été spécifiée, [53] ont rapporté une concentration en K de 0,1 g/kg, tandis que [54] ont observé une valeur de 11 g/kg. Toutefois, dans les deux cas, le substrat d'alimentation utilisé durant l'élevage des larves n'a pas été précisé. Le K est un macronutriment difficile à récupérer à partir de matières organiques, sa principale source étant d'origine géologique, notamment par exploitation minière [55]. Cet élément, tout comme d'autres (par exemple le magnésium, le manganèse ou le cuivre), se retrouve généralement en faibles concentrations dans les déjections des LMSN, indépendamment du substrat utilisé pour leur alimentation (Tableau 2).

Tableau 2. *Attributs chimiques de différentes frass dérivées du compostage de flux de déchets biodégradables par les larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*)*

Propriétés chimiques														Ref.
	C	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	pH	C/N ratio	
	%				g/kg			g/kg						
Gainesville diet	35,2	3.8	5.2	4.1	45	8	3	600	46,1	-	140	8,8	8	[51]
Grains de distillerie	-	3,4	0,8	1,1	13	3	5	125	15	45	90	-	-	[54]
Céréales de brasserie	38,6	3,6	0,5	0,3	9,7	1	-	310	25	109	182	7,3	10,7	[56]
Okara de soja et son de blé	37,1	4,8	1	0,9	1,3	0,1	-	26	2,2	4,2	0.1	7,5	7,7	[46]
Déchets ménagers	35,8	2,2	0,5	0,7	10	0,9	0,8	240	10	10	10	7,4	16,6	[57]
Déchets ménagers	41,8	3,3	3,4	2,4	4	10	2,6	-	-	-	-	9	12.6	[58]
Son de blé	35,7	2,8	1,4	2,3	-	0,3	-	15	8,9	19,4	15	6,8	16	[59]
Céréales de brasserie	35,2	2,1	1,2	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	-	7,7	16,8	[47]
Okara de soja frais	37,1	5,1	0,3	1,9	16,8	10,5	-	3,7	0,9	0,2	1,7	7,3	7,3	[60]
Fumier de volaille	23,6	2,3	1,1	1,8	-	-	-	-	-	-	-	8	16,4	[43]
Lisier de porc	26,8	2,4	2,1	1	-	-	-	-	-	-	-	8,7	17,6	[43]
Aliments pour volailles	47,9	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,2	18,5	[32]
Tonte d’herbe	44,3	2,4	-		-	-	-	-	-	-	-	5,4	18,2	[32]
Fruits et légumes	48,8	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,6	26,6	[32]
Lisier de vache	27,7	1,9	1	0,2	-	-	-	-	-	-	-	8,4	151,1	[43]
Légumes	38,7	2,8	1,5	3,3	15	7	0,3	896	19	149	137	8,6	13,8	[61]
Moyenne	36,6	2,9	1,6	2,4	11,6	3,7	2,3	249,1	14,2	42,4	64	7,5	14,5	
Médiane	36,5	2,8	1,1	1,5	9,9	1	2,6	125	10	14,7	15	7,6	15,6	

6 UTILISATION DU FRASS COMME SOURCE DE NUTRIMENTS POUR LES PLANTES EN CROISSANCE

À la suite de la mise en évidence de teneurs intéressantes en éléments nutritifs du frass issu de LMSN, plusieurs études ont été entreprises afin d'évaluer son potentiel en tant qu'engrais. À la connaissance des auteurs, la première étude portant sur le frass dérivé de déchets alimentaires a été menée par [53]. Ces derniers ont comparé ce produit à un engrais commercial de composition similaire (N, P, K et matière organique) dont l'origine n'a pas été précisée. L'expérimentation réalisée sur des plants de chou chinois a porté sur le nombre, la longueur et la largeur des feuilles ainsi que sur l'accumulation de nutriments. Les résultats ont révélé des performances comparables entre les deux fertilisants, à l'exception de l'absorption du phosphore, plus faible chez les plants traités avec la sciure. Par ailleurs, [62] ont évalué l'effet des frass de LMSN sur la croissance du maïs, en utilisant un mélange sol/déjections au ratio 1: 2 (w/w), sans toutefois indiquer la composition nutritionnelle du frass utilisé. Contrairement à un produit de fermentation microaérobie issu du même substrat alimentaire (déchets alimentaires), les déjections ont induit un développement végétatif plus limité, caractérisé par des plants nains et un nombre réduit de feuilles. Selon ces auteurs, cette inhibition de croissance pourrait être liée à des concentrations élevées d'ammoniac dans le frass.

[58] ont évalué trois sous-produits issus du traitement de déchets biodégradables par les LMSN à savoir: le frass (déjections), les exuvies (peaux de mue) et les mouches adultes mortes en tant qu'amendements du sol dans un essai en pot

sur le maïs. Ces sous-produits ont été appliqués à différents niveaux d'apport en éléments nutritifs: 180 et 215 kg N/ha, ainsi que 75 kg P₂O₅/ha pour chaque sous-produit. Les résultats ont indiqué que le frass présentait des performances de croissance inférieures (rendement, biomasse sèche, surface foliaire et efficacité d'utilisation des nutriments) par rapport aux autres sous-produits et aux fertilisants de référence (organiques et minéraux). Cette faible efficacité fertilisante a été attribuée à la dominance du phosphore (P) dans la composition du frass, au détriment de l'azote (N). En outre, les résultats suggèrent que la composition nutritionnelle du frass n'est pas toujours adaptée aux besoins spécifiques de certaines cultures. De leur côté, [57] ont examiné le potentiel fertilisant du frass de LMSN sur le chou champêtre (*Brassica rapa*) et ont recommandé un taux d'application compris entre 1/20 et 1/30 du poids du sol, estimé comme optimal pour favoriser la croissance. Un apport plus important (1/10) avait en effet entraîné un affaiblissement des plantes, caractérisé par un jaunissement foliaire. Par ailleurs, [27] ont conduit des essais au champ au Ghana afin d'évaluer l'effet de frass produits à partir de déchets de volaille, de brasserie et de légumes sur la croissance du maïs, du poivron et de l'échalote. Différents dosages (entre 2,5 et 10 t/ha) ont été appliqués, seuls ou combinés à un engrais minéral NPK. De façon générale, les performances observées avec le frass étaient comparables à celles obtenues avec le fumier de volaille, considéré localement comme l'amendement de référence. Toutefois, les meilleures réponses agronomiques ont été obtenues avec la combinaison frass + engrais chimique, indiquant un effet synergique entre les deux sources de nutriments.

[60] ont évalué l'effet du frass de LMSN, issu de l'okara de soja, sur la croissance de la laitue. Le frass, présentant des teneurs élevées en azote (50 g/kg), phosphore (0,3 g/kg) et potassium (2 g/kg), a été incorporé au sol à des concentrations de 10, 20 et 30 % (v/v). Il est à noter que seules les applications à 10 % ont permis une croissance satisfaisante des plants, tandis que les doses plus élevées (20–30 %) ont inhibé le développement. Les auteurs ont attribué cette réponse négative à un faible rapport C/N (7,2), susceptible d'entraîner une minéralisation rapide des nutriments et un déséquilibre dans la disponibilité de l'azote. À l'inverse, [61] ont constaté une croissance régulière et favorable du ray-grass à la suite de l'application de six doses croissantes de frass de LMSN, représentant entre 25 % et 150 % des besoins en azote de la culture (estimés à 140 kg N/ha). En plus de stimuler la croissance, l'apport de frass a amélioré la fertilité des sols, notamment par l'augmentation des teneurs en matière organique, en P₂O₅ et en K₂O, des effets généralement recherchés dans l'utilisation d'amendements organiques en remplacement partiel ou total des engrais chimiques.

7 UTILISATION DU FRASS COMME SOURCE DE COMPOSÉS BIOACTIFS

En plus de fournir des macro- et micronutriments, les engrais organiques sont généralement reconnus comme une source importante de composés bioactifs, dont l'intérêt agronomique ne cesse de croître ces dernières années. Ces composés biologiquement actifs jouent un rôle dans des processus moins connus de la nutrition végétale, tels que la signalisation cellulaire, au-delà de leur simple contribution à l'apport en éléments minéraux nécessaires à la croissance structurale des plantes [63]. Ils regroupent divers types de substances, notamment des peptides, des acides aminés, des substances humiques, des phytohormones ainsi qu'un large éventail de micro-organismes ([64], [63], [65]). Lorsqu'ils sont appliqués au sol, ces composés peuvent stimuler les processus naturels au sein du système sol-rhizosphère et renforcer le métabolisme des plantes, contribuant ainsi à une amélioration globale de la croissance. À la lumière des données disponibles sur les résidus issus du traitement d'autres invertébrés, il est plausible que les déjections de LMSN constituent également une source prometteuse de composés bioactifs pouvant être valorisés dans le cadre de systèmes agricoles durables ([66], [67]).

8 AVANTAGES DU FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE

Selon [28], le frass issu des LMSN présente des caractéristiques comparables à celles du compost. Le processus de biodégradation rapide des déchets organiques par les LMSN conduit à la production d'un frass compact, enrichi en macronutriments (N, P, K), micronutriments et matière organique, tous directement disponibles pour les plantes ([28], [31], [45], [34]). Ce produit organique offre plusieurs avantages agronomiques. Le frass contient une microflore abondante et bénéfique [41], incluant des bactéries fixatrices d'azote et nitrifiantes, capables de rendre l'azote assimilable par les plantes [38]. Ce type de micro-organismes joue un rôle crucial, notamment dans les écosystèmes pauvres en azote, en favorisant sa conversion en nitrates, une forme directement absorbable par les racines, ce qui renforce la résilience des sols face à des contraintes telles que la sécheresse, les inondations ou la dégradation. Cependant, la forte teneur en phosphore du frass contribue à l'accumulation d'azote dans les plantes, le phosphore jouant un rôle fondamental dans les processus de transfert d'énergie cellulaire [32]. En ce sens, l'utilisation du frass contribue au recyclage efficace de l'azote et du phosphore contenus dans les déchets alimentaires, limitant ainsi le recours aux engrais chimiques. Un autre élément d'intérêt est la présence de chitine dans le frass, qui favorise non seulement la croissance végétale, mais aussi l'activation des mécanismes de défense des plantes [37]. La chitine enrichit également le microbiome du sol, améliorant sa fertilité [33].

D'après [38], le frass de LMSN constitue la seule source connue de chitine digestible par les plantes. En situation de stress environnemental, cette chitine induit naturellement la production de peptides antimicrobiens, jouant un rôle de barrière protectrice contre les agents pathogènes. Ce phénomène est directement lié à la capacité des LMSN à synthétiser des peptides antimicrobiens au cours du processus de digestion des déchets, limitant ainsi la prolifération de bactéries nuisibles telles que *Salmonella enterica* ou *Escherichia coli*. Par ailleurs, la chitine et d'autres métabolites d'insectes contenus dans le frass peuvent contribuer à des processus écologiques bénéfiques, notamment en réduisant la pression exercée par les ravageurs. Même à faible dose, l'application de frass enrichi en chitine peut stimuler la croissance des plantes, favoriser la floraison et la production de graines, tout en attirant davantage de pollinisateurs.

Près de la moitié des déchets générés à l'échelle mondiale sont constitués de déchets alimentaires, dont environ 37 % sont enfouis dans des décharges contrôlées et 33 % sont éliminés dans des dépotoirs à ciel ouvert [3]. Pourtant, cette fraction organique, riche en éléments nutritifs (macro- et micronutriments), constitue une ressource précieuse qui, si elle n'est pas correctement valorisée, peut devenir une source importante de pollution environnementale. Sur le plan écologique, la production de frass par les LMSN permet de recycler efficacement les nutriments contenus dans les déchets alimentaires, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la limitation de la contamination des sols et des eaux par les substances toxiques et les nutriments issus des lixiviats ([35], [7]). L'utilisation du frass de LMSN comme produit à valeur ajoutée dans le cadre de la filière entomologique offre également des avantages économiques notables, dépassant ceux générés par la vente exclusive des larves destinées à l'alimentation animale. D'après [68], l'intégration du frass comme engrais a permis d'accroître le revenu net des agriculteurs d'un facteur allant de 5 à 15 par rapport à l'élevage de LMSN seul. En effet, une mégagramme (Mg) de larves séchées, valorisée à environ 900 USD, peut produire entre 10 et 34 Mg de frass, dont la valeur marchande est estimée entre 3000 et 10 200 USD. Des essais agronomiques réalisés sur le maïs ont également montré que les parcelles amendées avec du frass de LMSN généraient un revenu net supérieur de 29 à 44 % comparativement à celles traitées avec un engrais organique commercial. Par ailleurs, les petits producteurs d'insectes utilisant directement le frass comme fertilisant pour le maïs peuvent accroître leur revenu net de 30 à 232 % par rapport à ceux qui achètent ce même produit sur le marché.

9 MODES D'UTILISATION DU FRASS DES LARVES DE MOUCHE SOLDAT NOIRE POUR LA PRODUCTION DU PLANCTON

Les frass produits par les LMSN se distinguent de plus en plus comme une bioressource multifonctionnelle dans les systèmes de production circulaire. D'innombrables études indiquent que les frass sont riches en éléments nutritifs essentiels (N, P, K), ainsi qu'en matière organique et micronutriments (Zn, Cu, Fe, etc.), ce qui leur confère leur rôle de fertilisant organique complet. Selon [15], la compilation de nombreuses analyses de frass, le ratio moyen N: P₂O₅: K₂O est d'environ 1: 0.9: 1.1, avec un pH légèrement alcalin (≈ 7.5), et une libération lente des nutriments, ce qui suggère son intérêt comme fertilisant à long terme. De même, selon [69], les frass issus d'élevage des LMSN présentent des rapports N : P : K variant selon le substrat d'origine, avec des valeurs modérément élevées en azote et potassium. Par ailleurs, l'intérêt des frass ne se limite pas à l'agriculture terrestre. Une étude récente a évalué son utilisation comme engrais dans des bassins d'aquaculture pour stimuler la croissance du plancton comme source naturelle de nourriture. Dans cet essai (comparant 100 % fientes de caille, 50/50 fientes + frass, et 100 % frass), l'ajout de frass a favorisé la prolifération de phytoplancton appartenant aux phyla Chlorophyta et Chrysophyta avec un accroissement significatif de la densité cellulaire (de 295 à 2 020 cellules·l⁻¹ en cinq jours dans le traitement 50 % frass + 50 % fientes) [70].

De plus, l'utilisation des frass en agriculture témoigne de son efficacité et de sa sûreté. D'autres études confirment que le frass peut constituer une alternative durable aux fertilisants chimiques, tout en améliorant la matière organique de l'eau et du sol et en favorisant le recyclage des nutriments, dans une perspective d'agriculture circulaire [71].

Cependant, la variabilité de la qualité des frass (fortement dépendante du substrat d'élevage, type de déchets entrés, etc.) reste un point critique. Ainsi, des analyses spécifiques sont recommandées avant tout usage, surtout dans des systèmes sensibles comme la culture de phytoplancton ou l'aquaculture [71].

Ainsi, l'utilisation des frass dans des systèmes aquacoles ou de phytoplancton représente une voie prometteuse pour valoriser les déchets organiques, réduire les coûts d'intrants, et promouvoir une aquaculture plus durable, tout en s'inscrivant dans une logique de circularité des nutriments. Aussi, selon [72] les frass d'insectes peuvent être utilisés avec succès comme fertilisant pour la culture de *Chlorella vulgaris*, en maintenant des performances de croissance et une valeur protéique élevées. Ce résultat confirme l'intérêt des frass comme ressource nutritive durable et élément clé de nouvelles chaînes de production intégrées. Aussi, l'étude réalisée par [73] démontre que les frass d'insectes peuvent servir de milieu de culture efficace pour plusieurs microalgues, permettant une production de biomasse riche en glucides et en lipides. À l'exception de *P. tricornutum*, les espèces testées se sont bien adaptées à un milieu composé uniquement d'eau et des frass. D'autre part, l'usage du frass de

LMSN comme fertilisant organique est bien documenté dans les systèmes agricoles, ce qui atteste de sa relative innocuité et de son efficacité. Son incorporation dans le sol contribue à l'amélioration de la disponibilité en nutriments. Ceci favorise une fertilisation comparable à celle obtenue avec des engrais minéraux ou organiques traditionnels après application à des doses appropriées [32]. Toutefois, il est également documenté que des doses élevées peuvent poser des risques de phytotoxicité ou perturber l'équilibre microbien ou fongique d'où la nécessité de doser avec précaution [74]. Les frass de larves de LMSN apparaissent alors comme une source organique intéressante, écologique et économique pour fertiliser l'eau de culture de phytoplancton, notamment dans des contextes d'aquaculture souhaitant réduire les coûts des fertilisants tout en valorisant des déchets organiques. Leur utilisation doit cependant être optimisée (dilution, dosage, suivi de la qualité de l'eau) pour éviter des effets négatifs potentiels (eutrophisation, stress sur les organismes aquatiques, déséquilibre microbien).

REFERENCES

- [1] ONU-Habitat, ONU-Habitat - Ya somos 8 mil millones de personas, 2022.
[Online] Available: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/ya-somos-8-millones-de-personas> (accessed Mar. 19, 2023).
- [2] J. Timsina, «Can organic sources of nutrients increase crop yields to meet global food demand?» *Agronomy*, vol 8, no 10, pp. 1–20, 2018. doi: 10.3390/agronomy8100214.
- [3] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, «What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050». Urban Development Series, Washington, DC: World Bank. 2018. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648>.
- [4] E. Koda, A. Miszkowska, and A. Sieczka, «Levels of organic pollution indicators in groundwater at the old landfill and waste management site», *Appl. Sci.*, vol 7, 638. <https://doi.org/10.3390/app7060638>.
- [5] A. Silva, M. Rosano, L. Stocker, and L. Gorissen, «From waste to sustainable materials management: three case studies of the transition journey» *Waste Manage*, vol 61, pp. 547–557, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.038>.
- [6] S. Ahmad, N. Imran, N. Iqbal, F. Jamil, and D. Kim, «Optimal policy-making for municipal waste management based on predictive model optimization», *IEEE Access*, vol 8, pp. 218458–218469, 2017.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042598>.
- [7] I.G. Lopes, J.W. Yong, and C. Lalander, «Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives». *Waste Manage*, pp. 142, 65–76, 2022.
- [8] H. Čičková, J.W. Newton, R.C. Lacy, and M. Kozánek, «The use of fly larvae for organic waste treatment». *Waste Manage*, vol 35, pp. 68–80, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.026>.
- [9] M. Gold, F. Von Allmen, C. Zurbrugg, J. Zhang, A. Mathys, «Identification of Bacteria in Two Food Waste Black Soldier Fly Larvae Rearing Residues», *Front. Microbiol.*, vol 11, pp. 582867, 2020.
- [10] C. Lalander, S. Diener, C. Zurbrugg, and B. Vinnerås, «Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*) » *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 211–219, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>.
- [11] N. Ewald, A. Vidakovic, M. Langeland, A. Kiessling, S. Sampels, and C. Lalander, «Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) – Possibilities and limitations for modification through diet», *Waste Manage*, vol. 102, pp. 40–47, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.014>.
- [12] Y.S. Wang, and M. Shelomi, «Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food», *Foods*, vol. 6, no 91, 2017. <https://doi.org/10.3390/foods6100091>.
- [13] D. Beesigamukama, B. Mochoge, N. Korir, M. Musyoka, K.K.M. Fiaboa, D. Nakimbugwe, F.M. Khamis, S. Subramanian, T. Dubois, S. Ekesi, and C.M. Tanga, «Nitrogen fertilizer equivalence of black soldier fly frass fertilizer and synchrony of nitrogen mineralization for maize production» *Agronomy*, vol. 10, no 1395. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091395>.
- [14] P.C. Slorach, H.K. Jeswani, R. Cuellar-Franca, and A. Azapagic, «Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy», *Sci. Total Environ.*, vol. 693, no 133516, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322>.
- [15] Gärttling D, and H. Schulz, «Compilation of Black Soldier Fly Frass Analyses», *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, pp.7 <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00703-w>.
- [16] M.A. Esteban, A. Cuesta, J. Ortuno, and J. Meseguer, «Immunomodulatory effects of dietary intake of chitin on gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) innate immune system», *Fish Shellfish Immunol.*, vol 11, pp. 303–315, 2001.
- [17] A. Powell, and A.F. Rowley, «The effect of dietary chitin supplementation on the survival and immune reactivity of the shore crab, *Carcinus maenas*», *Comp. Biochem. Physiol.*, vol. 147, pp. 122–128, 2007.
- [18] S.H. Cha, J.S. Lee, C.B. Song, K.J. Lee, and Y.J. Jeon, «Effects of chitosan-coated diet on improving water quality and innate immunity in the olive flounder, *Paralichthys olivaceus*», *Aquaculture*, vol. 278, pp. 110–118, 2008.
- [19] Auza F.A., S. Purwanti, A.J. Syamsu, A. Natsir, R. Badaruddin, D. Deki Zulkarnain, And L.O. Muh. Munadi, «Effects of Using Black Soldier Fly Larvae Meal (*Hermetia illucens* L) as a Source of Protein on Boosting Performance, Carcass Quality, and

- Nutrient Digestibility of Village Chicken», *Journal of Animal Health and Production*, vol. 1, no 2, pp. 193-198, 2023. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.jahp/2023/11.2.193.198>
- [20] S.C.B. Pomalégni, D.S.J.C. Gbemavo, C.P. Kpadé, S. Babatoundé S, C.A.A.M. Chrysostome, O.D. Koudandé, M. Kenis, R.L. Glèlè Kakaï, and G.A. Mensah, «Perceptions et facteurs déterminant l'utilisation des asticots dans l'alimentation des poulets locaux (*Gallus gallus*) au Bénin», *Journal of Applied Bioscience*, vol. 98, pp. 9330–9343.
- [21] V.E. Herawati, T. Elfitasari, Y.S. Darmanto, N. Anggraeni, and S. Windarto, «Effect of different ratios of maggot meal (*Hermetia illucens*) on growth performance and body composition of vannamei shrimp (*Litopennaeus vannamei*) post larvae», *AACL Bioflux*, vol. 16, no 2, pp. 768-779, 2023.
- [22] D.N.S. Kpogue Gangbazo, D.C. Adjahouinou, A. Djissou, T. Godome, E. Tossavi, N. Diegane, J. Fall and A.B. Aboh, «Use of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in the diet of *Clarias gariepinus* (burchell, 1882) fingerlings reared in controlled environments', *J. Anim. Health Prod.* Vol 13, no 3, pp. 632-641, 2025. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.jahp/2025/13.3.632.641>
- [23] A. Nambima, T. Houehanou, M. Adjacou, N. Yehouenou, G. Gouwakinnou and H. Biaou, «La variation spatiale des pratiques de gestion durable des terres dans les terres de culture de l'Atacora Ouest au Bénin». *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 11 (2), 210-216, 2023. <https://doi.org/p-ISSN: 2028-991X>.
- [24] S. Diener, C. Zurbrugg, F. Roa Gutiérrez, D. Hong Nguyen, A. Morel, T. Koottatep and K. Tockner, «Black Soldier Fly Larvae for Organic Waste Treatment—Prospects and Constraints. In Proceedings of the Waste Safe» *2nd International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries, Khulna, Bangladesh*, 13–15 February 2011.
- [25] T.R Green and R. Popa, «Enhanced Ammonia Content in Compost Leachate Processed by Black Soldier Fly Larvae», *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol 166, pp. 1381–1387, 2012.
- [26] N.H. Zahn, «The Effects of Insect Frass Created by *Hermetia Illucens* on Spring Onion Growth and Soil Fertility». *Univ. Stirling*, vol. 1, 1–65, 2017. [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/321831639_The_effects_of_insect_frass_created_by_Hermetia_illucens_on_spring_onion_growth_and_soil_fertility.
- [27] R.S. Quilliam, C. Nuku-Adeku, P. Maquart, D. Little, R. Newton, and F. Murray, «Integrating insect frass biofertilisers into sustainable peri-urban agro-food systems», *J. Insects Food Feed*, vol. 6, no 3, pp. 315–322, 2020. <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0049>.
- [28] S. Bortolini, L.I. Macavei, J.H. Saadoun, G. Foca, A. Ulrici, F. Bernini, D. Malferrari, L. Setti, D. Ronga, and L. Maistrello, «*Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy», *J. Clean. Prod.*, vol., 262, 121289, 2020.
- [29] X. Xiao, L. Mazza, Y. Yu, M. Cai, L. Zheng, J.K. Tomberlin, J. Yu, A. van Huis, Z. Yu, and S. Fasulo, «Efficient co-conversion process of chicken manure into protein feed and organic fertilizer by *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae) larvae and functional bacteria», *J. Environ. Manag.*, vol. 217, pp. 668–676, 2018.
- [30] C. Zurbrugg, B. Dortmans, A. Fadhila, B. Verstappen, S. Diener, «From pilot to full scale operation of a waste-to-protein treatment facility», *Detritus*, vol. 1, pp. 18–22, 2018.
- [31] F.K. Attiogbe, N.Y.K. Ayim and J. Martey, «Effectiveness of black soldier fly larvae in composting mercury contaminated organic waste». *Sci. Afr.* 6, e00205. 2019.
- [32] T. Klammssteiner, V. Turan, M.F.D. Juárez, S. Oberegger and H. Insam, «Suitability of black soldier fly frass as soil amendment and implication for organic waste hygienization». *Agronomy*, vol. 10, 1578, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101578>.
- [33] E. Schmitt and W. de Vries, «Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction». *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* Vol. 25, 100335, 2020.
- [34] D. Sarpong, S. Oduro-Kwarteng, S.F. Gyasi, R. Buamah, E. Donkor, E. Awuah and M.K. Baah, «Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae». *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* Vol. 8, 45–54, 2019.
- [35] W. Pang, D. Hou, J. Chen, E. Nowar, Z. Li, R. Hu, J.K. Tomberlin, Z. Yu, Q. Li and S. Wang, «Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly». *J. Environ. Manag.* Vol. 260, 110066, 2020.
- [36] Q. Liu, J.K. Tomberlin, J.A. Brady, M.R. Sanford and Z. Yu, «Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae Reduce *Escherichia coli* in Dairy Manure». *Environ. Entomol.* Vol. 37, 1525–1530, 2008.
- [37] K. Surendra, J.K. Tomberlin, A. van Huis, J.A. Cammack, L.-H.L. Heckmann and S.K. Khanal, «Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF) ». *Waste Manag.* 117, 58–80, 2020.
- [38] S. Choi and N. Hassanzadeh, «A Novel Biofertilizer for Improving Plant Health While Minimizing Environmental Impact». *J. Can. Sci. Fair.* vol. 2, 41–46, 2019.

- [39] B. Dortmans, S. Diener, B. Verstappen and C. Zurbrügg, «Black Soldier Fly Biowaste Processing—A Step-by-Step Guide Eawag»; *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology: Dübendorf, Switzerland*, pp. 6–54. 2017.
- [40] R. Salomone, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo and D. Savastano, «Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*». *J. Clean. Prod.* vol. 140, 890–905, 2017.
- [41] M. Gold, J.K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg, A. Mathys, «Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review». *Waste Manage.* Vol. 82, 302–318. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>.
- [42] P. Ritika and S.S.P. Rajendra, «Study on occurrence of black soldier fly larvae in composting of kitchen waste». *Int. J. Res. Biosci.* Vol. 4, 38–45, 2015.
- [43] T. Liu, M.K. Awasthi, H. Chen, Y. Duan, S.K. Awasthi and Z. Zhang, «Performance of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) for manure composting and production of cleaner compost». *J. Environ. Manage.* Vol. 251, 109593. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109593>.
- [44] K. Kawasaki, T. Kawasaki, H. Hirayasu, Y. Matsumoto and Y. Fujitani, «Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) ». *Sustainability*, vol. 12, 4920. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12124920>.
- [45] Z. Gao, W. Wang, X. Lu, F. Zhu, W. Liu, X. Wang and C. Lei, «Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw». *J. Clean. Prod.* Vol. 230, 974–980, 2019.
- [46] S. Song, A.W.L. Ee, J.K.N. Tan, J.C. Cheong, Z. Chiam, S. Arora, W.N. Lam and H.T. W. Tan, «Upcycling food waste using black soldier fly larvae: effects of further composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential». *J. Clean. Prod.* Vol. 288, 125664. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125664>.
- [47] D. Beesigamukama, B. Mochoge, N.K. Korir, K.K.M. Fiaboe, D. Nakimbugwe, F.M. Khamis, S. Subramanian, T. Dubois, M.W. Musyoka, S. Ekesi, S. Kelemu and C.M. Tanga, «Exploring black soldier fly frass as novel fertilizer for improved growth, yield, and nitrogen use efficiency of maize under field conditions. Front». *Plant Sci.* vol. 11, 574592. 2020b. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.574592>.
- [48] N.E.A. Basri, N.A. Azman, I.K. Ahmad, F. Suja, N.A.A. Jalil and N.F. Amrul, «Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of FoodWaste: A Review». *Foods* vol. 11, 2664. 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11172664>.
- [49] J.B.O. Atchamou, R. Tonoukouen, D.N.S. Kpogue, M. Ogoudele, A. Djissou, BA. Aboh, Z. Sohoun, D. Ndong, J. Fall and G.A. Mensah, «Impact of Different Organic Substrates on the Productivity and Nutritional Composition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) ». *European Journal of Nutrition & Food Safety*, vol. 16 (11), 240-251. 2024. DOI: <https://doi.org/10.9734/ejnf/s/2024/v16i111589>.
- [50] J.B.O. Atchamou, G. Aïsetché, C. Hédji, S. Gbaguidi, A. Djissou, G. Djidohokpin, C. Lagnika and D.N.S.G. Kpoguè, «Effets de divers traitements technologiques sur la qualité nutritionnelle et microbiologique de la farine de larves de mouches soldats noires (LSMN) *Hermetia illucens* (L., 1758) ». *Journal of Applied Biosciences*, vol. 214: 22749 – 22772, 2025. <https://doi.org/10.35759/JABs.214.7>.
- [51] L. Setti, E. Francia, A. Pulvirenti, S. Gigliano, M. Zaccardelli, C. Pane, F. Caradonia, S. Bortolini, L. Maistrello and D. Ronga, «Use of black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media». *Waste. Manage.* 95, 278–288, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.017>.
- [52] L. Palma, J. Fernández-Bayo, F. Putri and J.S. VanderGheynst, «Almond by-product composition impacts the rearing of black soldier fly larvae and quality of the spent substrate as a soil amendment». *J. Sci. Food Agr.* vol. 100 (12), 4618–4626. 2020. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10522>.
- [53] Y. Choi, J. Choi, J. Kim, M. Kim, W. Kim, K. Park, S. Bae, G. Jeong, «Potential usage of food waste as a natural fertilizer after digestion by *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) ». *Int. J. Indust. Entomol.* vol. 19, 171–174, 2009.
- [54] M. Yildirim-Aksoy, R. Eljack and B.H. Beck, «Nutritional value of frass from black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, in a channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diet». *Aquacult. Nutr.* 26, 812–819, 2019. <https://doi.org/10.1016/10.1111/anu.13040>.
- [55] D.A.C. Manning, «Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review». *Agron. Sustain. Dev.* vol. 30 (2), 281–294. 2010. <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>.
- [56] A.O. Anyega, N.K. Korir, D. Beesigamukama, G.J. Changeh, K. Nkoba, S. Subramanian, J.J.A. Van Loon, M. Dicke, C.M. Tanga, «Black soldier fly-composted organic fertilizer enhances growth, yield, and nutrient quality of three key vegetable crops in Sub-Saharan Africa». *Front. Plant Sci.* vol. 12, 680312, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.680312>.
- [57] K. Kawasaki, T. Kawasaki, H. Hirayasu, Y. Matsumoto and Y. Fujitani, «Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) ». *Sustainability*, vol. 12, 4920. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12124920>.

- [58] D. Gärttling, S.M. Kirchner and H. Schulz, «Assessment of the N- and P-fertilization effect of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) by-products on maize». *J. Insect Sci.* vol. 20, 2020. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaa089>.
- [59] C. Watson, C. Schlösser, J. Vögerl, F. Wichern, «Excellent excrement? Frass impacts on a soil's microbial community, processes and metal bioavailability». *Appl. Soil Ecol.* Vol. 168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104110>.
- [60] Z. Chiam, J.T.E. Lee, J.K.N. Tan, S. Song, S. Arora, Y.W. Tong, H.T.W. Tan, «Evaluating the potential of okara-derived black soldier fly larval frass as a soil amendment». *J. Environ. Manage.* Vol. 286, 112163, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112163>.
- [61] R. Menino, F. Felizes, M.A. Castelo-Branco, P. Fareleira, O. Moreira, R. Nunes, D. Murta, «Agricultural value of black soldier fly larvae frass as organic fertilizer on ryegrass». *Heliyon* vol. 7 (1), e05855, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05855>.
- [62] M.A. Alattar, F.N. Alattar and R. Popa, «Effects of microaerobic fermentation and black soldier fly larvae food scrap processing residues on the growth of corn plants (*Zea mays*) ». *Plant Sci. Today* vol. 3, 57–62. 2016. <https://doi.org/10.14719/pst.2016.3.1.179>.
- [63] O.I. Yakhin, A.A. Lubyantsov, I.A. Yakhin, P.H. Brown, «Biostimulants in plant science: a global perspective». *Front. Plant Sci.* vol. 7, 2049, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>.
- [64] P. Du Jardin, «Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation». *Sci. Hortic.* Vol. 196, 3–14. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
- [65] L. Xu and D. Geelen, «Developing biostimulants from agro-food and industrial byproducts». *Front. Plant Sci.* vol. 9, 1567. 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01567>.
- [66] W.S. Wong, H.T. Zhong, A.T. Cross and J.W.H. Yong, «Plant biostimulants in vermicomposts: characteristics and plausible mechanisms. In: Geelen, D., Xu, L. (Eds.), *The Chemical Biology of Plant Biostimulants*». Wiley, pp. 155–180, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119357254.ch6>.
- [67] J. Poveda, «Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. Agr. Sustain». *Develop.* Vol. 41, 5. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>.
- [68] D. Beesigamukama, B. Mochoge, N.K. Korir, K.K. Fiaboe, D. Nakimbugwe, F.M. Khamis, S. Subramanian, M.M. Wangu, T. Dubois, S. Ekesi, et al. «Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly». *Waste Manag.* Vol. 119, 183–194. 2021.
- [69] G. Rossi S. Ojha A. Müller-Belecke and O.K. Schlüter «Fresh aquaculture sludge management with black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae: investigation on bioconversion performances». *Scientific Reports*, vol. 13, 20982, 2023.
- [70] M. Herliwati, Rahman and A. Ahmadi, «The Addition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Frass as Natural Fish Feed Fertilizer». *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 29 (5), 509-522. (2025).
- [71] A. Chepkorir, D. Beesigamukama, H.I. Gitari, S.Y. Chia, S. Subramanian, S. Ekesi, B.E. Abucheli, J.C. Rubyogo, T. Zahariadis, G. Athanasiou, A. Zachariadi, V. Zachariadis, A. Tenkouano and C.M. Tanga, «Insect frass fertilizer as a regenerative input for improved biological nitrogen fixation and sustainable bush bean production». *Frontiers in Plant Science*, vol. 15, 1460599, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1460599>.
- [72] P. Steinrücken, O. Müller, H. Böpple and D. Kleinegris, «Insect frass as a fertilizer for the cultivation of protein-rich *Chlorella vulgaris*». *Bioresource Technology Reports*, vol. 25, 101686, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101686>.
- [73] A. Petrucciani, L. Mollo, et al. «From waste to products: microalgal cultivation in insect frass to obtain valuable biomass». *Bioresource Technology Reports*, 32, 102339, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102339>.
- [74] M. Kaczor, A. Bieganski, D. Wiącek, and P. Bulak, s «Black soldier fly frass from seed waste of nitrogen-rich legumes – How long-term maturation affects the fertilizer properties?», *Journal of Environmental Management*, vol. 373, 123752, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123752>.