UNIVERSITÉ DE LA POLYNÉSIE FRANÇAISE

ÉCOLE DOCTORALE DU PACIFIQUE - ED 469

UMR 241 SECOPOL

THÈSE

présentée et soutenue publiquement par

Jade TETOHU

le 28 novembre 2024

en vue de l'obtention du titre du

Docteur de l'Université de la Polynésie française en

Département : **Sciences et Technologie**
Discipline : **Biologie des populations et écologie** (Section CNU n°67)
Spécialité : **Entomologie**

Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouches soldat noires (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale

Sous la direction de Hervé BOSSIN et Raimana HO

Jury

Laura GASCO, Professeur des Universités Université de Turin, Département des Sciences Agronomiques, Forestières et Alimentaires	Rapporteur
Christophe BRESSAC, Enseignant chercheur Université de Tours, Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte	Rapporteur
Nabila GAERTNER-MAZOUNI, Professeur des Universités Université de la Polynésie française, UMR 241 SECOPOL	Examinateur
Julie GRANDGIRARD, Ingénieure en entomologie, spécialité entomologie agricole Direction de l'Agriculture de Polynésie française	Examinateur
Hervé BOSSIN, Directeur du laboratoire d'entomologie médicale, Institut Louis Malardé, UMR 241 SECOPOL	Directeur de thèse
Raimana HO, Maitre de conférences, HDR Université de la Polynésie française, UMR 241 SECOPOL	Co-directeur de thèse

RESUMÉ

Résumé en français :

La mouche soldat noire (ou Black Soldier Fly, BSF) fait l'objet de nombreuses recherches pour la production et l'utilisation à grande échelle de sa larve comme biotechnologie verte. En effet, les larves de BSF se distinguent par leur capacité à digérer de grandes quantités de matières organiques, tout en s'enrichissant en protéines et en lipides. De ce fait, cet insecte peut être utilisé comme outil de gestion des biodéchets et comme une ressource nutritive, notamment pour l'alimentation animale. Cette thèse vise à étudier le potentiel de développement d'une telle filière à Tahiti (Polynésie française), territoire insulaire particulièrement dépendant du commerce extérieur. Les travaux de recherche sont donc axés sur la maitrise du cycle de vie complet de l'insecte (*Hermetia illucens*), sur la production et la caractérisation du profil nutritionnel des larves et enfin sur leur transformation et leur intégration dans l'alimentation des filières animales polynésiennes. Ces recherches sont effectuées dans le cadre du programme Ra'o Puha, porté par l'entreprise TECHNIVAL, en partenariat avec le laboratoire d'entomologie médicale de l'Institut Louis Malardé, co-financé par la Délégation à la Recherche de Polynésie française.

Mots clés : Bioconversion, biodéchets, alimentation animale, valorisation industrielle, insecte

Study of the industrial valorization of a process to produce black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) by bioconversion of agricultural and agro-industrial waste for animal feed

The black soldier fly (BSF) is the subject of extensive research for large-scale production and utilization of its larvae as a green biotechnology. Indeed, the BSF larvae are notable for their ability to digest large amounts of organic matter while enriching themselves in proteins and lipids. As a result, this insect can be used as a tool for organic waste management and as a nutritious resource, particularly for animal feed. This thesis aims to explore the development potential of such an industry in Tahiti (French Polynesia), an island territory highly dependent on external trade. The research focuses on mastering the complete life cycle of the insect (*Hermetia illucens*), the production and characterization of the larvae's nutritional profile, and their processing and integration into Polynesian animal feed industries. This research is conducted as part of the Ra'o Puha program, led by the company TECHNIVAL, in partnership with the Institute Louis Malardé's medical entomology laboratory, co-financed by the Research Delegation of French Polynesia.

Keywords: Bioconversion, biowaste, animal feed, industrial valorization, insects

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été extrêmement riche en rencontres, en échanges et en apprentissages. Avant de présenter le fruit de mes recherches, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet, qui m'ont guidée et soutenue, de près comme de loin.

Mes premières pensées vont vers Jean-Paul PEILLEX, ancien directeur général de la société TECHNIVAL, qui a initié ce projet et qui m'a fait confiance pour le poursuivre. Merci de m'avoir ouvert les portes de cet univers passionnant, auquel je n'étais pas forcément prédestinée ! Je remercie également Cyrille BACHELERY, directeur général de TECHNIVAL, qui m'a permis de mener ce projet librement, en m'accordant les ressources nécessaires et en me guidant dans ce parcours de gestion et de développement de projet industriel.

Je remercie également mes encadrants scientifiques : mes directeurs de thèse Hervé BOSSIN et Raimana HO. Merci pour votre disponibilité, votre accompagnement dans l'élaboration de mes expérimentations et vos conseils de rédaction. Gilles LE MOULLAC, qui a dirigé ma thèse avant son départ à la retraite puis qui m'a suivie en tant que consultant scientifique. Merci pour ton accompagnement dans le traitement de mes données et dans leur interprétation, pour ta réactivité dans la relecture de mes travaux, pour tes conseils et pour ton soutien dans cette phase finale cruciale.

Merci aux différents membres du jury d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail. Je remercie les rapporteurs du manuscrit, Pr. Laura GASCO de l'Université de Turin et Christophe BRESSAC de l'Université de Tours ainsi que les examinateurs Pr. Nabila GAERTNER-MAZOUNI de l'Université de la Polynésie française et Julie GRANDGIRARD de la Direction de l'Agriculture de Polynésie française. Merci pour le temps que vous avez consacré à ce travail.

Je remercie la Délégation à la Recherche de Polynésie française pour avoir supporté financièrement ce projet ainsi que ma bourse de thèse. Je remercie également l'École Doctorale du Pacifique par l'intermédiaire de sa co-directrice Florence POIRAT et des gestionnaires Tepuarata BROTHERS et Janice SCELLAND. Une pensée affectueuse à l'ancienne équipe en place que j'ai côtoyée durant la plus grande partie de mon parcours, Franck LUCAS et Tanoa URAEVA, merci pour votre accompagnement, vos encouragements et votre implication pour notre réussite à tous. Merci également à l'UMR 241 SECOPOL (anciennement UMR 241 EIO)

pour m'avoir accueillie dans vos locaux et laboratoires, me permettant de mener à bien mes travaux. Merci notamment à Tamatoa LEHARTEL, pour m'avoir aidée lors de mes premiers essais de dégraissage des larves par voie chimique.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Xavier MOPPERT et Denis SAULNIER, membres de mon comité de suivi individuel. Merci pour votre bienveillance lors de nos entrevues et pour vos conseils éclairés.

Ce travail de recherche a également été riche en collaborations. A l'échelle locale, je remercie notamment la Direction des Ressources Marines par le biais de Georges REMOISSENET, Moana MAAMAATUAIAHUTAPU, Marc-André LAFILLE et Matangi MOEROA pour avoir rendu possibles les essais en crevetticulture. Un grand merci à Stanley FLORH pour son aide dans l'approvisionnement en crevettes, en aliments et en matériel. Merci également à l'IFREMER pour nous avoir permis d'accéder au site expérimental. Travailler sur ce site a été une opportunité pour discuter avec la Coopérative des Aquaculteurs de Polynésie française (CAPF), je remercie notamment Carine ELISSONDO, Jean-Michel DELECHENEAU et Benoît LE MARECHAL, merci pour le temps que vous nous avez consacré et pour la qualité de nos échanges.

J'ai également eu l'opportunité de collaborer Valérie ANTRAS de la Direction de l'Agriculture. Merci pour la richesse de nos discussions et pour m'avoir mise en contact avec le réseau de petits éleveurs de poules pondeuses. J'en profite également pour remercier l'équipe PROTEGE, notamment Aurélie THOMASSIN, Karynn MI YOU et Angèle ARMANDO, j'ai pris beaucoup de plaisir à mener cette mission de développement de kits pour l'élevage artisanal de larves de BSF à vos côtés. Un grand merci aux éleveurs pilotes qui ont accepté de mettre à l'essai les kits de production de larves de BSF au sein de leur exploitation, et une pensée particulière pour Maori et Tutana qui ont accueilli les tests d'appétence en aviculture au sein de leur élevage.

Un grand merci à Philippe SOUDANT et Fabienne LEGRAND pour m'avoir accueillie au sein de la plateforme LIPIDOCEAN. Merci pour la belle opportunité de me former en extraction et analyse des profils d'acides gras, je pense notamment à Fany SARDENE et Marc LONG qui m'ont accompagnée pour le début des essais en laboratoire. Je suis également reconnaissante d'avoir pu assister aux modules de cours dispensés par Edouard KRAFFE DE LAUBAREDE, Gauthier SCHAAL et Marie VAGNER. Enfin, je n'oublie pas tous les copains du labo : Ambre GAUTIER, Léa JEUNET, Enora JAFFREZIC, Enora GONIDEC, Stina KOLODZEY, Adriana

SPEDICATO et Romain GONZALVEZ. Merci pour les sessions de décryptage des profils d'acides gras, pour les discussions sur les stats, pour les pauses café remotivantes et pour les sorties de lundi soir au Tara Inn ! Mes six mois passés à Brest ont été très formateurs et m'ont permis de rencontrer des personnes formidables.

Après Brest, direction le Canada ! Je remercie Benjamin BARIL de l'Université LAVAL à Québec, que nous avons eu le plaisir d'accueillir en stage à TECHNIVAL pour diverses missions sur la valorisation des déchets. Merci pour la qualité de nos échanges sur la thématique BSF et en particulier pour tes conseils sur la standardisation de nos procédures de maintien de colonie.

J'en profite également pour remercier les étudiants et stagiaires avec qui j'ai eu l'opportunité de travailler. Laura EICHHARDT, Aimie KARASZ, Lou DANNER, Anouk PILOSSIAN, Océane BARDY. J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous toutes, merci pour vos contributions et surtout pour tous les bons souvenirs que je garde avec chacune d'entre vous. J'espère vous revoir, épanouies dans vos parcours professionnels et personnels.

Un petit clin d'œil à Coralie DENIOT, qui a fait partie des toutes premières personnes à travailler sur ce projet à l'époque de son lancement. Comme tu le vois, le bébé a bien grandi ! C'est très amusant qu'on soit aujourd'hui amenées à échanger dans le cadre de ton poste de responsable de la valorisation des matières organiques à la CAPL. Merci pour tes encouragements et ton implication dans nos projets locaux.

Je ne peux pas parler de collaborations sans mentionner l'Institut Louis Malardé (ILM) notre partenaire historique sur ce programme de recherche. Je remercie en premier lieu Hervé VARET, ancien directeur de l'ILM, pour avoir accueilli notre projet sur le site du laboratoire d'entomologie médicale (LEM) et pour l'aménagement des laboratoires relais au sein desquels nous poursuivons notre projet. Je remercie également Maire SABRE, directrice actuelle de l'ILM avec qui un nouveau contrat de collaboration a été approuvé pour la poursuite de nos travaux à l'échelle pilote. Merci à André UNG du laboratoire de biotoxine marines de l'ILM pour les conseils avisés, le dépannage en petit matériel et surtout pour la lyophilisation de nos échantillons. Bien entendu, un grand merci à ma super team du LEM, pour les bons moments partagés, aussi bien au laboratoire que pendant les sessions de sport à Vaitavere. Je remercie Jérôme MARIE, Joan ROBSON, Teragihei CUK et Lorenzo HOGA pour votre aide dans la « manip moustiques ». Merci également à Michel CHEONG SANG, Manfred MERVIN,

Hmeniko TOURANCHEAU, Hutia BARFF et bien sûr Ranihei HOANG ; Vous m'avez accueillie dans la famille du LEM et m'avez soutenue et encouragée tout au long de mon parcours, merci ! Comme on aime le dire, « good job » les amis ! Une pensée affectueuse à ma copine doctorante Reva LANNUZEL, ça y est Reva, on est au bout ! Merci à toi également Françoise MATHIEU-DAUDE, pour nos petites discussions qui changent les idées, pour tes encouragements et pour ta bonne humeur !

Je saisis cette occasion pour remercier chaleureusement les personnes qui ont contribué significativement à la croissance de ce projet : Arthur MATAOA, qui m'a transmis le savoir-faire d'élevage acquis auprès de mes prédécesseurs. Tu resteras « Le roi Arthur » de notre unité d'élevage, merci pour toute l'énergie que tu as mis dans notre projet ! Je retiendrai ton dévouement autant que ton impatience ; tu as beau être une véritable tempête, tu étais également un solide pilier de ce projet. Je ne peux d'ailleurs pas parler de pilier sans mentionner Arii-Nui PROUT. Depuis que tu as rejoint l'aventure en tant que responsable du développement chez TECHNIVAL, le projet a clairement bénéficié d'un grand coup de boost. Merci pour ton soutien, pour le temps que tu prends à m'éclairer sur les aspects stratégiques ou techniques et pour ton écoute bienveillante. Un grand merci également au reste de l'équipe TECHNIVAL bureau, pour votre soutien, vos encouragements et la qualité des moments partagés. Je suis reconnaissante et heureuse de continuer l'aventure à vos côtés !

Une pensée affectueuse pour Mareva LOUIS, qui a rejoint l'équipe en début d'année en tant que technicienne d'élevage. Ta douceur et ton sens du détail sont tellement appréciables. J'espère que l'avenir nous permettra de continuer à faire grandir ce projet ensemble. Je pense également à Elisabeth APUARII, qui nous soutient depuis peu sur les activités de routine et à Billy TAPI qui venait nous aider les mercredis. Merci à tous les deux d'avoir contribué à la bonne conduite des activités d'élevage, dans une ambiance musicale de qualité mêlant remix locaux, chanteurs internationaux et vieilles chansons françaises !

En fin de compte, merci à tous ceux qui ont croisé mon chemin au cours de cette aventure, à ceux qui m'ont témoigné de la bienveillance ; à ceux qui ont accepté de répondre à mes questions, ou qui m'en ont posé ; à ceux qui se sont investis à mes côtés pour la réalisation des phases expérimentales et à ceux qui m'ont dépannée quand j'en avais besoin (aussi bien en matériel, qu'en idées de génies ou en nourriture réconfortante !).

A ma mouchette que je n’oublie pas, ma colocataire depuis le début de mes travaux de recherche, et pour encore plusieurs années je l’espère !

Enfin, merci infiniment à mes proches, qui ironiquement sont probablement ceux qui en savent le moins sur mon quotidien d’éleveuse de mouches ! Pour autant, vous avez toujours su me soutenir et m’encourager, même quand j’ai dû sacrifier certaines sorties ou certains événements pour rester bosser. Merci à mes parents et à mon frère pour l’environnement de calme, de joie et de réconfort que vous m’apportez au quotidien. Merci à mon chéri qui attend impatiemment le jour où ma farine d’insectes pourra remplacer sa whey ! Merci pour les promenades et pour tes blagues qui m’ont permis de me changer les idées sur la phase finale. A mes amies, merci les filles pour nos petits moments de qualité toutes ensemble. Et à ma bande au complet, merci les amis pour ces moments de déconnexion qui font du bien, il me tarde de vous retrouver plus souvent !

PUBLICATIONS ET TRAVAUX SCIENTIFIQUES

Articles soumis dans des revues scientifiques

TETOHU J., DANNER L., SOUDANT P., LE GRAND F., HO R., BOSSIN H., LE MOULLAC G. (2024). Bioconversion performances and composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on industrial by-products. *Soumis à la revue Animal.*

Communications orales

TETOHU J. (2021). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale – Objectifs et résultats préliminaires. Doctoriales 2021 de l'Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 3 juin 2021.

TETOHU J. (2022). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale. Concours « Ma thèse en 180 secondes » finale régionale. Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 16 mars 2022.

TETOHU J. & VITRAC M. (2022). Les écosystèmes face aux changements climatiques. Workshop des Doctoriales 2022 de l'Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 5 mai 2022.

TETOHU J. (2022). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale. Concours « Ma thèse en 180 secondes » demi-finale nationale. Totem de l'Institut des systèmes complexes, Paris. 7 avril 2022.

TETOHU J. (2022). Industrial valorization of the Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) production process by bioconversion of agricultural and agro-industrial waste for animal feed - Analysis of the PUFA profile of larvae depending on larval growth substrates. Atelier finistérien des lipides marins. Université de Bretagne Occidentale, Brest. 27 septembre 2022.

TETOHU J. & PROUT A. (2022). Valorisation de matières organiques par production locale de larves de Black Soldier Fly (BSF) pour l'alimentation des élevages polynésiens. Atelier économie circulaire du Club des Entreprises Polynésiennes Eco-responsables (EPER). Papeete, Tahiti. 2 décembre 2022.

TETOHU J. & PROUT A. (2023). Valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens)* par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels, pour l'alimentation des élevages polynésiens. Conférences de la Recherche 2023. Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 2 mars 2023.

TETOHU J. (2023). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale – Évaluation du potentiel d'enrichissement des larves de BSF en acides gras polyinsaturés. Doctoriales 2023 de l'Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 12 mai 2023.

TETOHU J. (2023). Industrial valorization of a process for producing black soldier fly larvae by bioconversion of agricultural and agro-industrial waste, for animal feed – Substitution of beef liver powder with defatted BSF meal in feeding of *Aedes aegypti* mosquito larvae. Conseil scientifique de l'Institut Louis Malardé. Punaauia, Tahiti. 8 octobre 2023.

Distinctions

Prix de la thèse offrant les meilleures perspectives de valorisation économique ou culturelle. Doctoriales 2021 de l'Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 3 juin 2021.

Prix du jury. Concours « Ma thèse en 180 secondes » finale régionale. Université de la Polynésie française. Punaauia, Tahiti. 16 mars 2022

Rapports scientifiques et techniques

Convention n°05833/MED/REC du 26 août 2019 entre l'Institut Louis Malardé et la Délégation à la Recherche de Polynésie française (9 000 000 XPF)

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & PEILLEX J-P. (2020). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves d'insectes *Hermetia illucens* par bioconversion de tourteaux de coprah et autres déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale (aquacole, avicole, entomologique) – Rapport initial. Septembre 2020 (5p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & PEILLEX J-P. (2021). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves d'insectes *Hermetia illucens* par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale (aquacole, avicole, entomologique) – Rapport d'étape. Août 2021 (16p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & HO R. (2023). Étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves d'insectes *Hermetia illucens* par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale (aquacole, avicole, entomologique) – Rapport final. Août 2023 (49p).

Programme PROTEGE financé par l'Union Européenne (1 695 000 XPF)

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & PEILLEX J-P. (2020). Élaboration d'un manuel de production de larves de Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) pour l'alimentation des poules pondeuses en Polynésie française et fourniture de 5 kits – Note de cadrage. Octobre 2020 (9p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & PEILLEX J-P. (2021). Élaboration d'un manuel de production de larves de Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) pour l'alimentation des poules pondeuses en Polynésie française et fourniture de 5 kits – Rapport intermédiaire. Avril 2021 (15p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & PEILLEX J-P. (2021). Élaboration d'un manuel de production de larves de Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) pour l'alimentation des poules pondeuses en Polynésie française et fourniture de 5 kits – Rapport technique final. Octobre 2021 (35p).

Convention n°4503/MAF/REC du 24 juin 2022 entre l'Institut Louis Malardé et la Délégation à la Recherche de Polynésie française (9 700 000 XPF)

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & HO R. (2022). Performances de croissance et profil nutritionnel des larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) élevées sur différents gisements de biodéchets de Tahiti – Rapport initial. Novembre 2022 (23p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & HO R. (2023). Performances de croissance et profil nutritionnel des larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) élevées sur différents gisements de biodéchets de Tahiti – Rapport d'étape. Novembre 2023 (44p).

TETOHU J., BOSSIN H., LE MOULLAC G. & HO R. (2024). Performances de croissance et profil nutritionnel des larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) élevées sur différents gisements de biodéchets de Tahiti – Rapport final. Juin 2024 (77p).

Rédaction de demandes de financements

Projet de recherche « Performances de croissance et profil nutritionnel des larves *Hermetia illucens* élevées sur différents gisements de biodéchets » présenté à la Délégation à la Recherche de la Polynésie française pour l'obtention d'un financement de 9 700 000 XPF en 2022.

Volet technique dans le cadre d'une demande de subvention ADEME pour la « Mise en place d'une unité pilote de production de larves de mouche soldat noire (Black Soldier Fly ou BSF, *Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets organiques en Polynésie française » pour le financement à hauteur de 50% de nos dépenses pour une enveloppe globale de 225 000 € en 2023.

Animation et vulgarisation scientifique

Capsule vidéo dans le cadre du programme PROTEGE publiée le 10 mars 2021 sur la chaîne YouTube de la Communauté du Pacifique : Projet PROTEGE : Les mouches soldat noires (BSF) en Polynésie française (youtube.com)

Guide d'élevage de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) à l'attention des petits élevages avicoles de Polynésie française. Kit de production artisanale – Avec la collaboration de la Direction de l'Agriculture, disponible en ligne depuis octobre 2021 : Guide d'élevage de larves de la mouche soldat noire en Polynésie française | The Pacific Community (spc.int)

Capsule vidéo dans le cadre de la Fête de la Science publiée le 9 novembre 2021 sur la chaîne YouTube de Fête de la Science Polynésie : Jade Tetohu - ILM - Transformer des biodéchets en ressources avec la larve de mouche soldat noire (youtube.com)

Présentation du programme Ra'o Puha sur le stand TECHNIVAL de la foire agricole du 28 septembre au 8 octobre 2023 et participation à l'émission Fenua Access du 3 octobre 2023.

Présentation du programme Ra'o Puha sur le stand partagé entre TECHNIVAL et l'Institut Louis Malardé à l'occasion des journées Proscience le 18 novembre 2023.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS **3**

PUBLICATIONS ET TRAVAUX SCIENTIFIQUES **8**

TABLE DES MATIÈRES **12**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **15**

Contexte de l'étude 15

But de l'étude dans le contexte polynésien 17

CHAPITRE 1 – ÉTAT DE L'ART **19**

L'utilisation d'insectes comme modèle biotechnologique durable 20

Les enjeux de l'industrie des insectes pour l'alimentation animale 25

La mouche soldat noire ou Black Soldier Fly (BSF) 32

L'élevage industriel de BSF 40

Le projet de recherche Ra'o Puha 42

CHAPITRE 2 – DOMESTICATION ET MAITRISE DE LA REPRODUCTION DES GÉNITEURS EN CAPTIVITÉ **45**

Introduction du chapitre *45*

Impact des conditions environnementales sur la dynamique des pontes sauvages de BSF sur un site pilote *48*

Introduction 48

Matériels et méthodes 48

Résultats et discussions 50

Conclusion partielle 65

Établissement d'une colonie captive et performances en fonction des générations *68*

Introduction 68

Matériels et méthodes 72

Résultats et discussions 74

Conclusion partielle 89

Conclusion du chapitre *90*

CHAPITRE 3 – BIOCONVERSION ET QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES LARVES DE BSF **92**

Introduction du chapitre *92*

Bioconversion performances and composition of Black soldier fly larvae (Hermetia illucens) reared on industrial by-products *96*
Conclusion du chapitre *147*

CHAPITRE 4 – TRANSFORMATION ET INTÉGRATION DES LARVES DE BSF A L'ALIMENTATION ANIMALE **150**
Introduction du chapitre *150*
Impact de la complémentation de l'alimentation des poules pondeuses avec des larves de BSF sur les performances de ponte *152*
Introduction 152
Matériels et méthodes 154
Résultats et discussion 157
Conclusion 166
Remplacement de la poudre de foie de bœuf par de la farine de BSF dans l'alimentation des larves de moustiques Aedes aegypti : suivi des performances zootechniques *168*
Introduction 168
Matériels et méthodes 170
Résultats 174
Discussion 179
Conclusion 183
Annexes 185
Développement d'un outil d'aide à la formulation et intégration des larves dans un aliment en aquaculture pour la crevette bleue Litopenaeus stylirostris *188*
Introduction 188
Formulation d'un aliment commercial incluant de la farine de BSF 191
Formulation et essai biologique d'un aliment humide expérimental 199
Conclusion 209
Annexes 211
Conclusion du chapitre *220*

CHAPITRE 5 – DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **222**
Principaux résultats et implications pour le développement d'une unité de production *223*
Importance de la domestication 223
Les enjeux de la bioconversion 223
Diverses approches pour la valorisation des larves de BSF 225
Industrialisation du procédé *228*
Dimensionnement d'une unité de production à Tahiti 228

Les aspects techniques et économiques 232
Les aspects réglementaires 233
Conclusion *235*
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 237

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de l'étude

Le programme Ra'o Puha est un projet de recherche porté par la société TECHNIVAL. Fondée en 1999, cette entreprise polynésienne développe des solutions de traitement, recyclage et valorisation des déchets à Tahiti. La préservation des ressources locales ainsi que la protection de l'environnement sont les valeurs autour desquelles Technival a développé ses trois pôles d'activités :

- Le tri, traitement et valorisation des déchets organiques : Technival réceptionne les déchets verts des particuliers, des professionnels et des collectivités, afin de les valoriser via la production puis la commercialisation de compost ;
- La gestion des déchets spéciaux : avec la prise en charge de la collecte, du conditionnement et du traitement de divers déchets dangereux, Technival est pionnier dans le domaine de la gestion des déchets spéciaux en Polynésie française. La société propose également un service d'accompagnement garantissant le respect des normes de sécurité et environnementales ;
- L'assainissement des eaux usées : Technival s'est spécialisé dans le traitement des eaux usées domestiques et industrielles, par un traitement biologique. La société propose également la réalisation d'études de conception, le suivi des travaux de construction ainsi que l'exploitation et la maintenance des stations d'épuration.

Au fil des années, les activités de Technival se sont orientées davantage vers des modèles d'économie circulaire, avec l'essor de nouveaux projets de développement liés à la valorisation de ressources locales et à la production d'intrants pour le secteur primaire ; c'est notamment le cas du projet Ra'o Puha.

Le projet Ra'o Puha a été initié en 2015, avec le Consortium de Valorisation Thématique Sud (CVT Sud) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) afin de répondre à la demande de valorisation des excédents de tourteaux de coprah produits par l'Huilerie de Tahiti. Même si une partie de la production de tourteaux de coprah était absorbée par le marché local de l'alimentation des animaux d'élevages, ce marché s'est montré trop petit, forçant l'Huilerie de Tahiti à exporter jusqu'à 800t de sa production de tourteaux vers les marchés calédoniens et

néo-zélandais en 2015 (données de l'Institut de la Statistique de la Polynésie française, ISPF, consultées le 18 janvier 2024).

Face à la requête de l'Huilerie, c'est dans un premier temps une solution de compostage qui est proposée par Technival, mais cette option n'est pas retenue car l'Huilerie de Tahiti souhaite une valorisation plus vertueuse des tourteaux de coprah. Au cours de la veille technologique menée par Technival, le projet « mini-larve » dont l'IRD détient le brevet est apparu comme une solution innovante et vertueuse pour traiter ce gisement de matière organique (Hem and Fahmi, 2009). Ce brevet porte sur des travaux menés en Indonésie par les chercheurs Domenico CARUSO et Saurin HEM, qui utilisent les larves de la mouche soldat noire (ou « Black Soldier Fly », BSF) pour la bioconversion de tourteaux de palmistes en protéines d'insectes, destinées à intégrer l'alimentation des alevins de poissons (Tilapias), de poissons d'aquarium et d'animaux de compagnie. En effet, la larve de BSF s'enrichit en nutriments en se nourrissant de la matière au cours de son développement. Avec sa capacité de dégradation et de bioconversion conséquente, cette larve est à la fois un outil de gestion des matières organiques (Li *et al.*, 2011; Surendra *et al.*, 2016) et une potentielle ressource nutritive pour les animaux d'élevages (DeFoliart, 1989; T Veldkamp *et al.*, 2012). Technival a alors fait l'acquisition de la licence de ce brevet pour mettre en place une unité de production de larves de BSF à Tahiti, pour le traitement et la valorisation des tourteaux de coprah de l'Huilerie de Tahiti, sur la base du modèle existant dans le Sud Est Asiatique. C'est ainsi que le projet est baptisé « Ra'o Puha », « ra'o » signifiant mouche, et « puha » désignant le coprah dans la langue tahitienne. Ce nom de projet, symbolique, sera conservé en mémoire à la genèse du projet, bien que les ambitions du programme ne se limitent pas uniquement au traitement des tourteaux de coprah.

Bien que les premiers essais de bioconversion de ce gisement par les larves de BSF se soient montrés prometteurs, ils ont également souligné la nécessité d'approfondir certains aspects relatifs à l'élevage de cet insecte à grande échelle à Tahiti, avant d'envisager pouvoir développer une telle industrie sur le territoire. Un partenariat scientifique a ainsi été établi en 2015 avec l'Institut Louis Malardé (ILM) pour entamer une phase de recherche et développement. Depuis, l'ILM héberge sur son site de Paea au sein de son laboratoire d'entomologie médicale (LEM) le pilote expérimental de production de larves de BSF de Technival, permettant ainsi aux deux entités de collaborer sur les diverses études menées durant cette phase de recherche expérimentale.

Riche de ce partenariat, le programme Ra'o Puha est lauréat de l'appel à projet « Recherche & Innovation : Partenariat Public-Privé (RIP 3) » de la délégation à la recherche en 2019, permettant le co-financement de la présente thèse.

But de l'étude dans le contexte polynésien

A travers ce projet, Technival m'a confié l'objectif d'étudier l'industrialisation du procédé de bioconversion de matières organiques, qui ne sont peu voire pas valorisées aujourd'hui, par les larves de BSF. Mes travaux doivent permettre la création d'une unité de production de larves de BSF sur le territoire polynésien qui permettra :

- Le développement d'une nouvelle filière de gestion des déchets agricoles et agro-industriels.
- La production locale des ressources nutritives alternatives et durables, à destination des élevages locaux

Ce projet d'économie circulaire trouve toute sa place dans l'écosystème économique polynésien. En effet, l'économie de la Polynésie française repose essentiellement sur le tourisme avec près de 200 000 visiteurs chaque année (ISPF ; Indicateurs économiques de la PF[1]) et la perliculture. Du fait de son insularité, et avec peu de ressources en matières premières, le Pays importe beaucoup de marchandises et de biens de consommation. D'après l'ISPF[1], en 2022, la valeur des imports s'élevait à près de 250 milliards de francs pacifique (plus de 800 000t de marchandise) contre 12 milliards de francs pacifique d'exports (près de 20 000t de marchandise). Ce déséquilibre de la balance commerciale inscrit la Polynésie française dans un schéma d'économie d'importation. Cette dépendance au commerce extérieur est un facteur de vulnérabilité du territoire, qui est soumis à des contraintes liées à la disponibilité des marchandises, aux coûts d'approvisionnement et aux délais d'acheminement. Afin de sortir progressivement de ce schéma, le Pays soutient et développe la production et la valorisation de ressources polynésiennes afin de dynamiser l'économie locale, à travers des activités participant notamment à l'autonomie alimentaire du Pays, à son développement durable et à sa résilience.

[1] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/indicateurs-economiques-de-la-polynesie-francaise/ janvier 2024

La finalité des travaux de recherche de cette thèse se concrétisera par le développement d'une nouvelle branche de la filière « insectes » en Polynésie française.

Le programme Ra'o Puha propose non seulement une réponse intéressante à la valorisation de matières organiques agricoles ou agro-industrielles, aujourd'hui considérées comme des biodéchets, mais également la production d'ingrédients (larves de BSF transformées) comme alternative durable aux sources de nutriments conventionnelles (farines et huiles de poisson ou de soja par exemple). A travers le développement d'une telle unité de production de larves de BSF, Technival souhaite contribuer à diminuer les importations d'aliments pour les élevages locaux, réduire l'impact environnemental, promouvoir une agriculture plus durable et soutenir l'effort vers une autonomie alimentaire.

CHAPITRE 1 – ÉTAT DE L'ART

La sécurité alimentaire et l'amélioration de la nutrition font partie des objectifs de développement durable de l'organisation des nations unies. Le défi de l'alimentation de la population mondiale n'a de cesse de se renforcer avec la croissance démographique, l'élévation du niveau de vie et les besoins croissants mais aussi de plus en plus exigeants des consommateurs, en particulier dans les pays en développement (FAO, 2009). La sécurité alimentaire mondiale repose sur la disponibilité et l'accès à des ressources nutritives. En plus de fournir des nutriments de qualité, il devient essentiel que les ressources actuelles soient gérées de façon durable, avec un impact environnemental réduit (Sachs, 2009).

La demande en céréales et en aliments riches en protéines est notamment liée à la consommation de viande (Trostle, 2008) et de poisson. L'alimentation des élevages est basée sur l'utilisation de protéines et de lipides d'origine végétale et animale telles que la farine de soja, les céréales, la farine de poisson et l'huile de poisson. La raréfaction de ces ressources entraine une augmentation du prix des matières premières (Schönfeldt and Hall, 2012; Dicke, 2018), qui peuvent représenter jusqu'à 70% des coûts de production dans les systèmes d'élevage (Van Huis, 2013). Ces coûts deviennent difficilement supportables pour les éleveurs. L'utilisation de ces ingrédients est également en augmentation dans l'alimentation animale, ce qui se traduit par une concurrence avec l'alimentation humaine pour l'accès aux ressources (Tveterås and Tveterås, 2010; Barragan-Fonseca, 2018). Par ailleurs, les modèles de production de ces ingrédients ne sont pas durables. La culture du soja est l'une des activités responsables de la déforestation, notamment en Amazonie (Gollnow *et al.*, 2018; da Silva *et al.*, 2023) et la disponibilité des terres dédiées à l'agriculture diminue à l'échelle mondiale en raison de l'urbanisation. D'autre part, la demande en farine et huile de poissons participe à la surexploitation des ressources marines et à la diminution de l'abondance et de la biodiversité des espèces pélagiques (Tacon and Metian, 2008).

Face à l'augmentation de la demande en protéines et aux pressions croissantes liées à la production et à l'utilisation des ingrédients conventionnels, l'élevage des insectes apparait comme une alternative pour la nutrition des animaux d'élevage (Premalatha *et al.*, 2011).

L'utilisation d'insectes comme modèle biotechnologique durable

Les insectes constituent le groupe animal le plus diversifié avec près d'un million d'espèces connues (Erwin, 2004). Dans la nature, ils sont essentiels à l'équilibre des écosystèmes car ils sont d'importants fournisseurs de services écologiques : ils jouent un rôle de pollinisateurs (Kevan, Clark and Thomas, 1990; Gabriel and Tscharntke, 2007), régulent la végétation ainsi que les espèces envahissantes (Nyffeler and Benz, 1987; Masson, 2018) et participent à la décomposition de la matière organique animale et végétale (Louzada and Nichols, 2012) de même qu'à la fertilité des sols (Yang and Gratton, 2014). Les différentes propriétés biologiques des insectes sont exploitées depuis de nombreuses années à travers l'élevage de masse de certaines espèces, pour des applications variées, dont quelques exemples sont présentés ci-après.

Production de biomatériaux

Les vers à soie (*Bombyx mori*) sont élevés à grande échelle pour la production de la soie depuis plusieurs milliers d'années. Cette industrie s'est dans un premier temps développée en Chine et en Inde avant d'être introduite en Europe (Dayalan, 2019). Des recherches sur la génétique et la biologie de l'insecte sont également menées pour des applications du ver à soie en tant que biotechnologie notamment dans le domaine biomédical (Wang *et al.*, 2014, 2018; Khosropanah *et al.*, 2022) et celui des biomatériaux (Baci, Moise and Dezmirean, 2021).

Digestion des matières plastiques

Les microbiomes intestinaux des insectes recèlent un potentiel prometteur pour une dégradation efficace du plastique en combinant des mécanismes physiques et biochimiques. L'insecte est en mesure d'ingérer des particules de plastique qui sont ensuite dégradées par la communauté microbienne du tube digestif de l'hôte. Plusieurs études récentes ont rapporté que les microbiomes des insectes sont capables de dégrader les plastiques. Les souches bactériennes telles que *Enterobacter asburiae* et *Bacillus sp*., isolées de l'intestin des larves de la pyrale indienne *Plodia interpunctella*, étaient capables de dégrader le polyéthylène (PE) (Yang et al. 2014). Les larves du coléoptère *Zophobas morio* décomposent les matières plastiques comme le polystyrène. Cette capacité altère toutefois leur bon développement (Sun *et al.*, 2022) .

Lutte biologique en agriculture

Les coccinelles

Les coccinelles (Coccinellidae) sont élevées à grande échelle pour leur rôle d'auxiliaire de culture (Lucas, 2012; Ben Boulaïd, 2019). En effet, les coccinelles ainsi que leurs larves sont prédatrices d'un certain nombre de ravageurs tels que les pucerons et les cochenilles (Masson, 2018; Stack Whitney, 2023). En Polynésie française, le laboratoire d'entomologie agricole de la Direction de l'Agriculture (DAG) développe depuis 2021 l'élevage de coccinelles pour réguler les populations de pucerons, ravageurs de cultures maraichères. Une phase expérimentale est en cours avec des agriculteurs partenaires pour valider l'efficacité d'utilisation de la coccinelle comme outil biotechnologique pour la gestion des pucerons à Tahiti.

Les guêpes parasitoïdes

Les guêpes parasitoïdes (Hymenoptera) sont également utilisées pour le contrôle des populations de certains ravageurs de cultures tels que les chenilles (Turlings *et al.*, 1995) ou les mouches des fruits (Ayelo *et al.*, 2017). Deux espèces de micro-guêpes (*Fopius arisanus* et *Diachasmimorpha longicaudata*) ont été introduites en Polynésie française, en 2002 et 2008 respectivement, pour combattre différentes espèces de mouches des fruits (*Bactrocera dorsalis, Bactrocera tryoni, Bactrocera xanthodes* et *Bactrocera kirki*) introduites accidentellement sur le territoire par le transport de fruits infestés (Vargas *et al.*, 2007, 2012). Le programme de lutte biologique contre les mouches des fruits en Polynésie française est également mené par le laboratoire d'entomologie agricole de la DAG.

Lutte antivectorielle en entomologie médicale

L'élevage industriel de moustiques est exploité dans le cadre de la préservation du bien-être et de la santé des communautés humaines afin de réduire les populations de moustiques vecteurs de maladies. Plusieurs méthodes de lutte innovante et respectueuses de l'environnement sont développées à l'échelle mondiale dont, la technique de l'insecte stérile (TIS) (Lees *et al.*, 2015; Bourtzis and Vreysen, 2021) et la technique de l'insecte incompatible (TII) (Zheng *et al.*, 2019; Griffin *et al.*, 2023). Ces méthodes sont des alternatives à la lutte mécanique (destruction des gites larvaires), et à la lutte chimique (utilisation d'insecticides). En Polynésie française, le laboratoire d'entomologie médicale de l'ILM développe l'élevage industriel de moustiques au sein de son centre INNOVENTOMO pour réduire les nuisances liées aux espèces *Aedes aegypti* (vecteur de la dengue, du Zika et du chikungunya), *Aedes polynesiensis* (vecteur des virus pré-

cités ainsi que de la filariose lymphatique) et prochainement *Culex quinquefasciatus* (vecteur du paludisme aviaire). L'ILM travaille sur les deux approches que sont la TIS et la TII.

Au-delà de ces différentes applications, les insectes constituent d'excellentes sources de nutriments, et pourraient bien être la ressource de demain pour subvenir aux besoins croissants de la population mondiale (FAO, 2013a).

Les insectes comme ressource nutritive

La consommation d'insectes n'est pas récente, les populations de nombreuses régions du monde (notamment en Afrique, en Asie, en Amérique centrale et du Sud ainsi qu'en Océanie), près de 2.5 milliards de personnes, intègrent depuis la nuit des temps de nombreuses espèces d'insectes récoltées dans la nature à leur alimentation (FAO, 2008, 2014; Pal and Roy, 2014). Parmi les insectes les plus consommés, on retrouve les coléoptères (Brett C., 2006; Ramos-Elorduy, Pino Moreno and Martínez Camacho, 2009), les chenilles (Kozanayi and Frost, 2002), les fourmis (Choo, 2010), les sauterelles (Paul *et al.*, 2016), les criquets (Egonyu *et al.*, 2021), les grillons (Lacey Rachael, 2016), les vers de farine (Feng, 2018), les vers de bambou (Sheileja *et al.*, 2022) et les vers à soie (Sharma *et al.*, 2022). Ces insectes sont consommés sous différentes formes, bien qu'ils puissent être consommés entiers et vivants, ils sont souvent frits, grillés ou séchés.

En revanche, l'élevage en masse des insectes et leur commercialisation pour leurs qualités nutritives sont en plein essor depuis le début du 21è siècle. En effet, les insectes sont considérés comme une ressource alternative pour répondre aux besoins globaux de l'alimentation humaine (FAO, 2014) et animale (Bovera *et al.*, 2016; Nowak *et al.*, 2016). Selon l'lPIFF (International Platform of Insects for Food and Feed), le volume de production de protéines d'insectes en Europe était de l'ordre de 5000 tonnes en 2019, 20 000 tonnes en 2022, et continueront d'augmenter avec des volumes attendus de 3 millions de tonnes d'ici 2030 (IPIFF, 2020). Parmi les insectes élevés à grande échelle pour leurs qualités nutritives, quatre espèces font l'objet d'une attention particulière, le ver de farine, le grillon, la mouche domestique et la mouche soldat noire (van Raamsdonk, van der Fels-Klerx and de Jong, 2017). Ces insectes ont la capacité de se nourrir sur différents sous-produits organiques, y compris sur des gisements considérés comme des biodéchets (Sánchez-Muros, Barroso and Manzano-Agugliaro, 2014; Shaphan Y. Chia *et al.*, 2018). Avec leur capacité de transformation de la matière en nutriments de haute qualité (Meneguz *et al.*, 2018), ces espèces suscitent un intérêt économique croissant

et ouvrent des perspectives de développement de nouvelles filières innovantes, basées sur des modèles d'économies circulaires (Sogari *et al.*, 2019).

Le ver de farine

Bien que le ver de farine (*Tenebrio molitor*) s'attaque communément aux stocks de farines de céréales (Ramos-Elorduy *et al.*, 2002), ses larves sont produites industriellement pour l'alimentation animale, en particulier pour les animaux domestiques, les oiseaux et les reptiles, ou encore les poissons d'ornements (Ng, 2001). Il s'agit d'un insecte facile à élever (Ghaly and Alkoaik, 2009), qui peut se nourrir de biodéchets d'origine végétale et animale. L'élevage industriel de cet insecte se fait généralement à partir de fruits, de légumes et de céréales (Aguilar-Miranda *et al.*, 2002; De Marco *et al.*, 2015). Le taux de protéines des vers de farine varie de 44 à 69% et le taux de lipides est compris entre 23 et 47% (T. Veldkamp *et al.*, 2012). Après la ponte par le ténébrion meunier, les œufs éclosent après environ 10 à 12 jours. Le stade larvaire comprend plusieurs stades, et peut durer de 3 à 12 mois suivant les conditions environnementales (Makkar *et al.*, 2014). La larve mature est de couleur jaune-brun clair et mesure entre 20 et 30mm de long, pour un poids moyen de 130 à 160mg. Sa capacité à s'alimenter sur divers biodéchets et particulièrement à transformer les déchets végétaux en biomasse larvaire riche en protéines, lipides et en énergie, en fait un insecte d'intérêt économique pour la gestion des biodéchets végétaux (Rakos-elorduy and Pino, 1990). Parmi les entreprises les plus connues dans l'élevage et la valorisation des vers de farine pour l'alimentation animale, on retrouve Ynsect, leader mondial sur le marché (entreprise française fondée en 2011) Micronutris (France, 2011), Entomo Farms (2014, Canada) et Beta Hatch (2015, Etats-Unis).

Le grillon

Parmi les entreprises citées précédemment, Micronutris et Entomo Farms développent également l'élevage de masse du grillon domestique (*Acheta domesticus*). Les grillons sont élevés pour leur richesse en protéines (Hackewitz, 2018) et peuvent intégrer l'alimentation humaine sous forme de barres énergétiques, poudres protéinées ou autres collations. La composition du grillon domestique est de l'ordre de 65% de protéines et 20% de lipides (Rumpold and Schlüter, 2013b). La période d'incubation des œufs est de 10 à 13 jours, période au bout de laquelle le grillon éclot sous sa forme définitive (il n'y a pas de stade larvaire) ; le grillon mettra ensuite environ 45 jours pour atteindre sa taille adulte (Clifford and Woodring, 1990) comprise entre 1.5 et 2cm. Les grillons ont une capacité de digestion similaire à celle des

vers de farine et se nourrissent aussi bien de matière organique végétale que de déchets carnés, ce qui rend leur élevage simple et peu couteux (Mukherjee and Mukherjee, 2022).

La mouche domestique

L'élevage de mouche domestique (*Musca domestica*) est également répandu. Les entreprises Agriprotein (Afrique du Sud, 2008), BioflyTech (Espagne, 2012) et Amusca BV (Pays-Bas, 2015) s'intéressent à la larve de mouche domestique pour le traitement de matière organique et la production de nutriments pour l'alimentation animale. Bien que cette mouche soit moins populaire en raison de son potentiel de transmission de maladies, la capacité de la larve omnivore à digérer de grandes quantités de nourriture en fait un insecte d'intérêt depuis de nombreuses années (Miller, Teotia and Thatcher, 1974; Hussein *et al.*, 2017). Les œufs de mouche domestique éclosent au bout de 8 à 12h, le stade larvaire a une durée d'environ 5 jours tout comme le stade de nymphe (Makkar *et al.*, 2014), résultant en un cycle de vie très court. La mouche adulte pond et se nourrit dans de la matière organique en décomposition. Elle liquéfie les aliments en régurgitant des gouttelettes de salive, processus impliqué dans la transmission des agents pathogènes (Joyner, Mills and Nayduch, 2013; Hassan *et al.*, 2021). La larve de mouche domestique contient environ 50% de protéines et 19% de lipides (Makkar *et al.*, 2014).

La mouche soldat noire

Les élevages industriels de mouches soldat noires (*Hermetia illucens*) sont en pleine expansion dans le monde. Plusieurs entreprises dédient leur activité à la production et la transformation de larves de mouches soldat noires pour le marché de l'alimentation animale. Parmi les entreprises les plus connues, on cite Enterra Feed Corporation (Etats-Unis, 2007), Enviroflight (Etats-Unis, 2009), Protix (Pays-Bas, 2009), Agronutris (France, 2011) et Innovafeed (France, 2015). L'élevage de cet insecte s'étend également à la région Pacifique avec notamment AgriProtein Pacific (Australie, extension des activités de la société basée en Afrique du Sud, développant à la fois l'élevage de la mouche domestique et de la mouche soldat noire) Goterra (Australie, 2016) et les start-up néo-calédoniennes Neofly (2020) et Entocal (2020). Tout comme les insectes cités précédemment, la mouche soldat noire a la capacité de s'alimenter sur une large variété de biodéchets (Cammack and Tomberlin, 2017; Nyakeri *et al.*, 2019), transformant la matière en nutriments de haute qualité. La biomasse larvaire de la mouche soldat noire contient environ 42% de protéines et 35% de lipides (Sheppard and Newton, 1994; Wang and Shelomi, 2017). La période d'incubation des œufs est d'environ 3 jours. Le stade larvaire dure en moyenne deux semaines, puis la larve se transforme en nymphe, et il faudra à

nouveau environ deux semaines avant l'émergence de la mouche adulte (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002; Holmes, Vanlaerhoven and Tomberlin, 2012).

Bien qu'elle soit émergente et très prometteuse, la filière de production d'insectes comme source de nutriments pour l'alimentation animale est encore relativement récente et fait face à des freins, aussi bien techniques que financiers ou règlementaires, freinant son acceptabilité dans l'industrie agroalimentaire.

Les abeilles et l'apiculture

L'apiculture repose sur l'exploitation des abeilles domestiques (*Apis mellifera*) pour la production de miel. Cette activité remonte à des millénaires, avec des preuves d'abeilles domestiquées remontant à l'Égypte ancienne et à la Grèce antique. Elle est devenue une industrie importante dans de nombreuses cultures à travers le monde. L'apiculture joue un rôle crucial dans la pollinisation des plantes, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale. Les abeilles domestiques sont les espèces d'abeilles les plus couramment utilisées en apiculture en raison de leur capacité à produire du miel en quantité. L'apiculture est confrontée à divers défis, notamment les maladies, la perte d'habitats naturels, l'utilisation de pesticides et les changements climatiques. Ces menaces ont des répercussions sur la santé des colonies d'abeilles et sur la durabilité de l'apiculture à long terme.

La filière apicole a débuté en Polynésie française dans les années 1970. A ce jour, elle produit environ 200 tonnes de miel par an. Il y a 250 apiculteurs, 10 000 ruches déclarées en 2018 et environ 60 000 abeilles par ruche. L'espèce d'abeille utilisée en apiculture en Polynésie est *Apis mellifera*. Celle-ci vient de croisements entre des abeilles importées d'Australie, de Nouvelle-Zélande ou encore du Chili. La durabilité de la filière apicole repose sur la conservation des plantes mellifères et le contrôle de la circulation de la bactérie *Paenibacillus larvae* responsable de la maladie dite de la loque américaine qui touche l'abeille et peut entraîner des pertes économiques considérables pour l'apiculteur et la filière apicole.

Les enjeux de l'industrie des insectes pour l'alimentation animale

Enjeux nutritionnels

Le développement de la filière insecte pour l'alimentation animale répond avant tout au besoin mondial de sécurité alimentaire (Van Huis, 2013). Les enjeux nutritionnels sont ceux présentés en introduction, témoignant de la nécessité de trouver de façon urgente de nouvelles ressources nutritives et durables pour nourrir la planète et diminuer la compétition entre alimentation

humaine et alimentation animale. Chaque année, le bétail consomme 77 millions de tonnes de protéines contenues dans des aliments fourragers, alors que les produits destinés à la consommation humaine et issus de l'élevage n'en fournissent que 58 millions (Steinfeld *et al.*, 2006; FAO, 2009).

Les insectes ont un fort potentiel pour le remplacement des sources actuelles de protéines telles que la farine de soja ou la farine de poisson dans l'alimentation animale, que ce soit en aquaculture (Henry *et al.*, 2015; Motte *et al.*, 2019) , en aviculture pour les poulets de chair (Schiavone, Cullere, *et al.*, 2017; Chodová and Tůmová, 2020) et les poules pondeuses (Borrelli *et al.*, 2017; Mwaniki *et al.*, 2020), pour l'élevage porcin (Yu *et al.*, 2020; Veldkamp and Vernooij, 2021) ou même pour les animaux domestiques (Beynen, 2018; Bosch and Swanson, 2021). Rumpold & Schlüter (2013a) ont rédigé une revue très complète de la composition nutritionnelle de plus de 200 espèces d'insectes, incluant les profils d'acides aminés et d'acides gras ainsi que la composition minérale et vitaminique, témoignant de la qualité nutritive des insectes.

Enjeux environnementaux

La production de masse des insectes présente plusieurs avantages par rapport aux filières d'élevages conventionnels. Les insectes ont des taux de reproduction et des efficacités de conversion alimentaires supérieurs à ceux des volailles, des bovins ou des porcs (Raubenheimer and Rothman, 2013; Van Huis, 2013). Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'élevage d'insectes sont faibles (Oonincx *et al.*, 2010; Barroso *et al.*, 2017; van Huis and Oonincx, 2017) et l'élevage à grande échelle nécessite moins d'espace et moins d'eau par kilogramme de protéines produites (Oonincx and de Boer, 2012; Kim, Weaver and Choi, 2016), ce qui n'est pas négligeable dans le schéma actuel où la production animale mobilise aujourd'hui 70% de la superficie agricole (Barragan-Fonseca, 2018) .

En Polynésie française, la production locale de ressources nutritives permettrait de réduire les importations de certaines matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments pour animaux, et ainsi réduire les impacts environnementaux liés au transport de ces marchandises. A titre indicatif, entre 2020 et 2022, ce sont entre 900 et 1200 t/an de tourteaux de soja qui ont été importés sur le territoire polynésien, pour une valeur CAF comprise entre 63 et 80 millions de francs pacifiques (ISPF). Par ailleurs, beaucoup d'aliments déjà assemblés (type granulés, croquettes) sont importés pour être directement distribués auprès des particuliers ou des éleveurs (en moyenne, 13 000 tonnes de marchandises par an entre 2020 et 2022, ISPF). La

production locale d'ingrédients encouragera également la production des aliments directement sur le territoire, permettant de réduire significativement les importations de ce secteur.

Par ailleurs, l'utilisation des insectes pour traiter la matière organique permet de réduire les émissions liées à l'accumulation des gisements de matière organique. En effet, pour citer quelques exemples, l'accumulation des fumiers dans les élevages est un contributeur majeur à l'émission de composés tels que l'ammoniaque, dangereux pour la santé humaine et l'entassement des déchets organiques dans les décharges augmente les émissions de méthane et de dioxyde de carbone, qui contribuent à la pollution de l'air (FAO, 2011; Jones, Tomberlin and Stull, 2019). Le développement de la filière insecte pour le traitement et la valorisation des matières organiques permettrait de proposer une nouvelle chaine de traitement de ces déchets organiques, bien que la règlementation de l'Union européenne interdise l'utilisation de certains gisements de matière organique pour l'alimentation des insectes. Les aspects réglementaires sont abordés dans le prochain paragraphe.

Enjeux règlementaires

Bien qu'elle soit en cours d'adaptation, la réglementation est ce qui a limité la production et l'utilisation des insectes pour l'alimentation animale. En effet, il y avait ces dernières années un défaut de cadre législatif clair et exhaustif, au sujet de la production, de la transformation et de la commercialisation des insectes sur le marché de l'alimentation animale, à l'échelle nationale et internationale (FAO, 2014). Quelques éléments marquants sont décrits ci-après.

En Europe, la production et la commercialisation des insectes comme source de nutriments pour l'alimentation animale est régie par la Règlementation Européenne. Un ensemble de textes législatifs encadre la sécurité alimentaire : la règlementation n°178/2002 relative à la sécurité des denrées alimentaires, la règlementation n°852/2004 relative à l'hygiène des denrées alimentaires et la règlementation n°183/2005 établissant des exigences en matière d'hygiène des aliments pour animaux. Il existe également des restrictions qui s'appliquent aux « animaux d'élevages », c'est-à-dire les animaux élevés pour la production de ressources alimentaires ou de produits dérivés. Ces restrictions s'appliquent également aux insectes produits pour la consommation humaine ou l'alimentation animale. Enfin, la directive européenne sur le bien-être des animaux (98/58/CE) pour l'élevage ne s'applique pas aux insectes car il s'agit d'invertébrés.

En 2017, dans le cadre de la règlementation Européenne, le règlement 2017/893 modifie le règlement 2001/999 et autorise l'utilisation de protéines provenant de 7 espèces d'insectes pour l'alimentation des filières aquacole, avicole et porcine : la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*), la mouche domestique (*Musca domestica*), le ver de farine (*Tenebrio molitor*), le petit ténébrion (*Alphitobius diaperinus*), le grillon domestique (*Acheta domesticus*), le grillon domestique tropical (*Gryllodes sigillatus*) et le grillon des steppes (*Gryllus assimilis*). En 2021, dans le cadre de la législation sur les sous-produits animaux 2021/1925, l'utilisation de protéines animales transformées du ver à soie (*Bombyx mori*) est autorisée pour l'alimentation des filières citées précédemment, élargissant la liste des espèces autorisées de sept à huit.

La règlementation cadre également les gisements de biodéchets qui peuvent être utilisés pour la production d'insectes à destination de l'alimentation animale. Pour l'heure, selon la règlementation européenne, seuls les substrats végétaux ainsi que des denrées alimentaires végétales, les produits laitiers ou les œufs non consommés mais n'étant plus propre à la consommation humaine peuvent être utilisés. Sont exclus les produits carnés ou à base de poisson, les restes alimentaires après consommation, les déchets d'abattoirs et les fumiers d'élevage (IPIFF, 2020).

La forme finale d'utilisation et par conséquent la transformation des différentes espèces d'insectes n'est pas la même suivant les filières d'alimentation animales visées. La figure 1.1 ci-après résume ces informations.

En Polynésie française, l'intégration de ressources nutritives issues des insectes à destination de l'alimentation animale fait l'objet d'un vide juridique. Le programme Ra'o Puha ayant comme ambition de valoriser divers gisements de biodéchets, y compris les co-produits de restauration tels que les restes alimentaires, la phase de recherche et développement du projet sur la transformation des larves de mouche soldat noire et leur intégration dans l'alimentation animale apportera un éclairage essentiel pour la mise en place de la règlementation polynésienne pour l'utilisation des insectes dans l'alimentation animale. Cette démarche permet d'inscrire la Polynésie française comme territoire démonstrateur pour la valorisation de biodéchets d'origine animale et végétale par bioconversion.

Insects as feed - **Regulation (EU) No 68/2013** on the Catalogue of feed materials and in accordance **with Regulation (EC) No 999/2001 and Regulation (EC) No 1069/2009**	Ruminant animals	Aquaculture	Poultry	Pigs	Pets	Fur and other animals (e.g. zoo)	Technical uses(e.g. cosmetic industry, bio-based fuels, production of other bio-based materials such as bioplastics)
Insect proteins (under entry 9.4.1. 'Processed animal protein')	✗	✓ **	✓ **	✓ **	✓	✓	✓
Insect fats (under entry 9.2.1 'animal fat')	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Whole insects (untreated) (under entry 9.16.2. 'terrestrial invertebrates, dead')	✗	✗	✗	✗	✓ ***	✓ ***	✓
Whole insects (treated- e.g. Freeze drying) (under entry 9.16.2.'terrestrial invertebrates, dead')	✗	✗	✗	✗	✓ ***	✓ ***	✓
Live insects (under entry 9.16.1 'terrestrial invertebrates, live')	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hydrolysed insect proteins (under entry 9.6.1. 'Hydrolysed animal proteins')	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

** Limited to Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*), Common Housefly (*Musca domestica*), Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*), Lesser Mealworm (*Alphitobius diaperinus*), House cricket (*Acheta domesticus*), Banded cricket (*Gryllodes sigillatus*), Field Cricket (*Gryllus assimilis*) and Silkworm (*Bombyx mori*).
*** if authorised by the national competent authority of the Member State where the product is being commercialised, under the specific conditions applicable to processed pet food (in case the product is intended for use as processed pet food)

Figure 1.1 : Tableau des formes et des filières d'utilisation des insectes. Tiré de IPIFF, (2024)

Enjeux économiques

Malgré les qualités nutritives, les avantages environnementaux et les textes encadrant l'hygiène et la sécurité des insectes produits, l'essor de la filière insecte pour l'alimentation animale n'est viable que si les produits sont compétitifs sur le marché pour encourager le remplacement progressif des ressources conventionnelles. Les insectes peuvent être peu ou pas transformés et ainsi être vendus directement aux consommateurs. Suivant le niveau de transformation et le marché visé, les prix de vente diffèrent. Ci-dessous, quelques exemples (liste non exhaustive) de produits à base d'insectes, présents sur le marché de l'alimentation animale (Tableau 1.1).

Si les produits présentés dans le tableau 1.1 s'adressent directement au consommateur, les farines et huiles d'insectes sont quant à elles vendues en gros aux fabricants d'aliments, comme ingrédients intégrant la formulation d'aliments complets. Pour être compétitives sur le marché, les farines et huiles d'insectes ne devront pas excéder 1,67 $USD/kg (T Veldkamp *et al.*, 2012; Bimbilé Somda *et al.*, 2019). En 2013, la valeur de la larve de mouche soldat noire était estimée à 2,32 $USD/kg (Bullock *et al.*, 2013), la farine de soja a une valeur moyenne comprise entre 300 et 400 $USD/t (Mourtzinis *et al.*, 2018; Pope *et al.*, 2023) et la prix de la farine de poisson ne cesse d'augmenter avec des coûts atteignant 1600 à 1800 $USD/t (Asche, Oglend and Tveteras, 2013; Hodar *et al.*, 2020) .

Dans l'écosystème économique polynésien, le développement de l'industrie des insectes pour l'alimentation animale sera générateur d'emplois, sur plusieurs pôles tels que l'élevage, la production de larves et leur transformation tout en alimentant le commerce interne avec la vente de produits transformés au(x) provendier(s) du territoire. Ceci permettra notamment à ces derniers de diversifier leurs gammes de produits mis sur le marché, et dans le meilleur des cas, d'étendre leur portefeuille de produits à d'autres filières animales que celles actuellement alimentées.

Tableau 1.1 : Exemples de produits transformés à base d'insecte sur le marché de l'alimentation animale

Produit	Marque	Quantité	Prix	Prix au kg	Mode de vente
Vers de farine séchés	Torgenn ® (France)	170 g	10,90 €	64,12 €/kg	Vente en ligne
		500 g	16,90 €	33,8 €/kg	
		1 kg	25,90 €	25,90 €/kg	
		2 kg	39,90 €	19,95 €/kg	
		5 kg	69,90 €	13,90 €/kg	
Vers de farine séchés	Pikhoo (France)	2 kg	39,90 €	19,95 €/kg	Vente en ligne
		3,5 kg	54,95 €	15,70 €/kg	
		5 kg	74,45 €	15,09 €/kg	
Croquettes pour chiens (37,5% farine d'insectes française)	Ekinoé (France)	1,1 kg	7,99 €	7,26 €/kg	Boutique
Cure reminéralisante chiens et chats Ver de farine (59%)		300 g	15 €	50 €/kg	
Croquettes pour chiens Protéines d'insectes (18%)	Goood (France)	1,8 kg	12,99 €	7,21 €/kg	Boutique
Granulés pour poissons Mouche soldat noire (15%), ver à soie (15%) et ver de farine (15%)	Tropical (Thaïlande)	1 kg	21,15 €	21,15 €/kg	Vente en ligne
Friandises pour chats Ver de farine (20%)	Fung Feed (France)	75 g	4,80 €	64 €/kg	Vente en ligne
Croquettes pour chats Ver de farine (48,5%)		1,5 kg	124,50 €	83 €/kg	
Pâtée pour chats Ver de farine (58%)		200 g	5,5 €	27,5 €/kg	

Dans le cadre de ce manuscrit, c'est la mouche soldat noire qui est étudiée pour l'industrialisation de sa production sur l'île de Tahiti (Polynésie française) car son élevage présente des avantages en plus de ses qualités nutritionnelles :

- Son cycle de vie court ;
- Son taux de croissance important (gain de masse par unité de temps) ;
- Sa grande capacité à digérer un large éventail de matières organiques ;
- Le fait qu'elle ne soit ni nuisible ni vectrice de pathogènes ;
- Le fait qu'elle soit inscrite dans la liste des insectes autorisés pour l'alimentation animale dans la règlementation européenne.

La mouche soldat noire ou Black Soldier Fly (BSF)

La mouche soldat noire (Figure 1.2) ou Black Soldier Fly (BSF) est un insecte qui appartient à l'ordre des diptères, à la famille des Stratiomyidae, au genre *Hermetia* et à l'espèce *Hermetia illucens*.



Figure 1.2 : Photo de la mouche soldat noire vue de profil
(image extraite de https://www.eatcrickster.com/blog/black-soldier-fly)

Origine et distribution

La BSF est originaire du sud des Etats-Unis (Sheppard and Newton, 1994). Cosmopolite, cette espèce est aujourd'hui communément présente dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes (Tomberlin, 2001; Maquart, Richard and Willems, 2020; Kaya *et al.*, 2021) qui offrent des conditions environnementales favorables au développement et à la survie de la BSF (25-30°C, 60-90% d'humidité relative dans l'air, exposition à la lumière du soleil). Sous les tropiques l'accouplement et la ponte ont lieu toute l'année tandis que dans les régions tempérées chaudes la reproduction naturelle est influencée par les saisons (Tomberlin and

Sheppard, 2001; Kim *et al.*, 2008) . On la retrouve également dans les îles du Pacifique et à Tahiti, où elle a été identifiée à plusieurs reprises au cours d'inventaires faunistiques (Rageau, 1956; Cochereau, 1974).

Cycle de vie et description morphologique de la BSF

La figure 1.3 ci-après illustre le cycle de vie de la BSF. Les durées des différentes étapes du cycle de vie sont indicatives et peuvent varier suivant la nourriture (qualité et quantité) disponible pour les larves et les conditions environnementales telles que la température et l'humidité (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002; Tomberlin, Adler and Myers, 2009; Miranda, Cammack and Tomberlin, 2019).

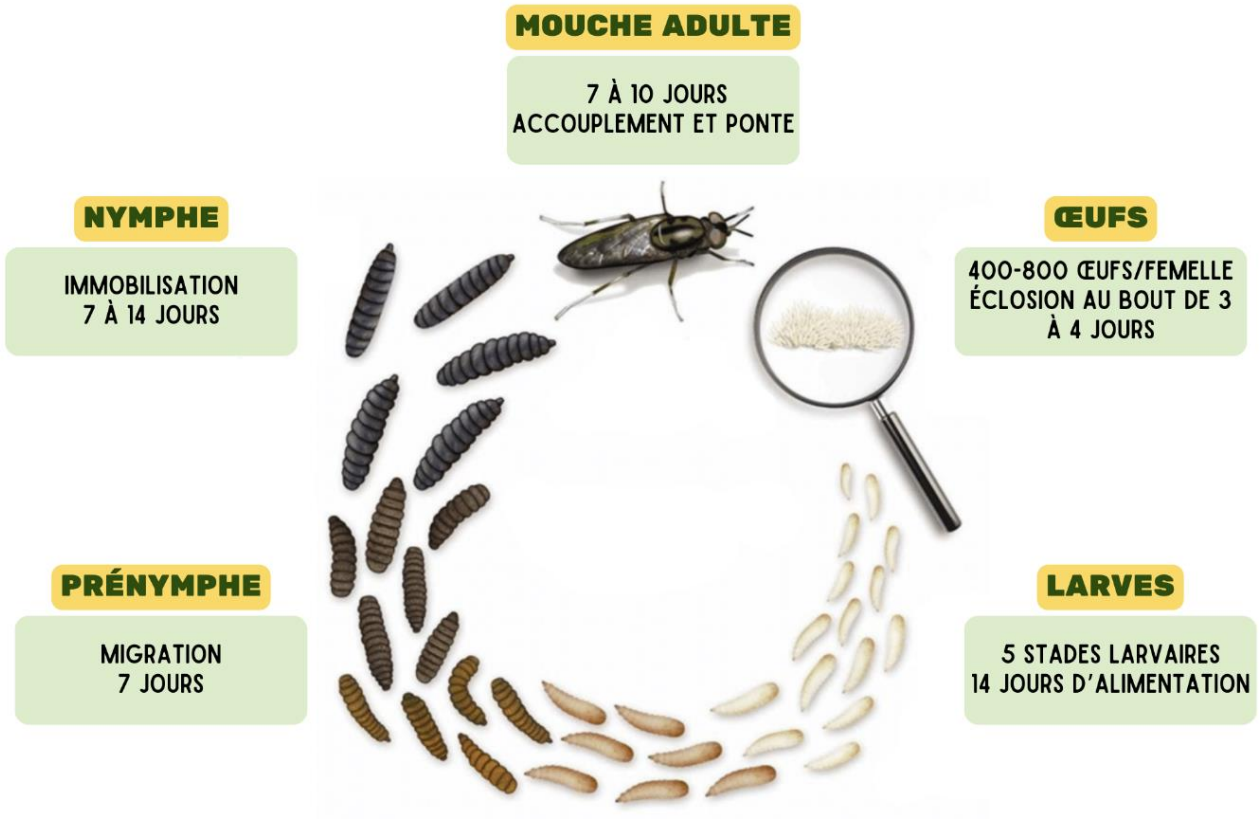


Figure 1.3 : Cycle de vie de la mouche soldat noire.

(Illustration tirée et adaptée de http://uniquebiotechnology.com/)

Dans la nature les femelles BSF déposent leurs œufs (Figure 1.4) dans des fissures ou des petits interstices à proximité de matière organique en décomposition (Sheppard *et al.*, 2002). Les cavités offrent aux œufs un abri protégé des éventuels prédateurs et empêchent la déshydratation des pontes par exposition directe à la lumière du soleil. Pondus par amas de plusieurs centaines (400 à 800 œufs en moyenne, (Dortmans *et al.*, 2017), les œufs sont de

couleur blanc crème dans les premières heures puis deviennent jaunâtres à mesure que l'embryon se développe . De forme elliptique et allongée, l'œuf mesure environ 1 mm de long (Barros *et al.*, 2019) et éclot généralement au bout de quatre jours (Li, Wang and Wang, 2016; Samayoa and Hwang, 2018). La proximité des œufs à la matière organique en décomposition assure aux larves une source de nourriture dès l'éclosion.

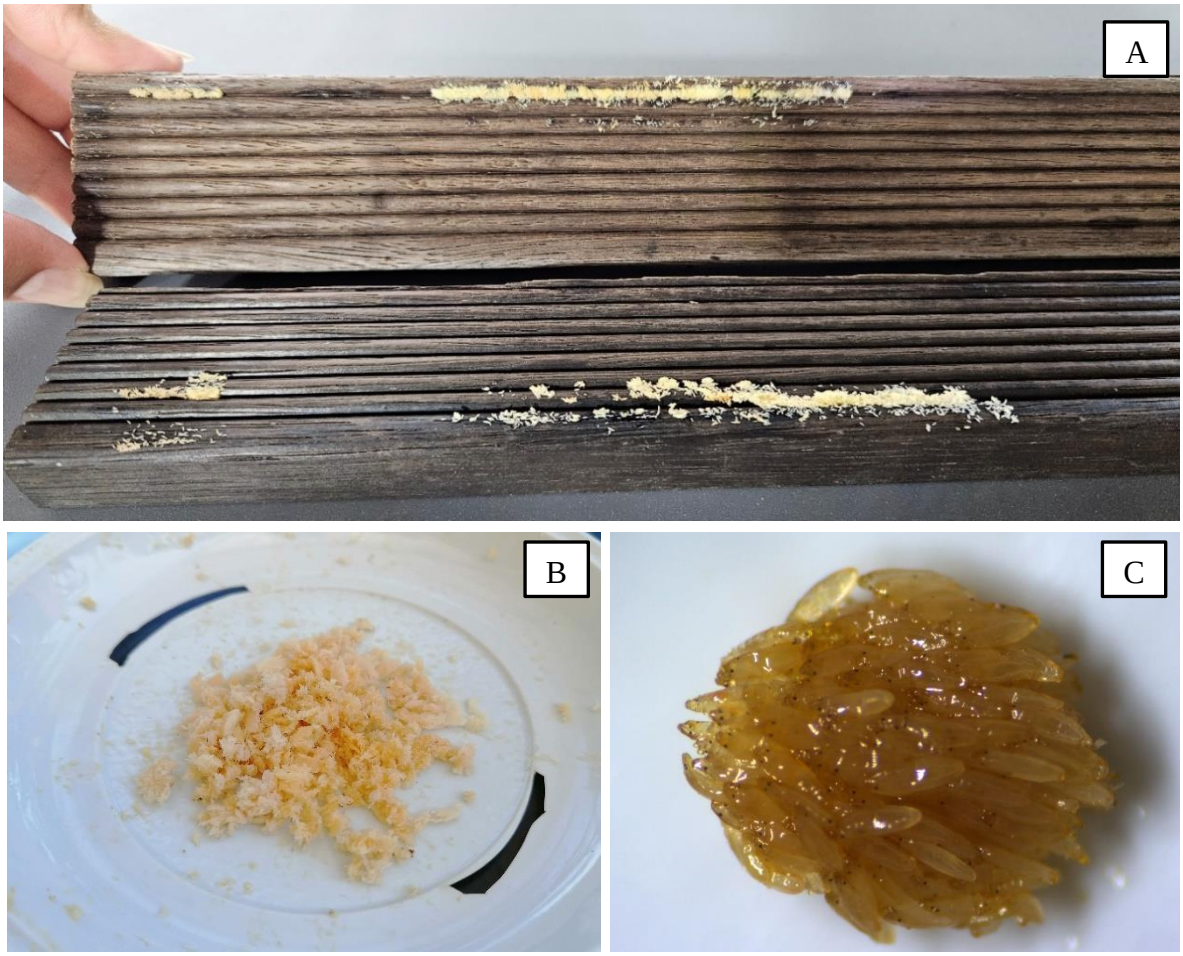


Figure 1.4 : Photos de pontes de BSF (A) Œufs pondus sur un pondoir, (B) Œufs après récolte observés à l'œil nu, (C) Amas d'oeufs après récolte observés à la loupe binoculaire (Gx30). © J.TETOHU, TECHNIVAL

La croissance larvaire se décompose en 5 stades séparés par des épisodes de mues. Une description complète de la morphologie des différents stades a été faite par (Barros *et al.*, 2019). Les larves, détritivores et voraces, grandissent et se nourrissent pendant environ quatorze jours (Figure 1.5.A). Leur taille peut atteindre 27 mm de long et 6 mm de large. Elles sont initialement de couleur blanchâtre, avec une petite tête, puis grossissent et brunissent à mesure qu'elles s'alimentent.

Les larves se transforment ensuite en prénymphes, de couleur brune (Figure 1.5.B). Lors de cette transformation, les larves remplacent leurs pièces buccales qui leur servaient à s'alimenter par une structure en forme de crochet. Le crochet leur permet alors de se déplacer et de s'éloigner aisément de la source de nourriture vers un environnement propre et sec, pour entrer en nymphose (Barros *et al.*, 2019) après avoir vidé leur tube digestif. C'est le stade le plus riche en nutriments dans le cycle de vie de la BSF, la larve ayant stocké protéines, graisses, calcium et autres nutriments pour assurer la survie et la reproduction au stade adulte.

Puis l'enveloppe des larves en phase d'immobilisation s'assombrit, durcit et une nymphe (Figure 1.5.C) se développe à l'intérieur, avant d'émerger en adulte environ quatorze jours plus tard (Diclaro and Kaufman, 2009).



Figure 1.5 : Photos des différents stades (A) Stade larvaire, (B) Stade de prénymphe, (C) Stade de nymphe. © J.TETOHU, TECHNIVAL

De couleur noire et mesurant entre 15 et 20 mm de longueur, les adultes sont reconnaissables par leurs pattes aux extrémités blanches et par leurs antennes allongées. Bien qu'on ait cru pendant longtemps que les BSF adultes étaient dépourvus de pièces buccales fonctionnelles (Sheppard *et al.*, 2002; Cammack and Tomberlin, 2017), des études ont montré que l'absorption de liquides leur permettait d'améliorer leurs performances et leur espérance de vie (Bertinetti, Samayoa and Hwang, 2019; Lupi *et al.*, 2019). De l'ordre d'une dizaine de jours dans la nature (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002; Jones, Tomberlin and Stull, 2019), l'espérance de vie de la BSF est courte, son rôle principal étant d'assurer la reproduction (Figure 1.6.A) et la ponte (Figure 1.6.B). Dans la nature, le comportement d'accouplement dépend des variations saisonnières, de la durée du jour et de son intensité lumineuse (K.-H. Park *et al.*, 2010). Les femelles commencent à s'accoupler deux jours après émergence et produisent des œufs fécondés deux jours après accouplement (Tomberlin and Sheppard, 2002).

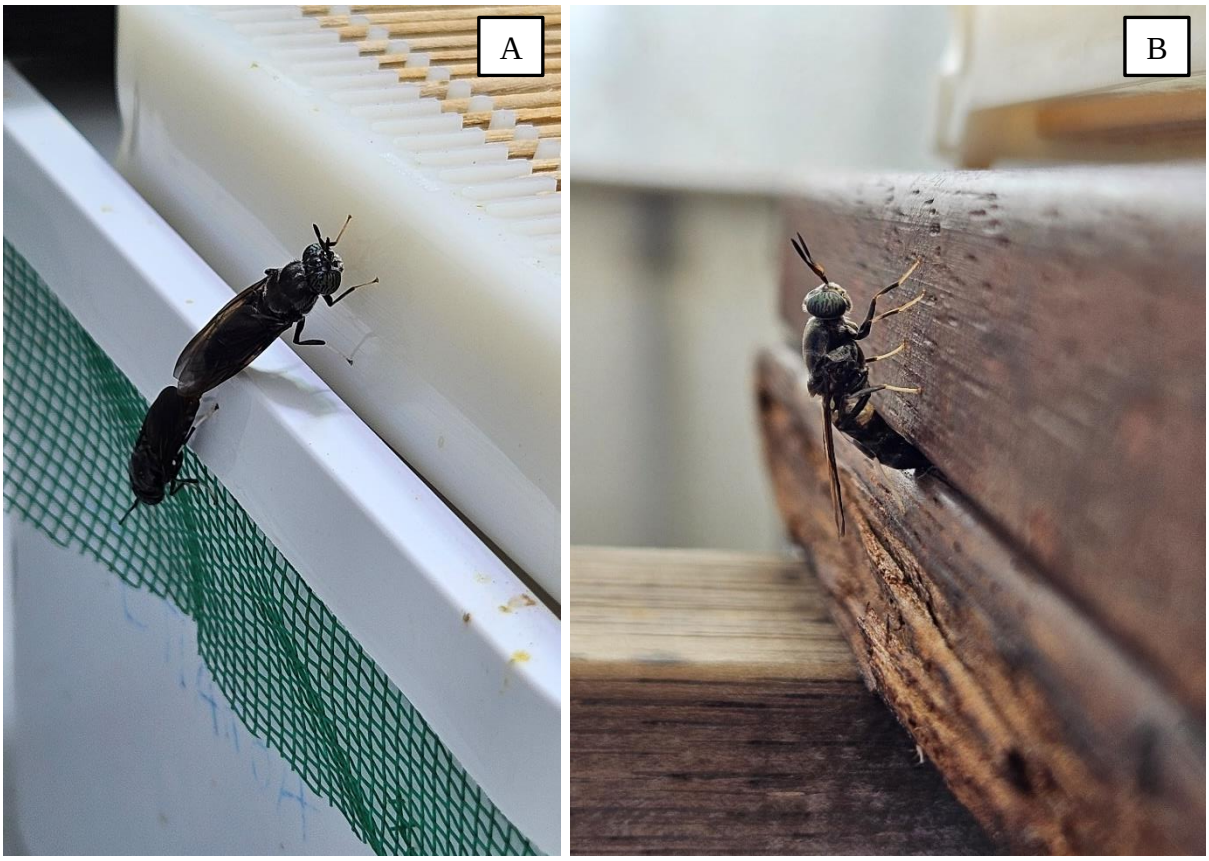


Figure 1.6 : Photos des BSF adultes (A) Accouplement, (B) Femelle en train de pondre © J.TETOHU, TECHNIVAL

Contrairement à d'autres espèces de mouches, la femelle BSF ne pond pas ses œufs directement sur la matière organique en décomposition et les populations adultes ne sont pas attirées à l'intérieur des habitations humaines. Pour ces raisons, le risque de transmission de maladies est

significativement plus faible que pour les autres espèces de mouches (Newton et al., 2005). De plus, la BSF ne mord pas et ne pique pas, cette espèce n'est donc pas considérée comme nuisible (Heussler *et al.*, 2018).

Les mâles sont plus petits que les femelles (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002) et les sexes se distinguent par une différence anatomique au niveau du dernier segment abdominal (Figure 1.7)

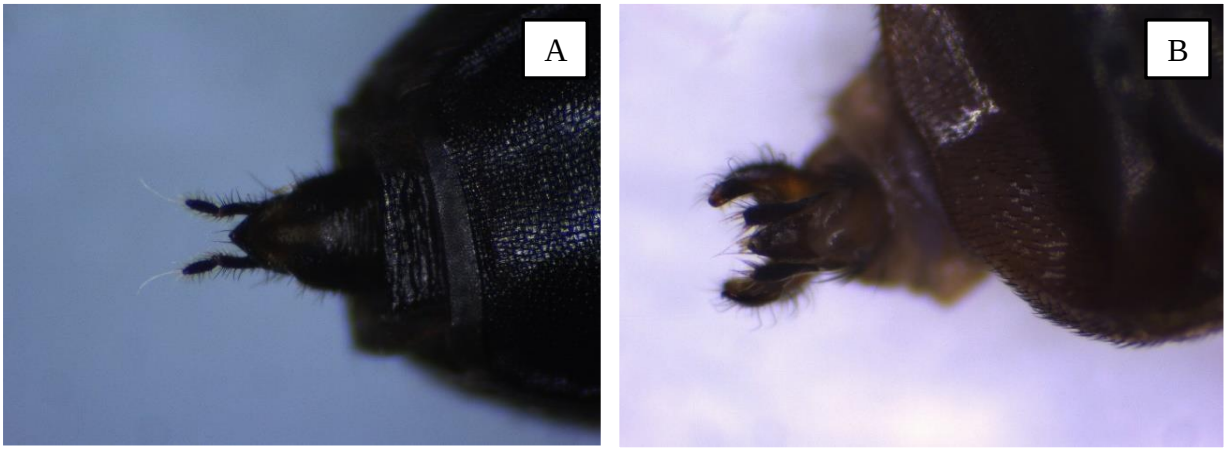


Figure 1.7 : Organes génitaux des mouches adultes (A) Femelle, (B) Mâle, observé à la loupe binoculaire (Gx30). © J.TETOHU, TECHNIVAL

L'élevage des larves de BSF comme biotechnologie verte

Avec son appétit féroce, la larve de BSF se caractérise par sa capacité à coloniser une grande variété de substrats que sont les fumiers et lisiers d'élevage (Newton *et al.*, 2004; Miranda, Cammack and Tomberlin, 2019), les déchets d'animaux type carcasses de volailles ou co-produits de la pêche (St-Hilaire *et al.*, 2007), des tourteaux de coprah ou de palmiste (Mohd-Noor *et al.*, 2017), des restes alimentaires (Čičková *et al.*, 2015; Rahmi, Yamin and Sasaerila, 2020), ou encore des drèches de distillerie (Shaphan Y. Chia *et al.*, 2018). Ces exemples de substrats sur lesquels la larve de BSF peut s'alimenter correspondent également à des gisements importants de biodéchets dont le traitement à l'échelle mondiale n'est pas nécessairement assuré. Le développement des différentes industries (élevages, production et transformation de matières premières, alimentation mondiale) contribue à l'augmentation de la production de ces biodéchets (Mirabella, Castellani and Sala, 2014; Gao *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2017) et par la même occasion, renforcent la nécessité de trouver des solutions de traitement et de valorisation vertueuses.

Chaque jour, une larve de BSF est capable de transformer jusqu'à 500 mg de matière fraiche (Bondari and Sheppard, 1987). La matière est ainsi valorisée de deux façons : d'une part la larve s'enrichit en nutriments à mesure qu'elle s'alimente (Kim *et al.*, 2011), devenant ainsi une ressource de haute qualité notamment pour l'alimentation animale (Veldkamp et al. 2012), d'autre part, la larve produit un résidu de bioconversion, composé de la matière digérée et excrétée et de ses mues, constituant un amendement organique pour la fertilisation des cultures (Cammack and Tomberlin, 2017). Avec son aptitude à convertir la matière organique en biomasse (larvaire) et en engrais, qu'on désigne par la capacité de bioconversion de la matière, la larve de BSF est un véritable outil de traitement des biodéchets et de production de ressources nutritives.

Par ailleurs, la production à grande échelle de larves de BSF génère d'autres co-produits : les mouches mortes (Figure 1.8.A), les mues (entre les stades larvaires) ainsi que les exuvies, enveloppe rigide résultant de l'émergence de la mouche après la nymphose (Figure 1.8.B). Ces co-produits constituent une source de chitine, biopolymère à haute valeur ajoutée, qui après traitement et transformation en chitosan peut trouver de nombreuses applications dans le domaine pharmaceutique, cosmétique ou encore agroalimentaire (H. Wang *et al.*, 2020; Mirwandhono, Nasution and Yunilas, 2022).



Figure 1.8 : Photos des (A) Mouches mortes et (B) Exuvies © J.TETOHU, TECHNIVAL

Enfin, la larve de BSF est également reconnue en tant qu'agent de biocontrôle. D'une part, pour ses qualités antimicrobiennes, grâce à ses hauts niveaux d'acide laurique (Kim *et al.*, 2020).

Les larves ont la capacité de réduire les pathogènes comme *Escherichia coli* et *Salmonella spp.*(Lalander *et al.*, 2013; Nyakeri *et al.*, 2017). D'autre part, la présence de chitine dans le résidu de bioconversion lui confère des propriétés pesticides, en stimulant le système immunitaire de la plante (Kaku *et al.*, 2006). Enfin, la présence de larves de BSF dans les fumiers et lisiers diminue la présence et donc donc la nuisance des mouches domestiques (Furman, Young, and Catts 1959; Wang et al. 2020).

La larve de BSF comme ressource pour l'alimentation animale

La composition des larves de BSF est considérée comme prometteuse pour l'alimentation animale (Cutrignelli *et al.*, 2018). Chez la larve de BSF comme chez la plupart des insectes, la composition nutritionnelle des larves dépend de ce sur quoi elles s'alimentent (Surendra *et al.*, 2016). Les teneurs en protéines et surtout en lipides sont donc modulables en fonction de l'alimentation (Liland *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2022). La figure 1.9 ci-après compare les taux de protéines et de lipides des larves de BSF en fonction de leur substrat de croissance larvaire.

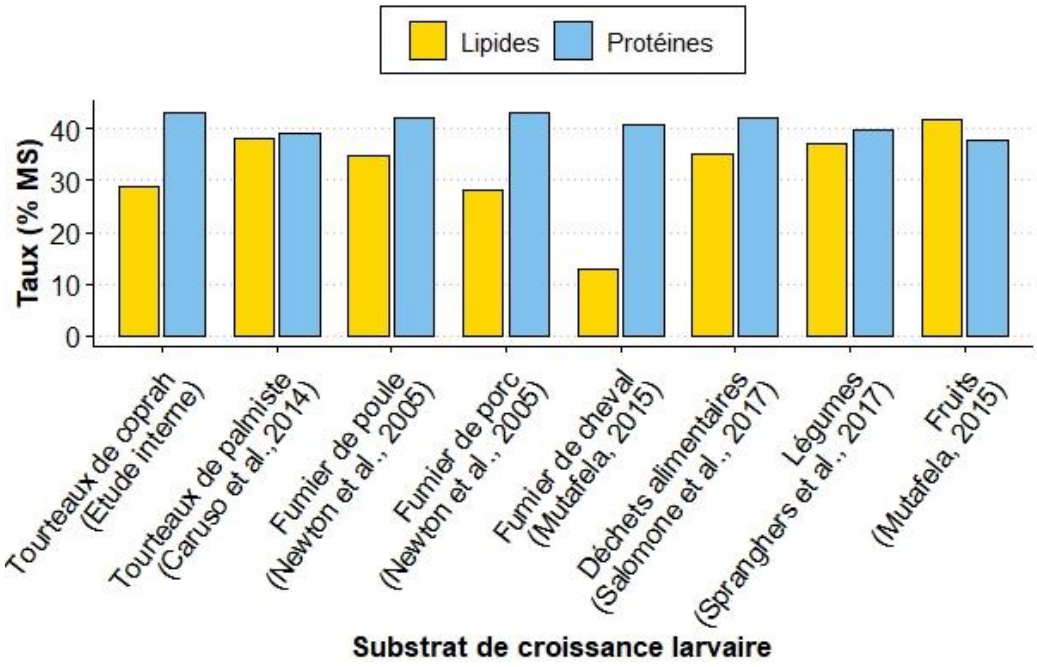


Figure 1.9 : Taux de protéines et de lipides dans les larves de BSF récoltées au stade de prénymphe, en fonction du substrat de croissance larvaire. Les résultats sont exprimés en pourcentage de matière sèche (% MS).

Ces résultats sont présentés à titre indicatif car les méthodes d'extraction ou encore l'âge exact des larves peuvent différer suivant les expériences. Néanmoins, les taux importants de protéines

(de l'ordre de 40%) et de lipides (13-42%) de ces larves sont particulièrement intéressants pour l'alimentation des filières animales, pour substituer notamment les farines de soja et farines de poisson (K. Park *et al.*, 2010; Renna *et al.*, 2017) dans les formulations des aliments pour animaux.

L'élevage industriel de BSF

Les unités de production de larves de BSF se décomposent en plusieurs pôles fonctionnels qui comportent généralement :

- Une unité d'élevage des BSF qui correspond à la colonie de BSF,
- Une unité de bioconversion qui comprend les activités de collecte des matières organiques, de préparation de ces matières puis de leur traitement par les larves de BSF et enfin la séparation des larves de la matière digérée (résidu de bioconversion),
- Une unité de transformation qui traite les larves de BSF et les résidus de bioconversion pour en faire des produits commercialisables.

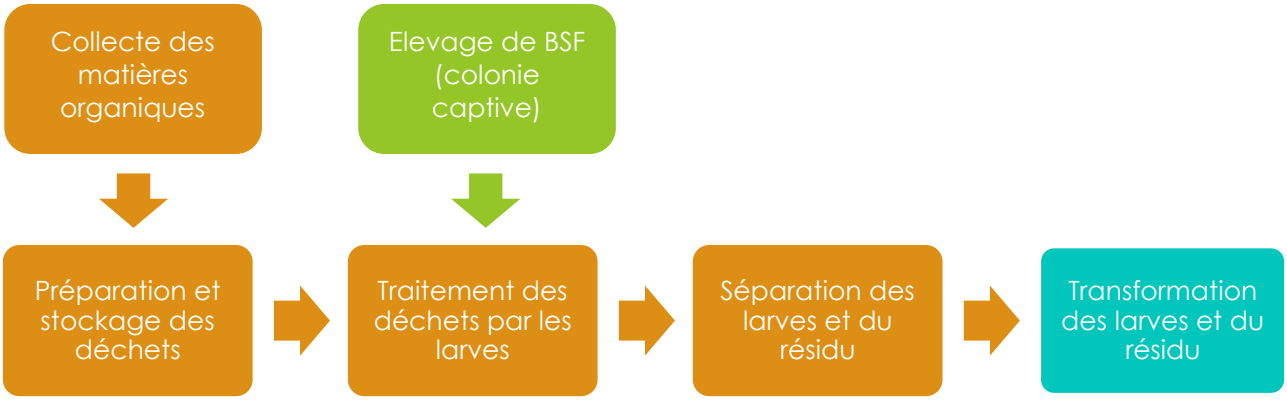


Figure 1.10 : Schéma des différents pôles d'une unité de production de larves de BSF

L'unité d'élevage des BSF

L'unité d'élevage des BSF correspond à la colonie captive de géniteurs, garantissant un approvisionnement constant et suffisant en œufs et donc en larves de BSF. En principe, les œufs obtenus sont incubés et à l'éclosion et les larves néonates sont élevées pendant environ 5 jours. Une partie des larves est ensuite transférée à l'unité de bioconversion, tandis que l'autre partie des larves est conservée pour les élever jusqu'à l'âge adulte afin d'assurer le maintien et la pérennité de la colonie reproductrice. Dans un système de production de larves de BSF, ce pôle peut être externalisé. Les systèmes de production peuvent également être basés sur la collecte

de pontes sauvages, comme le modèle de fonctionnement de (Caruso *et al.*, 2014), avec les risques d'une production variable, liée aux variations saisonnières et météorologiques.

L'unité de bioconversion

L'unité de bioconversion correspond à l'unité de traitement des matières organiques par les larves de BSF qui se nourrissent, digèrent et dégradent la matière, et s'enrichissent en nutriments. Les matières organiques doivent avant tout être collectées. S'en suit une étape d'inspection, pour s'assurer de l'absence de matières inorganiques. Une étape de broyage permet de réduire la taille des particules afin de créer un mélange homogène des différents types ou gisements de matière organiques à traiter. Ces mélanges sont enfin stockés temporairement avant d'être donnés comme nourriture aux jeunes larves. En fin de traitement de la matière organique par les larves, ces dernières sont séparées du résidu de bioconversion, et chacun de ces co-produits est envoyé vers l'unité de transformation.

Les systèmes d'élevages industriels peuvent exploiter les caractéristiques du cycle de vie de la larve de BSF pour mettre en place un système d'auto-récolte des larves. En effet, au stade de prénymphe, les larves cessent de s'alimenter, sortent de leur substrat et migrent vers un endroit propre et sec pour entamer le processus de nymphose (Barros *et al.*, 2019). Des entreprises telles que Agriprotein en Afrique du Sud utilisent cette propriété des prénymphes dans leur système de production. Néanmoins, la plupart des entreprises spécialisées dans l'élevage industriel des larves de BSF font le choix de travailler dans des bacs d'élevage et récoltent les larves de façon manuelle ou à l'aide d'un système automatisé, au stade voulu. Ces deux méthodes présentent divers avantages et inconvénients. Par exemple, les systèmes d'élevages avec l'auto-récolte des larves nécessitent moins de main d'œuvre pour la préparation du substrat et pour la récolte des larves mais la capacité de production ne peut pas être connue avec précision et les larves récoltées sont uniquement des prénymphes. A l'inverse, les systèmes d'élevage en bac, permettent une meilleure gestion des rendements de production car le procédé est standardisé, le passage à grande échelle est possible en multipliant la quantité de bacs d'élevage, et les larves peuvent être récoltées à différents stades.

L'unité de transformation

Les larves et le résidu de bioconversion sont deux produits d'intérêt qui peuvent être transformés pour être mis sur le marché. Les larves peuvent être commercialisées sous différentes formes, leur raffinage comprend généralement une étape de mise à mort (par ébouillantage ou congélation), une étape de séchage, puis une extraction des lipides sous forme

d'huile et des protéines sous forme de farine dégraissée. Ces différentes étapes nécessitent l'utilisation d'équipements spécifiques, similaires aux équipement utilisés dans l'industrie agro-alimentaire (séchoir, presse, machine à moudre). Ces ingrédients (farines, huile de BSF) peuvent alors être proposés aux fabricants d'aliments pour être utilisés dans la formulation d'aliments pour animaux, en remplacement des farines et huiles conventionnellement utilisés. Le raffinage du résidu correspond à une étape de compostage, il peut ensuite être vendu aux agriculteurs ou aux particuliers en tant qu'amendement organique.

Le projet de recherche Ra'o Puha

Objectifs de recherche

Les objectifs du programme Ra'o Puha sont de maitriser et d'optimiser les différentes étapes du processus de production et de transformation des larves de BSF. Cela comprend le cycle de reproduction de la mouche, la croissance des larves, la qualité nutritive des larves en fonction du gisement de matière organique utilisé pour nourrir les larves, la transformation des larves et enfin, leur intégration sous différentes formes aux filières d'alimentations animales. Pour ce faire, ce programme se décline en trois axes de recherche :

- La domestication et la maitrise de la reproduction des géniteurs en captivité,
- La bioconversion des gisements de matière organique pour la production de masse des larves de BSF
- La transformation et l'intégration des larves de BSF à l'alimentation animale

Questions scientifiques

Ce travail de thèse tente de répondre aux questions suivantes :

1. La mouche soldat noire sauvage, naturellement présente dans la zone d'étude, peut-elle être élevée en captivité et assurer une descendance viable sur plusieurs générations ?
2. Quelles sont les conditions les plus favorables à l'établissement d'une colonie captive de mouche soldat noire ?
3. Quels sont les effets du régime larvaire (gisements de matière organique) sur les performances de croissance et de bioconversion des larves ainsi que sur les performances de reproduction des adultes ?
4. Quel est l'impact de la qualité nutritionnelle du régime larvaire sur le profil nutritionnel des larves ?
5. Quelle est l'appétence des différentes filières animales visées pour la larve de BSF ?

6. Quels sont les effets de l'intégration de la larve de BSF à l'alimentation des diverses filières animales ?

Questions techniques

Ce travail s'inscrivant dans une démarche de création d'une entreprise pour le traitement de matières organiques et la production de larves pour l'alimentation animales, ce manuscrit s'attache également à répondre aux questions suivantes :

1. Quels sont les gisements de matière organique mobilisables et à haut potentiel de valorisation par bioconversion ?
2. Quelles sont les filières d'alimentation animale les plus enclines à intégrer la larve de BSF dans leurs aliments ?
3. Sous quelle(s) forme(s) commercialiser la larve de BSF ?
4. Quelles seront les rendements de production des larves de BSF ainsi que des produits transformés ?

Plan du manuscrit

Pour répondre à ces questions, la suite de ce manuscrit se décline en plusieurs parties, regroupées par thématique.

Le chapitre 2 porte sur l'obtention d'œufs de BSF pour l'approvisionnement d'une unité de production de larves de BSF. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de la dynamique des pontes sauvages sur le site de production du projet en lien avec les paramètres environnementaux, tandis que la seconde partie est axée sur l'établissement d'une colonie de BSF domestiquée et élevée en captivité.

Le chapitre 3 est dédié à l'étude des performances de croissance et de bioconversion des larves de BSF élevées sur différents gisements de matière organique dans le contexte polynésien. La qualité nutritionnelle des substrats de croissance larvaire et celle des larves sont étudiées et comparés.

La connaissance du profil nutritionnel des larves de BSF permet d'envisager leur intégration dans l'alimentation animale. Le chapitre 4 décrit trois formes de valorisation de la larve de BSF dans différentes filières animales. La première partie de ce chapitre porte sur l'intégration de larves entières et congelées dans l'alimentation de poules pondeuses. La seconde porte sur la substitution de la poudre de foie de bovin dans l'alimentation des larves de moustiques *Aedes*

aegypti sous forme de farine dégraissée. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'intégration de la larve de BSF à l'alimentation de la crevette bleue *Litopenaeus stylirostris*.

Une synthèse des résultats obtenus ainsi que des perspectives de recherches sont présentées en conclusion de ce manuscrit. Une simulation simplifiée d'une unité de production industrielle est proposée sur la base des indicateurs décrits dans les chapitres précédents.

CHAPITRE 2 – DOMESTICATION ET MAITRISE DE LA REPRODUCTION DES GÉNITEURS EN CAPTIVITÉ

Introduction du chapitre

La larve de BSF élevée à grande échelle est un insecte d'importance économique pour la production de nutriments à partir de matières organiques agro-industrielles (St-Hilaire *et al.*, 2007; Diener, Zurbrugg, *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011; Van Huis, 2013; Banks, Gibson and Cameron, 2014). Afin d'améliorer la gestion et la rentabilité des élevages de masse de la BSF, il est fondamental de mieux connaitre son écologie et de maitriser son cycle de reproduction, les rendements de reproduction des géniteurs impactant directement les rendements de production d'œufs et donc la quantité de larves disponibles pour le traitement de la matière organique (Munsch-Masset *et al.*, 2023). Au-delà des rendements, la durabilité d'une colonie de BSF, qu'elle soit sauvage ou domestiquée, dépend entre autres du succès de l'accouplement et de la ponte (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002).

Originaire du Sud des Etats-Unis (Newton, Sheppard, *et al.*, 2005), la mouche soldat noire est aujourd'hui présente dans les régions tropicales et tempérées chaudes du globe entre les latitudes 45°N et 42°S (Hasbenli, 2003; K.-H. Park *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2015; Gladun, 2019; Maquart, Richard and Willems, 2020). Dans les régions tropicales, les BSF s'accouplent et pondent toute l'année tandis que la reproduction est limitée à quelques générations dans les régions tempérées chaudes (Kim et al., 2008; Park et al., 2010; Tomberlin & Sheppard, 2001) en raison des variations saisonnières. Par exemple, dans le Sud des Etats-Unis, les BSF ont trois générations par an (Villazana and Alyokhin, 2019), de la fin du printemps au début de l'automne, de fin mai à mi-novembre (Sheppard and Newton, 1994). Avec sa capacité à coloniser un large éventail de matières organiques (Diener, Zurbrugg, *et al.*, 2011; Nguyen, Tomberlin and Vanlaerhoven, 2015; Bortolini *et al.*, 2020), la mouche soldat noire est souvent observée aux abords des élevages de bétail, les larves se nourrissant du fumier (Holmes et al., 2012; Newton, et al., 2005) ou à proximité de zones où de la matière organique (MO) s'accumule. A l'inverse, la BSF n'est pas attirée par la nourriture ni les habitations humaines (Furman, Young and Catts, 1959).

Aujourd'hui, de nombreux systèmes d'élevages de BSF se situent dans des régions du monde dans lesquelles les conditions climatiques ne sont pas propices au maintien d'une colonie toute l'année (Maquart, Richard and Willems, 2020). Les systèmes d'élevage en conditions contrôlées se sont alors développés, pour la mise en place de colonies de laboratoire à des fins de recherche mais également pour le développement de colonies destinées à approvisionner en œufs de BSF les unités industrielles de bioconversion de matières organiques. En outre, même dans les zones géographiques où le climat permet le maintien des colonies sauvages toute l'année, la maitrise et la stabilité des conditions d'élevage est une condition nécessaire pour garantir la constance des durées de développement des différentes étapes du cycle de vie de la mouche, pour tendre vers un fonctionnement pérenne et standardisé.

Dans la nature, le comportement d'accouplement des géniteurs est considéré comme dépendant de l'intensité de la lumière du soleil tandis que les comportements de ponte seraient corrélés aux conditions de température et d'humidité (Tomberlin and Sheppard, 2001). Booth & Sheppard, (1984) indiquent que plus de 99% des pontes ont lieu entre 27,5 et 37,5°C, les femelles BSF commençant à pondre 48h après l'accouplement (Tomberlin, 2001; Tomberlin and Sheppard, 2002). Bien que l'élevage des stades larvaires est assez simple à maitriser, le contrôle de la reproduction en captivité peut représenter un défi car des conditions spécifiques de laboratoires sont requises, influencées par divers facteurs tels que la température (Shaphan Yong Chia *et al.*, 2018; Shumo, Khamis, *et al.*, 2019; Malawey *et al.*, 2021), l'humidité relative dans l'air (Holmes, Vanlaerhoven and Tomberlin, 2012), l'exposition à la lumière (Zhang *et al.*, 2010; Macavei *et al.*, 2020; Schneider, 2020; Z. Liu *et al.*, 2021), les dimensions de la zone d'élevage (Nakamura et al., 2016; Park et al., 2016) ou encore la qualité de l'alimentation larvaire avant l'émergence des mouches adultes, les géniteurs (Gobbi, Martínez-Sánchez and Rojo, 2013; Yahouédo *et al.*, 2014). L'ensemble de ces paramètres nécessitent d'être optimisés afin de maximiser les performances de reproduction et de ponte des mouches adultes élevées en captivité.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier puis d'appliquer les conditions favorables à l'établissement d'une colonie de géniteurs de BSF afin de développer la production de larves de BSF sur le territoire polynésien. L'atteinte de cet objectif nécessite de mieux comprendre l'écologie de la BSF afin de maitriser son cycle de vie et de déterminer les conditions d'élevage qui favorisent l'accouplement des géniteurs et la ponte des femelles, pour assurer le maintien des générations suivantes en captivité.

Ce chapitre décrit dans un premier temps la dynamique des pontes sauvages sur le site pilote du programme Ra'o Puha, en fonction des données environnementales. Cette étude de cas a pour objectif de mettre en avant l'influence des paramètres climatiques (température, humidité, précipitations, ensoleillement) sur les performances de ponte des mouches sauvages. Puis nous décrirons dans un second temps les étapes menant à l'établissement de colonies captives en conditions extérieures et intérieures et les performances de reproduction de ces colonies.

Impact des conditions environnementales sur la dynamique des pontes sauvages de BSF sur un site pilote

Introduction

Le climat polynésien est un climat tropical. Du fait de l'étendue de la surface de ce territoire (118 îles dispersées sur une surface de 2,5 millions de km²), chaque archipel est soumis à des conditions spécifiques. Tahiti appartient à l'archipel de la Société, où le climat est tropical humide. Deux saisons rythment le cycle annuel : la saison des pluies qui est aussi la saison chaude, de novembre à avril et une saison fraiche où les pluies sont plus faibles, et les températures plus douces, en particulier la nuit. Bien qu'un climat tropical soit favorable au maintien des colonies de BSF, l'influence des facteurs environnementaux sur la dynamique des pontes sauvages est peu documentée. En effet, la plupart des essais consacrés à l'impact des conditions abiotiques sur les performances de reproduction des BSF se tiennent en conditions de laboratoire. La première partie de ce chapitre a donc pour objectif d'évaluer l'impact des conditions environnementales (température, humidité, précipitations) sur les comportements de pontes en conditions naturelles sur le site de production de larves de BSF du programme Ra'o Puha. Une meilleure compréhension de ces comportements permettrait de mieux connaitre les exigences spécifiques à cet insecte, afin d'optimiser les conditions d'élevage en vue de sa domestication et de sa production à l'échelle industrielle.

Matériels et méthodes

Site d'étude

Cette étude est menée au sein du laboratoire d'entomologie médicale de l'Institut Louis Malardé (Paea, Tahiti, Polynésie française) où est installé le pilote d'élevage de BSF (Figure 2.1.1).

Collecte des données

Un dispositif de récolte de pontes sauvages est installé sur le site d'étude. Ce dispositif correspond à un bac en plastique contenant du tourteau de coprah fermenté comme attracteur olfactif des femelles sauvages gravides, ainsi que des planchettes de bois rainurées superposées deux à deux, offrant des sites de pontes (Figure 2.1.2). Ce dispositif de pontes est lui-même posé sur un fût en PEHD de 200L, contenant des tourteaux de coprah en cours de fermentation. Les planchettes sont observées tous les jours et les œufs, lorsqu'il y en a, sont récoltés, du 1er janvier au 31 décembre 2021. Chaque récolte journalière est pesée à l'aide d'une balance de précision (RADWAG analytical balance AS110.R2), ces résultats sont enregistrés dans une

base de données. Les données environnementales de température, humidité relative dans l'air, précipitations et ensoleillement sont enregistrées par une station météorologique installée sur le site d'étude (RX-2102 HOBO MicroRX Station, société ONSET, USA).



Figure 2.1.1 : Localisation du site pilote du programme Ra'o Puha (Google Earth, 2024)



Figure 2.1.2 : Photos du dispositif de pontes déployé sur le site pilote, vue de face (A) et vue de haut (B), femelle BSF sauvage déposant ses œufs sur les sites de pontes, à l'interface entre les deux planchettes de bois rainurées (C).

Analyse des données

Les données environnementales sont enregistrées par la station météorologique avec un pas de temps de 10 minutes entre chaque acquisition. Les données de température (°C) et d'humidité relative dans l'air (%) sont présentées sous la forme moyenne ± écart-type. La moyenne est effectuée à différentes échelles (annuelle, mensuelle, journalière) et l'écart-type correspond à l'écart à la moyenne. Les valeurs maximales et minimales sont également décrites. Les données maximales de radiations solaires (W/m²) sont présentées. Les précipitations (mm) et les poids des récoltes des pontes (g) sont présentés sous la forme de résultats cumulés, aux différentes échelles temporelles citées précédemment. Les analyses statistiques sont effectuées avec RStudio (version 4.2.0). Un test de corrélation de Spearman a été réalisé sur la relation entre la masse d'œufs récoltés et les paramètres environnementaux. Un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé pour la comparaison des moyennes de températures, d'humidité relative et de pontes journalières entre chaque mois de l'année. Lorsqu'une différence est significative pour un paramètre, un test de comparaison par paires de Wilcoxon est réalisé.

Résultats et discussions

Description des données de ponte et des données climatiques

Les données de ponte ainsi que les données climatiques sont présentées dans le tableau 2.1.1 avec une représentation au mois et à l'année. Au cours de l'année 2021, la température moyenne sur le site d'étude était de 26,0 ± 2,8°C, avec une humidité relative dans l'air de 83 ± 10 %. Au total ce sont 914,8 mm d'eau de pluies qui sont tombés et 40,6g d'œufs issus de pontes sauvages qui ont été récoltés.

Les mois de septembre et de janvier sont ceux pour lesquels les récoltes d'œufs de BSF sauvages étaient les plus importantes, avec 8,8 g d'œufs récoltés au total sur chaque mois, tandis que les mois de novembre, mai et décembre correspondent aux récoltes les plus pauvres avec respectivement 0,7 g, 0,9g et 1,6g d'œufs récoltés par mois (Figure 2.1.3, Tableau 2.1.1). Lorsque les données des récoltes journalières sont moyennées pour chaque mois de l'année 2021, on observe (Figure 2.1.4), que durant le mois de janvier, le poids moyen des récoltes quotidiennes d'œufs est significativement plus élevé que pour les mois de mai, juillet, novembre et décembre ($p<0,05$).

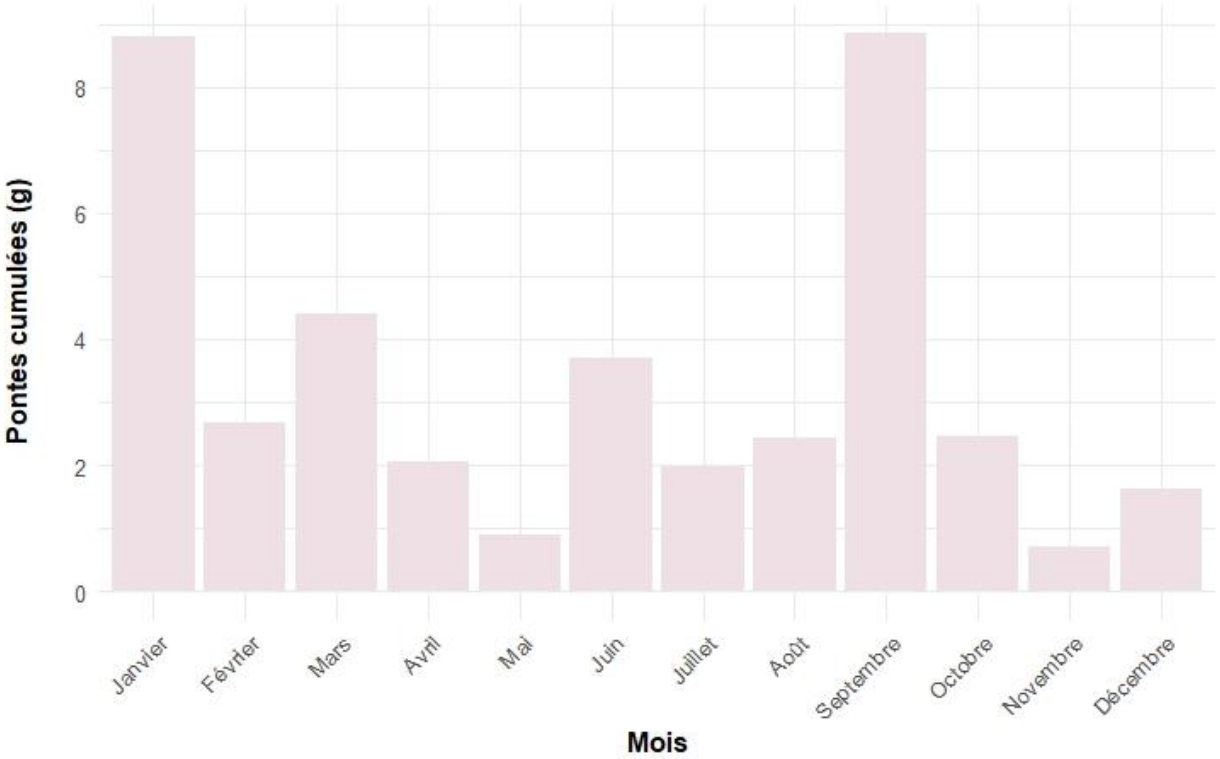


Figure 2.1.3 : Récoltes cumulées d'œufs sauvages de BSF par mois au cours de l'année 2021 sur le site expérimental.

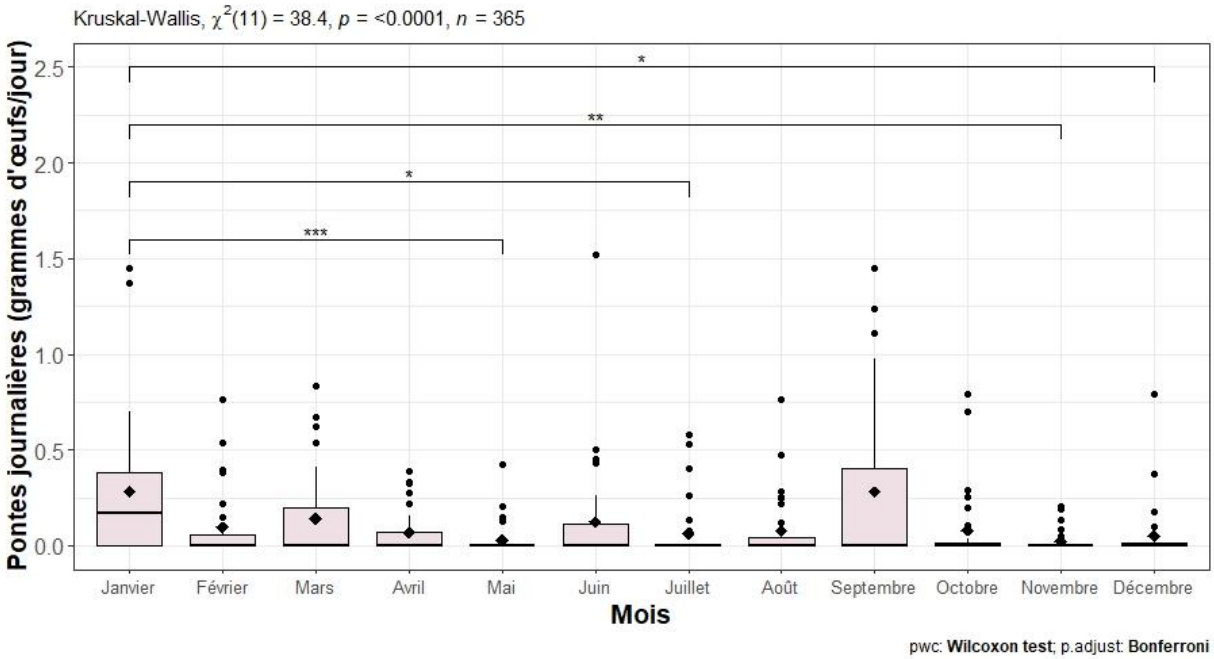


Figure 2.1.4 : Boites à moustache des pontes récoltées journalièrement pour chaque mois de l'année (* : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001)

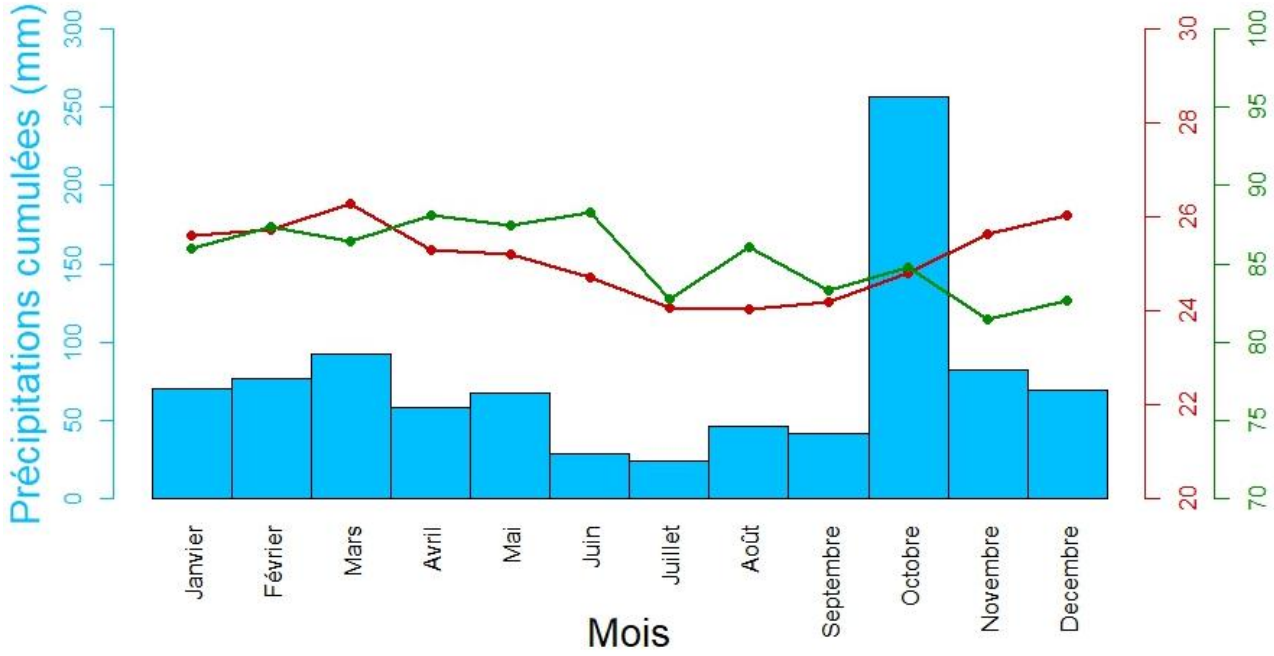


Figure 2.1.5 : Diagrammes climatiques représentant les précipitations cumulées ainsi que la température moyenne (rouge) et l'humidité relative dans l'air (vert) au cours de l'année 2021 sur le site expérimental.

Les précipitations cumulées étaient comprises entre 24,4 et 46,0 mm de juin à septembre, le mois de juillet étant celui ayant enregistré la valeur minimale. De janvier à mai et d'octobre à décembre, les précipitations cumulées plus importantes étaient comprises entre 58,4 et 256,4 mm, le mois d'octobre étant celui ayant enregistré la valeur maximale (Figure 2.1.5, Tableau 2.1.1). L'intensité lumineuse maximale plafonne généralement entre 996 et 999 W/m^2, mis à part pour les mois de mai, juin et juillet pour lesquels les pics d'intensité lumineuse sont de 978, 861 et 921 W/m^2 respectivement.

Les données de température montrent une période plus chaude de janvier à mai et de novembre à décembre (Figures 2.1.5 et 2.1.6), avec une température moyenne supérieure à 25°C et des écart-types compris entre 2,6 et 3,1°C (Tableau 2.1.1). Pendant la période de juin à octobre, les températures moyennes sont inférieures à 25°C et les écart-types compris entre 2,3 et 2,9°C (Tableau 2.1.1). Le mois le plus chaud de l'année 2021 était le mois de mars, avec une température moyenne de 26,3 ± 2,8°C, tandis que les mois de juillet, août et septembre sont ceux pour lesquels les températures moyennes étaient les plus basses, comprises entre 24,0 et 24,2°C (Tableau 2.1.1).

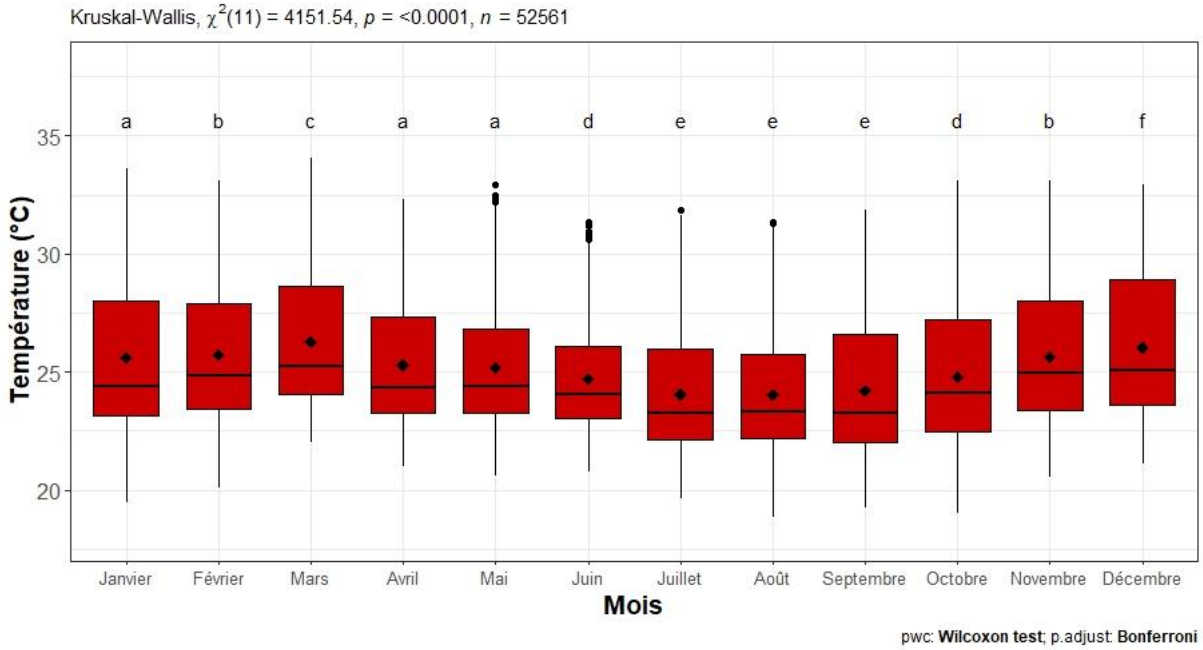


Figure 2.1.6 : Boites à moustache des températures pour chaque mois de l'année (deux lettres différentes indiquent une différence significative p<0,05)

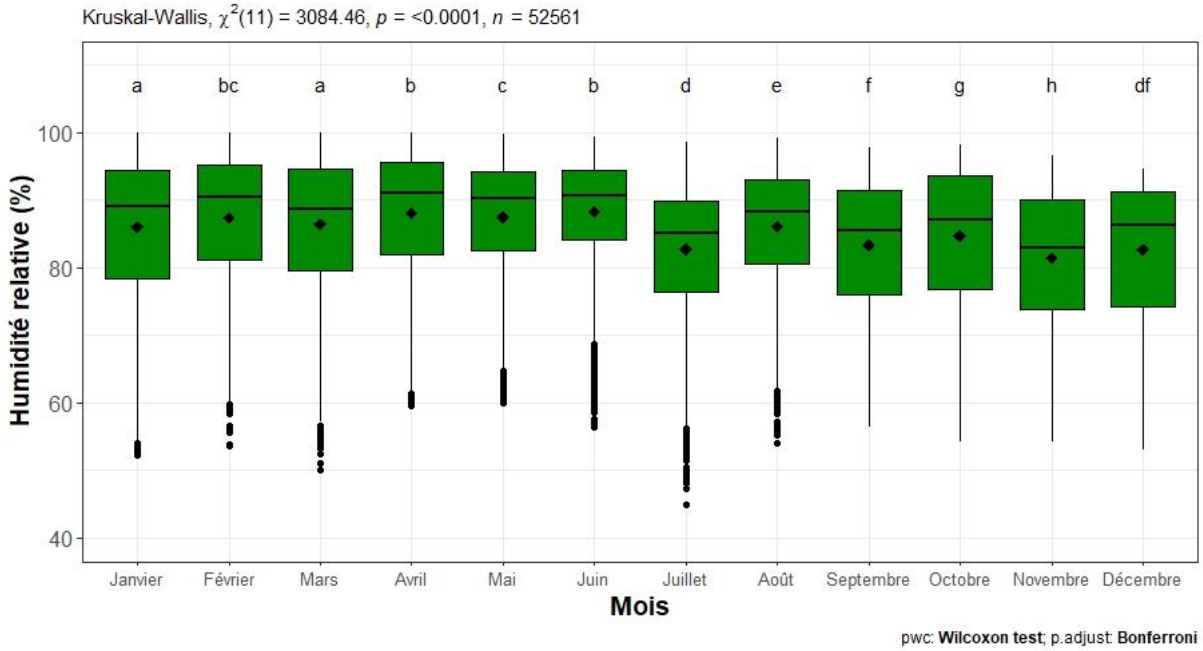


Figure 2.1.7 : Représentation sous forme de boites à moustache des valeurs d'humidité relative dans l'air pour chaque mois de l'année (deux lettres différentes indiquent une différence significative p<0,05)

Le premier semestre de l'année 2021 était plus humide avec une humidité relative moyenne dans l'air comprise entre 86% et 88%, tandis que durant le second semestre 2021, les taux moyens relevés sont compris entre 81% et 86%. Les mois d'avril et de juin étaient les mois les plus humides avec respectivement 88 ± 10 % et 88 ± 8 % d'humidité moyenne dans l'air, tandis que le mois de novembre est celui pour lequel le taux d'humidité moyen était le plus faible avec 81 ± 10 % (Figures 2.1.5 et 2 .1.7, Tableau 2.1.1).

Analyse des corrélations entre les pontes et les conditions environnementales

La mise en relation des données de récolte de pontes sauvages de BSF et des données climatiques met en avant des résultats surprenants. En effet, les mois de janvier et de septembre sont ceux pour lesquels le poids total de pontes sauvage est le plus élevé. Alors que les conditions climatiques caractérisant ces 2 mois ont été particulièrement contrastées: en effet janvier fait partie de la période la plus chaude et la plus humide (Tableau 2.1.1, Figure 2.1.5) avec des précipitations régulières tout au long du mois (Figure 2.1.8), tandis que le mois de septembre fait partie de la période la plus douce de l'année avec des températures plus faibles et moins d'humidité dans l'air (Tableau 2.1.1, Figure 2.1.5) avec des épisodes pluvieux moins fréquents et moins importants (Figure 2.1.8). A l'inverse, parmi les mois où les récoltes étaient les plus faibles, on retrouve mai, novembre et décembre dont les conditions climatiques sont similaires à celles du mois de janvier (période chaude et pluvieuse). De ce fait, la recherche des corrélations entre les données mensuelles (figures 2.1.3 et 2.1.5) de récoltes de pontes sauvages avec les données climatiques mensuelles ne permet pas de mettre en avant des corrélations significatives entre ces paramètres ($p>0,05$) (Tableau 2.1.2).

Nous répétons donc ces calculs avec les données journalières présentées dans les figures 2.1.5 et 2.1.6. Dans ce référentiel temporel s'ajoute un biais expérimental. Les récoltes des pontes ayant lieu du lundi au vendredi, les récoltes du lundi sont généralement plus importantes car elles contiennent les œufs pondus les samedis et dimanches. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.1.3. Même à cette échelle plus fine, il n'y a pas de corrélations significatives entre les données de pontes récoltées et les paramètres climatiques.

Nous décidons de tester les corrélations entre ces mêmes paramètres en ne conservant que les données extrêmes : les 3 mois pour lesquels les récoltes de pontes sauvages étaient les plus importantes (septembre, janvier et mars) et les 3 mois pour lesquels elles étaient le plus faible (novembre, mai et décembre). Encore une fois, il n'y a pas de corrélations entre les paramètres, à l'exception de la relation entre le cumul journalier des pontes et la température maximale

journalière pour laquelle nous obtenons une corrélation positive avec un coefficient de corrélation de 0,15 ($p<0,05$) (Annexe 2.1.1).

Au regard de ces résultats nous formulons les hypothèses et les explications suivantes. Dans un premier temps, il y a peu de différences au niveau de la dynamique des pontes tout au long de l'année (Figure 2.1.4). En effet, en raison du grand nombre de jours où le poids des pontes était nul, la moyenne des poids des récoltes par jour présente des écarts-types généralement plus grands que la moyenne elle-même (Tableau 2.1.4). Cela limite l'obtention de différences significatives entre les mois. Ces observations s'appliquent également aux moyennes journalières des précipitations, pour lesquelles les tests de comparaison par paires n'ont révélé aucune différence significative entre les valeurs moyennes des différents mois de l'année (Tableau 2.1.4). Par conséquent, bien que les variations de températures et d'humidité relative soient plus prononcées, les corrélations entre les données de ponte et les données climatiques ne sont pas statistiquement significatives. La forte variabilité intra-journalière des conditions climatiques est elle aussi susceptible d'influencer la dynamique des pontes. Une analyse temporelle plus fine, à l'échelle horaire, aurait probablement permis de mieux caractériser les relations entre le poids des pontes et les conditions environnementales. Une telle approche faciliterait l'identification des heures spécifiques auxquelles les femelles effectuent leurs pontes, et permettrait de déterminer les conditions environnementales associées à ces événements de ponte. Par exemple, une étude menée par Julita et al., (2020) en Indonésie a montré que les femelles BSF élevées en serres pondent majoritairement dans l'après-midi, une fois que l'intensité de la lumière du soleil diminue. Par ailleurs, notre étude était centrée sur les relations entre le poids des pontes et les données climatiques, dans la mesure où il n'a pas été possible d'observer les accouplements des BSF sauvages mais seulement de recueillir leurs œufs. Cependant, des informations sur les accouplements auraient été pertinentes pour déterminer les conditions environnementales favorables à la copulation des individus sauvages. Enfin, nos résultats montrent que la récolte des pontes peut être équivalente malgré des conditions climatiques contrastées (janvier et septembre), et inversement, la récolte peut être divisée par 3 dans des conditions climatiques similaires (janvier et février). Ces observations suggèrent que les paramètres étudiés ne suffisent pas à expliquer les variations dans la dynamique des pontes sauvages de femelles BSF.

Tableau 2.1.1 : Données de ponte et conditions environnementales enregistrées sur le site pilote au cours de l'année 2021.

Période	Poids total des pontes récoltées (g)	Température moyenne (°C)	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Humidité moyenne (%)	Humidité minimale (%)	Humidité maximale (%)	Précipitations cumulées (mm)	Intensité lumineuse maximale (W/m²)
Janvier	8,7904	25,6 ± 3,1	22,2 ± 0,8	31,8 ± 1,2	86 ± 11	63 ± 7	97 ± 3	70,4	998
Février	2,6713	25,7 ± 3,0	22,4 ± 1,3	31,5 ± 1,4	87 ± 10	66 ± 6	98 ± 2	76,8	999
Mars	4,4085	26,3 ± 2,8	23,2 ± 0,5	32,0 ± 1,1	86 ± 10	67 ± 7	97 ± 3	92,4	998
Avril	2,0559	25,3 ± 2,6	22,4 ± 0,6	31,0 ± 1,1	88 ± 10	69 ± 5	97 ± 3	58,4	996
Mai	0,9073	25,2 ± 2,6	22,5 ± 0,7	30,6 ± 1,4	87 ± 9	68 ± 7	96 ± 2	67,4	978
Juin	3,709	24,7 ± 2,3	22,2 ± 0,6	29,5 ± 1,2	88 ± 8	71 ± 8	96 ± 2	29,0	861
Juillet	1,9862	24,1 ± 2,6	21,3 ± 0,8	29,4 ± 1,6	83 ± 10	64 ± 7	93 ± 3	24,4	921
Août	2,4402	24,0 ± 2,4	21,2 ± 0,8	28,9 ± 1,4	86 ± 9	70 ± 7	95 ± 3	46,0	996
Septembre	8,8391	24,2 ± 2,8	21,0 ± 0,7	29,9 ± 1,2	83 ± 10	65 ± 6	94 ± 3	41,6	998
Octobre	2,4694	24,8 ± 2,9	21,4 ± 1,0	30,0 ± 1,7	85 ± 10	69 ± 8	95 ± 3	256,4	999
Novembre	0,6959	25,6 ± 2,7	22,3 ± 0,7	30,2 ± 1,4	81 ± 10	66 ± 7	92 ± 3	82,4	999
Décembre	1,6108	26,0 ± 2,8	22,5 ± 0,6	31,1 ± 0,9	83 ± 10	64 ± 5	93 ±1	69,6	998
Annuel	40,584	25,1 ± 2,8	22,0 ± 1,0	30,5 ± 1,6	85 ± 10	67 ± 7	95 ± 3	914,8	978 ± 41

Les données de température et d'humidité sont présentées sous la forme moyenne mensuelle ± écart-type, et moyenne annuelle ± écart-type. Les données de poids des pontes et de précipitations correspondent aux données cumulées sur le mois et sur l'année. Les données d'intensité lumineuse correspondent à l'intensité maximale enregistrée par la station météorologique, ces données sont moyennées à l'année.

Tableau 2.1.2 : Coefficients de corrélation et p-values entre les différents paramètres environnementaux et les données de ponte à l'échelle mensuelle (NS : non significatif)

Paramètre 1	Paramètre 2	Coefficient de corrélation	p-value	Significativité
Cumul mensuel des pontes	Température mensuelle moyenne	-0,08	0,78	NS
Cumul mensuel des pontes	Température mensuelle minimale	-0,21	0,49	NS
Cumul mensuel des pontes	Température mensuelle maximale	0,23	0,47	NS
Cumul mensuel des pontes	Humidité relative mensuelle moyenne	0,06	0,86	NS
Cumul mensuel des pontes	Humidité relative mensuelle minimale	-0,37	0,24	NS
Cumul mensuel des pontes	Humidité relative mensuelle maximale	0,25	0,43	NS
Cumul mensuel des pontes	Cumul mensuel des précipitations	-0,13	0,69	NS
Cumul mensuel des pontes	Intensité lumineuse mensuelle maximale	0,08	0,80	NS

Tableau 2.1.3 : Coefficients de corrélation et p-values entre les différents paramètres environnementaux et les données de ponte à l'échelle journalière (NS : non significatif)

Paramètre 1	Paramètre 2	Coefficient de corrélation	p-value	Significativité
Cumul journalier des pontes	Température journalière moyenne	0,01	0,66	NS
Cumul journalier des pontes	Température journalière minimale	0,01	0,87	NS
Cumul journalier des pontes	Température journalière maximale	0,09	0,08	NS
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière moyenne	-0,02	0,77	NS
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière minimale	-0,05	0,33	NS
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière maximale	0,04	0,45	NS
Cumul journalier des pontes	Cumul mensuel des précipitations	-0,02	0,66	NS
Cumul journalier des pontes	Intensité lumineuse journalière maximale	0,07	0,18	NS

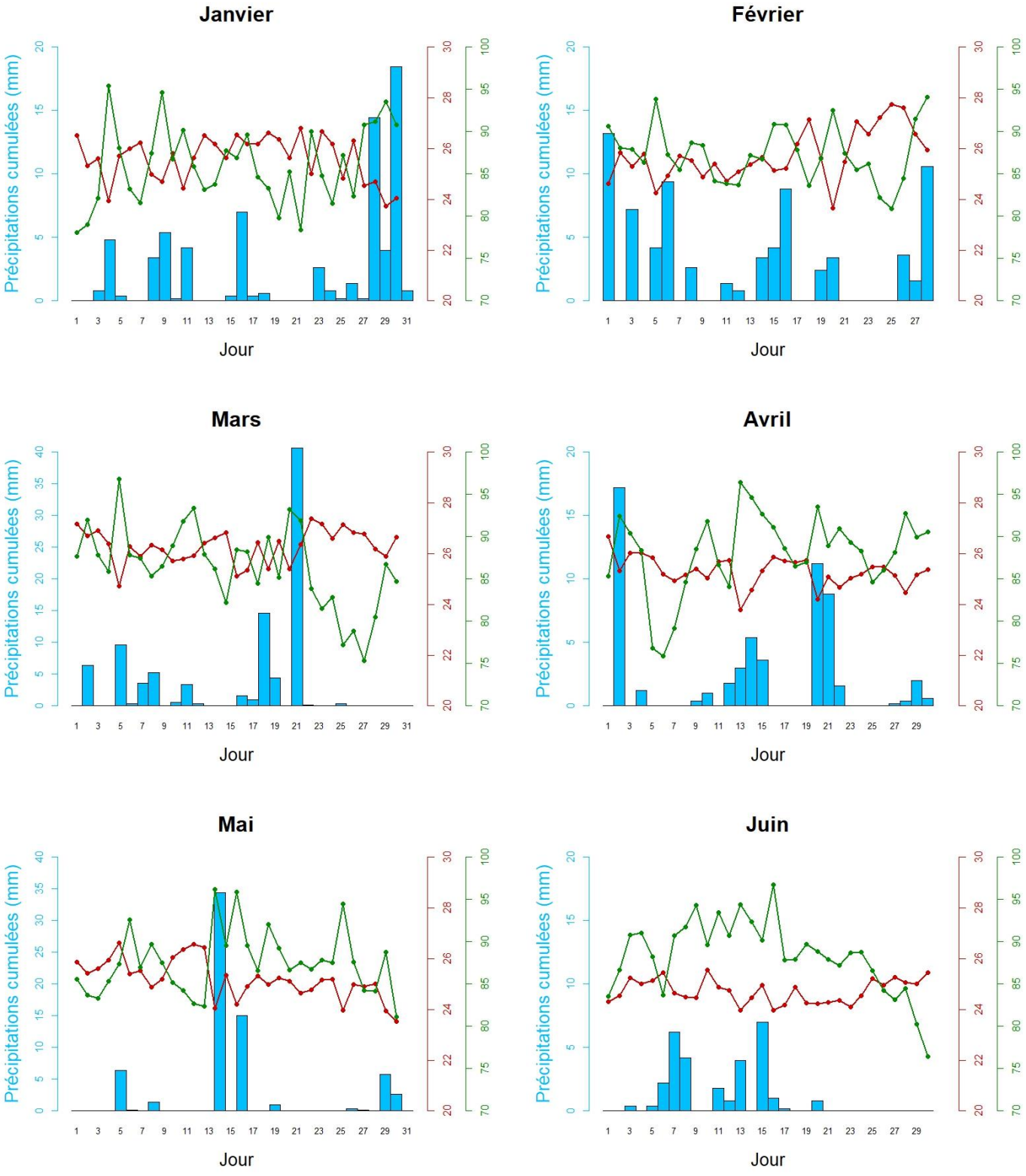


Figure 2.1.8 : Diagrammes climatiques représentant les précipitations cumulées ainsi que la température moyenne (rouge) et l'humidité relative dans l'air (vert) au cours de l'année 2021

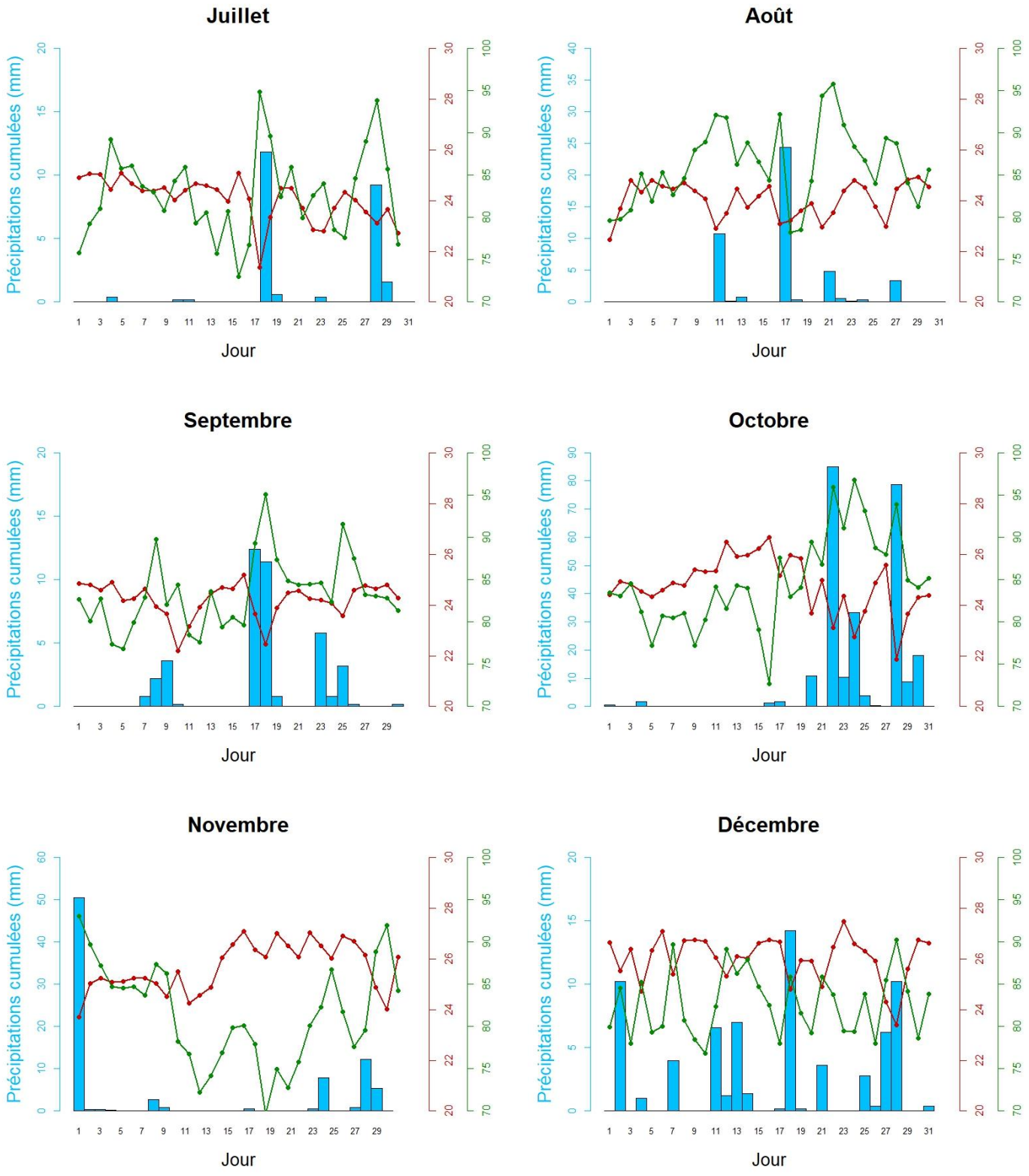


Figure 2.1.8 (suite et fin) : Diagrammes climatiques représentant les précipitations cumulées ainsi que la température moyenne (rouge) et l'humidité relative dans l'air (vert) au cours de l'année 2021

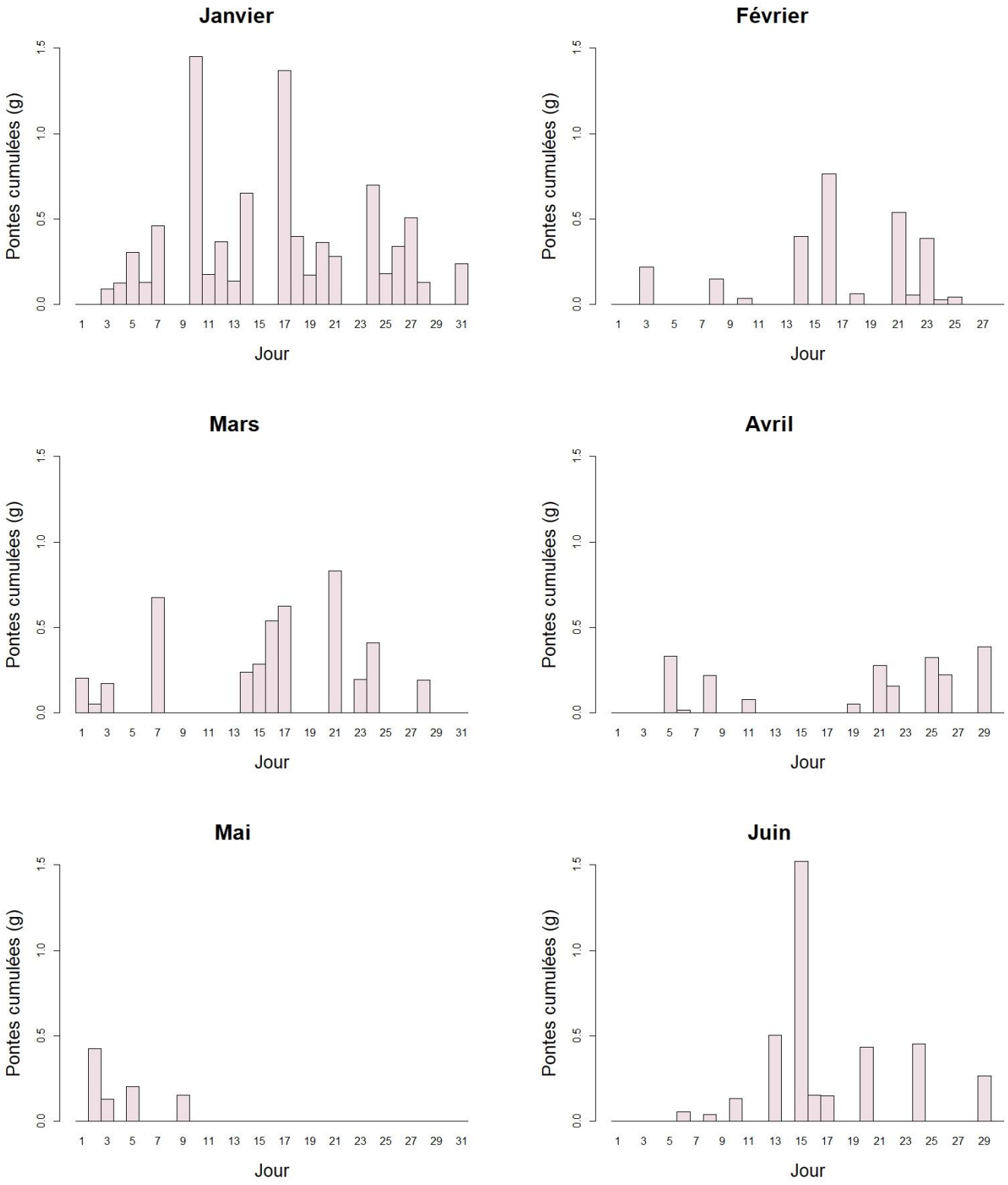


Figure 2.1.9 : Histogramme des récoltes journalières d'œufs sauvages de BSF au cours de l'année 2021

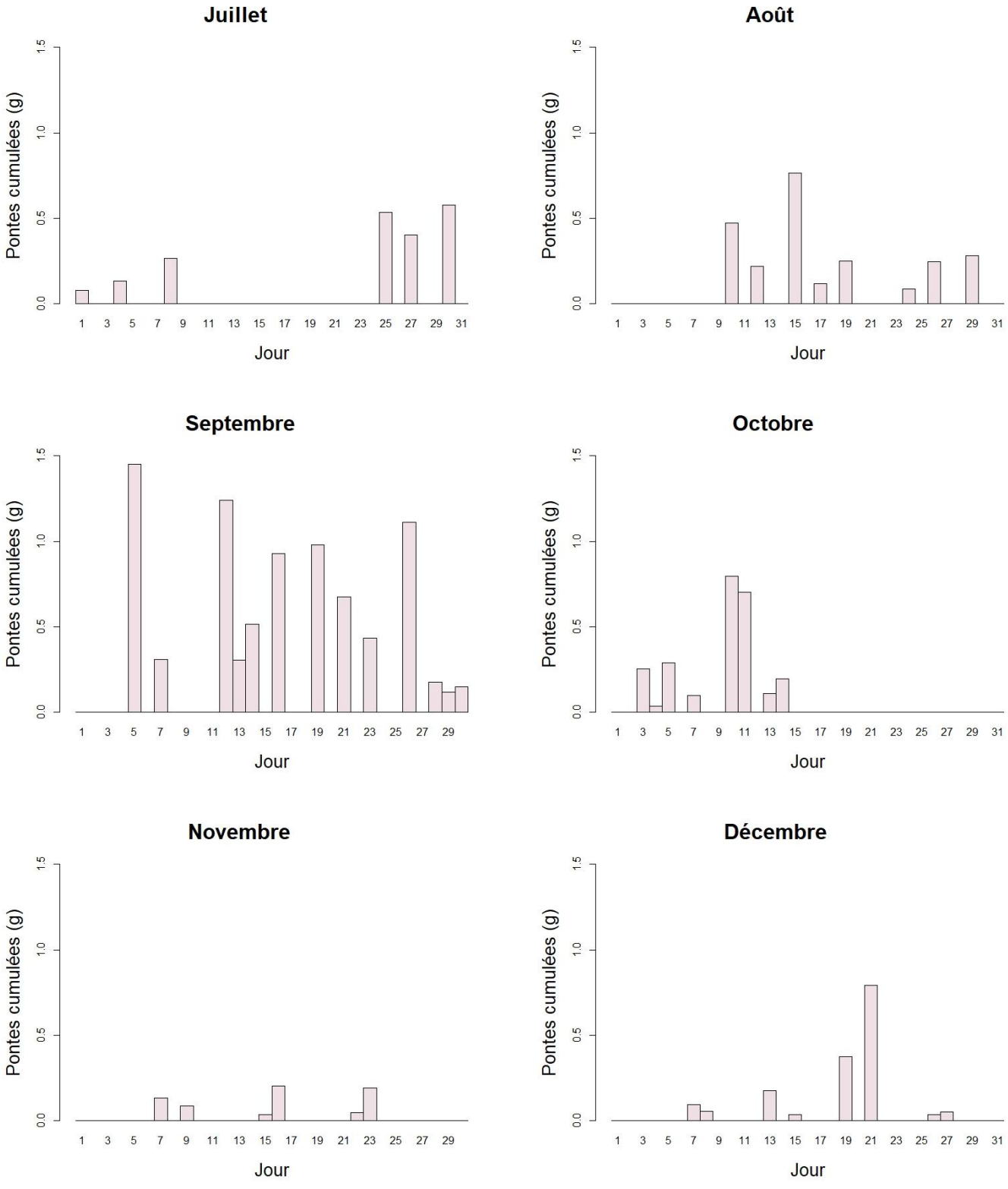


Figure 2.1.9 (suite et fin) : Histogramme des récoltes journalières d'œufs sauvages de BSF au cours de l'année 2021

Tableau 2.1.4 : Pontes et des précipitations journalières moyennes pour chaque mois de l'année 2021(les moyennes d'une même colonne avec deux lettres différentes en exposant diffèrent significativement)

Mois	n	Pontes journalières moyennes (g)	Précipitations journalières moyennes (mm)
Janvier	31	0,284 ± 0,363^{a}	2,27 ± 4,26^{a}
Février	28	0,095 ± 0,193^{ab}	2,74 ± 3,76^{a}
Mars	31	0,142 ± 0,234^{ab}	2,98 ± 7,73^{a}
Avril	30	0,069 ± 0,121^{ab}	1,95 ± 3,94^{a}
Mai	31	0,029 ± 0,088^{b}	2,17 ± 6,70^{a}
Juin	30	0,124 ± 0,302^{ab}	0,97 ± 1,89^{a}
Juillet	31	0,064 ± 0,157^{b}	0,79 ± 2,63^{a}
Août	31	0,079 ± 0,172^{ab}	1,48 ± 4,76^{a}
Septembre	30	0,280 ± 0,436^{ab}	1,39 ± 3,16^{a}
Octobre	31	0,080 ± 0,194^{b}	8,27 ± 20,9^{a}
Novembre	30	0,023 ± 0,056^{b}	2,75 ± 9,40^{a}
Décembre	31	0,052 ± 0,156^{b}	2,24 ± 3,77^{a}
p-value	-	<0,0001	0,036

Recherche d'autres facteurs

Les cycles naturels

Afin d'expliquer les variations de performances de pontes au cours de l'année, d'autres facteurs environnementaux sont évalués. La durée du jour a été relevée à l'échelle journalière et moyennée à l'échelle mensuelle. Cependant, la recherche de corrélations montre qu'il n'y a pas de corrélations statistiquement significative entre cumul des pontes et durée du jour, ni à l'échelle journalière (r=0,17, p=0,602), ni à l'échelle mensuelle (r=0,12, p=0,054, Figure 2.1.10).

Nous nous sommes également intéressés au cycle lunaire. Pour ce faire, à partir du calendrier lunaire de 2021, le rythme lunaire a été traduit en chiffre, avec une gamme allant de -15 jours à +15 jours. La pleine lune est à 0 jour, encadrée par deux nouvelles lunes à –15(±1) jours et +15(±1) jours. Les dates de nouvelle lune et de pleine lune sont présentées en annexe 2.2.2. Une fois de plus, la recherche de corrélations montre qu'il n'y a pas de corrélation significative en rythme lunaire et cumul journalier des pontes (r=-0,10, p=0,098).

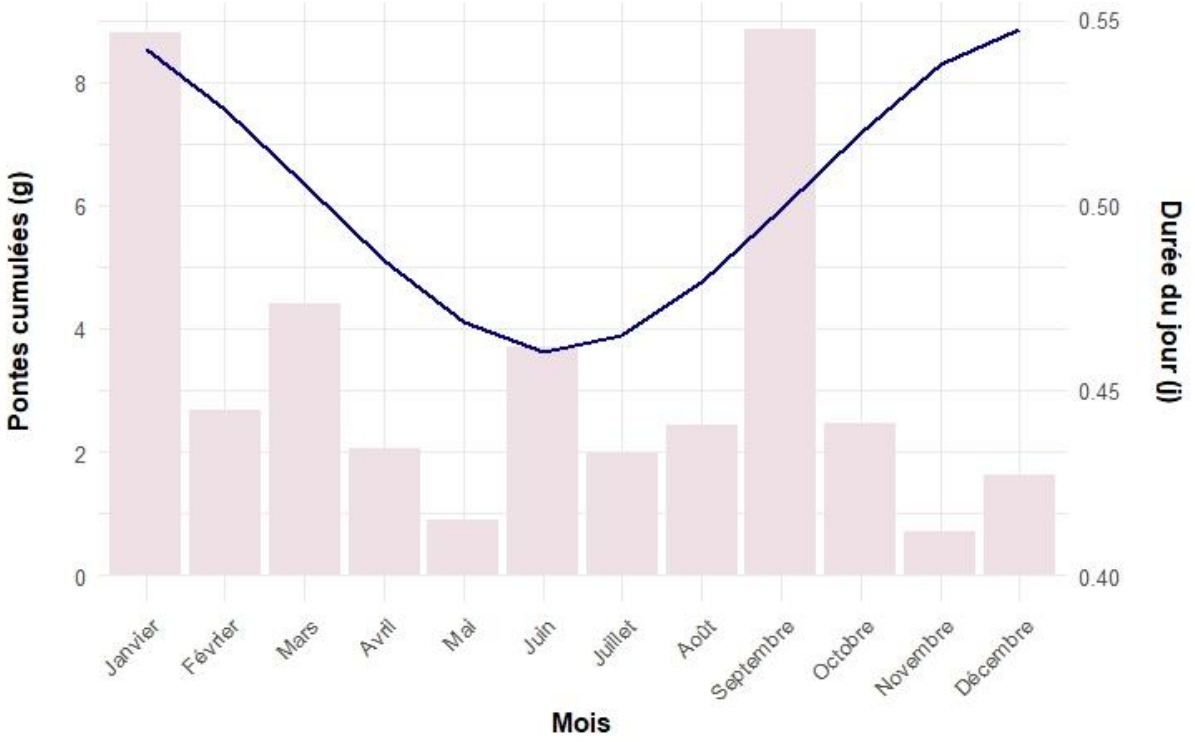


Figure 2.1.10 : Représentation des pontes cumulées et de la durée du jour pour chaque mois de l'année 2021

Hypothèses de l'influence des activités anthropiques

Nous suggérons donc que les conditions environnementales peuvent permettre le maintien d'une population sauvage de BSF toute l'année, mais que d'autres facteurs peuvent influencer l'intensité des pontes et la dynamique spatiale des populations sauvages de BSF sur un site spécifique. Les sites de ponte et en particulier le micro-habitat et la nature de l'attracteur olfactif jouent un rôle déterminant pour attirer les femelles sauvages (Booth and Sheppard, 1984; Sripontan *et al.*, 2017; Ebenezer, 2019). La présence de végétation est essentielle, fournissant à la fois des sites de repos et des zones de rassemblement (dites zones de « lekking ») où les mâles adultes se postent pour capturer les femelles en vol et s'accoupler avec elles (Tomberlin and Sheppard, 2001; Giunti *et al.*, 2018). En outre, nous estimons que la dynamique spatiale des populations de BSF sauvages est également influencée par les activités anthropiques sur le site. Les activités de jardinage, débroussaillage ou d'aménagement du site peuvent pousser les populations à s'éloigner de la zone, tandis que la gestion de grandes quantités de MO au sein du pilote expérimental peut renforcer la présence de femelles gravides et entretenir leur présence sur le site. De ce fait, en fonction de l'attractivité du site expérimental et des activités

exercées, la population sauvage de BSF se concentre dans les endroits où les conditions sont les plus favorables, modifiant ainsi localement la dynamique des pontes sur le point de récolte.

Estimation de la contribution de la population sauvage à proximité du site

A partir du poids des pontes sauvages récoltées au cours de l'année, nous pouvons estimer le nombre de femelles sauvages ayant contribué aux évènements de ponte. En effet, si on considère qu'une femelle peut pondre entre 200 et 1000 œufs (Furman, Young and Catts, 1959; De Smet *et al.*, 2018; Bertinetti, Samayoa and Hwang, 2019) et que le poids moyen d'un œufs est compris entre 0,022 et 0,028 mg (Booth and Sheppard, 1984; Dortmans *et al.*, 2017; Hoc *et al.*, 2019), on estime entre 1500 et 9000 le nombre de femelles BSF ayant pondu les 40,6 g d'œufs récoltés dans le cadre de cette étude sur toute l'année 2021. Les estimations pour chaque mois sont décrites dans le tableau 2.1.5, une gamme à l'échelle journalière est également déduite des résultats mensuels et du nombre de jours dans chaque mois.

Tableau 2.1.5 : Estimation du nombre de femelles sauvages ayant contribué aux pontes au cours de l'année 2021 en fonction du poids des récoltes des œufs

Mois	**Poids des pontes (g)**	**Nombre de femelles ayant pondu/mois**	**Nombre de femelles ayant pondu/jour**
Janvier	8,7904	314-1998	10-64
Février	2,6713	95-607	3-22
Mars	4,4085	157-1002	5-32
Avril	2,0559	73-467	2-16
Mai	0,9073	32-206	1-7
Juin	3,709	132-843	4-28
Juillet	1,9862	71-451	2-15
Août	2,4402	87-555	3-18
Septembre	8,8391	316-2009	11-67
Octobre	2,4694	88-561	3-18
Novembre	0,6959	25-158	1-5
Décembre	1,6108	58-366	2-12

Conclusion partielle

Ces travaux avaient pour objectif de mieux comprendre les paramètres régissant la dynamique des pontes sauvages de BSF. Les résultats de notre étude montrent que les facteurs environnementaux ne sont pas limitants pour la reproduction des BSF mais ne suffisent pas à expliquer la variabilité dans la collecte des pontes sur une année. Cela suggère que des facteurs anthropiques peuvent impacter la dynamique spatiale des colonies sauvages. Avec des récoltes de pontes aléatoires, il n'est pas possible de prévoir les quantités d'œufs récoltés quotidiennement. Il n'est donc pas envisageable de baser l'approvisionnement d'une unité de production de larves sur la collecte de pontes sauvages.

Une production issue d'une colonie domestiquée élevée en captivité apparait comme la solution la plus viable. En effet, l'apport en œufs doit être régulier et prévisible pour assurer d'une part la production d'une grande quantité de biomasse larvaire, afin de traiter par bioconversion de grandes quantités de MO et pour assurer d'autre part la production de larves dédiées au maintien de la colonie captive (Pastor *et al.*, 2015). La prochaine partie de ce chapitre est consacrée à l'établissement d'une colonie captive en vue d'une industrialisation de la production.

Annexe 2.1.1 : Coefficients de corrélation et p-values entre les différents paramètres environnementaux et les données de ponte à l'échelle journalière pour les mois de janvier, mars, mai, septembre, novembre et décembre (NS : non significatif)

Paramètre 1	**Paramètre 2**	**Coefficient de corrélation**	**p-value**	**Significativité**
Cumul journalier des pontes	Température journalière moyenne	-0,06	0,42	NS
Cumul journalier des pontes	Température journalière minimale	-0,09	0,24	NS
Cumul journalier des pontes	Température journalière maximale	0,15	0,04	*
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière moyenne	-0,0001	0,99	NS
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière minimale	-0,11	0,14	NS
Cumul journalier des pontes	Humidité relative journalière maximale	0,10	0,19	NS
Cumul journalier des pontes	Cumul mensuel des précipitations	0,13	0,09	NS
Cumul journalier des pontes	Intensité lumineuse journalière maximale	-0,01	-0,90	NS

Annexe 2.2.2 : Dates de pleine lune et de nouvelle lune de l'année 2021

Date	Phase de la lune
13-janvier	Nouvelle lune
28-janvier	Pleine lune
11-février	Nouvelle lune
26-février	Pleine lune
13-mars	Nouvelle lune
28-mars	Pleine lune
11-avril	Nouvelle lune
26-avril	Pleine lune
11-mai	Nouvelle lune
26-mai	Pleine lune
10-juin	Nouvelle lune
24-juin	Pleine lune
09-juillet	Nouvelle lune
23-juillet	Pleine lune
08-août	Nouvelle lune
22-août	Pleine lune
06-septembre	Nouvelle lune
20-septembre	Pleine lune
06-octobre	Nouvelle lune
20-octobre	Pleine lune
04-novembre	Nouvelle lune
18-novembre	Pleine lune
03-décembre	Nouvelle lune
18-décembre	Pleine lune

Établissement d'une colonie captive et performances en fonction des générations

Introduction

La précédente partie de ce chapitre a souligné l'importance d'établir une colonie de BSF élevée en captivité pour pallier la variabilité des reproductions naturelles. Dans la littérature scientifique, peu d'informations sont disponibles sur la méthodologie à suivre pour établir une colonie captive de BSF à partir d'une population sauvage. En revanche, plusieurs essais sont référencés pour discuter des conditions d'élevages de BSF en conditions contrôlées. Ces informations sont cruciales pour l'établissement d'une colonie domestiquée car pour maximiser la production d'œufs de BSF en laboratoire, il est essentiel d'optimiser les conditions d'élevage de tous les stades de vie.

De manière générale, dans une démarche de domestication d'une colonie, le choix des individus fondateurs prélevés dans la population sauvage semble être un facteur essentiel pour la réussite de l'élevage en captivité (Soulé *et al.*, 1986; Ballou, 1997). La diversité génétique des individus fondateurs ainsi que l'adéquation entre les conditions de vie en captivité et leurs besoins biologiques sont des éléments essentiels. Plus spécifiquement, le succès de l'élevage en captivité pour les BSF dépend de nombreux paramètres : l'émergence d'un maximum d'individus, la survie des géniteurs, la capacité des adultes à s'accoupler, la fécondité des femelles et la fertilité des œufs. Ces paramètres sont eux-mêmes déterminés par plusieurs facteurs tels que la température et l'humidité au sein du substrat alimentaire, la qualité et la quantité de la nourriture disponible au cours de la croissance larvaire mais également par les conditions de vie offertes aux adultes en termes d'espace, de densité, d'hygrométrie, de photopériode et de substrat attractant utilisé pour stimuler la ponte.

De nombreux essais ont été menés pour évaluer l'impact de la température sur la croissance larvaire de la BSF. Les auteurs reportent un développement larvaire accéléré par les températures élevées, avec des optimum entre 27°C et 33°C (Wang *et al.*, 2023). La production de biomasse larvaire est maximale à 30°C et est significativement plus élevée qu'à 20°C (Raimondi *et al.*, 2020; Ribeiro, Costa and Ameixa, 2022; Opare *et al.*, 2023). Les survies sont généralement maximales entre 27°C et 30°C (Tomberlin, Adler and Myers, 2009), avec des différences significatives par rapport aux températures basses (20°C)(Ribeiro, Costa and Ameixa, 2022) et élevées (33 à 36°C) (Raimondi *et al.*, 2020). En deçà de 20°C, la croissance larvaire est significativement ralentie et la mortalité accrue (Wang et al., 2023), tandis qu'au-

delà de 40°C, Harnden & Tomberlin, (2016) rapportent une absence totale de développement larvaire. Shumo et al., (2019) ont par ailleurs montré que la température optimale pour le développement larvaire et la survie pouvait varier en fonction du substrat de croissance larvaire. La synthèse de ces travaux indique une plage idéale de température allant de 25°C à 30°C (Barragan-Fonseca, 2018), les températures ne devant pas descendre en dessous de 20°C ni monter au-delà de 35°C pour préserver la pérennité de la colonie.

Holmes et al., (2012) ont investigué les effets de différents niveaux d'humidité relative sur les traits de vie de la BSF à différents stades. Leurs travaux ont montré que l'éclosion des œufs est optimale dans la gamme de 40 à 60% d'humidité relative, tandis qu'elle est significativement réduite aux valeurs seuil de 25% et 70% d'humidité relative. L'humidité relative a eu un impact significatif sur la durée des stades de développement ainsi que sur la survie des individus et sur le taux d'émergence des adultes, les meilleurs résultats étant obtenus pour une valeur de 70% d'humidité relative. Cette valeur est généralement celle ciblée dans les colonies de laboratoires (Li, Wang and Wang, 2016) avec des gammes assez larges pouvant aller de 30% à 90% d'humidité relatives (Sheppard *et al.*, 2002; Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002; Shumo, Osuga, *et al.*, 2019; Bruno *et al.*, 2020). Les recommandations pour le régime alimentaire larvaire sont également d'un taux d'humidité de 70% (Tomberlin, Sheppard and Joyce, 2002; Malawey *et al.*, 2019; Ibadurrohman *et al.*, 2020; Ribeiro, Costa and Ameixa, 2022).

Si on s'intéresse spécifiquement aux conditions favorisant la ponte et l'accouplement de la BSF, la lumière apparait comme un facteur déterminant, ce paramètre ayant fait l'objet de nombreuses études. Tomberlin & Sheppard, (2002) ont montré l'importance de l'exposition à la lumière naturelle du soleil. Les travaux de Zhang et al., (2010) confirment que le taux d'accouplement le plus élevé est obtenu lorsque les géniteurs sont soumis à la lumière naturelle du soleil. Des performances prometteuses ont également été obtenues avec l'utilisation de lampes à iodures métalliques, qui peuvent être une alternative intéressante en l'absence de lumière naturelle. Les expérimentations menées par Oonincx et al., (2016) ont révélé que les BSF sont sensibles aux UV, au bleu et au vert. En se basant sur ces résultats, deux éclairages artificiels ont été utilisés : un éclairage à partir de tubes fluorescents et un éclairage à partir de diodes électroluminescentes (LED) émettant à 365 nm (UV), 450 nm (bleu) et 515 nm (vert) et deux intensités lumineuses sont testées pour chacune des sources (éclairage fluorescent : 5 et 23 W/m², éclairage LED : 14 et 24 W/m²). Leurs résultats montrent que pour les deux intensités, la fécondité et la longévité des adultes est similaire. En revanche, le nombre de larves issues du traitement par LED est largement supérieur à celui des tubes fluorescents, suggérant que si

l'intensité lumineuse est un paramètre secondaire, la composition du spectre lumineux a un rôle déterminant pour l'obtention de pontes fertiles. Les travaux de Heussler et al., (2018) corroborent ces résultats et confirment que la lumière émise par les LED est la meilleure source d'éclairage pour assurer la longévité des adultes et favoriser les comportements d'accouplement et de ponte.

Hoc et al., (2019) ont mené une étude complète sur l'optimisation des paramètres influençant la reproduction de la BSF en milieu contrôlé. Leur étude montre qu'il y a une densité d'individus par cage optimale pour maximiser la production d'œufs, de l'ordre de 6500 individus/m^3, avec une population où les femelles sont plus nombreuses que les mâles. A des densités plus basses et plus hautes, les quantités d'œufs produites par femelle sont plus faibles, avec néanmoins une production d'œufs croissante jusqu'à la densité seuil de 6500 individus/m^3. Cette corrélation positive entre densité de population adulte et production d'œufs avait déjà été observée par Park et al., (2016), ces auteurs n'avaient cependant pas pu définir d'optimum, la production d'œuf ayant continué d'augmenter avec la densité (gamme approximative allant de 1 600 à 26 000 individus par m^3).

D'autres auteurs ont également observé les bénéfices d'une source de nutriments pour les adultes, l'ajout d'eau sucrée permettant d'allonger l'espérance de vie des géniteurs (Nakamura *et al.*, 2016; Macavei *et al.*, 2020), et l'utilisation d'agar ou de lait ayant un impact positif sur la longévité mais également sur la production d'œufs (Bertinetti, Samayoa and Hwang, 2019). La forme physique et la longévité des adultes va également être déterminée par les ressources énergétiques accumulée au cours du cycle larvaire (Gobbi, Martínez-Sánchez and Rojo, 2013). La qualité du substrat de croissance larvaire pour les futurs géniteurs est donc un élément clé pour l'optimisation des performances de reproduction (Barragan-Fonseca, 2018).

Les précédents essais de domestication de la BSF dans le cadre du programme Ra'o Puha s'étaient soldés par des échecs. En effet, la récolte des pontes sauvages, l'incubation puis l'éclosion des œufs et enfin la croissance des larves jusqu'à l'émergence des mouches a été réalisée avec succès dans un larvarium en bois, néanmoins les mouches une fois installées en captivité dans de grandes volières exposées à la lumière naturelle ne permettaient pas d'initier une colonie faute de pontes (Figure 2.2.1). Des tentatives se sont succédé sur plusieurs années sans parvenir à obtenir de descendance viable.

Face aux difficultés rencontrées, des essais en conditions de laboratoire sont envisagés. L'accès à de nouvelles infrastructures a été rendu possible grâce à la collaboration avec l'Institut Louis

Malardé, qui a déployé sur le site du laboratoire d'entomologie médicale des espaces laboratoires relais (Figure 2.2.1).



Figure 2.2.1 : Photo du pilote expérimental de production de larves de BSF (larvarium à gauche, espace d'élevage des adultes à droite) au début du programme Ra'o Puha (Haut) et aperçu des installations des laboratoires relais (Bas) ©J. TETOHU

Cette partie est donc consacrée à la description de la méthodologie appliquée, basée sur l'analyse bibliographique, pour l'obtention d'une colonie captive dans ces nouvelles conditions. Les traits de vie de la colonie domestiquée sont suivis au fil des générations. Ces travaux avaient également pour objectif d'établir une procédure d'élevage standardisée et transposable à grande échelle pour le maintien d'une colonie de BSF dans le cadre de la production de masse de larves pour le traitement de matières organiques.

Matériels et méthodes

Initiation et maintien de la colonie

La colonie captive a été initiée à partir de pontes sauvages récoltées sur le site expérimental de Paea avec le dispositif décrit dans la partie précédente de ce chapitre. La salle d'élevage larvaire est un espace clos, avec une température moyenne de 24 ± 3 °C. Les forts écarts de température sont du fait de l'absence d'isolation du container d'élevage. L'humidité relative est de 80 ± 20 %. Les œufs issus de pontes sauvages sont collectés et incubés pendant 3 jours dans des boites en plastique (16,5x16,5x16,5 cm) contenant le régime alimentaire artificiel (Aliment pour poules pondeuses mélangé à de l'eau, teneur en eau 70%). Après l'éclosion, les néonates sont nourries à volonté jusqu'à ce qu'une majorité des larves aient atteint le stade de nymphes (caractérisé par la couleur noire de l'enveloppe larvaire). Les nymphes sont séparées du résidu de bioconversion par tamisage puis placées dans une nouvelle boite en plastique contenant des copeaux de bois pour favoriser la nymphose puis l'émergence des mouches adultes. La boite en plastique est recouverte d'une moustiquaire en attendant l'émergence des adultes. Les individus nouvellement émergés sont transférés dans la salle d'élevage des géniteurs.

Cette salle est maintenue à une température moyenne de 24 ± 3 °C avec les mêmes problèmes d'isolation et avec une humidité relative dans l'air de 80 ± 20 %. Elle est équipée d'un éclairage artificiel (lampes LED 50W) qui est effectif de 8h à 16h. Les insectes sont exposés aux cycles d'aube et de crépuscule naturels grâce à une imposte permettant le passage de la lumière naturelle du soleil (lever du jour entre 5h et 6h et tombée de la nuit entre 17h30 et 18h30 suivant les périodes de l'année).

Les mouches sont élevées dans des cages Bugdorm équipées d'un attracteur olfactif (aliment pour poules pondeuses mélangé à de l'eau, teneur en eau 70%) pour stimuler la ponte sur lequel est posé un pondoir, et d'un abreuvoir correspondant à un récipient peu profond dans lequel est posé un papier absorbant imbibé d'eau sucrée (10g/100mL). De l'eau douce est pulvérisée quotidiennement à la surface des cages. Les pontes sont récoltées trois fois par semaine à l'aide

d'un cutter, le poids des pontes est déterminé à l'aide d'une balance de précision (RADWAG analytical balance AS110.R2). Dans un premier temps, la génération suivante est propagée à partir de toutes les pontes de la génération précédente en répétant la procédure décrite précédemment. Puis, lorsque la quantité d'œufs et de larves néonates devient suffisamment grande, chaque génération est propagée à partir d'un échantillon des larves issues des pontes de la génération précédente (Figure 2.2.2).

Mesure des traits de vie

La durée du développement des individus est suivie, avec d'une part la durée de la période d'alimentation (développement larvaire) et d'autre part la durée de la nymphose (période entre la mise des nymphes dans les copeaux de bois et l'émergence des premières mouches). Ces données sont relevées pour chaque bac d'élevage. Des indicateurs liés aux mouches placées en captivité sont également relevés tels que la période entre la mise en captivité des mouches et la première ponte correspond à la période de pré-ponte.

La durée entre la première et la dernière ponte correspond à la période de ponte. La production d'œufs est recensée via la pesée systématique des œufs issus de chaque cage de reproduction. Une fois la période de ponte achevée, les pots dans lesquels la nymphose et l'émergence des adultes ont lieu sont inspectés. A partir du nombre de nymphes restantes et du nombre d'exuvies (enveloppe résiduelle après l'émergence de la mouche), le taux d'émergence est calculé. Il correspond au ratio entre le nombre d'exuvies et le nombre de nymphes initialement placées dans la boite (calculé en faisant la somme du nombre de nymphes résiduelles et du nombre d'exuvies). Ce résultat est exprimé en pourcentage. Le nombre de mouches par cage est déduit du nombre d'exuvies comptabilisées. Le sexe ratio est déterminé grâce à un échantillon de 100 mouches. Le sexage de ces mouches est effectué grâce à une observation des organes génitaux à la loupe binoculaire. La fécondité est déterminée à partir des données précédentes et est exprimée en mg d'œufs par femelle.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec RStudio (version 4.2.0). Les données relatives aux traits de vie sont présentées sous la forme moyenne ± écart-type. Un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé pour comparer les performances entre les générations. Lorsqu'une différence statistique est trouvée, un test de comparaison par paires de Wilcoxon est effectué.

Résultats et discussions

Description de la propagation des générations

Les données présentées correspondent aux résultats obtenus à partir des pontes de la colonie sauvage, que nous considérons de génération 0 (G0). Les larves issues de ces pontes sont élevées jusqu'aux stades de nymphes puis de mouches adultes. Ces adultes (G0) sont placés pour la première fois en captivité, nous considérons que les pontes de ces adultes sont de génération 1 (G1), ce qui correspond à la première génération issue de pontes récoltées en captivité. Dans le cadre de ce manuscrit, nous décrirons les résultats pour les générations G0 jusqu'à G5 (Figure 2.2.2).

L'obtention de la première génération d'individus domestiqués constitue le frein historique du projet Ra'o Puha. En effet, dans les précédentes installations (Figure 2.1.1), l'obtention de pontes fertiles n'était pas maitrisée et demeurait très aléatoire. Les larves (G1) issues de ces pontes étaient généralement peu nombreuses et présentaient un taux de mortalité élevé. Cela ne permettait pas d'obtenir d'adultes de la première génération et empêchait donc la production d'une descendance.

L'approche au sein des nouvelles infrastructures a consisté à accroitre le nombre d'adultes G0 placés en captivité en conditions semi-contrôlées, afin de maximiser les collectes d'œufs G1 et de favoriser l'obtention du plus grand nombre possible d'adultes G1 (Figure 2.2.2). Un total de 9,8 g d'œufs G0 ont été utilisés pour le lancement de 6 cages en captivité, mobilisant un total d'environ 11 300 mouches adultes G0. Cette approche a permis de récolter environ 8,1 g d'œufs de génération G1 (Tableau 2.2.1) sur la période d'octobre 2023 à mars 2024 (Figure 2.2.3). L'intégralité de ces pontes G1 a été conservée pour produire un maximum d'adultes G1, et récolter la plus grande quantité possible d'œufs G2. La même démarche est appliquée pour l'obtention de la troisième génération. Le maintien de ces trois premières générations domestiquées était donc guidé par la volonté de maximiser le nombre d'individus en captivité et le nombre d'œufs récoltés. Dans cette optique, les cages étaient maintenues le plus longtemps possible, généralement jusqu'à mortalité totale des géniteurs, afin de bénéficier de la plus grande quantité d'œufs disponibles.

Une fois que la production d'œufs, la croissance larvaire et l'obtention de géniteurs étaient assurées, la méthode de gestion de la colonie captive a été progressivement ajustée afin d'atteindre un protocole de travail standardisé.

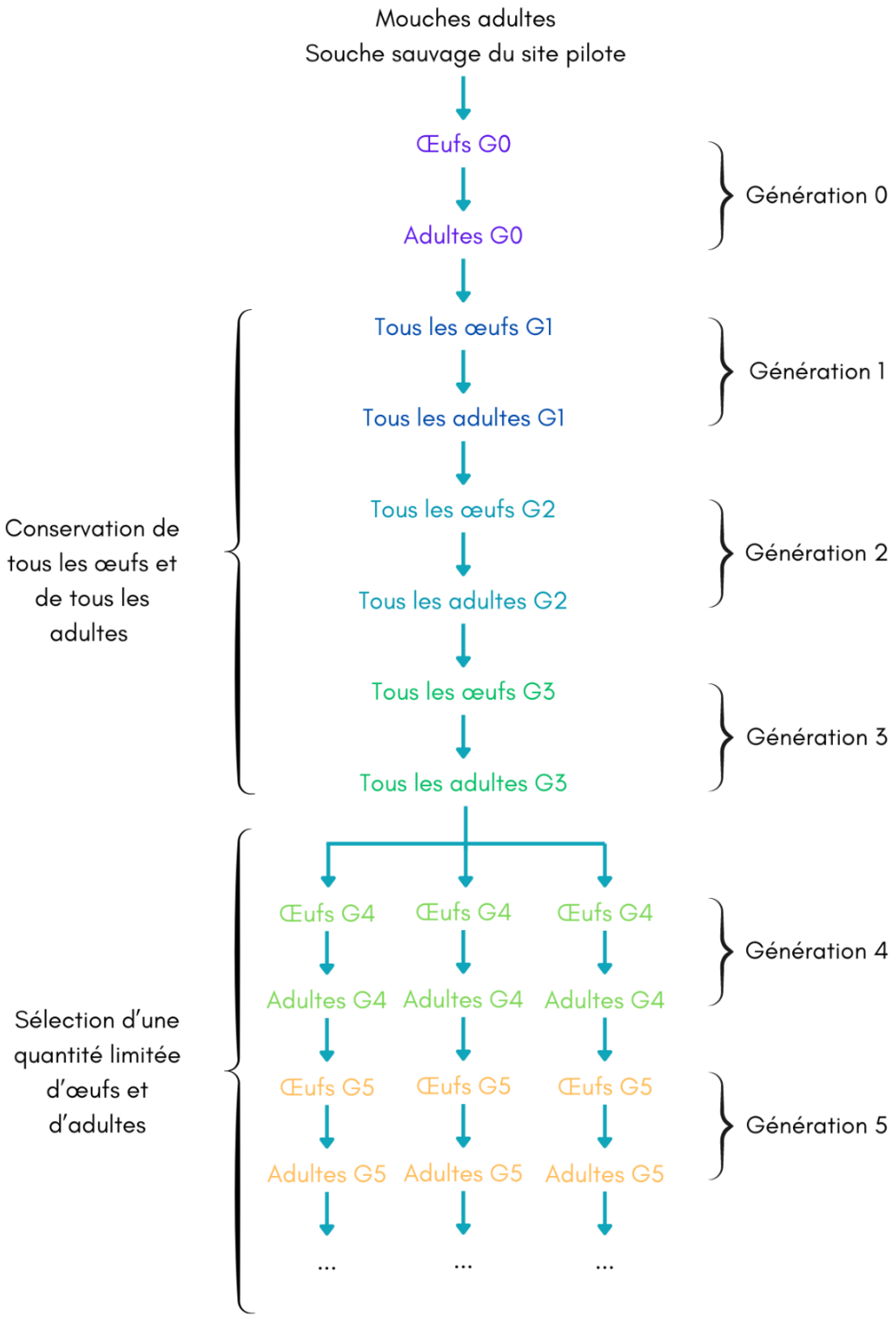


Figure 2.2.2 : Schéma du processus de mise en place de la colonie captive

Dans cette démarche, nous avons reçu les conseils et recommandations de M. Benjamin BARIL, professionnel de recherche de l'Université de LAVAL, pour adapter et améliorer notre protocole de gestion de colonies de BSF. Ce travail mené en collaboration a permis de produire un protocole d'élevage hybride, inspiré du fonctionnement opéré au sein de l'élevage de BSF de l'Université de LAVAL, et adapté aux ressources humaines et matérielles de notre projet. Le protocole adopté correspond à un fonctionnement avec deux opérateurs, intervenant trois jours par semaine. La transition a été initiée entre les générations 3 et 4, où seulement une partie des pontes et donc des larves néonates ont été conservées pour la propagation des générations suivantes. Brièvement, le dispositif d'élevage a été miniaturisé et divisé en plusieurs lots afin de répartir les larves néonates du même âge dans plusieurs bacs d'élevage distincts. Cette approche permet de sécuriser la production en cas de problème survenant dans l'un des bacs. Pour cet élevage standardisé, les larves sont nourries sur la base d'une ration journalière humide de 200 mg d'aliment par larve. Chaque bac d'élevage contient en moyenne 500 larves, nourries pendant 14 jours. A l'issue du développement larvaire, 50g de nymphes par bac (l'équivalent de 300 à 400 individus) sont conservés pour l'obtention de géniteurs. La standardisation du protocole de maintien de colonie initiée à la mi-mars 2024 s'est traduite par une augmentation du nombre de bacs d'élevage et de cages de captivité (tableau 2.2.1). Chaque jour, tous les stades de développement de la BSF sont produits au sein du pilote d'élevage et de nouvelles récoltes sont intégrées au processus.

Tableau 2.2.1 : Récoltes de pontes en grammes et nombre total de mouches et de cages de captivités lancées pour chaque génération n

Génération	Œufs Gn (g)	Adultes Gn	Œufs Gn+1	Cages
G0	9,8	11 300	8,1	6
G1	8,1	6400	13,4	4
G2	13,4	10 000	13,2	3
G3	13,2	27 400	25,1	8
G4	25,1	15 300	21,3	10
G5	21,3	eca	eca	11

eca : en cours d'acquisition au moment du traitement des données

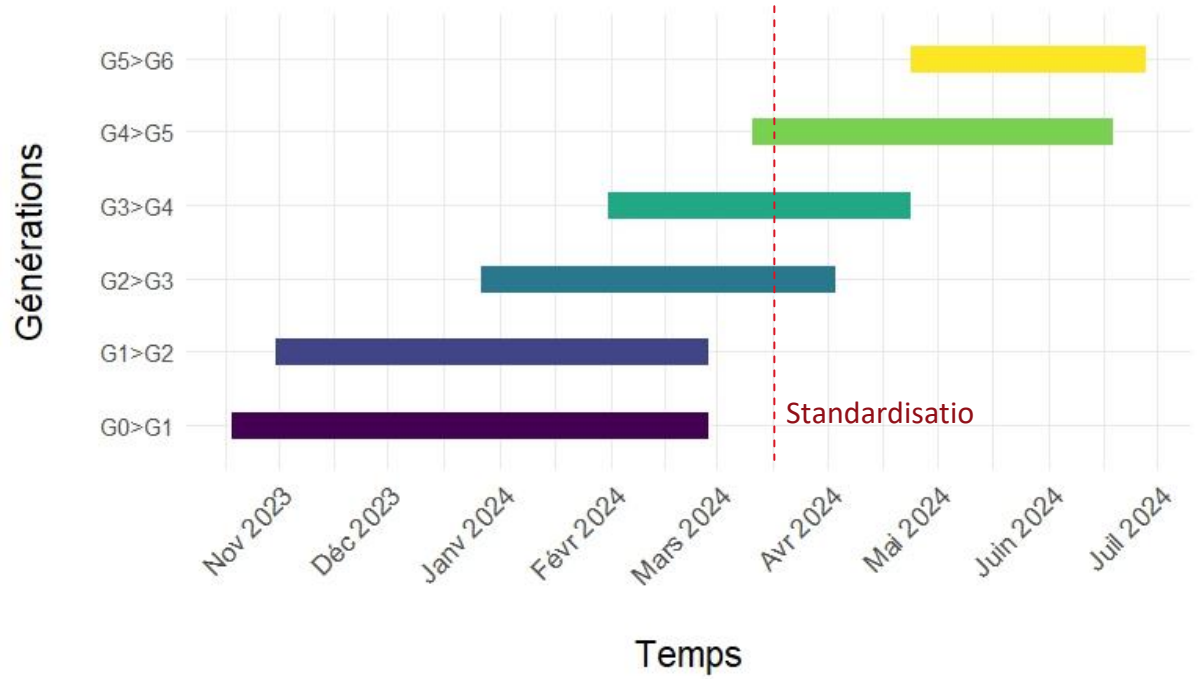


Figure 2.2.3 : Représentation de la durée des générations de la colonie domestiquée, Gn>Gn+1 : Gn correspond à la génération des adultes et Gn+1 à la génération des pontes issues de ces adultes.

Traits de vie des populations en fonction des générations

Les traits de vie des individus ont été mesurés au fil des générations afin de documenter leurs performances mais également afin d'identifier les étapes où les processus d'élevage peuvent être améliorées. Le jeu de données des générations 0 à 4 est exhaustif, tandis que celui de la génération 5 est partiel, l'acquisition des données étant en cours au moment du traitement de ces résultats et de la rédaction du manuscrit.

Durée des étapes du développement

Dans un premier temps sont présentés les résultats relatifs au développement des individus. La durée du développement larvaire correspond à la période entre l'éclosion des larves et la mise en émergence des nymphes dans les copeaux de bois. La nymphose correspond à la période entre la mise en émergence et l'apparition des premières mouches adultes. Ces deux indicateurs sont suivis pour chaque bac d'élevage. En raison de notre approche empirique sur les premières générations puis en voie de standardisation sur les suivantes, le nombre de bacs d'élevages N est variable d'une génération à une autre (Tableau 2.2.2).



Figure 2.2.5 : Observation à la loupe binoculaire de l'éclosion des larves de BSF (Gx30) (A) ; Larves de BSF au cours de la croissance larvaire (B) ; Individus au stade de nymphes avant d'être placées dans les copeaux de bois (C) ; Emergence des mouches adultes (D) ©J. TETOHU

Il n'y a pas de différences significatives ($p>0,05$) entre les générations pour la durée du développement larvaire qui converge vers une durée de 18 à 19 jours (Tableau 2.2.2). La standardisation du processus d'élevage permet d'obtenir des durées de développement larvaire similaires avec des écart-types réduits car les différentes étapes de production sont exécutées suivant le planning défini, tout en conservant une certaine flexibilité afin de s'assurer que le passage à l'étape suivante soit adapté au développement effectif des individus et ne soit ni prématuré, ni retardé (Figure 2.2.5). A l'inverse, la durée de la nymphose varie significativement ($p<0,0001$) en fonction des générations (Tableau 2.2.2). Deux groupes principaux se distinguent, les individus des générations 0 à 3 avec une durée de nymphose comprise entre 15 et 17 jours et les individus des générations 3 à 5 dont la durée est significativement plus courte, de 11 à 12 jours en moyenne (Figure 2.2.5). Les écarts les plus

marqués sont entre les individus de la génération 1 et 3 ($p<0,01$) et entre les individus de la génération 1 et 4 ($p<0,01$). Cette différence entre les deux groupes pourrait s'expliquer par une stabilisation des conditions d'élevage au cours des générations successives, qui se traduit par une meilleure synchronisation du développement des différents stades.

Tableau 2.2.2 : Développement larvaire et durée de la nymphose des différents bacs d'élevages en fonction des générations. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type. Les résultats d'une même colonne présentant des lettres en exposant différentes sont significativement différents.

Génération	**N**	**Développement larvaire (jours)**	**Durée de la nymphose (jours)**
0	11	19 ± 7^{a}	16 ± 5^{ab}
1	13	19 ± 5^{a}	17 ± 6^{a}
2	15	19 ± 2^{a}	15 ± 5^{abc}
3	25	19 ± 2^{a}	11 ± 3^{d}
4	30	18 ± 2^{a}	11 ± 3^{cd}
5	18	19 ± 2^{a}	12 ± 4^{bcd}
p-value (Kruskal-Wallis)		$p>0,05$	$p<0,05$

La durée du développement larvaire mesurée dans nos conditions expérimentales est du même ordre de grandeur que celle des colonies de laboratoires élevées sur des régimes similaires, notamment le Gainesville diet (environ 20 jours) (Tomberlin, Adler and Myers, 2009) et l'aliment pour poules pondeuses (16 à 20 jours) (Diener, Zurbrügg and Tockner, 2009). D'autres études décrivent des durées de développement larvaire et de nymphose différentes, qui varient en fonction des conditions de températures ou du régime larvaire (Nguyen, Tomberlin and Vanlaerhoven, 2013; Harnden and Tomberlin, 2016; Singh *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Dans notre cas, le régime des larves destinées à devenir des géniteurs est un régime standard (aliment pour poules pondeuses) dont la qualité et la méthode de préparation sont constantes dans le temps. La température apparait donc comme le paramètre à ajuster et à fixer pour uniformiser la durée des stades de développement.

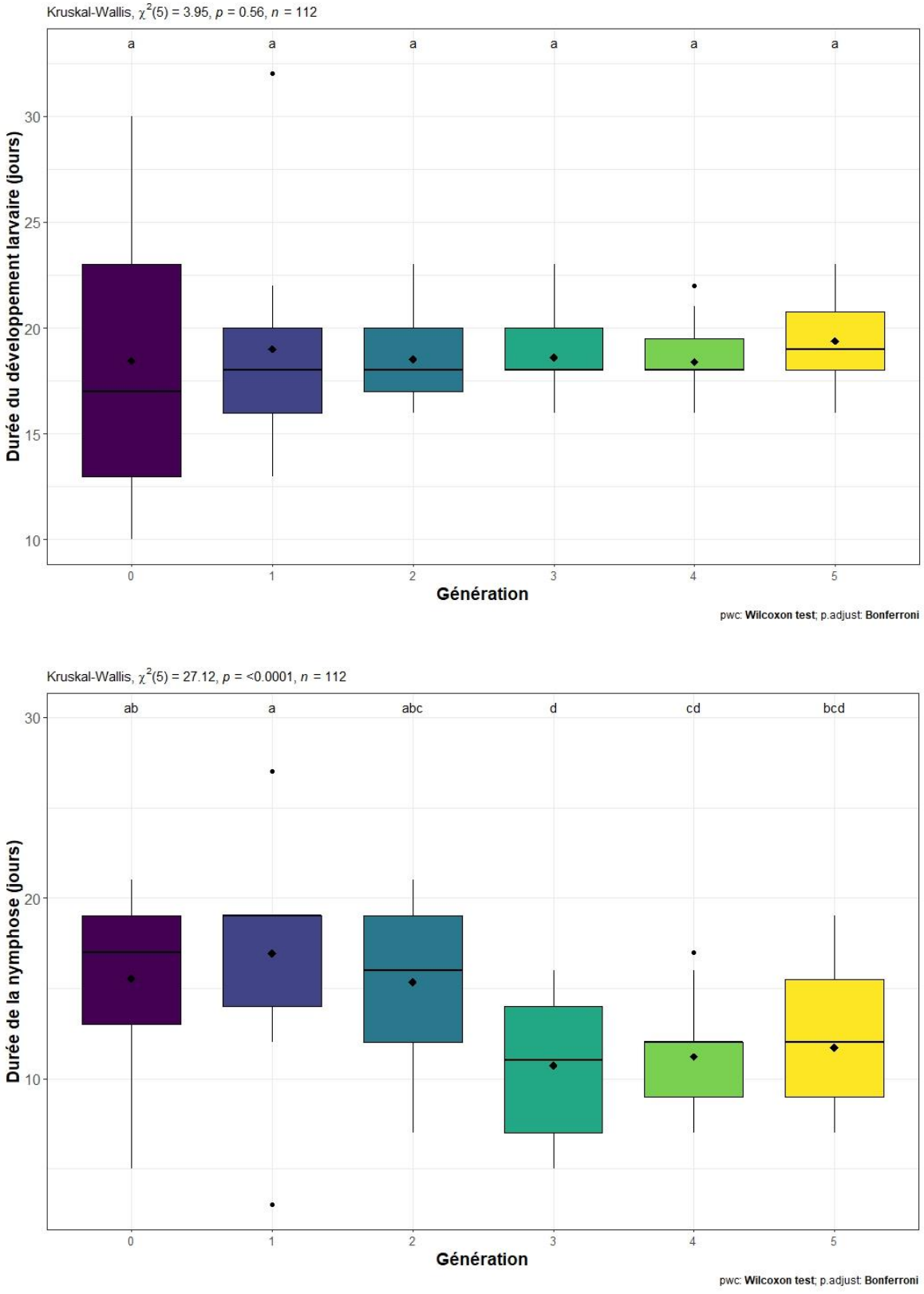


Figure 2.2.5 : Boites à moustaches de la durée de développement larvaire (haut) et de la nymphose (bas) en fonction des générations (deux lettres différentes indiquent une différence significative p<0,05).

Dans les conditions actuelles de production (3 jours de fonctionnement/7), l'écart-type ne pourra pas être inférieur à 2 jours, car il y a donc toujours 2 jours qui séparent deux points de mesure. L'augmentation du nombre de jours de fonctionnement permettra donc également de contribuer à la stabilisation des traits de vie des individus.

Performances de ponte

Dans un second temps, les individus adultes nouvellement émergés sont placés en captivité et les indicateurs liés aux performances de ponte sont relevés. L'effectif N présenté dans le tableau 2.2.3 correspond au nombre de cages de captivité lancées pour chaque génération. Les cages de reproduction regroupant plusieurs bacs d'élevage, l'effectif N présenté est inférieur au nombre total de bacs suivis dans les données antérieures. Les tests statistiques de comparaison des indicateurs ne révèlent pas de différences significatives entre les générations (Tableau 2.2.3), cependant plusieurs tendances sont remarquables.

Les périodes de pontes montrent une dynamique différente avec des périodes croissantes entre les générations 0 à 2 d'une part et entre les générations 3 à 5 d'autre part (Figure 2.2.6). Les valeurs moyennes sont comprises entre 12 et 30 jours (Tableau 2.2.3). Une fois encore, des variations intragénérationnelles sont notables, en particulier pour les générations 0 à 3 (Tableau 2.2.3). Les travaux de Julita et al., (2020) décrivent une période de ponte de 8 jours, ceux mesurés par Nakamura et al., (2016) sont de 7,6 à 8,4 jours tandis que Heussler et al., (2018) décrivent des périodes de pontes comprises entre 8 et 13 jours. Une période de ponte très courte peut révéler des anomalies dans les conditions expérimentales conduisant à l'absence de ponte ou à l'occurrence très faible de cet événement. A l'inverse, une période de ponte trop longue n'est pas nécessairement favorable car elle nécessite d'entretenir la cage sur une période plus importante. Dans le cadre de l'industrialisation du procédé de production de larves de BSF, l'objectif est de déterminer la durée de maintien des cages de reproduction, permettant de maximiser la production d'œufs et de limiter le temps de séjour de chaque cage.

Tableau 2.2.3 : Indicateurs liés aux performances de ponte de individus en captivité en fonction des générations. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type. Les résultats d'une même colonne présentant des lettres en exposant différentes sont significativement différents. Le nombre de mouches par cage est présenté sous forme de gamme avec les valeurs minimales et maximales des réplicas.

Génération	**N**	**Période de pré-ponte (jours)**	**Période de ponte (jours)**	**Cumul des pontes (g)**	**Fécondité (mg d'œufs /femelle)**	**Ratio M/F**	**Nombre de mouches par cage**
G0	6	12 ± 8^{a}	18 ± 12^{a}	1,6 ± 2,0^{a}	2,2 ± 1,8^{a}	0,9 ± 0,3^{a}	264-3325
G1	4	11 ± 8^{a}	26 ± 10^{a}	1,9 ± 1,5^{a}	6,0 ± 6,0^{a}	0,7 ± 0,3^{a}	26-3825
G2	3	7 ± 2^{a}	30 ± 12^{a}	4,3 ± 2,6^{a}	3,2 ± 4,8^{a}	0,7 ± 0,2^{a}	1178-5869
G3	7	6 ± 2^{a}	12 ± 10^{a}	1,6 ± 2,0^{a}	1,6 ± 1,2^{a}	0,9 ± 0,5^{a}	394-4729
G4	10	6 ± 2^{a}	15 ± 7^{a}	2,5 ± 2,3^{a}	4,3 ± 3,8^{a}	0,9 ± 0,4^{a}	456-3140
G5	5	7 ± 2^{a}	20 ± 6^{a}	4,2 ± 2,7^{a}	5,0 ± 2,6^{a}	1,0 ± 0,7^{a}	683-3297
p-value (Kruskal-Wallis)		p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	-

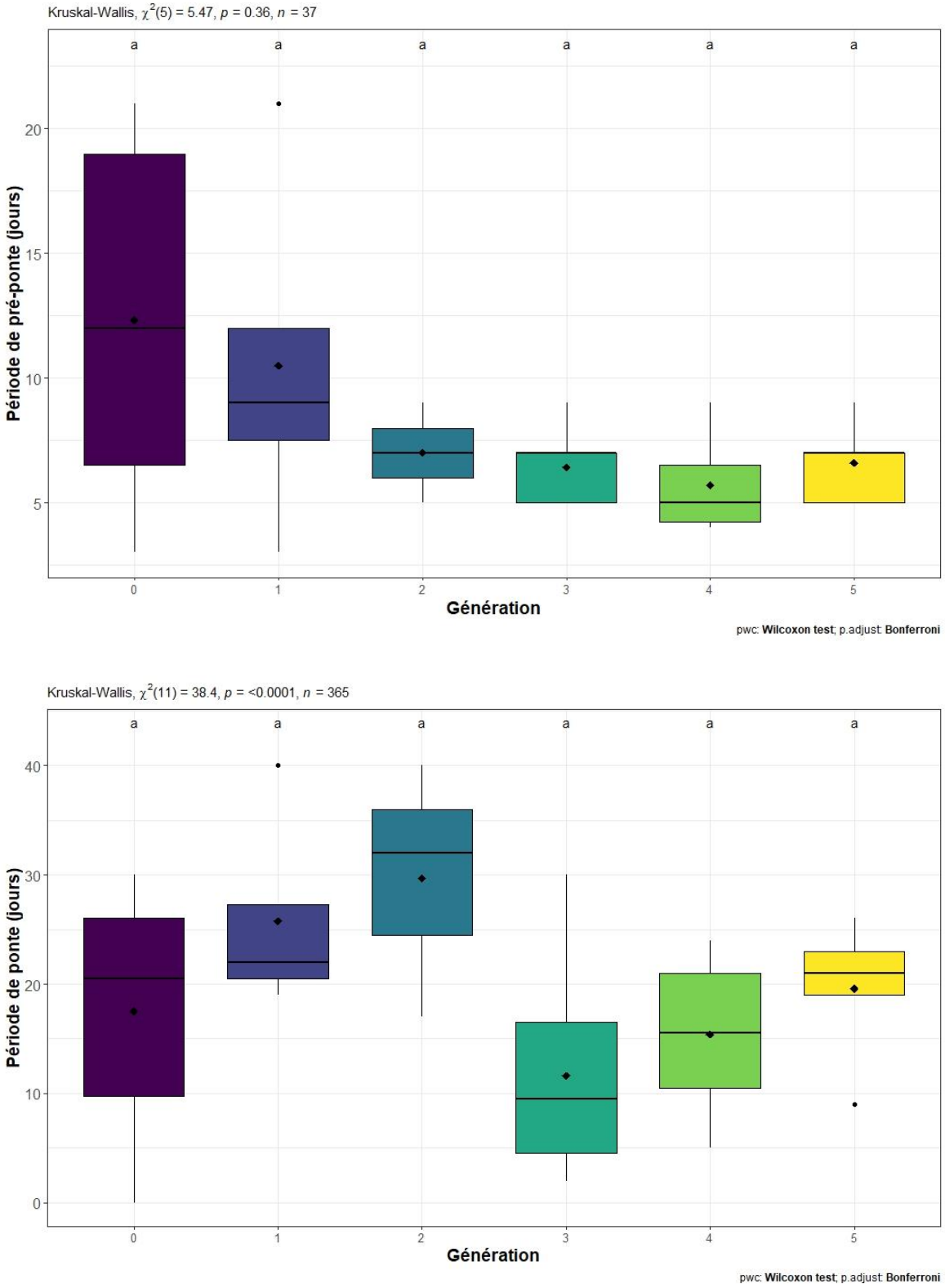


Figure 2.2.6 : Boites à moustaches de la durée de pré-ponte (haut) et de la durée de ponte (bas) en fonction des générations (deux lettres différentes indiquent une différence significative p<0,05).

En toute logique, la figure 2.2.7 montre que le poids total des œufs pondus par cage s'accroît avec la durée de la période de ponte, tandis que la fécondité des femelles est variable, aussi bien entre les générations qu'au sein d'une même génération. L'étude approfondie de la dynamique des pontes des femelles BSF dans chaque cage (Figure 2.2.8) montre des performances de ponte variables au sein d'une même génération, et ce même après standardisation des méthodes d'élevage. La lecture spécifique du cumul des pontes des géniteurs 4 et 5 (Figure 2.2.8) révèle qu'entre le jour 5 et le jour 10 la quantité d'œufs pondus augmente, pour se stabiliser à partir des jours 15 à 20, la majorité des œufs ayant déjà été pondus. Ceci donne une indication sur la durée prévisionnelle de maintien en activité de chaque cage qui sera comprise entre 15 et 20 jours. L'acquisition de ces mêmes données pour les captivités suivantes sera importante pour déterminer si les performances de pontes s'homogénéiseront et si les durées de ponte se synchroniseront au cours des générations suivantes. Ceci permettra de déterminer plus finement la période idéale de captivité des individus reproducteurs.

La fécondité de nos femelles élevées en captivité est faible compte tenu du potentiel de ponte de cette espèce. En effet, dans la littérature, *Hermetia illucens* est connue pour avoir des femelles adultes capables de pondre plusieurs centaines d'œufs, avec une moyenne de l'ordre de 500 œufs (Dortmans *et al.*, 2017; Macavei *et al.*, 2020). Le poids moyen d'un œuf de BSF étant de l'ordre de 0,025 mg (Booth and Sheppard, 1984; Kim *et al.*, 2008; Hoc *et al.*, 2019), la fécondité observée chez nos femelles (1,6 à 6,0 mg d'œufs par femelle, tableau 2.2.3) équivaut à une ponte de 64 à 240 œufs par individus. Cet indicateur a donc un fort potentiel d'amélioration au sein de notre unité de production.

Notre hypothèse pour expliquer les performances de ponte variables est que la densité d'individus par cage est aléatoire en raison de la variabilité du taux d'émergence. Une stabilisation du taux d'émergence des adultes reproducteurs, de leur sexe ratio, ainsi qu'une meilleure synchronisation des stades de vie des individus permettraient une gestion plus efficace du nombre et donc de la densité des adultes par cage. La maitrise de la densité d'individus par cage permettra de conforter la standardisation des conditions d'élevage et plus particulièrement de reproduction.

Le taux d'émergence des adultes reproducteurs a été enregistré à partir de la standardisation de la méthode d'élevage. De ce fait, la base de données n'est pas exhaustive, en raison de l'absence de données pour les générations 0 à 2 et des données partielles pour la G3 ainsi que pour la G5 pour laquelle des données sont en cours d'acquisition au moment de la rédaction de ces résultats. A titre indicatif, les résultats recensés sont présentés dans le tableau 2.2.4.

Tableau 2.2.4 : Taux d'émergence (%) des adultes reproducteurs. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type.

Génération	N	Taux d'émergence
3	5	14 ± 6
4	27	64 ± 25
5	18	79 ± 12

Les données indiquent des taux d'émergence qui augmentent au fil des générations, cependant les fortes variations intragénérationnelles en particulier pour la génération 4 montrent que ce paramètre nécessite d'être stabilisé. De la même façon, le sexe ratio présente des variations assez importantes au sein d'une même génération (Figure 2.2.9). Les données des générations futures seront nécessaires pour conclure quant à l'impact de la standardisation des procédures de maintien de la colonie sur ces paramètres. La stabilisation de ce paramètre devrait être améliorée avec l'utilisation de « dark cages », qui permettent d'isoler de la lumière les individus pendant la nymphose et l'émergence des adultes. Ces dispositifs permettent aux adultes d'émerger dans le noir. Cet environnement permet aux géniteurs de rester calmes sans activité d'accouplement jusqu'au moment de leur transfert dans les cages de reproduction à la lumière (Dortmans *et al.*, 2017).

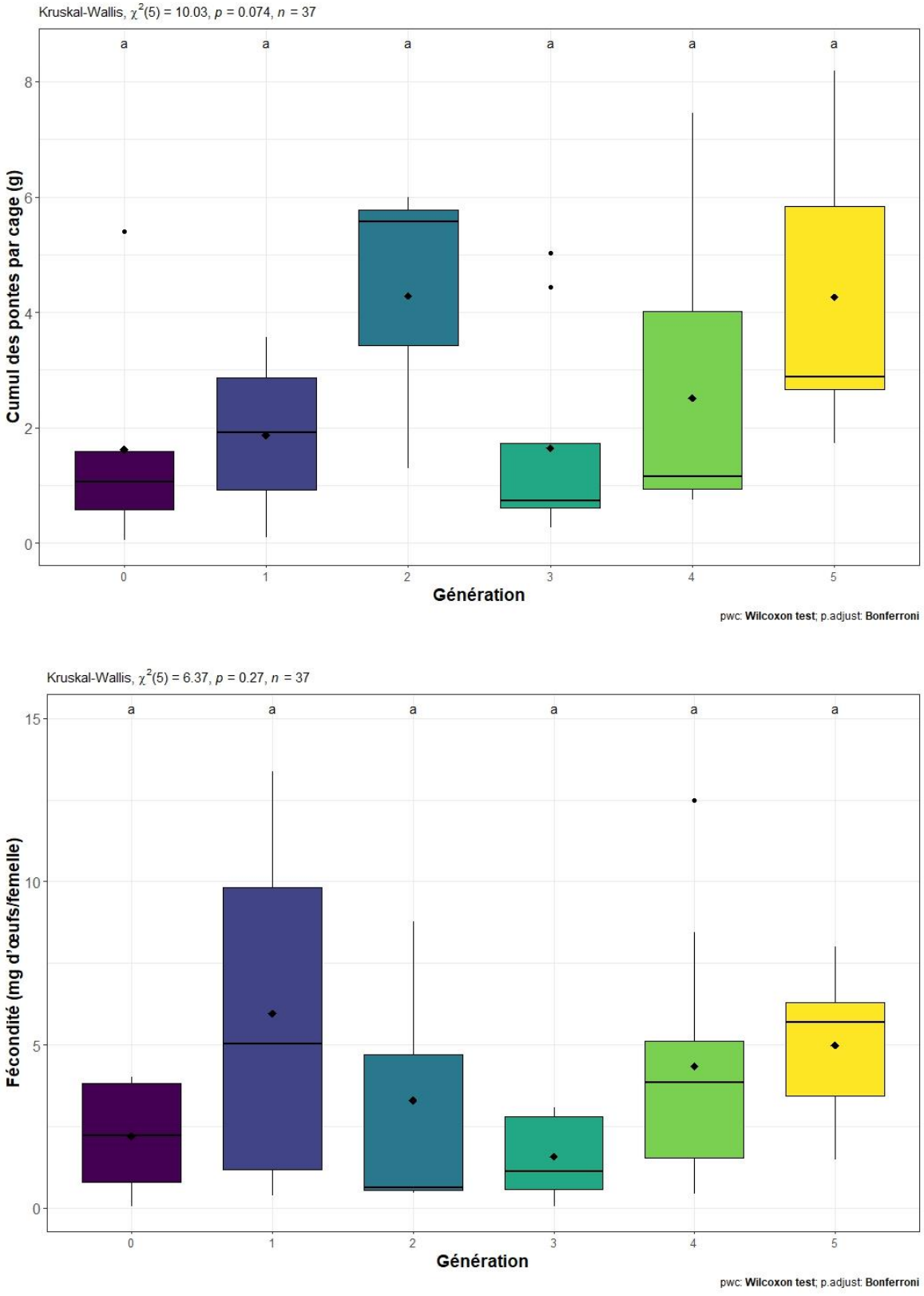
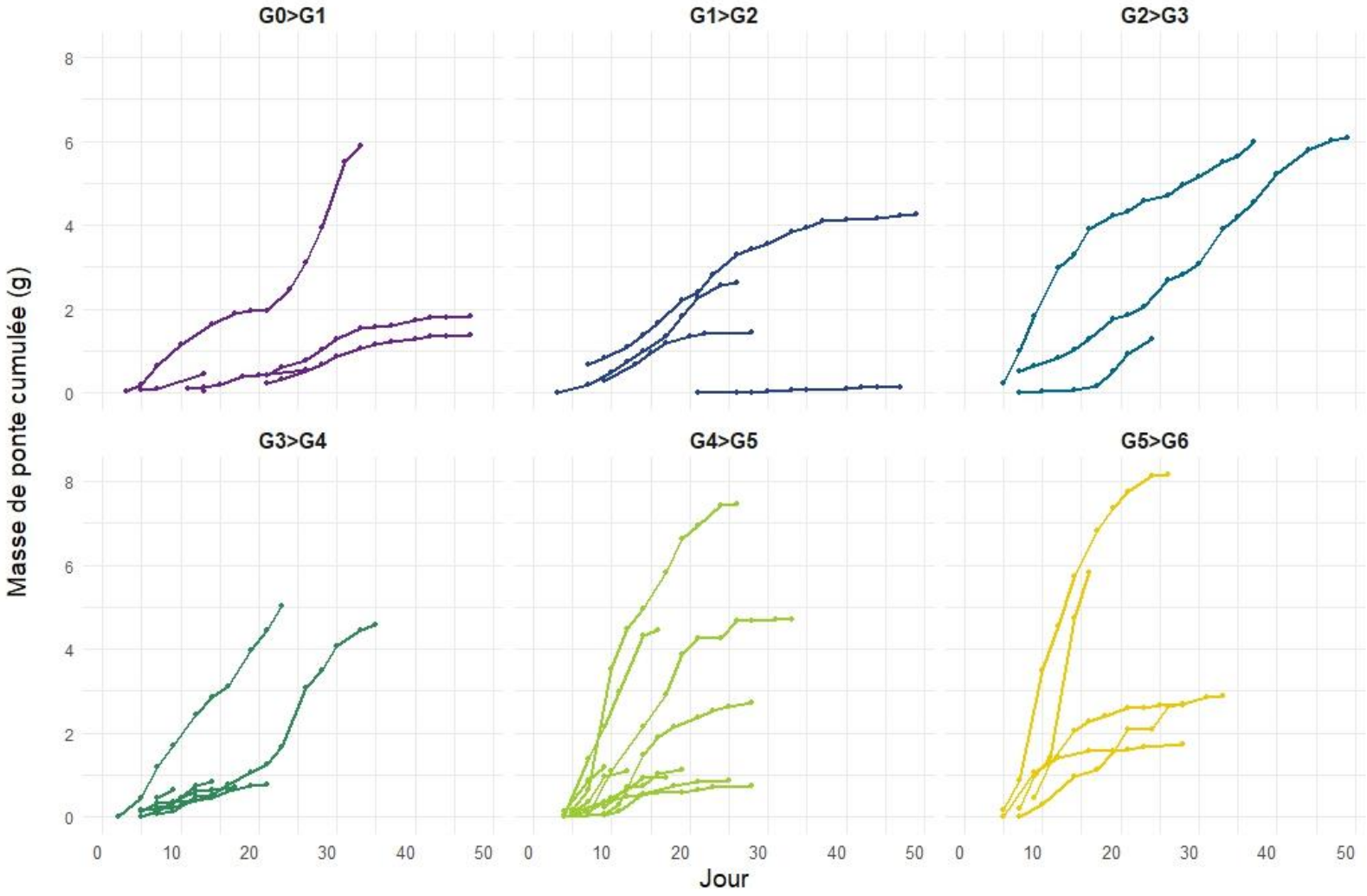


Figure 2.2.7 : Boites à moustache du cumul des pontes par cage (haut) et de la fécondité des femelles (bas) en fonction des générations (deux lettres différentes indiquent une différence significative p<0,05).

Figure 2.2.8 : Cumul des pontes récoltées pour chaque cage, catégorisé par génération. Chaque courbe correspond à une cage. Gn>Gn+1 : Gn correspond à la génération des adultes et Gn+1 à la génération des pontes issues de ces adultes



En plus du taux d'émergence variable, un autre facteur que nous supposons responsable de la forte variabilité des performances de ponte mesurées, est la température. En effet, la zone d'élevage est soumise à de fortes variations de température, liées aux variations extérieures (Tableau 2.2.5) et ces fluctuations impactent la durée de stades de développement des individus (Harnden and Tomberlin, 2016; Wang *et al.*, 2023). Si la croissance larvaire ralentit et que les individus sont passés en émergence de manière prématurée, les individus n'auront pas tous achevé leur développement jusqu'au stade de nymphes. De ce fait, les performances de nymphose, de taux d'émergence et de forme physique des adultes peuvent être impactées (Gobbi, Martínez-Sánchez and Rojo, 2013; Barragan-Fonseca, 2018). D'autre part, la fertilité des mâles peut être dramatiquement altérée au-delà de 35°C (Sales *et al.*, 2018).

Tableau 2.2.5 : Comparaison des températures moyennes, minimales et maximales au cours des six derniers mois. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne mensuelle ± écart-type (N=29 à 31 jours).

	Températures moyennes (°C)		**Températures minimales (°C)**		**Températures maximales (°C)**	
Mois	**Intérieures**	**Extérieures**	**Intérieures**	**Extérieures**	**Intérieures**	**Extérieures**
Février	26,5 ± 3,2	27,8 ± 2,8	22,9 ± 0,9	24,2 ± 0,8	32,4 ± 3,5	32,5 ± 1,6
Mars	25,3 ± 2,0	28,1 ± 3,0	22,3 ± 0,9	24,2 ± 0,8	29,4 ± 1,4	33,1 ± 0,9
Avril	25,1 ± 2,8	27,5 ± 2,8	22,0 ± 1,0	24,0 ± 1,0	29,7 ± 3,2	32,6 ± 1,0
Mai	22,6 ± 1,9	26,2 ± 3,2	20,1 ± 0,4	22,3 ± 1,2	26,9 ± 1,6	31,7 ± 1,0
Juin	23,2 ± 2,0	25,0 ± 3,2	20,9 ± 1,7	21,2 ± 1,2	26,7 ± 1,4	30,4 ± 1,7
Juillet	22,5 ± 2,3	24,6 ± 3,2	19,8 ± 1,7	20,7 ± 1,8	26,4 ± 2,2	29,2 ± 2,3

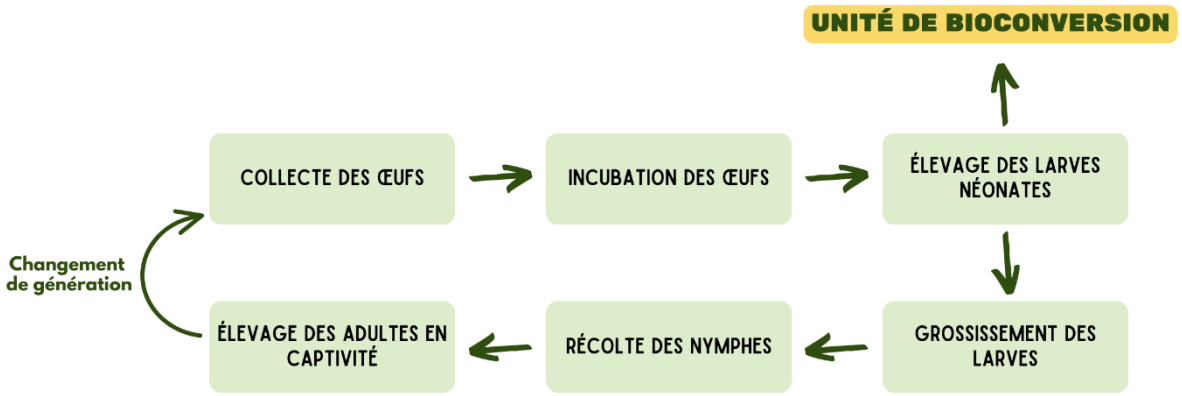


Figure 2.2.9 : Processus de fonctionnement de l'unité d'élevage des BSF

Conclusion partielle

Cette partie était consacrée à la description de la méthodologie appliquée pour l'établissement d'une colonie en captivité à partir de pontes d'une colonie sauvage, ainsi qu'aux mesures des traits de vie en fonction des générations. Pour qu'un organisme soit considéré comme domestiqué, son cycle de vie doit être entièrement bouclé en captivité, indépendamment des sources sauvages (œufs, larves ou mouches adultes). Ceci nécessite de connaitre les besoins nutritionnels spécifiques des stades de développement, de créer des structures d'élevage avec des conditions favorables au bon développement des individus et de contrôler la reproduction des générations successives ainsi que la multiplication des individus maintenus en captivité. Le cycle de vie complet en captivité est désormais maitrisé au sein de notre pilote d'élevage. Les structures d'élevage existantes ont permis d'initier puis de maintenir la colonie domestiquée cependant l'amélioration de ces dernières sera nécessaire pour la stabilisation des conditions d'élevage et l'amélioration des performances de reproduction. En effet, une meilleure synchronisation des cycles couplée à l'augmentation et la stabilisation des taux d'émergence permettront d'ajuster et de standardiser le nombre de mouches par cage, pour homogénéiser et maximiser la production d'œufs.

Ces travaux ont mené à la production et à l'application d'une procédure de gestion de colonie standardisée. Cette procédure est un support important pour le développement progressif de l'unité d'élevage des géniteurs, qui se traduira par une amplification de la taille de la colonie. Les rendements de reproduction des géniteurs sont des données essentielles qui permettent de projeter la taille de la colonie à atteindre en fonction des quantités de matières organiques à traiter avec l'unité de bioconversion. En effet, la colonie domestiquée devra produire suffisamment d'œufs pour approvisionner l'unité de bioconversion, mais aussi pour renouveler le cheptel et produire de nouveaux géniteurs (Figure 2.2.9).

L'ensemble des résultats obtenus dans cette partie démontre l'importance de renforcer la synchronisation des différents stades de vie, et la stabilisation du taux d'émergence des mouches. L'amélioration et la stabilisation des performances sera possible grâce à un meilleur contrôle de la température dans les salles d'élevage. L'amplification de la taille de la colonie domestiquée devra donc se faire dans une infrastructure dont l'isolation thermique est adaptée pour limiter les écarts de température dans la journée ou au cours des saisons. L'utilisation de « dark cages » est également envisagée pour synchroniser les adultes et par conséquent les évènements de reproduction.

Conclusion du chapitre

La première partie de ce chapitre était consacrée à l'étude des performances de ponte des femelles BSF sauvages sur le site d'élevage en relation avec les données climatiques. Ces travaux ont montré que les facteurs environnementaux (température, humidité, pluviométrie, ensoleillement, durée du jour, cycle lunaire) ne suffisent pas à expliquer la dynamique des pontes des femelles sauvages. En effet, le climat polynésien fait état de deux saisons, toutefois les variations des performances de ponte ne sont pas corrélées aux variations saisonnières. Nous suggérons que l'activité anthropique est un facteur non négligeable, qui peut notamment impacter la dynamique spatiale des populations sauvages, qui se concentrent dans les sites les plus attractifs. Cette hypothèse ouvre des perspectives pour de futures études de dynamiques des populations, sur la répartition des populations de BSF sur Tahiti et dans ses îles et éventuellement des mesures de protection de cette ressource. Ces données pourraient s'avérer bénéfiques pour la mise en place d'unités de productions artisanales de larves de BSF à partir de pontes sauvages. Cela pourrait notamment profiter aux petits éleveurs des îles, leur permettant d'utiliser ces larves pour l'alimentation de leurs cheptels et ainsi réduire leur dépendance aux arrivages. Ce sujet sera développé plus en détail dans le chapitre 4.

Face au caractère aléatoire de la dynamique des pontes sauvages sur le site expérimental, le développement d'une unité de production de larves de BSF basée sur la récolte de pontes sauvages n'est pas envisageable. L'établissement d'une colonie domestiquée maintenue en captivité est donc la condition sine qua non pour envisager l'industrialisation du procédé de bioconversion. C'est pourquoi la deuxième section de ce chapitre était dédiée à la description de la méthodologie appliquée pour établir un élevage en captivité, ainsi qu'à la mesure des traits de vie des individus au fil des générations. Pour l'heure, l'objectif de la domestication de la BSF et de la maitrise de la reproduction en captivité est atteint. Cependant, le maintien d'une ou plusieurs colonies en captivité peut entrainer des problèmes génétiques liés à la consanguinité lors du processus de sélection. Afin de pouvoir gérer la diversité génétique au cours de la sélection, il est nécessaire de mener des études de génétique pour disposer de facteurs de type SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms) (Donkpegan *et al.*, 2022).

Les performances de la colonie montrent un potentiel d'améliorations tels que l'isolation thermique des zones d'élevage, et l'optimisation du protocole de gestion de la colonie, qui permet d'ores et déjà un fonctionnement standardisé.

L'industrialisation du procédé de bioconversion de la matière organique par les larves de BSF se traduira nécessairement par l'amplification de la taille de la colonie domestiquée. La colonie de laboratoire actuelle a permis de produire 5 à 20g d'œufs par mois, montrant ainsi des gains de productivité et de régularité des pontes en comparaison aux récoltes mensuelles sauvages comprises entre 0,7 et 8,8 g d'œufs. La taille de la future colonie sera basée sur les objectifs de production de larves de l'unité industrielle et donc des quantités de matières organiques à traiter. Ces informations font l'objet du prochain chapitre qui est consacré à l'étude du traitement par bioconversion des gisements de matière organique mobilisables par les larves de BSF, et aux performances zootechniques des larves sur ces gisements.

CHAPITRE 3 – BIOCONVERSION ET QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES LARVES DE BSF

Introduction du chapitre

La capacité de bioconversion de la matière organique (MO) par les larves de BSF est ce qui en fait un insecte d'intérêt grandissant. La larve de BSF est vorace (Kim *et al.*, 2011), son système digestif robuste lui permet de consommer de grandes quantités de MO (Bondari and Sheppard, 1987), allant de 25 mg à 500 mg de matière consommée par larve et par jour (Makkar *et al.*, 2014). De nombreuses études ont démontré l'efficacité des larves de BSF pour la digestion de matières telles que les fumiers ou lisiers (Zhou *et al.*, 2013; Mazza *et al.*, 2020; Pamintuan, Agustin and Deocareza, 2020) , les tourteaux de palmiste (Caruso *et al.*, 2014) ou les tourteaux de coprah (Mohd-Noor *et al.*, 2017), les co-produits de l'industrie alimentaire (Nguyen, Tomberlin and Vanlaerhoven, 2015; Rahmi, Yamin and Sasaerila, 2020; Saadoun *et al.*, 2020; Karthikeyani *et al.*, 2024), les drèches de distillerie (Meneguz *et al.*, 2018; Saadoun *et al.*, 2020; Arabzadeh *et al.*, 2022) , les boues de station d'épuration (Lalander *et al.*, 2013; Nyakeri *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020) ou encore les déchets d'animaux issus de la pêche (St-Hilaire *et al.*, 2007; Putra *et al.*, 2021) ou de l'abattage (Lalander *et al.*, 2019; Silva, Brown and James, 2020). De ce fait, la larve de BSF, via son élevage à grande échelle, peut être utilisée comme un outil de gestion des MO.

La gestion de ces MO est d'autant plus importante qu'elles sont générées en grandes quantités et sont sources de nuisances si elle ne sont pas traitées correctement. Par ailleurs, la gestion des déchets organiques peut être rendue plus difficile en raison de leurs volumes importants et de leur dégradabilité rapide (Yin *et al.*, 2014). Par exemple, l'Organisation des Nations Unies estime à 1,3 milliards de tonnes la quantité de nourriture gaspillée par an, soit un tiers de la nourriture produite, représentant une perte de près de 750 milliards de dollars par an (FAO, 2011). L'entassement de tonnes de MO dans les décharges contribue à augmenter les émissions de gaz à effet de serre (FAO, 2011; Porter *et al.*, 2016). D'autre part, la décomposition du fumier dans les structures d'élevage, associée à la présence de nuisibles et à l'émission d'odeurs, est un contributeur majeur à l'émissions de substances telles que l'ammoniac, menace potentielle pour la santé humaine (FAO, 2009). Même s'il existe aujourd'hui des pratiques de gestion des

matières organiques (telles que la mise en décharge, l'enfouissement, la méthanisation ou le compostage), ces méthodes s'avèrent couteuses et impactent négativement l'environnement (émissions de gaz à effet de serre, pollution des sols, contamination des eaux de surface et souterraines) (FAO, 2011; Surendra *et al.*, 2016).

La Polynésie française n'échappe pas à ces problématiques liées à la gestion des MO. Son isolement géographique par rapport aux autres pays ainsi que l'éclatement des îles polynésiennes sur une surface grande comme l'Europe renforcent par ailleurs sa vulnérabilité dans ce domaine et témoignent de la nécessité de développer des solutions de traitement sur le territoire.

D'après une étude interne commandée par Technival (Stuber, 2017), plusieurs gisements de MO sont générés et sont potentiellement mobilisables à l'échelle de l'île de Tahiti (Figure 3.1). Les gisements les plus représentés étant les boues de stations d'épuration (STEP) épaissies, les sous-produits du port de pêche, les co-produits de l'industrie alimentaire (déchets des cuisines centrales, restes de repas, invendus alimentaires, etc.) et les fientes de volailles. Les tonnages présentés correspondent aux quantités inventoriées en 2017, et sont susceptibles d'avoir évolué depuis.

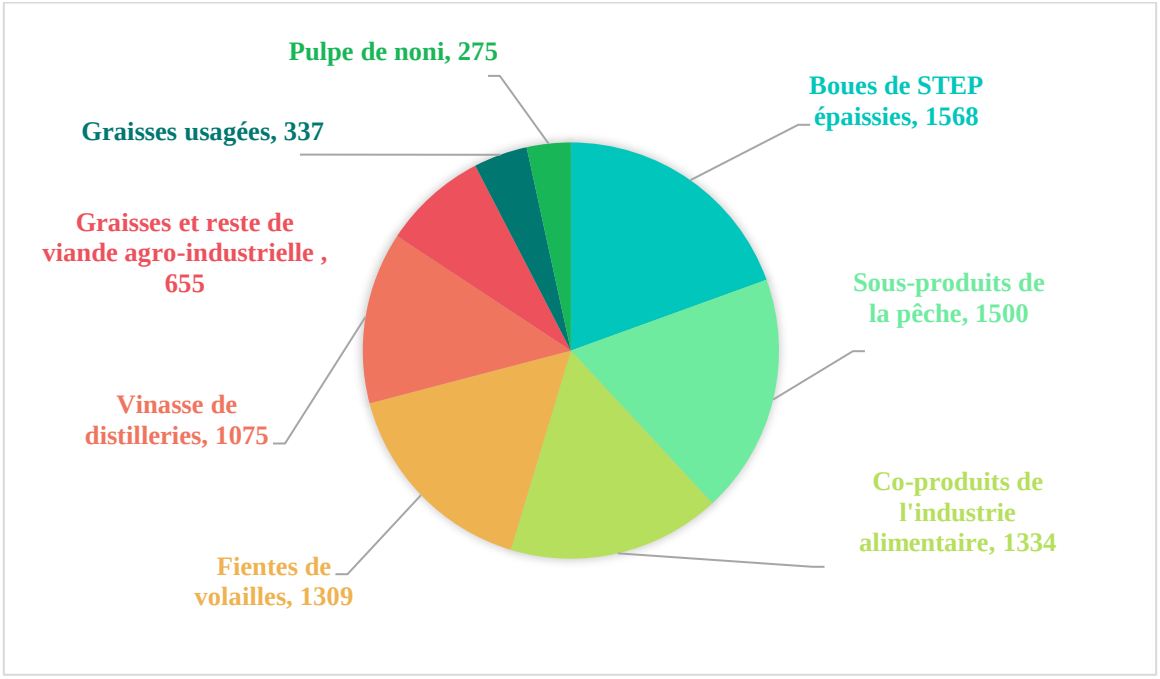


Figure 3.1 : Catégorisation des différents gisements de MO et production annuelle (en tonnes). Inventaire non exhaustif issu de Stuber (2017).

Les boues de STEP épaissies représentent un gisement conséquent d'environ 1500t/an. Ces boues sont majoritairement traitées au sein de la plateforme de compostage de Paihoro (Tahiti). Des initiatives privées sont à l'étude pour valoriser ces boues asséchées et hygiénisées en agriculture. Les sous-produits du port de pêche de Papeete correspondent également à un gisement de taille, d'au moins 1500t/an, qui va continuer d'augmenter avec l'intensification des activités de pêche. En 2023 par exemple, la production de sous-produits a excédé les 2700 tonnes (données non publiées, Société du Port de Pêche). Ces sous-produits de pêche sont essentiellement composés de la tête, de l'arête centrale de la peau et des nageoires des poissons, une fois les filets découpés pour être mis sur le marché. Aujourd'hui, malgré des initiatives pour transformer ces sous-produits en engrais, la majorité de ces biodéchets est rejetée en mer au large de Papeete, alors qu'ils ont un fort potentiel de valorisation, aussi bien en agriculture qu'en alimentation animale. Bien que cette pratique ait été tolérée jusqu'à présent, il devient urgent de mettre en place une solution de traitement pour ce gisement, plus durable et plus respectueuse de l'environnement. Près de 1300t de co-produits de l'industrie alimentaire sont produits par ailleurs chaque année et finissent enfouis au centre d'enfouissement technique (CET) de Paihoro, alors qu'ils ont également un fort potentiel de valorisation en agriculture et en alimentation animale. L'accumulation de fumier dans les élevages intensifs d'animaux (ex. porcheries, élevages de poules pondeuses) représente 1300t de déchets par an. Ce gisement est difficilement mobilisable à ce jour car les éleveurs le valorisent économiquement en approvisionnant des maraîchers et des agriculteurs.

Tous les gisements de MO cités précédemment peuvent intégrer l'alimentation de la larve de BSF et être traités par bioconversion, néanmoins, une attention particulière est portée aux co-produits de l'industrie alimentaire ainsi qu'aux sous-produits du port de pêche. En effet, il s'agit des deux gisements dont le traitement sur le territoire nécessite d'être amélioré. Compte-tenu de leurs valeurs nutritives intéressantes, ces deux gisements de MO ont un fort potentiel de valorisation (alimentation animale ou engrais) et sont deux candidats de choix pour être valorisés par bioconversion par les larves de BSF. En effet, plusieurs études ont montré de bonnes performances de croissance et de bioconversion des larves de BSF nourries avec des restes alimentaires (Lalander *et al.*, 2019; Ezlin *et al.*, 2022; Isibika *et al.*, 2023; Mannucci *et al.*, 2024). Les sous-produits de la pêche sont naturellement riches en acides gras polyinsaturés (AGPI) oméga 3 tels que l'EPA (acide eicosapentaénoïque, 20 :5n- 3) et le DHA (acide docosahexaénoïque, 22 :6n-3). Ces AGPI n'étant pas (ou peu) synthétisés par les poissons et les crevettes, il est nécessaire de les apporter via l'alimentation, pour garantir des performances

de croissance et de reproduction optimales (Tocher, 2015). Les acides gras présents dans la biomasse larvaire des BSF sont majoritairement des acide gras saturés (AGS) (Liu *et al.*, 2017). Néanmoins, de précédentes études ont montré que le profil d'acides gras des substrats de croissance larvaire impactent significativement le profil d'acides gras des larves (Hoc *et al.*, 2020; El-Dakar, Ramzy and Ji, 2021; Siddiqui *et al.*, 2022). Cette particularité permet de moduler le profil nutritionnel des larves de BSF via l'alimentation larvaire afin de mieux répondre aux exigences des différentes filières de l'alimentation animale. La richesse en AGPI essentiels des sous-produits de la pêche en fait un substrat d'intérêt pour l'enrichissement de la biomasse larvaire de BSF en oméga 3 (St-Hilaire *et al.*, 2007; Liland *et al.*, 2017), rendant ainsi la larve de BSF plus attractive pour être utilisée comme ingrédient dans la filière aquacole. A ces gisements d'intérêt se rajoutent les tourteaux de coprah, dont la production abondante dépassait les besoins locaux, nécessitant ainsi l'exportation d'une partie de cette production (830 tonnes exportées en 2015, 515 tonnes exportées en 2019 selon les données de l'ISPF). Avec une production de 4000 tonnes en 2018, les quantités de tourteaux de coprah produites par l'Huilerie de Tahiti diminuent progressivement et se stabilisent aux alentours de 3000 tonnes en 2022 (IEOM, 2022). Bien que la totalité de la production de tourteaux de coprah soit actuellement absorbée par le marché local de l'alimentation animale, ce gisement a été conservé dans le cadre de cette étude en raison de sa forte concentration en AGS, en opposition aux sous-produits de la pêche riches en AGPI.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le potentiel de valorisation de différents gisements de biodéchets agro-industriels de Tahiti via le processus de bioconversion des larves de BSF. Pour ce faire, nous avons mesuré les performances de croissance et de bioconversion des larves de BSF nourries sur les différents gisements de biodéchets. Dans un second temps, la qualité nutritionnelle des larves obtenues a été déterminée à partir d'une série d'analyses biochimiques (matière sèche, protéines, lipides, glucides, fibres, cendres, énergie, acides gras et acides aminés). La qualité nutritionnelle des gisements utilisés comme substrats de croissance larvaire a également été évaluée pour être mise en lien avec les performances zootechniques et la qualité des larves. Ces travaux permettront de proposer un assemblage de biodéchets adapté à la production industrielle de larves de BSF sur Tahiti, garantissant à la fois de bonnes performances de bioconversion et des profils nutritionnels de la biomasse larvaire en adéquation avec les besoins des filières animales.

Ces travaux ont fait l'objet de la rédaction d'un article scientifique soumis à la revue Animal, dont le contenu est présenté ci-après.

Bioconversion performances and composition of Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on industrial by-products

Tetohu Jade[1,6*], Danner Lou[2], Soudant Philippe[3], Le Grand Fabienne[3], Ho Raimana[1], Bossin Hervé[1,4], Le Moullac Gilles[5]

[1] UPF, IFREMER, ILM, IRD, UMR 241 SECOPOL, BP 6570, 98702 Faaa, Tahiti, French Polynesia

[2] ENSAIA, Université de Lorraine, Nancy, France

[3] Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin, UMR 6539 UBO-CNRS-IFREMER-IRD, 29280 Plouzané, France

[4] Medical Entomology Laboratory , UMR 241 SECOPOL, Institut Louis Malardé, BP 30, 98713 Papeete, Tahiti, French Polynesia

[5] Marine Aquaculture Assistance, BP 71087, 98719 Taravao, Tahiti, French Polynesia

[6] Technival, BP 4644, 98713 Papeete, Tahiti, French Polynesia

*** Correspondence:**

Tetohu Jade

jade.tetohu@doctorant.upf.pf

Keywords: Waste management, *Hermetia illucens*, bioconversion, aquaculture, bioeconomy, nutrients production

Abstract

Waste management and supply of raw materials and goods constitute a challenge in Island Countries and Territories. Larvae of Black Soldier Fly (BSF) may be used as a green technology for the reduction and the treatment of organic wastes, and the production of larval biomass, rich in proteins and lipids of high value for animal feed. In this study we used industrial by-products such as copra cake, food scraps and fish offal to formulate different substrates to feed BSF larvae. Bioconversion performances were measured to identify the potential of these deposits for the high-scale rearing of black soldier fly larvae. Our results showed that the mixture of food scraps and fish offal achieved the highest specific growth rate (33.6%) of BSF larvae, whereas copra cake maximized the food conversion rate (6.09) and the overall degradation (43.9%). Biochemical composition analysis revealed that regardless of the larval diets, all essential amino acids were found in BSF larvae. Our results also showed that fatty acids profile of BSF larvae is mainly composed of saturated fatty acids (55.2-80.5%), with increasing levels

of specific polyunsaturated fatty acids such as eicosapentaenoic acid (4.7%) and docosahexaenoic acid (3.8%) when fed with polyunsaturated fatty acids-rich substrates , such as fish offal. Overall, BSF larvae are able to convert large amounts of organic wastes into high quality nutrients, suitable for the partial replacement of fishmeal or soybean meal in aquaculture and other animal feed. The industrialization of the process of biotransformation in French Polynesia can contribute to the production of alternate resources under a circular economy framework.

1. Introduction

According to the United Nations, the world's population is expected to exceed 9 billion people by 2050 (U.N., 2017). Consequently, global food production will need to increase significantly to meet growing food needs. Nevertheless, access to resources is already limited these days and many ingredients are used to feed the human population but also livestock, resulting in an increase in raw materials prices (Schönfeldt and Hall, 2012; FAO, 2016) and exacerbating competition between human food and animal feed (Tveterås and Tveterås, 2010; Van Huis, 2013).

Aquaculture industries have an unsustainable dependency on fish meal (FM), fish oil (FO), but also soybean meal (SBM) and cereals, all sources of essential proteins and lipids (Tocher, 2015; Bruni *et al.*, 2021). Incorporation of these ingredients into feed formulas reach 50% of the global composition (Emerenciano *et al.*, 2022). There has been growing interest in the expansion of aquaculture, especially as the sector now supplies more fish and shellfish than traditional fisheries. This global importance is partly facilitated by the availability and distribution of feed for aquaculture farms in major producing countries. Aquaculture production systems rely on intensive feeding, with demanding needs in terms of protein and lipid quality, necessary for optimal growth and health of marine species. Indeed, more than 70% of global aquaculture production depends on the supply of food inputs from external sources (Tacon and Metian, 2015). However, overexploitation of marine resources threatens the abundance of pelagic forage fish from which FM and FO are derived (Tacon & Metian, 2008). Moreover, climate change impacts industrial fishing and consequently the availability of FM has stagnated since the 80s (Poulet and Lazard, 2022). Although many studies have presented soy as a partial substitute for FM in aquaculture feed (Arriaga-Hernández *et al.*, 2021; T. Liu *et al.*, 2021), soybean cultivation remains one of the activities mainly responsible for deforestation, especially in the Amazon (Masuda and Goldsmith, 2009; Gollnow *et al.*, 2018; da Silva *et al.*, 2023). Hence, it becomes essential to find alternative and sustainable resources containing high

amounts of proteins and essential amino acids (EAAs), fatty acids (FAs) and micronutrients, while reducing environmental impact of nutrients production.

One way for achieving this is to use insects as feed. Insects breeding has the advantage of having a low environmental impact considering greenhouse gases emission, water consumption and landfill use (Van Huis and Tomberlin, 2017). As protein source, insects, depending on the species, have an adequate profile of amino acids (AAs) matching the nutritional requirements of many aquatic species (Makkar *et al.*, 2014). However, in insects the lipid content and the quality of FAs is dependent on the material used to feed these insects (Barroso *et al.*, 2017). Black soldier fly (BSF, *Hermetia illucens*) larvae are known to feed on a wide range of organic matter. Indeed, the BSF larva is characterized by its robust digestive system and its ability to transform large quantities of organic waste into larval biomass, with an interesting nutritional composition (Diener, Zurbrügg and Tockner, 2009; Nyakeri *et al.*, 2019). Due to its bioconversion capacity, the BSF larva attracts growing interest as a green technology for the management and transformation of a variety of organic wastes into high quality nutrients. With its high protein (37-63% dry matter; DM) and fat content (7-39% DM) (Barragan-Fonseca, Dicke and van Loon, 2017), BSF larva is considered as an insect of high economic interest (Jones et al., 2019; Li et al., 2016).

Large-scale production of this insect can contribute to the development of new waste treatment sectors and the production of alternative resources. This circular bio-economy model is particularly well suited for Island Countries and Territories. Pacific Island Countries and Territories (PICTs), such as French Polynesia, are highly dependent on external inputs due to their geographical isolation. The covid crisis has revealed the vulnerability of these territories to fluctuant international trade, on which the supply of feed for farm animals is based. There is therefore an important challenge in French Polynesia to promote the production of local resources for the primary sector. More specifically, the island environment of this territory offers significant reef-lagoon marine domains, favorable to aquaculture development. The main species currently reared by French Polynesian's aquaculture are blue shrimp (*Litopenaeus stylirostris*), elongated giant clam (*Tridacna maxima*), orbicular batfish (*Platax orbicularis, Paraha Peue*), silver rabbitfish (*Siganus argenteus, Marava*) and tilapia (*Oreochromis spp*.) in aquaponics. It is therefore crucial to secure its aquaculture production, by locally sourcing its own animal feed. This would reduce imports of feed, thus promoting short supply chain and contribute to the development of a local and circular bioeconomy.

Local studies have inventoried and quantified mobilizable biowaste deposits generated across the island of Tahiti (French Polynesia). Among these deposits, those generated in quantities greater than 1,000t per year are, among others, sludge from sewage treatment plants, co-products of laying hen farming (chicken carcasses) and fish by-products, food waste, poultry manure and distillery stillage (Stuber, 2017). While such deposits are already used directly in agriculture (poultry manure, distillery stillage), others are composted (sludge), incinerated (chicken carcasses), buried (food waste) or do not have a suitable treatment method (fish co-products). Although all these deposits can be treated by bioconversion of BSF larvae, food scraps and fishing by-products are of particular interest. In fact, these are two deposits which treatment on the island of Tahiti could be improved, especially since they represent a source of nutrients with high valorization potential by BSF larvae.

Depending on the quality of the larval growth substrate, the composition of the larvae as well as its growth performance will vary (Liland *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2019; Pamintuan, Agustin and Deocareza, 2020). In particular, the FA profile of the larvae is largely affected by the FA profile of the rearing substrates (Spranghers *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2022). This particularity opens up possibilities for modulating the nutritional profile of BSF larvae to best meet the needs of the targeted animal feed sectors. For example, omega-3 FAs, in particular eicosapentaenoic acid (EPA, 20:5n-3) and docosahexaenoic acid (DHA, 22:6n-3) are essential for optimal growth and reproduction in fish and shrimps (Tocher, 2015). As these polyunsaturated fatty acids (PUFAs) are little to not synthesized by these animals, it is necessary to provide them through their diet. Although the fat of BSF larvae is mainly in the form of saturated fatty acids (SFAs) (Liu *et al.*, 2017), previous studies showed the successful incorporation of significant amounts of EPA and DHA in BSF larvae when fed diets containing n-3 PUFA such as fish offal, algae or squid liver oil (St-Hilaire *et al.*, 2007; Liland *et al.*, 2017; Tirtawijaya and Choi, 2022).

The main objective of the present study was to assess the effects of agro-industrial by-products sourced in French Polynesia as BSF rearing substrates on larval growth and bioconversion performances. This study also investigated the nutritional composition of the produced larvae focusing on the AAs and FAs compositions. Such information could shed light on the biowaste assemblage most suitable for rearing BSF larvae for industrial purposes.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Study area and insects rearing

BSF larvae were reared at Institute Louis Malardé's medical entomology laboratory in Paea, Tahiti, French Polynesia. Neonate larvae were fed with the Gainesville diet considered as a control diet, consisting of a hand mixture of wheat bran (50%), alfalfa (30%) and corn meal (20%) (Hogsette, 1992) mixed with tap water (1:2, w:w). Gainesville diet was purchased from the supplier Bertrand Export (Sydney, Australia) and presents the following proximal composition: 17.8% crude protein, 11.5% crude ash, 4.7% fiber, 1.2% crude fat. To ensure optimal larval development, the control diet was provided *ad libitum* to the neonates until the start of the experimental trials.

2.1.2. Collection and preparation of larval diets

Four substrates (Gainesville diet, copra cake, fish offal and food scraps) were used to create five diets, differing in nutrient composition (Table 1): Gainesville diet (GD), used as control diet; copra cake (CC), supplied by Huilerie de Tahiti (Papeete, Tahiti, French Polynesia), mixed with water (1:2, w:w) and stored at room temperature for 4 weeks; fish offal (FO) obtained from the Société du Port de Pêche de Papeete (S3P, Papeete, Tahiti, French Polynesia) and crushed at the Centre pour Jeunes Adolescents (CJA, Tahiti, French Polynesia) before being stored at -20°C; food scraps (FS) from the campus restaurant of the University of French Polynesia (Punaauia, French Polynesia), ground, mixed manually until a homogeneous mixture is obtained and stored at -20°C; and finally a mix (1:1, w:w) of food scraps and fish offal (FO-FS) obtained from a homogenous mixture of substrates FO and FS.

Table 1 : Nutrient composition of the experimental diets

Nutrient composition	**Experimental diets**				
	GD	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
Crude protein (%)	21.2 ± 0.7	26.8 ± 0.8	58.2 ± 1.5	36.6 ± 1	43 ± 1.2
Crude lipid (%)	1.4 ± 0.6	8.9 ± 0.8	14.1 ± 0.9	12 ± 0.8	14.7 ± 1
Crude fiber (%)	5.6 ± 1.0	17.2 ± 1.5	<0.4	1 ± 0.7	1.7 ± 0.8
Crude ash (%)	13.7 ± 0.5	6.0 ± 0.3	23.2 ± 0.5	4.4 ± 0.3	16.9 ± 0.5
Carbohydrates (%)	63.6	58.3	4.5	47.1	25.4
Gross energy (KJ/kg)	14,950	17,760	15,880	18,650	17,080

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values are expressed as percentages of dry matter. Data shown are mean ± analytical uncertainty

2.2. Experimental design

Newly hatched larvae were raised on GD for 5 to 8 days prior to being introduced to the diets. Each feeding trial was carried out into a plastic box (16.5×16.5×16.5cm) with a perforated lid to allow air to circulate. A mosquito net was stretched between the box and the perforated lid to avoid other insect contamination. Each box was put into a plastic transfer tray containing wood chips to collect the larvae in case they escaped from their feeding substrate. Feeding trials were replicated six times, with each box containing 500 larvae. During the experiment (between 10 and 18 days of rearing according to substrates), larvae were fed daily with their respective diets. Larval growth was monitored three times per week. 30 larvae per replicate were randomly sampled from the box, rinsed with tap water to remove any diet residues, briefly dried onto absorbent paper (Saadoun *et al.*, 2020) and weighed (RADWAG analytical balance AS110.R2). The larvae cohorts were then returned to their respective feeding substrates. At the end of the feeding trials, when the mean larval weight reached 150 mg, larvae were separated from their diet by sieving, rinsed with tap water and dried with absorbent paper. All surviving larvae were counted, and total weight was recorded, as well as the total weight of substrates residues. Finally, larvae were killed by freezing in liquid nitrogen, later freeze-dried for 72h.

For each feeding trial, 4 samples of 20 larvae, as well as samples of 10 g of diets and residues were taken for FAs composition analysis. These samples were stored at -80°C until analysis.

As a minimum quantity of 100 g of sample was required for proximal nutrients analysis and AAs analysis, the remaining individuals were collected equally in the 6 replicates of each condition and then pooled. For each condition, a batch of 100 g of each diet previously prepared for the duration of the experiment was sampled, as well as a batch of 100 g of substrates residues. These samples were stored at -20°C until analysis could be carried out.

2.3. Larval performances

Growth and bioconversion performances of larvae were evaluated at the end of the feeding trial with the following parameters as described in Pamintuan et al., (2020) and in Caruso et al., (2014).

The specific growth rate (SGR) was calculated using the following formula, $W_{initial}$ and W_{end} corresponding respectively to the initial and final larval weight in grams, and d to the number of rearing days.

$$Specific\ growth\ rate\ (SGR) = \frac{\ln(W_{end}) - \ln(W_{initial})}{d} \times 100 \quad (1)$$

The survival rate corresponded to the ratio between the initial number of larvae (L_{in}) and the final number of larvae (L_{out}).

$$\%\ Survival\ = \frac{L_{out}}{L_{in}} \times 100 \quad (2)$$

The feed conversion rate (FCR) was determined by dividing the amount of feed consumed by the larval weight gain. Feed consumed corresponded to the difference between the amount of feed added and the amount of residue. Low FCR values indicate high food conversion efficiency.

$$Feed\ conversion\ rate\ (FCR) = \frac{Amount\ of\ feed\ added\ (g) - Amount\ of\ residue\ (g)}{W_{end} - W_{initial}\ (g)} \quad (3)$$

The overall degradation (OD) was calculated by dividing the amount of feed consumed by the amount of feed added. High OD values indicate good degradation efficiency.

$$Overall\ degradation\ (OD) = \frac{Amount\ of\ feed\ consumed\ (g)}{Amount\ of\ feed\ added\ (g)} \times 100 \quad (4)$$

2.4.Biochemical analysis

2.4.1. Proximal composition and amino acids

Proximal composition and AAs analyses were carried out at Eurofins Analytics France (Nantes, France). Samples were dried at 103°C to determine dry matter content followed by incineration at 550°C until constant weight to determine the ash content. Total nitrogen was measured using Kjeldahl procedure. A conversion factor of 4.76 was applied to the measured nitrogen content in order to calculate the protein content of the larvae samples (Janssen *et al.*, 2017). Protein content of diets and residues was calculated using a conversion factor of 6.25 used for nutrition labeling. Crude fat content was gravimetrically determined by hydrolysis in hydrochloric acid followed by extraction in petroleum ether. Crude fiber content was gravimetrically obtained after heating with alternating acid and base washing. Amino acid analysis (except tryptophan) was carried out using ionic chromatography with UV detection. Tryptophan content was determined using high performance liquid chromatograph equipped with fluorescence detector.

2.4.2. Lipid extraction and analysis of fatty acid methyl esters

Analysis of the lipid profile was carried out within the LIPIDOCEAN core facility of the LEMAR laboratory (Brest, France). Lipid extraction was performed using a modified version of the method described by Folch et al. (1957). Briefly, freeze-dried larvae were crushed using a plastic rod. Total lipids were extracted from black soldier fly larvae tissues with chloroform:methanol (2:1,v:v), sonicated, placed on a stir plate and stored overnight at - 20°C. Fatty acid methyl esters (FAMEs) were obtained after saponification and acid transmethylation. FAMEs were subsequently analyzed on a gas chromatograph (Varian CP-3800) equipped with splitless injectors and a flame-ionization detector (T_{inj}=250°C, T_{det}=280°C). Carrier gas was hydrogen (f_H= 2ml.min^{-1}). FAMEs were separated by polar ZBWAX column (30m×0.25mm×0.2µm) and identified by comparison of their retention time with standards (Supelco FAME Mix standard). The weight of each FAME was estimated using the internal standard, and the FAME composition was expressed as µg FAME mg^{-1} dry weight and/or mass percentage of total reported fatty acid. The percentage of SFAs, monounsaturated fatty acids (MUFAs) and PUFAs in larvae were calculated by adding the total percentage of the identified saturated fatty acids, mono-unsaturated fatty acids, or poly-unsaturated fatty acids.

2.5. Statistical analysis

All statistical analyses and graphical illustrations were carried out using RStudio (version 4.2.0). The normality of distribution and the homogeneity of variance of the variables were tested with Shapiro-Wik's and Levene's test, respectively. When both conditions were satisfied, analysis of variance (ANOVA) with 95% confidence interval was performed to identify statistically significant differences between samples. Percentage data were arcsine-square-root-transformed for normal distribution approximation and to achieve equal variance. When a significant difference was found, Tukey post-hoc test with 95% confidence interval was performed. Due to limited sample amount, data for proximal analysis and amino acids were based on single analysis, thus no statistical analysis was performed

3. Results

3.1. Biochemical composition of diets

3.1.1. Proximal composition

Nutrient composition varied between the substrates (Table 1). Protein and lipid levels were highest in substrates containing food scraps and fish co-products (FO, FO-FS, FS), and lowest in plant-based substrates GD and CC. Substrates also showed difference with respect to

carbohydrate and fiber contents, which were highest in GD and CC, and lowest in FO. Gross energy was highest in FS, and lowest in GD.

3.1.2. Amino acid composition

Amino acid composition

The most abundant AAs found in the substrates were glutamic acid (3.4-6.4 g/100g), aspartic acid (1.7-4.2 g/100g) and glycine (1.0-6.2 g/100g). The FO substrate showed the highest concentrations in all AAs in comparison with the other experimental diets (Table S1).

3.1.3. Fatty acid composition

FA composition, given as a percentage of total fatty acids (TFA) in Table S2, differed according to the diet. CC was the richest substrate in SFA (88.4% of TFA) while the concentrations of SFA in other substrates do not exceed 45.1% of TFA. SFA in CC were essentially 12:0 (lauric acid; 52.6% of TFA), 14:0 (myristic acid; 20.4% of TFA) and 16:0 (palmitic acid; 11.1% of TFA) whereas 16:0 (palmitic acid) and 18:0 (stearic acid) were the most abundant SFAs in other diets. Consequently, low levels of MUFAs (8.1% of TFA) and PUFAs (3.5% of TFA) were measured in CC. The main MUFA in all diets was 18:1(n-9) (oleic acid), the highest concentrations being achieved by FS (28.6% of TFA) and FO-FS (22.8% of TFA). Finally, GD and FO were the richest substrates in PUFAs, with 39.7% and 39.6% of TFA respectively. For GD, the majority of PUFAs are omega-6 PUFAs (33.4% of TFA), essentially 12:2n-6 (linolenic acid; 32.4% of TFA) while FO was particularly rich in omega-3 PUFAs (31.7% of TFA), with 22:6n-3 (DHA; 23.8% of TFA) and 20:5n-3 (EPA; 5.1% of TFA).

3.2. Effect of feeding regime on growth, bioconversion performance and survival rate

In this study, feeding regime had a significant effect on growth and bioconversion performance of BSF larvae (Table 2). The larvae that were grown using fish offal in the feeding media (experimental diets FO and FO-FS) obtained the lowest survival rates (58.4% and 51.6% respectively) which is significantly lower ($p<0.0001$) compared to the other substrates. The highest specific growth rate (SGR) was observed for the larvae fed with the mix of food scraps and fish offal (34%). Moreover, larvae fed with CC and FS also showed a SGR significantly higher ($p<0.0001$) than the ones fed with the two remaining substrates (GD and FO). Furthermore, individuals raised on GD and FO, with the lowest SGR, needed an additional 6-8 days to reach an average larval weight of 150 mg compared to larvae reared on diets CC, FS and FO-FS (Figure 1). The highest FCR was observed for the larvae fed with CC (6.1) whereas

the lowest FCR was by the larvae reared on FS and the mix of FO-FS (2.0 and 2.4 respectively). Statistical analysis reveals 3 significantly different groups for OD. The significantly highest score was obtained with larvae fed with CC (44%). Moreover, the larvae fed with the experimental diets FO, FS and FO- FS showed similar OD performances (between 25 and 30%), which was significantly higher ($p<0.0001$) than the OD for the larvae fed with GD (14%).

Table 2: Bioconversion parameters of black soldier fly larvae reared on the experimental diets

Bioconversion parameters	**Experimental diets**				
	GD	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
Survival (%)	85.6 ± 8.37^{b}	95.1 ± 3.86^{b}	58.4 ± 14.90^{a}	82.4 ± 4.76^{b}	51.6 ± 6.36^{a}
SGR (% per day)	14.4 ± 2.47^{a}	20.8 ± 1.72^{b}	16.2 ± 2.31^{a}	22.1 ± 0.91^{b}	33.6 ± 3.46^{c}
FCR	3.84 ± 0.46^{c}	6.09 ± 1.02^{d}	3.34 ± 0.82^{bc}	2.04 ± 0.22^{a}	2.38 ± 0.47^{ab}
OD (%)	13.8 ± 1.3^{a}	43.9 ± 4.9^{c}	25.2 ± 5.7^{b}	30.0 ± 2.7^{b}	29.7 ± 3.4^{b}

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps ,SGR: Specific growth rate, FCR : Food conversion ratio, OD : Overall degradation).
Values shown are mean ± standard deviation (SD; n=6). Values with different superscript letters within a line are significantly different ($p<0.05$)

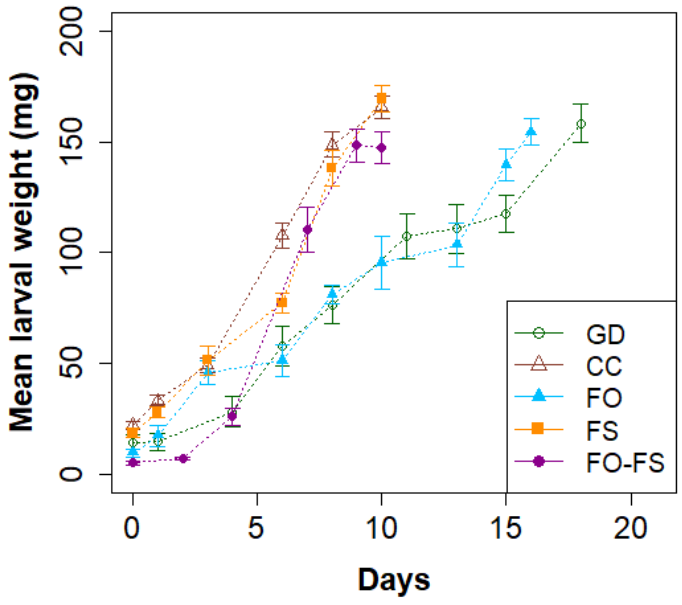


Figure 1: Black soldier fly larvae wet weight in mg (mean ± standard deviation, n=6) as affected by experimental diets. Growth was monitored until mean larval weight reached 150mg.

3.3.Biochemical composition of larvae

3.3.1. Proximal composition

Crude nutrient contents of the larvae reared on the different experiment diets are presented in Table 3. The crude protein content of the larvae fed with the control diet (GD) was the lowest (35.5%), while it was the highest for the larvae reared on FO (42.5%). Larvae reared on experimental diets containing food scraps (FS and FS-FO) exhibited high levels of lipids (42.9% and 38.9% respectively). Compared to these groups, lipid content of the larvae fed with GD was low (25.1%). Crude fiber levels were higher in the larvae when the substrate contained fish offal (FO and FS-FO, 9.6% and 8.6% respectively), in contrast to larvae reared on CC showing lower value (5.2%). Carbohydrate levels in larvae were highest when fed with GD (15.5%) and CC (13.7%), and lowest when fed with FS (1.7%). Finally, it is notable that the larvae fed with the GD contained the highest crude ash content (12.9%) and the lowest energetic value (19,8 KJ/kg).

Table 3 : Nutrient composition of larvae reared on the experimental diets

Nutrient composition (%)	**Experimental diets**				
	GD	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
Crude protein (%)	35.5 ± 1.0	39.3 ± 1.1	42.5 ± 1.2	39.0 ± 1.1	39.1 ± 1.1
Crude lipid (%)	25.1 ± 1.2	29.4 ± 1.2	31 ± 1.9	42.9 ± 1.7	38.9 ± 1.6
Crude fiber (%)	7.7 ± 1.2	5.2 ± 1	9.6 ± 1.7	8.6 ± 1.4	9.5 ± 1.5
Crude ash (%)	12.9 ± 0.4	5.3 ± 0.4	5.6 ± 0.6	4.2 ± 0.5	6.1 ± 0.5
Carbohydrates (%)	15.5	13.7	7.5	1.7	3.6
Gross energy (KJ/kg)	19,830	21,980	22,250	24,870	23,750

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values are expressed as percentages of dry matter. Data shown are the value for one sample of 100 g larvae. Data shown are mean ± analytical uncertainty.

3.3.2. Amino acid composition

The nutritional profile of BSF larvae protein was evaluated by examining the AA composition of the larvae depending on the experimental diet. Results were presented in Table 4. The most abundant AAs found in larvae were glutamic acid (4.9-6.1 g/100g), aspartic acid (4.1-5.1 g/100g), and alanine (3.4-5.0 g/100g), followed by leucine (3.3-4.2 g/100g), lysine (3.0-3.7 g/100g), proline (2.9-4.0 g/100g) and tyrosine (2.7-3.5 g/100g), while the less abundant were ornithine (<0.3 g/100g) and hydroxyproline (<0.2 g/100g). Although the concentrations are close between the experimental groups, the larvae which showed the highest concentrations in AAs are those having grown on FO and FS.

Table 4 : Amino acids composition of larvae reared on experimental diets

	Experimental diets				
Amino acids (g/100)	**GD**	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
Total tryptophan	0,799 ± 0,08	0,793 ± 0,079	0,955 ± 0,096	0,96 ± 0,096	0,784 ± 0,079
Total alanine	3,686 ± 0,515	3,461 ± 0,484	4,485 ± 0,628	5 ± 0,7	4,378 ± 0,612
Arginine	2,255 ± 0,316	2,254 ± 0,315	3,054 ± 0,428	2,5 ± 0,35	2,229 ± 0,312
Aspartic acid	4,369 ± 0,612	4,754 ± 0,665	5,183 ± 0,726	4,938 ± 0,692	4,136 ± 0,578
Glutamic acid	4,974 ± 0,696	5,185 ± 0,725	6,126 ± 0,857	5,542 ± 0,775	4,895 ± 0,685
Total glycine	2,655 ± 0,371	2,488 ± 0,349	3,124 ± 0,438	3,354 ± 0,469	2,989 ± 0,418
Histidine	1,405 ± 0,197	1,552 ± 0,217	2,007 ± 0,281	1,856 ± 0,26	1,632 ± 0,228
Hydroxyproline	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Isoleucine	2,036 ± 0,285	2,069 ± 0,289	2,531 ± 0,354	2,438 ± 0,342	2,1 ± 0,294
Total leucine	3,325 ± 0,465	3,461 ± 0,484	4,206 ± 0,588	3,938 ± 0,552	3,425 ± 0,48
Lysine	3,08 ± 0,432	3,288 ± 0,461	3,7 ± 0,518	3,792 ± 0,531	3,247 ± 0,454
Total phenylalanine	2,01 ± 0,281	2,143 ± 0,3	2,461 ± 0,344	2,521 ± 0,352	2,019 ± 0,283
Total proline	3,131 ± 0,438	2,943 ± 0,413	3,892 ± 0,545	4,042 ± 0,567	3,263 ± 0,457
Total serine	2,101 ± 0,294	2,057 ± 0,288	2,478 ± 0,347	2,333 ± 0,327	2,052 ± 0,288
Threonine	2,049 ± 0,287	1,983 ± 0,277	2,548 ± 0,356	2,438 ± 0,342	1,955 ± 0,273
Total tyrosine	3,26 ± 0,456	3,177 ± 0,445	3,56 ± 0,499	3,5 ± 0,49	2,698 ± 0,378
Total valine	2,938 ± 0,411	3,03 ± 0,424	3,56 ± 0,499	3,521 ± 0,494	3,086 ± 0,431
Cysteine + Cystine	0,345 ± 0,049	0,333 ± 0,047	0,368 ± 0,052	0,344 ± 0,048	0,36 ± 0,05
Methionine	0,849 ± 0,119	0,829 ± 0,116	0,928 ± 0,129	0,923 ± 0,129	0,893 ± 0,124

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values are expressed as percentages of dry matter. Data shown are the value for one sample of 100 g larvae. Data shown are mean ± analytical uncertainty.

3.3.3. Fatty acid composition

The lipid profile of BSF larvae was evaluated by examining FA composition of the larvae reared on the different experimental diets. Results are shown in Table 5. Regardless of the larval growth substrate, the main FA in the larval biomass is 12:0 (lauric acid; from 26.6 to 59.3 % of TFA), followed by 14:0 and 16:0 (myristic acid; from 5.9 to 15.5 % of TFA and palmitic acid; from 9.5 to 17.4% of TFA respectively). BSF larvae fed with fish offal and/or food scraps (FO, FS and FO-FS) contained significantly higher levels of oleic acid 18:1(n-9) (between 17.4 and 17.8 % of TFA) than the two remaining groups (between 9.1 and 10.6 % of TFA, $p<0.001$). Furthermore, neither 20:5n-3 (eicosapentaenoic acid, EPA) nor 22:6n-3 (docosahexaenoic acid,

DHA) were detected in larvae reared on GD and CC whereas these FAs were found in increasing levels as the amount of fish offal increased in the larval diet. Larvae fed exclusively with FO reached the significantly highest concentrations of EPA and DHA (4.7 and 3.8 % of TFA, $p<0.001$). Concerning the sum of PUFAs, larvae showed similar contents when reared on FO, FS and FO-FS (between 12.1 and 13.1 % of TFA), which was significantly higher than the contents found in the larvae reared on GD and CC (between 2.4 and 3.2 % of TFA, $p<0.001$).

Table 5: Main fatty acid composition as a percentage of total fatty acids of larvae reared on the experimental diets

Fatty acids (%TFA)	Experimental diets				
	GD	CC	FO	FS	FO-FS
C12 :0	59.3 ± 1.1^{d}	51.5 ± 2.6^{c}	26.6 ± 1.6^{a}	36.8 ± 2.2^{b}	30.4 ± 2.1^{a}
C14 :0	9.5 ± 0.5^{d}	15.5 ± 0.3^{e}	5.9 ± 0.3^{a}	8.4 ± 0.6^{c}	7.0 ± 0.2^{b}
C16 :0	9.5 ± 0.4^{a}	11.1 ± 0.9^{b}	17.4 ± 0.6^{d}	14.2 ± 0.6^{c}	15.6 ± 0.7^{c}
C16 :1 (n-7)	3.9 ± 0.4^{b}	3.1 ± 0.1^{a}	6.9 ± 0.2^{d}	3.3 ± 0.3^{ab}	5.1 ± 0.2^{c}
C18 :0	1.8 ± 0.2^{a}	1.5 ± 0.3^{a}	3.6 ± 0.2^{b}	3.1 ± 0.2^{b}	3.4 ± 0.3^{b}
C18 :1 (n-9)	9.1 ± 0.4^{a}	10.6 ± 0.7^{b}	17.4 ± 0.5^{c}	17.8 ± 0.5^{c}	17.6 ± 0.4^{c}
C18 :1(n-7)	0.4 ± 0.1^{a}	0.4 ± 0.1^{a}	1.5 ± 0.2^{b}	0.6 ± 0.1^{a}	1.7 ± 0.3^{b}
C18 :2 (n-6) (LA)	2.6 ± 0.6^{b}	1.9 ± 0.1^{b}	0.9 ± 0.1^{a}	9.9 ± 1.2^{d}	4.7 ± 1.0^{c}
C18 :3 (n-3) (ALA)	0.3 ± 0.2^{b}	0.1 ± 0.0^{a}	0.3 ± 0.0^{b}	1.1 ± 0.1^{c}	0.5 ± 0.0^{b}
C20 :4 (n-6) (ARA)	0.0 ± 0.0^{b}	0.0 ± 0.0^{a}	1.0 ± 0.1^{e}	0.3 ± 0.1^{c}	0.7 ± 0.1^{d}
C20 :5 (n-3) (EPA)	0.0 ± 0.0^{a}	0.0 ± 0.0^{a}	4.7 ± 0.3^{d}	0.2 ± 0.0^{b}	3.1 ± 0.3^{c}
C22 :6 (n-3) (DHA)	0.0 ± 0.0^{a}	0.0 ± 0.0^{a}	3.8 ± 0.5^{c}	0.0 ± 0.0^{a}	2.7 ± 0.3^{b}
∑ SFA	80.5 ± 0.8^{c}	80.1 ± 1.1^{c}	55.2 ± 2.0^{a}	62.9 ± 1.6^{b}	57.6 ± 1.3^{a}
∑ MUFA	14.3 ± 0.4^{a}	15.0 ± 0.7^{a}	29.1 ± 0.9^{d}	23.2 ± 0.6^{b}	26.8 ± 0.7^{c}
∑ PUFA (all)	3.2 ± 0.8^{a}	2.4 ± 0.2^{a}	13.0 ± 1.1^{b}	12.1 ± 1.3^{b}	13.1 ± 0.7^{b}
∑ PUFA (n-3)	0.4 ± 0.2^{a}	0.2 ± 0.0^{a}	9.3 ± 0.9^{d}	1.3 ± 0.1^{b}	6.6 ± 0.6^{c}
∑ PUFA (n-6)	2.7 ± 0.6^{a}	1.9 ± 0.1^{a}	2.5 ± 0.2^{a}	10.3 ± 1.3^{c}	5.8 ± 1.0^{b}
n-3/n-6	0.14 ± 0.05^{a}	0.09 ± 0.01^{a}	3.66 ± 0.16^{c}	0.131 ± 0.013^{a}	1.18 ± 0.30^{b}

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values shown are mean ± standard deviation (SD; n=4). Values with different superscript letters within a row are significantly different ($p<0.05$)

4. Discussion

4.1. Impact of energy value of diets on larval growth and bioconversion

BSF larvae are attracting growing interest due to their application as a green technology in waste management and production of quality nutrients through their ability to bioconvert organic matter. In our study, all experimental diets supported the development of BSF larvae. The survival rates of larvae fed with diets FO and FS were in agreement with the results obtained by Ewald et al., (2020), with a survival rate significantly higher for larvae fed with food waste (89%) than larvae fed with fish offal (18%). Julita et al., (2020) associated high mortality rate with substrates with low protein content. In our experiment, the FO diet resulted in significantly higher larval mortality, despite its highest protein content (58.2%) compared to other diets. This could be explained by its extremely low carbohydrate content (4.5%) as proteins and carbohydrates are the most important nutrients for insect survival, growth and reproduction for species with a nonfeeding adult stage (Arrese and Soulages, 2010; Barragan-Fonseca *et al.*, 2019). Otherwise, it is possible to suspect a high susceptibility of BSF larvae to reactive oxygen species (ROS) which are produced in the case of high oxidative catabolism as in insects. BSF larvae fed with FO accumulated a lot of C20 PUFAs. These are particularly unstable and susceptible to peroxidation. Peroxide PUFAs cause irreversible cell damage (Stanley and Kim, 2020).

Despite relatively slow larval growth on fishery by-products, it appeared that the mixture of this substrate with food scraps maximized growth performance. A previous study also showed that supplementing the larval growth substrate (faecal sludge) with other organic waste, such as food remains, resulted in significantly higher larval weight and shorter larval development time (Nyakeri *et al.*, 2019). Another study showed that using a formulation of different biowastes significantly increased larval performance compared to individual wastes (Gold *et al.*, 2020). According to these observations, mixing several biowastes seemed to provide a more nutritious, balanced, and convertible feed for larval growth. Food conversion rate (FCR) and overall degradation (OD) were important parameters to evaluate the waste reduction performance of BSF larvae. A low FCR reflected that the feed consumed was efficiently converted into larval biomass, it is a good indication of high-quality feed (Tirtawijaya and Choi, 2022) . On the other hand, a high OD expressed that a high quantity of feed was reduced in the process of bioconversion. Our results indicated that FS, FO and the mix of them are more easily digested by larvae and converted into higher larval biomass than CC, although CC degradation is the most efficient. Considering these parameters, the most promising substrate for the

development of an industrial production of BSF larvae depends on the purpose of the project. Substrates made from food scraps and fish offal, especially FO and FO-FS, were more suitable for larval biomass production, whereas larvae raised with CC showed best performance with respect to the treatment of a large quantity of waste, followed by the larvae fed with food scraps and fish offal-based substrates. Fishery by-products have the advantage of being rich in proteins and lipids, while food waste is a good source of carbohydrates. These two deposits are a source of nutrients that are particularly interesting and recoverable by bioconversion, to produce larvae rich in high quality nutrients.

4.2. Nutritional qualities of BSF larvae and potential applications

In this study, the influence of proximate and nutrient composition of the rearing substrate on that of BSF larvae was investigated. This study revealed certain features of lipid metabolism in BSF larvae. Regardless of the larval growth substrate, SFA was found to be the main group of FAs in larvae (Table 5), of which most representative FA was lauric acid (12:0), followed by myristic (14:0), and palmitic (16:0) acids. Some authors reported similar results (Liland *et al.*, 2017; Barroso *et al.*, 2019; Oonincx *et al.*, 2020).

Our experiment showed the ability of BSF larvae to synthesize SFAs, as shown by the very high level of lauric acid in larvae fed with the Gainesville diet composed of cereals, extremely poor in lauric acid but rich in carbohydrates. This highlights the importance of carbohydrates in the constitution of the BSF FAs profile as shown by Hoc et al., (2020) and this confirms the hypothesis formulated by Gold et al., (2020) on the fact that carbohydrates in the substrates may be converted into lipids in the larval biomass. Moreover, FAs in larvae constitute an energy reserve, which could be mobilized during the adult nonfeeding stage. As suggested by Ushakova et al., (2016) and Ewald et al., (2020), if this energy is mainly stored in the form of SFAs, it may be because these FAs are not subject to oxidation, unlike PUFAs.

The lipid profile of BSF larvae is similar to some vegetable oils. In particular, percentages of lauric (12:0) and myristic (14:0) acids make BSF fat similar to coconut fat and palm kernel fat (Caligiani *et al.*, 2018; Matthäus *et al.*, 2019). Consequently, BSF oil could be used for applications similar to these highly saturated oils, particularly in the food and pharmaceutical industries (Kappally, Shirwaikar and Shirwaikar, 2015; Aila *et al.*, 2018). Moreover, with its relatively high concentration of medium chain SFA and low concentration of PUFA, the BSF larvae oil appears to be a promising candidate for the production of high-quality biodiesel with

a lower viscosity and a higher oxidative stability than soybean oil and sunflower oil (Surendra *et al.*, 2016; Caligiani *et al.*, 2018).

Lauric (C12:0), palmitic (C16:0) and stearic acids (C18:0) are also known to have anti-microbial properties (Auza *et al.*, 2020; Casillas-Vargas *et al.*, 2021). This increases the potential of the BSF larvae as a biocontrol agent in waste treatment, as their ability to reduce the number of pathogens such as *Escherichia coli* and *Salmonella enteric* has been reported (Erickson *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2008; Lalander *et al.*, 2013). Consequently, antimicrobial molecules contained in the BSF larvae have a great potential for substitution of antibiotics in animal farming (Moretta *et al.*, 2020; Xia, Ge and Yao, 2021). Moreover, production of BSF larvae also leads to the production of a promising larval growth residue, not only as an organic fertilizer (Kawasaki *et al.*, 2020; Schmitt and de Vries, 2020), but also as an anti-fungal agent, to reduce the use of conventional pesticides (Arabzadeh *et al.*, 2023).

Unlike SFA which can be synthetized by the BSF larvae, FA with more than 18 carbons should be found in the substrate to be accumulated by BSF larvae to obtain a high-quality nutritional value (Siddiqui *et al.*, 2022). We were able to confirm this in this study, as we observed that BSF larvae accumulate PUFA according to the richness of the substrate in PUFA, which is in line with earlier findings by Barroso et al., (2017) and St-Hilaire et al., (2007). PUFA contents are similar in larvae reared on food scraps and fish offal-based substrates (FO, FS an FO-FS) ranging from 12.1 to 13.1 %TFA. Nevertheless, we note that the larvae fed on FO are particularly rich in omega-3 PUFA (9.3 %TFA) while those reared on FS are enriched in omega-6 PUFA (10.3 %TFA), reflecting the composition of the respective substrates (Table S2).

More specifically, enrichment of BSF larvae with EPA and DHA was only possible if the diet already contained them, as it is the case in fish offal that could thus be valued by the process of bioconversion. Interestingly, although DHA (23.8% TFA) was present in greater quantity than EPA (5.1% TFA) in the FO substrate, the larval biomass turned out to be richer in EPA (4.7% TFA for EPA vs 3.8% TFA for DHA). These levels in BSF larvae may fluctuate depending on the larval stage as the percentage of PUFA decreases over time during the BSF development (Liu *et al.*, 2017). However, Barroso et al., (2017) also observed selective accumulation of EPA over DHA over time, putting forward the hypothesis that EPA would be an essential FA for larval-pupal development of this species. It can also be assumed that DHA can be retroconverted into EPA as it is the case in the marine bacteria *Shewanella livingstonensis* (Ogawa *et al.*, 2020). In humans, DHA supplementation results in increased EPA levels

(Schuchardt *et al.*, 2016). Therefore, DHA can partly substitute for, but is not biologically equivalent to EPA. There is still work to be done to understand the dynamics of conversion.

AAs are important for protein synthesis, but they can also generate glucose, adenosine triphosphate (ATP), and FAs, and they are precursors for numerous biomolecules (Chandel, 2021). Our study shows that the essential and non-essential AA contents are relatively homogeneous in larvae fed with different diets even though the AA levels of these different diets are very different. Similar findings were described by Sprangers *et al.*, (2017) and Wang *et al.*, (2020). The relative levels of AA in fish-free diets (GD, CC and FS) are lower than those in corresponding larvae. Fish-containing diets are naturally high in protein, so AA are widely available, while low-protein diets provide relatively fewer AA. There is therefore a mechanism of compensation by differential assimilation according to the diet to achieve an optimal concentration. In all BSF larvae samples of this study, leucine, lysine and valine were the most abundant EAAs observed, whereas aspartic and glutamic acids were the most abundant non-essential AAs as observed by Zulkifli et al., (2022).

4.3. Potential of BSF larvae in aquaculture

These last years, FM production has continued to decrease, thus a number of innovative alternatives from other sources such as animal and plants are under consideration (Ayadi, Rosentrate and Muthukumar, 2012; Gasco *et al.*, 2018; Dawood *et al.*, 2022). Potential alternative ingredients are evaluated according to the quality of their AA and FA profiles.

EAA requirements have been established for a number of species of fish and shrimp, as reviewed by Nunes et al., (2014) indicating also that methionine (Met) followed by lysine (Lys) are the first limiting AAs in plant and processed animal by-products. Several studies on shrimp showed that the need of some EAA such as lysine, methionine, threonine, arginine and tryptophane are respectively of 2%, 0.9%, 1.4%, 1.9-2.5% and 0.2% (Chen, Leu and Roelants, 1992; Fox, Lawrence and Li-Chan, 1995; Millamena *et al.*, 1998, 1999; Richard *et al.*, 2010). In this study, BSF larvae provided all EAAs, in sufficient quantity to meet these needs, but also the estimated fish feed requirements (EFFR) regardless of the experimental larval diet: arginine 2.2-3.1 g/100g (EFFR 1.0-3.1%), histidine 1.4-2.0 g/100g (EFFR 0.4-1%), isoleucine 2.0-2.5 g/100g (EFFR 0.6-1.8%), leucine 3.3-4.2 g/100g (EFFR 0.8-3.4%), lysine 3.0-3.7 g/100g (EFFR 1.2-3.3%), methionine 0.8-0.9 g/100g (EFFR 0.4-1.5%) , phenylalanine 2.0-2.5 g/100g (EFFR 0.5-2.5%), threonine 1.9-2.5 g/100g (EFFR 1.8-4.5%) and valine 2.9-3.5 g/100 (EFFR 0.7-1.6%) (Council, 2011). The analyzed AA profile of the BSF larvae is similar to the AA

profile of FM (Ogunji *et al.*, 2006; Vaun C Cummins *et al.*, 2017), with equal or even greater concentrations of AA except for cysteine + cystine (non-essential AAs) with less than 0,4g/100g dry matter in BSF larvae, against 4,9 g/100g dry matter in FM. Moreover, Nogales-Mérida et al., (2018) showed that the AA profile of BSF larvae was better suited for aquafeeds than SBM.

Apart from being used as an alternative source of protein in animal feed, BSF larvae are regarded as valuable resources of fat, because the BSF is one of the insect species richest in lipids (Ramos-Bueno *et al.*, 2016). In our study, crude lipid content ranged between 251 and 429 g kg^{-1} (dry matter basis). These values are in perfect agreement with the fat content found in previous studies using food waste (407 g kg^{-1} DM) or fresh mussels (331 g kg^{-1} DM) to rear BSF larvae (Ewald *et al.*, 2020). Nevertheless, the lack of EPA and DHA in insects is one of the most important limitations to their inclusion in aquafeeds (Barroso *et al.*, 2014) because they are essential FAs, playing essential roles in promoting the growth, reproduction and boosting immunity of fish and shrimps (Tocher, 2015). According to the review by (Tocher, 2010), EPA and DHA requirements of marine and freshwater fish can be successfully fulfilled by the BSF larvae produced in the present work, when the larval diet was enriched with fish offal.

The European Commission approved the use of processed insect meal in aquafeeds in 2017 (Regulation 2017/893/EC, 2017). Previous studies already investigated the replacement of FM with BSF larvae meal in the diet of various species of fish such as European seabass *Dicentrarchus labrax* (Magalhães *et al.*, 2017), Siberian sturgeon *Acipenser baerii* (Rawski *et al.*, 2021), rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* Walbaum (Renna *et al.*, 2017), climbing perch *Anabas testudineus* (Vongvichith *et al.*, 2020) without impairing growth performance, fish health or digestibility. Other studies showed the limitations of the use of BSF larvae meal generally linked to the limited ability to digest chitin as suggested by (St-Hilaire *et al.*, 2007).

5. Conclusion

This study investigated the effects of agro-industrial by-products on the growth, bioconversion performance and nutritional quality of BSF larvae. Fishery co-products and food waste appeared to be good candidates to produce high quality BSF larvae meal, as suitable replacement of FM and SBM. Indeed, the AA profile of *H. illucens* is better than the SBM and can be used as a suitable replacement of fish meal in the aquaculture feed formulation. It therefore appears that the nutritional qualities of the larvae can be modified regarding the FA profile, as the larvae can be enriched with PUFA by providing a suitable diet. On the other

hand, it appears that the AA content will remain stable regardless of the AA richness of the diet, suggesting that the larvae might implement a compensation mechanism to maintain a stable AA content. The composition of BSF larvae shows high protein and lipid contents. Consequently, separating the components of BSF larvae into distinct oil and defatted meal fractions is crucial to enhance their utilisation into animal nutrition.

6. Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

7. Author Contributions

JT, LD, FLG and PS for acquisition and analysis. JT and GLM for interpretation of data for the work. JT, GLM, HB for drafting the work. JT, GLM, HB and RH for revising it critically for important intellectual content.

8. Funding

This work was supported by the Research Delegation of French Polynesia (CV MAF-REC n°4503) and the fund of the society TECHNIVAL.

9. Acknowledgments

We are grateful to the LIPIDOCEAN platform for assisting in extracting and analyzing lipid fractions, and bioinformatics analysis.

10. Supplementary materials

Table S1 : Amino acids composition of experimental diets

	Experimental diets				
Amino acids (g/100)	**GD**	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
Total tryptophan	0,246 ± 0,025	0,161 ± 0,016	0,509 ± 0,051	0,302 ± 0,03	0,44 ± 0,043
Total alanine	1,168 ± 0,163	1,462 ± 0,204	3,893 ± 0,545	1,59 ± 0,222	3,056 ± 0,428
Arginine	1,05 ± 0,147	1,882 ± 0,263	3,422 ± 0,479	1,694 ± 0,237	2,766 ± 0,388
Aspartic acid	1,838 ± 0,258	1,71 ± 0,24	4,203 ± 0,588	2,536 ± 0,356	3,877 ± 0,542
Glutamic acid	3,437 ± 0,481	3,817 ± 0,534	6,396 ± 0,895	4,345 ± 0,608	6,425 ± 0,9
Total glycine	1,092 ± 0,153	1,086 ± 0,152	6,267 ± 0,877	2,006 ± 0,281	4,191 ± 0,587
Histidine	0,477 ± 0,067	0,478 ± 0,067	1,797 ± 0,251	0,794 ± 0,111	1,232 ± 0,173
Hydroxyproline	0 ± 0	0 ± 0	1,807 ± 0,361	0,625 ± 0,125	1,341 ± 0,268
Isoleucine	0,779 ± 0,109	0,768 ± 0,108	1,733 ± 0,243	1,035 ± 0,144	1,655 ± 0,232

Leucine totale	1,826 ± 0,255	1,505 ± 0,211	3,091 ± 0,433	1,923 ± 0,269	2,935 ± 0,411
Lysine	0,808 ± 0,113	0,582 ± 0,082	3,615 ± 0,506	1,85 ± 0,259	3,249 ± 0,455
Total phenylalanine	1,002 ± 0,141	0,939 ± 0,131	1,936 ± 0,271	1,081 ± 0,152	1,763 ± 0,246
Total proline	1,372 ± 0,192	0,792 ± 0,111	3,497 ± 0,49	1,58 ± 0,221	2,729 ± 0,382
Total serine	0,965 ± 0,135	0,847 ± 0,118	2,011 ± 0,281	1,081 ± 0,152	1,655 ± 0,232
Threonine	0,834 ± 0,117	0,791 ± 0,111	2,107 ± 0,295	1,05 ± 0,147	1,92 ± 0,269
Total tyrosine	0,7 ± 0,098	0,487 ± 0,068	1,251 ± 0,175	0,806 ± 0,113	1,22 ± 0,17
Total valine	0,976 ± 0,137	1,247 ± 0,174	2,225 ± 0,311	1,268 ± 0,178	2,005 ± 0,28
Cysteine + Cystine	0,313 ± 0,044	0,335 ± 0,047	0,484 ± 0,067	0,312 ± 0,044	0,42 ± 0,059
Methionine	0,301 ± 0,042	0,302 ± 0,042	1,487 ± 0,209	0,546 ± 0,077	1,036 ± 0,145

(GD : Gainsville diet, CC : Coprah cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values are expressed as percentages of dry matter. Data shown are the value for one sample of 100 g larvae. Data shown are mean ± analytical uncertainty.

Table S2: Main fatty acid composition as a percentage of total fatty acids of experimental diets

Fatty acids	**Experimental diets**				
	GD	**CC**	**FO**	**FS**	**FO-FS**
C12 :0	0,7 ± 0,1	52,6 ± 1,7	0,1 ± 0	0,54 ± 0,06	0,4 ± 0,1
C14 :0	0,8 ± 0,1	20,4 ± 0,7	2,6 ± 0	4,6 ± 0,2	3,8 ± 0,4
C16 :0	23,2 ± 0,2	11,1 ± 0,3	21,2 ± 0,4	25,8 ± 0,5	24,1 ± 1,1
C16 :1 (n-7)	0,2 ± 0,1	0 ± 0	4,3 ± 0,1	2,2 ± 0	3,1 ± 0,2
C18 :0	8,7 ± 0,2	4 ± 0,2	6,1 ± 0,1	13,2 ± 0,2	9,7 ± 0,9
C18 :1 (n-9)	20 ± 1,2	7,7 ± 1,4	15,9 ± 0,1	28,6 ± 0,9	22,8 ± 0,4
C18 :1(n-7)	1,1 ± 1,1	0,2 ± 0,2	2,3 ± 2,3	1,6 ± 1,6	2,2 ± 2,2
C18 :2 (n-6) (LA)	32,4 ± 2,4	2,6 ± 0,8	0,9 ± 0	16,5 ± 0,5	11 ± 1,3
C18 :3 (n-3) (ALA)	4,3 ± 0,4	0,1 ± 0	0,3 ± 0	1,1 ± 0	0,7 ± 0
C20 :4 (n-6) (ARA)	0 ± 0	0 ± 0	2,4 ± 0,1	0,1 ± 0	1,1 ± 0
20 :5 (n-3) (EPA)	0 ± 0	0 ± 0	5,1 ± 0,1	0 ± 0	2,1 ± 0,2
22 :6 (n-3) (DHA)	0 ± 0	0 ± 0	23,8 ± 0,5	0 ± 0	9,4 ± 0,8
∑ SFA	36,6 ± 0,7	88,4 ± 2,3	32,4 ± 0,7	45,1 ± 0,9	39,6 ± 2,5
∑ MUFA	22,8 ± 0,9	8,1 ± 1,5	27,3 ± 0,2	33,7 ± 1,6	31 ± 0,2
∑ PUFA (all)	39,7 ± 0,3	3,5 ± 0,8	39,6 ± 0,5	19,6 ± 0,7	28 ± 2,4
∑ PUFA (n-3)	6,1 ± 2,5	0,5 ± 0	31,7 ± 0,4	1,6 ± 0,1	13,5 ± 1,1
∑ PUFA (n-6)	33,4 ± 2,8	2,9 ± 0,8	6,2 ± 0,1	17,1 ± 0,7	13,4 ± 1,3
n-3/n-6	0,187 ± 0,089	0,194 ± 0,072	5,116 ± 0,003	0,091 ± 0,008	1,005 ± 0,013

(GD : Gainsville diet, CC : Copra cake, FO : Fish offal, FS : Food scraps)
Values shown are mean ± standard deviation (SD; n=2).

11. References

Abd El-Hack, M.E. *et al.* (2020) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal as a promising feed ingredient for poultry: A comprehensive review', *Agriculture (Switzerland)*, 10(8), pp. 1–31. doi:10.3390/agriculture10080339.

Aerni, V. *et al.* (2005) 'Productivity and mortality of laying hens in aviaries: A systematic review', *World's Poultry Science Journal*, 61(1), pp. 130–142. doi:10.1079/WPS200450.

Aguilar-Miranda, E.D. *et al.* (2002) 'Characteristics of maize flour tortilla supplemented with ground *Tenebrio molitor* larvae', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(1), pp. 192–195. doi:10.1021/jf010691y.

Aila, N. *et al.* (2018) 'Usage of palm oil, palm kernel oil and their fractions as confectionery fats', *Journal of oil palm research*, 29(3), pp. 301–310. doi:10.21894/jopr.2017.2903.01.

Akiyama, D.M., Dominy, W.G. and Lawrence, A.L. (1992) 'Penaeid Shrimp Nutrition', in *Marine Shrimp Culture : Principles and Practices*. Third Edit. Elsevier B.V., pp. 535–568. doi:10.1016/b978-0-444-88606-4.50031-x.

Aquacop (1983) 'Production of feeds to support shrimp farming in Tahiti (French Polynesia)', in *1st International Biennal Conference on Warm Water Aquaculture - Crustacea 02/9-11/83 Brigham Young University. Hawai*, pp. 417–425.

Arabzadeh, G. *et al.* (2022) 'Diet Composition Influences Growth Performance, Bioconversion of Black Soldier Fly Larvae: Agronomic Value and In Vitro Biofungicidal Activity of Derived Frass', *Agronomy*, 12(8), p. 1765. doi:10.3390/agronomy12081765.

Arabzadeh, G. *et al.* (2023) 'Assessment of Antifungal/Anti-Oomycete Activity of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae to Control Plant Pathogens in Horticulture: Involvement of *Bacillus velezensis*', *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). doi:10.3390/su151410957.

Arrese, E.L. and Soulages, J.L. (2010) 'Insect Fat Body: Energy, Metabolism, and Regulation', *Annual Review of Entomology*, 55(1), pp. 207–225. doi:10.1146/annurev-ento-112408-085356.

Arriaga-Hernández, D. *et al.* (2021) 'Fish meal replacement by soybean products in aquaculture feeds for white snook, *Centropomus viridis*: Effect on growth, diet digestibility, and digestive capacity', *Aquaculture*, 530(August 2020), p. 735823. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.735823.

Arrouze, F. *et al.* (2017) 'Chitin and chitosan: Study of the possibilities of their production by valorization of the waste of crustaceans and cephalopods rejected in Essaouira', *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(7), pp. 2251–2258.

Asche, F., Oglend, A. and Tveteras, S. (2013) 'Regime Shifts in the Fish Meal/Soybean Meal Price Ratio', *Journal of Agricultural Economics*, 64(1), pp. 97–111. doi:10.1111/j.1477-9552.2012.00357.x.

Attia, Y.A., Al-Harthi, M.A. and Abo El-Maaty, H.M. (2020) 'Calcium and Cholecalciferol Levels in Late-Phase Laying Hens: Effects on Productive Traits, Egg Quality, Blood Biochemistry, and Immune Responses', *Frontiers in Veterinary Science*, 7(July). doi:10.3389/fvets.2020.00389.

Auza, F.A. *et al.* (2020) 'Antibacterial activities of black soldier flies (*Hermetia illucens*. l) extract towards the growth of *Salmonella typhimurium*, E.coli and *Pseudomonas aeruginosa*', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 492(1). doi:10.1088/1755-1315/492/1/012024.

Ayadi, F.Y., Rosentrate, K.A. and Muthukumar, K. (2012) 'Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds', *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, 4(1), pp. 1–26. doi:10.3923/joafsnu.2012.1.26.

Ayelo, P.M. *et al.* (2017) 'Host species and vegetable fruit suitability and preference by the parasitoid wasp Fopius arisanus', *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 163(1), pp. 70–81. doi:10.1111/eea.12561.

Azzollini, D. *et al.* (2020) 'Mechanical and Enzyme Assisted Fractionation Process for a Sustainable Production of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Ingredients', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(June). doi:10.3389/fsufs.2020.00080.

Baci, G.M., Moise, A.R. and Dezmirean, D.S. (2021) 'Utilization of transgenic *Bombyx mori* for biomaterials production.', *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies*, 54(1), pp. 110–116. Available at: http://spasb.ro/index.php/spasb/article/view/2703.

Ballou, J.D. (1997) 'Genetic and demographic modeling for animal colony and population management', *ILAR Journal*, 38(2), pp. 69–75. doi:10.1093/ilar.38.2.69.

Banks, I.J., Gibson, W.T. and Cameron, M.M. (2014) 'Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation', *Tropical Medicine and International Health*, 19(1), pp. 14–22. doi:10.1111/TMI.12228.

Barragan-Fonseca, K.B. (2018) *Flies are what they eat Tailoring nutrition of black soldier fly for larval biomass production and fitness*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Barragan-Fonseca, K.B. *et al.* (2019) 'Effects of dietary protein and carbohydrate on life-history traits and body protein and fat contents of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Physiological Entomology*, 44(2), pp. 148–159. doi:10.1111/phen.12285.

Barragan-Fonseca, K.B., Dicke, M. and van Loon, J.J.A. (2017) 'Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review', *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), pp. 105–120. doi:10.3920/JIFF2016.0055.

Barros, L.M. *et al.* (2019) 'Morphological description of the immature stages of *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Stratiomyidae)', *Microscopy Research and Technique*, 82(3), pp. 178–189.

doi:10.1002/jemt.23127.

Barroso, F.G. *et al.* (2014) 'The potential of various insect species for use as food for fish', *Aquaculture*, 422–423, pp. 193–201. doi:10.1016/j.aquaculture.2013.12.024.

Barroso, F.G. *et al.* (2017) 'Insects as food: Enrichment of larvae of *Hermetia illucens* with omega 3 fatty acids by means of dietary modifications', *Journal of Food Composition and Analysis*, 62, pp. 8–13. doi:10.1016/j.jfca.2017.04.008.

Barroso, F.G. *et al.* (2019) 'Production of n-3-rich insects by bioaccumulation of fishery waste', *Journal of Food Composition and Analysis*, 82(November 2018), p. 103237. doi:10.1016/j.jfca.2019.103237.

Bartter, J. *et al.* (2018) 'Use of chicken eggshell to improve dietary calcium intake in rural sub-Saharan Africa', *Maternal and Child Nutrition*, 14(June), pp. 1–10. doi:10.1111/mcn.12649.

Belghit, I. *et al.* (2019) 'Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*)', *Aquaculture*, 503(December), pp. 609–619. doi:10.1016/j.aquaculture.2018.12.032.

Bell, J.G. and Sargent, J.R. (2003) 'Arachidonic acid in aquaculture feeds: Current status and future opportunities', *Aquaculture*, 218(1–4), pp. 491–499. doi:10.1016/S0044-8486(02)00370-8.

Bellini, R. *et al.* (2018) 'Exploring protandry and pupal size selection for *Aesdes albopictus* sex separation', *Parasites and Vectors*, 11(Suppl 2). doi:10.1186/s13071-018-3213-x.

Bertinetti, C., Samayoa, A.C. and Hwang, S.Y. (2019) 'Effects of feeding adults of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on longevity, oviposition, and egg hatchability: Insights into optimizing egg production', *Journal of Insect Science*, 19(1), pp. 1–7. doi:10.1093/jisesa/iez001.

Beynen, A. (2018) 'Insect-based petfood', *Creature companion*, (September), p. 7.

Bimbilé Somda, N.S. *et al.* (2019) 'Insects to feed insects - feeding Aedes mosquitoes with flies for laboratory rearing', *Scientific Reports*, 9(1), pp. 1–13. doi:10.1038/s41598-019-47817-x.

Boissière, A. *et al.* (2012) 'Midgut microbiota of the malaria mosquito vector *Anopheles gambiae* and interactions with Plasmodium falciparum infection', *PLoS Pathogens*, 8(5), pp. 1–12. doi:10.1371/journal.ppat.1002742.

Bondari, K. and Sheppard, D.C. (1987) 'Soldier fly larvae as feed for channel catfish and blue tilapia', *Aquaculture and fisheries management*, (1981), pp. 209–220.

Booth, D.C. and Sheppard, C. (1984) 'Oviposition of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Eggs, Masses, Timing, and Site Characteristics', *Environmental Entomology*, 13(2), pp. 421–423. doi:10.1093/ee/13.2.421.

Borrelli, L. *et al.* (2017) 'Insect-based diet, a promising nutritional source, modulates gut microbiota

composition and SCFAs production in laying hens', *Scientific Reports*, 7(1), pp. 1–11. doi:10.1038/s41598-017-16560-6.

Bortolini, S. *et al.* (2020) '*Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy', *Journal of Cleaner Production*, 262, p. 121289. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121289.

Bosch, G. and Swanson, K.S. (2021) 'Effect of using insects as feed on animals: pet dogs and cats', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), pp. 795–805. doi:10.3920/JIFF2020.0084.

Bossin, H. *et al.* (2016) 'Releases of Wolbachia mosquito males to sterilize and suppress a population of Aedes polynesensis on Tetiaroa atoll, french polyneisa', in *International Congress for Tropical Medecine and Malaria*. Birbane, p. 1.

Ben Boulaïd, M. (2019) *Lutte biologique par l'utilisation de la coccinelle Coccinella algerica Kovar , 1977 , issues d'élevage dans les conditions contrôlées . Contribution à l'évaluation de son efficacité contre les pucerons de la culture des solanacées sous serre à Biskra*.

Bourtzis, K. and Vreysen, M.J.B. (2021) 'Sterile insect technique (Sit) and its applications', *Insects*, 12(7). doi:10.3390/insects12070638.

Bovera, F. *et al.* (2016) 'Use of *Tenebrio molitor* larvae meal as protein source in broiler diet: Effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits', *Journal of Animal Science*, 94(2), pp. 639–647. doi:10.2527/jas.2015-9201.

Brett C., R. (2006) 'Scarab beetles in human culture', *Coleopterists Society Monograph*, 5, pp. 85–101.

Brigham, C. (2017) 'Chitin and Chitosan: Sustainable, Medically Relevant Biomaterials', *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 6(2), pp. 41–47. doi:10.6000/1927-3037.2017.06.02.1.

Bruni, L. *et al.* (2021) 'Is it possible to cut down fishmeal and soybean meal use in aquafeed limiting the negative effects on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet quality and consumer acceptance?', *Aquaculture*, 543(May), p. 736996. doi:10.1016/j.aquaculture.2021.736996.

Bruno, D. *et al.* (2020) 'An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Arthropod Structure and Development*, 58, p. 100969. doi:10.1016/j.asd.2020.100969.

Buckner, G.D. and Martin, J.H. (1920) 'Effect of Calcium on the Composition of the Eggs and Carcass of Laying Hens', *Journal of Biological Chemistry*, 41(2), pp. 195–203. doi:10.1016/s0021-9258(18)87217-9.

Bullock, N. *et al.* (2013) 'The black soldier fly How- to- guide', *BioSystems Design Blog*, p. 12. Available at: http://hdl.handle.net/2027/umn.31951000441419j.

Caligiani, A. *et al.* (2018) 'Influence of the killing method of the black soldier fly on its lipid

composition', *Food Research International*, 116(July 2018), pp. 276–282. doi:10.1016/j.foodres.2018.08.033.

Cammack, J.A. and Tomberlin, J.K. (2017) 'The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae)', *Insects*, 8(2). doi:10.3390/insects8020056.

Cantero-Bahillo, E. *et al.* (2022) 'Supercritical-CO2 for defatting and production of bioactive extracts from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae', *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(12), pp. 1441–1453. doi:10.3920/JIFF2021.0210.

Caruso, D. *et al.* (2014) *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens, Stratiomyidae*. Available at: https://uved-formation-aquaculture.cirad.fr/content/download/4328/32130/version/3/file/BLACK+SOLDIER+Technical+Handbook.pdf.

Casillas-Vargas, G. *et al.* (2021) 'Antibacterial fatty acids: An update of possible mechanisms of action and implications in the development of the next-generation of antibacterial agents', *Progress in Lipid Research*, 82(January). doi:10.1016/j.plipres.2021.101093.

Chambers, G.M. and Klowden, M.J. (1990) 'Correlation of nutritional reserves with a critical weight for pupation in larval Aedes aegypti mosquitoes.', *Journal of the American Mosquito Control Association*, 6(3), pp. 394–399.

Chandel, N.S. (2021) 'Amino acid metabolism', *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(4), pp. 1–18. doi:10.1101/CSHPERSPECT.A040584.

Chen, H.Y., Leu, Y.T. and Roelants, I. (1992) 'Quantification of arginine requirements of juvenile marine shrimp, *Penaeus monodon*, using microencapsulated arginine', *Marine Biology*, 114(2), pp. 229–233. doi:10.1007/BF00349523.

Chen, S. *et al.* (2020) 'Multiple Factors Determine the Structure of Bacterial Communities Associated With *Aesdes albopictus* Under Artificial Rearing Conditions', *Frontiers in Microbiology*, 11(April). doi:10.3389/fmicb.2020.00605.

Chia, Shaphan Y. *et al.* (2018) 'Effects of waste stream combinations from brewing industry on performance of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *PeerJ*, 2018(11), pp. 1–26. doi:10.7717/peerj.5885.

Chia, Shaphan Yong *et al.* (2018) 'Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens* : Implications for mass production', *PLoS ONE*, 9, pp. 1–26.

Chodová, D. and Tůmová, E. (2020) 'Insects in chicken nutrition. A review', *Agronomy Research*, 18(2), pp. 376–392. doi:10.15159/AR.20.003.

Choo, J. (2010) 'Potential ecological implications of human entomophagy by subsistence groups of the Neotropics', *Terrestrial Arthropod Reviews*, 1(1), pp. 81–93. doi:10.1163/187498308x345442.

Čičková, H. *et al.* (2015) 'The use of fly larvae for organic waste treatment', *Waste Management*, 35, pp. 68–80. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.026.

Clifford, C.W. and Woodring, J.P. (1990) 'Methods for rearing the house cricket, Acheta domesticus (L.), along with baseline values for feeding rates, growth rates, development times, and blood composition', *Journal of Applied Entomology*, 109(1–5), pp. 1–14. doi:10.1111/j.1439-0418.1990.tb00012.x.

Cochereau, P. (1974) 'Ébauche d'un inventaire faunistique de l'Ile Mangareva (Archipel des Gambier)', *Cah. Pac.*, 18(2)(18), pp. 479–532.

Cogollo-Herrera, K. *et al.* (2018) 'Techno-economic sensitivity analysis of large scale chitosan production process from shrimp shell wastes', *Chemical Engineering Transactions*, 70, pp. 2179–2184. doi:10.3303/CET1870364.

Contreras-Perera, Y. *et al.* (2023) 'Different larval diets for Aedes aegypti (Diptera: Culicidae) under laboratory conditions: in preparation for a mass-rearing system', *Biologia*, 78(12), pp. 3387–3399. doi:10.1007/s11756-023-01469-5.

Coon, K.L. *et al.* (2014) 'Mosquitoes rely on their gut microbiota for development', *Molecular Ecology*, 23(11), pp. 2727–2739. doi:10.1111/mec.12771.

Coon, K.L., Brown, M.R. and Strand, M.R. (2016) 'Mosquitoes host communities of bacteria that are essential for development but vary greatly between local habitats', *Molecular Ecology*, 25(22), pp. 5806–5826. doi:10.1111/mec.13877.

Council, N.R. (2011) *Nutrient requirements of fish and shrimp*. Washington, DC: The national Academies Press, Washington, DC. doi:10.1007/s10499-011-9480-6.

Cummins, Vaun C *et al.* (2017) 'Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Aquaculture*, 473, pp. 337–344. doi:10.1016/j.aquaculture.2017.02.022.

Cummins, Vaun C. *et al.* (2017) 'Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Aquaculture*, 473, pp. 337–344. doi:10.1016/j.aquaculture.2017.02.022.

Cutrignelli, M.I. *et al.* (2018) 'Evaluation of an insect meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute: Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens', *Research in Veterinary Science*, 117, pp. 209–215. doi:10.1016/j.rvsc.2017.12.020.

Cuzon, G. and Aquacop (1998) 'Nutritional Review of *Penaeus stylirostris*', *Reviews in fisheries*

science, 6(1–2), pp. 129–141. doi:10.1080/10641269891314249.

Dabbou, S. *et al.* (2021) 'Modified black soldier fly larva fat in broiler diet: Effects on performance, carcass traits, blood parameters, histomorphological features and gut microbiota', *Animals*, 11(6). doi:10.3390/ani11061837.

Davis, D.A. and Gatlin, D.M. (1996) 'Reviews in Fisheries Science Dietary mineral requirements of fish and marine crustaceans Dietary Mineral Requirements of Fish and Marine Crustaceans', *Reviews in Fisheries Science*, 4(1), pp. 75–99.

Dawood, M.A.O. *et al.* (2022) 'Fruit processing by-products in the aquafeed industry: A feasible strategy for aquaculture sustainability', *Reviews in Aquaculture*, 14(4), pp. 1945–1965. doi:10.1111/raq.12680.

Dayalan, D. (2019) *The Origin of Silk Production, Archaeological survey of India*. Available at: https://www.academia.edu/38239669/The_Origin_of_Silk_Production_pdf.

DeFoliart, G.R. (1989) 'The Human Use of Insects as Food and as Animal Feed', *Bulletin of the Entomological Society of America*, 35(1), pp. 22–36. doi:10.1093/besa/35.1.22.

Dicke, M. (2018) 'Insects as feed and the Sustainable Development Goals', *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(3), pp. 147–156. doi:10.3920/JIFF2018.0003.

Diclaro, J.W. and Kaufman, P.E. (2009) 'Black soldier fly *Hermetia illucens* Linnaeus (Insecta : Diptera : Stratiomyidae)', *IFAS Extension*, p. 5. Available at: http://sfyl.ifas.ufl.edu/about/.

Diener, S., Studt Solano, N.M., *et al.* (2011) 'Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae', *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), pp. 357–363. doi:10.1007/s12649-011-9079-1.

Diener, S., Zurbrugg, C., *et al.* (2011) 'Black soldier fly larvae for organic waste treatment - prospects and constraints', *WasteSafe 2011 2nd International Conference on Solid Waste Management in Developing Countries 1315 February 2011 Khulna Bangladesh* [Preprint], (June 2014).

Diener, S., Zurbrügg, C. and Tockner, K. (2009) 'Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates', *Waste Management and Research*, 27(6), pp. 603–610. doi:10.1177/0734242X09103838.

DIREN (2020) *Code de l'environnement de la polynesie française*. Available at: https://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/ELECTRONIC/111276/138584/F908441022/FRA-111276.pdf.

DIREN (2024) *Schéma territorial de prévention et de gestion des déchets de la Polynésie française Quelle stratégie de prévention et de gestion Consultation publique 2024 Sommaire*.

Donkpegan, A.S.L. *et al.* (2022) 'Development of genomic resources in black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) via throughput DNA pool sequencing', in *Proceedings of the 12th World Congress on*

Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP), pp. 2524–2527. doi:10.3920/978-90-8686-940-4_610.

Dortmans, B. *et al.* (2017) *Black Soldier Fly Biowaste Processing*. doi:10.1117/12.464354.

Dortmans, B. *et al.* (2021) *Black Soldier Fly Biowaste Processing - 2nd Edition, Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO).*

DRM (2024) *Les filières de l'aquaculture en Polynésie française*. Available at: http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB 2.pdf.

Dzepe, D. *et al.* (2021) 'Feeding strategies for small-scale rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as organic waste recycler', *SN Applied Sciences*, 3(2), pp. 1–13. doi:10.1007/s42452-020-04039-5.

Ebenezer, A.E. (2019) *Establishment of laboratory colony of black soldier fly, Hermetia illucens L. (DIPTERA : STRATIOMYIDAE)*.

Egonyu, J.P. *et al.* (2021) 'Global overview of locusts as food, feed and other uses', *Global Food Security*, 31(September), p. 100574. doi:10.1016/j.gfs.2021.100574.

El-Dakar, M.A., Ramzy, R.R. and Ji, H. (2021) 'Influence of substrate inclusion of quail manure on the growth performance, body composition, fatty acid and amino acid profiles of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)', *Science of the Total Environment*, 772, p. 145528. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145528.

Emerenciano, M.G.C. *et al.* (2022) 'Intensification of Penaeid Shrimp Culture: An Applied Review of Advances in Production Systems, Nutrition and Breeding', *Animals*, 12(3). doi:10.3390/ani12030236.

Erickson, M.C. *et al.* (2004) 'Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly', *Journal of Food Protection*, 67(4), pp. 685–690. doi:10.4315/0362-028X-67.4.685.

Ernawan, B. *et al.* (2023) 'Evaluation of black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) larvae flour as larval diet for dengue vector mosquito Aedes aegypti (Diptera : Culicidae)', *Agriculture and natural resources*, 57, pp. 877–884.

Erwin, T.L. (2004) *The Biodiversity Question. How Many Species of Terrestrial Arthropods Are There?* Second Edi, *Forest Canopies: Second Edition*. Second Edi. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-012457553-0/50019-8.

Ewald, N. *et al.* (2020) 'Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) – Possibilities and limitations for modification through diet', *Waste Management*, 102, pp. 40–47. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.014.

Ezlin, N. *et al.* (2022) 'Comparison of Black Soldier Fly Larvae (BSFL) Growth and Frass Production Fed with Fermented Food Waste, Coconut Dregs and Cow Manure', *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, 71(4), pp. 1201–1209. Available at: http://philstat.org.ph.

FAO/IAEA (2020) *Guidelines for Mass-rearing of Aedes Mosquitoes*.

FAO (2008) 'Forest insects as food : humans bite back', in *Asia-Pacific resources and their potential for development*, p. 241. doi:10.1016/S0009-9260(03)00123-5.

FAO (2009) *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*, *Le point sur l'élevage*. Rome, Italie. doi:10.2307/1530623.

FAO (2011) *Global Food losses and food waste: Extent, causes and prevention, Rome, Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions*. Rome, Italy. doi:10.4337/9781788975391.

FAO (2013a) *Edible insects. Future prospects for food and feed security, Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

FAO (2013b) *Food wastage footprint : impacts on natural resources : summary report, Fao*. Rome, Italy. Available at: www.fao.org/publications.

FAO (2014) *Insectes comestibles: Perspectives pour la sécurité alimentaire et l 'alimentation animale, Fao*. Available at: http://www.fao.org/3/a-i3253f.pdf.

FAO (2016) *The state of world fisheries and aquaculture, Contributing to food security and nutrition for all*. Rome.

Faruck, M.O., Yusof, F. and Chowdhury, S. (2016) 'An overview of antifungal peptides derived from insect', *Peptides*, 80(June), pp. 80–88. doi:10.1016/j.peptides.2015.06.001.

Feng, S. (2018) '*Tenebrio molitor* L., entomophagy and processing into ready to use therapeutic ingredients: a review', *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(3), pp. 280–285. doi:10.15406/jnhfe.2018.08.00283.

Fisher, H.J. *et al.* (2020) 'Black soldier fly larvae meal as a protein source in low fish meal diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)', *Aquaculture*, 521, p. 734978. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.734978.

Focks, D.A. (1980) 'An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae).', *Journal of medical entomology*, 17(6), pp. 567–568. doi:10.1093/jmedent/17.6.567.

Folch, J., Lees, M. and Sloane Stanley, G.H. (1957) 'A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues.', *The Journal of biological chemistry*, 226(1), pp. 497–509. doi:10.1016/s0021-9258(18)64849-5.

Fossum, O. *et al.* (2009) 'Causes of mortality in laying hens in different housing systems in 2001 to

2004', *Acta Veterinaria Scandinavica*, 51(1), pp. 1–9. doi:10.1186/1751-0147-51-3.

Fox, J.M. *et al.* (2006) 'Current status of amino acid requirement research with marine penaeid shrimp', *Avances en Nutrición Acuícola*, 8, pp. 182–196.

Fox, J.M., Lawrence, A.L. and Li-Chan, E. (1995) 'Dietary requirement for lysine by juvenile Penaeus vannamei using intact and free amino acid sources', *Aquaculture*, 131(3–4), pp. 279–290. doi:10.1016/0044-8486(94)00348-R.

Furman, D.P., Young, R.D. and Catts, P.E. (1959) '*Hermetia illucens* (Linnaeus) as a Factor in the Natural Control of *Musca domestica* Linnaeus', *Journal of Economic Entomology*, 52(5), pp. 917–921. doi:10.1093/JEE/52.5.917.

Gabriel, D. and Tscharntke, T. (2007) 'Insect pollinated plants benefit from organic farming', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1–4), pp. 43–48. doi:10.1016/j.agee.2006.04.005.

Gao, Q. *et al.* (2017) 'Influences of chromium and cadmium on the development of black soldier fly larvae', *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), pp. 8637–8644. doi:10.1007/s11356-017-8550-3.

Gao, Z. *et al.* (2019) 'Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw', *Journal of Cleaner Production*, 230, pp. 974–980. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.074.

Gasco, L. *et al.* (2018) *Fishmeal Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-77941-6_1.

Gasco, L. *et al.* (2019) 'Animals fed insect-based diets: State-of-the-art on digestibility, performance and product quality', *Animals*, 9(4), pp. 1–32. doi:10.3390/ani9040170.

Ghaly, A.E. and Alkoaik, F.N. (2009) 'The yellow mealworm as a novel source of protein', *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 4(4), pp. 319–331. doi:10.3844/ajabssp.2009.319.331.

Giunti, G. *et al.* (2018) 'Male courtship behaviour and potential for female mate choice in the black soldier fly *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae)', *Entomologia Generalis*, 38(1), pp. 29–46. doi:10.1127/entomologia/2018/0657.

Gladun, V. V. (2019) 'The first record of *Hermetia illucens* (Diptera, stratiomyidae) from russia', *Nature Conservation Research*, 4(4), pp. 111–113. doi:10.24189/ncr.2019.063.

Glencross, B.D. *et al.* (2002) 'The effects of dietary lipid amount and fatty-acid composition on the digestibility of lipids by the prawn, *Penaeus monodon*', *Aquaculture*, 205(1–2), pp. 157–169. doi:10.1016/S0044-8486(01)00686-X.

Gobbi, P., Martínez-Sánchez, A. and Rojo, S. (2013) 'The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *European Journal of Entomology*,

110(3), pp. 461–468. doi:10.14411/eje.2013.061.

Gold, M. *et al.* (2020) 'Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates', *Waste Management*, 102, pp. 319–329. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.036.

Gollnow, F. *et al.* (2018) 'Property-level direct and indirect deforestation for soybean production in the Amazon region of Mato Grosso, Brazil', *Land Use Policy*, 78(July), pp. 377–385. doi:10.1016/j.landusepol.2018.07.010.

Gortari, M.C. and Hours, R.A. (2013) 'Biotechnological processes for chitin recovery out of crustacean waste: A mini-review', *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(3). doi:10.2225/vol16-issue3-fulltext-10.

Griffin, L. *et al.* (2023) 'Estimating mosquito abundance and population suppression in an incompatible insect technique study', *Journal of Applied Ecology*, 60(9), pp. 1803–1815. doi:10.1111/1365-2664.14465.

Hackewitz, V.L. (2018) *The house cricket Acheta domesticus, a potential source of protein for human consumption*, *Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences*. Available at: https://stud.epsilon.slu.se/13728/.

Hahn, T. *et al.* (2022) 'Purification of Chitin from Pupal Exuviae of the Black Soldier Fly', *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), pp. 1993–2008. doi:10.1007/s12649-021-01645-1.

Halloran, A. and Vantomme, P. (2013) 'La contribution des insectes à La sécurité alimentaire, aux moyens de subsistance et à l'environnement', *Fao* [Preprint]. Available at: http://www.fao.org/docrep/018/i3264f/i3264f00.pdf.

Harnden, L.M. and Tomberlin, J.K. (2016) 'Effects of temperature and diet on black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), development', *Forensic Science International*, 266, pp. 109–116. doi:10.1016/j.forsciint.2016.05.007.

Hasbenli, A. (2003) 'The first record of *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera , Stratiomyidae) from the Near East', *Studia dipterologica*, 10, pp. 181–185.

Hassan, A.O. *et al.* (2021) 'The Role of Common Housefly as a Mechanical Vector of Pathogenic Microorganisms', *AJOSR*, 3(1), pp. 261–269. Available at: www.achieversciencejournal.org.

Hem, S. and Fahmi, M.R. (2009) 'Production of live insect "mini-larvae" and use thereof for feeding aquarium fish, alevins of farm fish and pets'.

Henry, M. *et al.* (2015) 'Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future', *Animal Feed Science and Technology*, 203(1), pp. 1–22. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001.

Hervo, F. (2023) *Optimisation de l'utilisation digestive de calcium et du phospore chez la poule*

pondeuse - Vers un nouveau système d'évaluation des besoins par une approche de modélisation. Université Laval.

Heussler, C.D. *et al.* (2018) 'Influence of three artificial light sources on oviposition and half-life of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing', *PLoS ONE*, 13(5), pp. 40–45. doi:10.1371/journal.pone.0197896.

Hoc, B. *et al.* (2019) 'Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction', *PLoS ONE*, 14(4), pp. 1–13. doi:10.1371/journal.pone.0216160.

Hoc, B. *et al.* (2020) 'About lipid metabolism in *Hermetia illucens* (L. 1758): on the origin of fatty acids in prepupae', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–8. doi:10.1038/s41598-020-68784-8.

Hodar, A.R. *et al.* (2020) 'Fish meal and fish oil replacement for aqua feed formulation by using alternative sources: a review', *Journal of Experimental Zoology India*, 23(January), pp. 13–21. Available at: https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue9/PartI/10-8-322-305.pdf.

Hogsette, J.A. (1992) 'New diets for production of house flies and stable flies (Diptera: Muscidae) in the laboratory.', *Journal of economic entomology*, 85(6), pp. 2291–2294. doi:10.1093/jee/85.6.2291.

Holmes, L.A., Vanlaerhoven, S.L. and Tomberlin, J.K. (2012) ' Relative Humidity Effects on the Life History of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) ', *Environmental Entomology*, 41(4), pp. 971–978. doi:10.1603/en12054.

Van Huis, A. (2013) 'Potential of insects as food and feed in assuring food security', *Annual Review of Entomology*, 58, pp. 563–583. doi:10.1146/annurev-ento-120811-153704.

Van Huis, A. and Oonincx, D.G.A.B. (2017) 'The environmental sustainability of insects as food and feed. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5). doi:10.1007/s13593-017-0452-8.

Van Huis, A. and Tomberlin, J.K. (2017) *Insects as food and feed: from production to consumption*, *Insects as food and feed: from production to consumption*. Wageningen Academic Publishers. doi:10.3920/978-90-8686-849-0.

Hurtado-Ribeira, R. *et al.* (2023) 'The Interaction of Slaughtering, Drying, and Defatting Methods Differently Affects Oxidative Quality of the Fat from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae', *Insects*, 14(4), p. 17. doi:10.3390/insects14040368.

Hussein, M. *et al.* (2017) 'Sustainable production of housefly (*Musca domestica*) larvae as a protein-rich feed ingredient by utilizing cattle manure', *PLoS ONE*, 12(2), pp. 1–19. doi:10.1371/journal.pone.0171708.

Ibadurrohman, K. *et al.* (2020) 'The potential analysis of food waste management using bioconversion of the organic waste by the black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in the cafeteria of the faculty of engineering, universitas Indonesia', *Evergreen*, 7(1), pp. 61–66. doi:10.5109/2740946.

IEOM (2022) *RAPPORT ANNUEL ÉCONOMIQUE 2022 Polynésie française*.

IPIFF (2020) 'The insect sector milestones towards sustainable food supply chains', *The International Platform of Insects for Food and Feed*, (May), pp. 1–24.

IPIFF (2024) *Guide on good hygiene practices*.

IRAM/CANC/PTPU/CIRAD (2021) *Schéma directeur « Agriculture » en Polynésie française 2021 – 2030*.

Isibika, A. *et al.* (2023) 'Food industry waste - An opportunity for black soldier fly larvae protein production in Tanzania', *Science of the Total Environment*, 858(August 2022), p. 159985. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159985.

Janssen, R.H. *et al.* (2017) 'Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Three Edible Insects : *Tenebrio molitor, Alphitobius diaperinus* and *Hermetia illucens*', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(11), pp. 2275–2278. doi:10.1021/acs.jafc.7b00471.

Jones, B.M., Tomberlin, J.K. and Stull, V. (2019) 'Impact of Larval Competition on Life-History Traits of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Annals of the Entomological Society of America*, 112(6), pp. 505–510. doi:10.1093/aesa/saz014.

Joyner, C., Mills, M.K. and Nayduch, D. (2013) '*Pseudomonas aeruginosa* in *Musca domestica* L.: Temporospatial examination of bacteria population dynamics and house fly antimicrobial responses', *PLoS ONE*, 8(11). doi:10.1371/journal.pone.0079224.

Józefiak, A. *et al.* (2018) 'Full-fat insect meals as feed additive – the effect on broiler chicken growth performance and gastrointestinal tract microbiota', *Journal of Animal and Feed Sciences*, 27(2), pp. 131–139. doi:10.22358/jafs/91967/2018.

Julita, U., Fatimah, S., *et al.* (2020) 'Bioconversion of Food Waste by Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* larvae (Diptera: Stratiomyidae L.) for Alternative Animal Feed Stock', in. doi:10.4108/eai.11-7-2019.2297613.

Julita, U., Lusianti F, L., *et al.* (2020) 'Mating Success and Reproductive Behavior of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) in Tropics', *Journal of Entomology*, 17(3), pp. 117–127. doi:10.3923/je.2020.117.127.

Kaku, H. *et al.* (2006) 'Plant cells recognize chitin fragments for defense signaling through a plasma membrane receptor', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(29), pp. 11086–11091. doi:10.1073/pnas.0508882103.

Kappally, S., Shirwaikar, Arun and Shirwaikar, Annie (2015) 'Coconut oil - A review of potential applications', *Hygeia - Journal for drugs and mecicines*, (November), pp. 34–41. doi:10.15254/H.J.D.Med.7.2015.149.

Karthikeyani, T. *et al.* (2024) 'The Efficiency of Black Soldier Fly Larvae with Vegetable, Fruit and Food Waste as Biological Tool for Sustainable Management of Organic Waste', *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), pp. 441–448. doi:10.9734/ijecc/2024/v14i23959.

Kawasaki, K. *et al.* (2019) 'Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and pre-pupae raised on household organic waste, as potential ingredients for poultry feed', *Animals*, 9(3). doi:10.3390/ani9030098.

Kawasaki, K. *et al.* (2020) 'Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)', *Sustainability (Switzerland)*, 12, p. 14. doi:10.3390/SU12124920.

Kaya, C. *et al.* (2021) 'Global population genetic structure and demographic trajectories of the black soldier fly, *Hermetia illucens*', *BMC Biology*, 19(1), pp. 1–22. doi:10.1186/s12915-021-01029-w.

Kevan, P.G., Clark, E.A. and Thomas, V.G. (1990) 'Insect pollinators and sustainable agriculture', *American Journal of Alternative Agriculture*, 5(1), pp. 13–22. doi:10.1017/S0889189300003179.

Khosropanah, M.H. *et al.* (2022) 'Biomedical applications of silkworm (*Bombyx mori*) proteins in regenerative medicine (a narrative review)', *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 16(2), pp. 91–109. doi:10.1002/term.3267.

Kim, B. *et al.* (2020) 'Evaluation of black soldier fly larvae oil as a dietary fat source in broiler chicken diets', *Journal of Animal Science and Technology*, 62(2), pp. 187–197. doi:10.5187/jast.2020.62.2.187.

Kim, J.-G. *et al.* (2008) 'Ecology of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratmyidae) in Korea', *Korean journal of applied entomology*, 47(4), pp. 337–343. doi:10.5656/ksae.2008.47.4.337.

Kim, S.K., Weaver, C.M. and Choi, M.K. (2016) 'Proximate composition and mineral content of five edible insects consumed in Korea', *CYTA - Journal of Food*, 15(1), pp. 143–146. doi:10.1080/19476337.2016.1223172.

Kim, S.W. *et al.* (2019) 'Removal of fat from crushed black soldier fly larvae by carbon dioxide supercritical extraction', *Journal of Animal and Feed Sciences*, 28(1), pp. 83–88. doi:10.22358/jafs/105132/2019.

Kim, W. *et al.* (2011) 'Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), pp. 11–14. doi:10.1016/j.aspen.2010.11.003.

Kothri, M. *et al.* (2020) 'Microbial sources of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) and the prospect of organic residues and wastes as growth media for PUFA-producing microorganisms', *FEMS Microbiology Letters*, 367(5), pp. 1–11. doi:10.1093/femsle/fnaa028.

Kozanayi, W. and Frost, P. (2002) 'Marketing of Mopane Worm in Southern Zimbabwe', *Processing*,

(January), pp. 1–31.

Kumar, K. *et al.* (2017) 'Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds', *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1). doi:10.1186/s40643-017-0148-6.

Lacey Rachael (2016) *Crickets as food : The perceptions of and barriers to entomophagy and the potential for widespread incorporation of cricket flour in American diets*.

Lalander, C. *et al.* (2013) 'Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) - From a hygiene aspect', *Science of the Total Environment*, 458–460(May), pp. 312–318. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.033.

Lalander, C. *et al.* (2019) 'Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*)', *Journal of Cleaner Production*, 208, pp. 211–219. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.017.

Larouche, J. *et al.* (2019) 'Effects of killing methods on lipid oxidation, colour and microbial load of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae', *Animals*, 9(4), pp. 1–19. doi:10.3390/ani9040182.

Lees, R.S. *et al.* (2015) 'Back to the future: the sterile insect technique against mosquito disease vectors', *Current Opinion in Insect Science*, 10, pp. 156–162. doi:10.1016/j.cois.2015.05.011.

Leni, G., Caligiani, A. and Sforza, S. (2019) 'Killing method affects the browning and the quality of the protein fraction of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) prepupae: a metabolomics and proteomic insight', *Food Research International*, 115(May 2018), pp. 116–125. doi:10.1016/j.foodres.2018.08.021.

Li, L., Wang, Y. and Wang, J. (2016) 'Intra-puparial development and age estimation of forensically important *Hermetia illucens* (L.)', *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(1), pp. 233–237. doi:10.1016/j.aspen.2016.01.006.

Li, Q. *et al.* (2011) 'From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible', *Fuel*, 90(4), pp. 1545–1548. doi:10.1016/j.fuel.2010.11.016.

Liland, N.S. *et al.* (2017) 'Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media', *PLoS ONE*, 12(8), p. 23. doi:10.1371/journal.pone.0183188.

Lindh, J.M., Borg-Karlson, A.K. and Faye, I. (2008) 'Transstadial and horizontal transfer of bacteria within a colony of *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae) and oviposition response to bacteria-containing water', *Acta Tropica*, 107(3), pp. 242–250. doi:10.1016/j.actatropica.2008.06.008.

Liu, Q. *et al.* (2008) 'Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae Reduce *Escherichia coli* in Dairy Manure', *Environmental Entomology*, 37(6), pp. 1525–1530. doi:10.1603/0046-225x-37.6.1525.

Liu, T. *et al.* (2020) 'Effects of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) on food waste and

sewage sludge composting', *Journal of Environmental Management*, 256(December 2019), p. 109967. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109967.

Liu, T. *et al.* (2021) 'Effects of replacing fish meal with soybean meal on growth performance, feed utilization and physiological status of juvenile redlip mullet Liza haematocheila', *Aquaculture Reports*, 20, p. 100756. doi:10.1016/j.aqrep.2021.100756.

Liu, X. *et al.* (2017) 'Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly', *PLoS ONE*, 12(8), pp. 1–21. doi:10.1371/journal.pone.0182601.

Liu, Z. *et al.* (2021) 'Reproduction of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Under Different Adult Densities and Light Regimes', *Journal of Economic Entomology*, 115(1), pp. 37–45. doi:10.1093/jee/toab225.

Louzada, J.N.C. and Nichols, E.S. (2012) 'Detritivorous Insects', in *Insect Bioecology and Nutrition for Integrated Pest Management*, pp. 397–416. doi:10.1201/b11713-24.

Lucas, P.-D. (2012) 'Les coccinelles de la Martinique : une ressource biologique méconnue pour la protection durable des cultures', in *ACOREP-France : Coléoptères des Petites Antilles. Tome 1*, pp. 86–94.

Lupi, D. *et al.* (2019) 'Feeding in the adult of *Hermetia illucens* (Diptera Stratiomyidae): Reality or fiction?', *Journal of Entomological and Acarological Research*, 51(1). doi:10.4081/jear.2019.8046.

Macavei, L.I. *et al.* (2020) 'Optimization of *Hermetia illucens* (L.) egg laying under different nutrition and light conditions', *PLoS ONE*, 15(4), pp. 1–18. doi:10.1371/journal.pone.0232144.

Magalhães, R. *et al.* (2017) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*)', *Aquaculture*, 476, pp. 79–85. doi:10.1016/j.aquaculture.2017.04.021.

Makkar, H.P.S. *et al.* (2014) 'State-of-the-art on use of insects as animal feed', *Animal Feed Science and Technology*, 197, pp. 1–33. doi:10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008.

Makri, A. *et al.* (2011) 'Lipid synthesized by micro-algae grown in laboratory- and industrial-scale bioreactors', *Engineering in Life Sciences*, 11(1), pp. 52–58. doi:10.1002/elsc.201000086.

Malawey, A.S. *et al.* (2019) 'Adult Reproductive Tract Morphology and Spermatogenesis in the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Annals of the Entomological Society of America*, 112(6), pp. 576–586. doi:10.1093/aesa/saz045.

Malawey, A.S. *et al.* (2021) 'Interaction of Age and Temperature on Heat Shock Protein Expression, Sperm Count, and Sperm Viability of the Adult Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(1), pp. 21–33. doi:10.3920/JIFF2020.0017.

Mamai, W. *et al.* (2019) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae powder as a larval diet ingredient

for mass-rearing Aedes mosquitoes', *Parasite*, 26. doi:10.1051/parasite/2019059.

Mannucci, A. *et al.* (2024) 'From Food Waste to Functional Biopolymers : Characterization of Chitin and Chitosan Produced from Prepupae of Black Soldier Fly Reared with Different Food Waste-Based Diets', *Foods*, 13(278), p. 14.

Maquart, P.-O., Richard, D. and Willems, J. (2020) 'First record of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, in the Western regions of France (Vendée, Loire-Atlantique, Ille-et-Vilaine) with notes on its worldwide repartition (Diptera, Stratiomyidae)', *Bulletin de la Société entomologique de France*, 125(1), pp. 13–18. doi:10.32475/bsef_2104.

De Marco, M. *et al.* (2015) 'Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy', *Animal Feed Science and Technology*, 209(January 2016), pp. 211–218. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.08.006.

Martin, G.P. (1995) 'Applications and Environmental Aspects of Chitin and Chitosan', *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 32(4), pp. 629–640.

Masson, M. (Chambre d'agriculture du P. (2018) *Les auxiliaires des cultures. Les connaitre et les favoriser*. doi:10.3726/978-3-0352-6383-1/25.

Masuda, T. and Goldsmith, P.D. (2009) 'World soybean production: Area harvested, yield, and long-term projections', *International Food and Agribusiness Management Review*, 12(4), pp. 143–162. doi:10.22004/ag.econ.92573.

Matthäus, B. *et al.* (2019) 'Renewable Resources from Insects: Exploitation, Properties, and Refining of Fat Obtained by Cold-Pressing from *Hermetia illucens* (Black Soldier Fly) Larvae', *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121(7), pp. 1–11. doi:10.1002/ejlt.201800376.

Mazza, L. *et al.* (2020) 'Management of chicken manure using black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae assisted by companion bacteria', *Waste Management*, 102, pp. 312–318. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.055.

Mehring, A.L. and Titus, H.W. (1964) 'The Effects of Low Levels of Calcium in the Diet of Laying Chickens', *Poultry Science*, 43(6), pp. 1405–1414. doi:10.3382/ps.0431405.

Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A.J. and Salinas-Castro, A. (2019) 'Edible Insects Processing: Traditional and Innovative Technologies', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 00, pp. 1–26. doi:10.1111/1541-4337.12463.

Meneguz, M. *et al.* (2018) 'Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), pp. 5776–5784. doi:10.1002/jsfa.9127.

Mercer, D.R., Schoergendorfer, A. and Vandyke, R. (2008) 'Sexual differences in larval molting rates in a protandrous mosquito (Diptera: Culicidae) species, Aedes sierrensis', *Journal of Medical Entomology*, 45(5), pp. 861–866. doi:10.1603/0022-2585(2008)45[861:SDILMR]2.0.CO;2.

Millamena, O.M. *et al.* (1998) 'Requirements of juvenile marine shrimp, *Penaeus monodon* (Fabricius) for lysine and arginine', *Aquaculture*, 164(1–4), pp. 95–104. doi:10.1016/S0044-8486(98)00179-3.

Millamena, O.M. *et al.* (1999) 'Quantitative dietary requirements of postlarval tiger shrimp, *Penaeus monodon*, for histidine, isoleucine, leucine, phenylalanine and tryptophan', *Aquaculture*, 179(1–4), pp. 169–179. doi:10.1016/S0044-8486(99)00160-X.

Miller, B.F., Teotia, J.S. and Thatcher, T.O. (1974) 'Digestion of poultry manure by *Musca domestica*', *British Poultry Science*, 15(2), pp. 231–234. doi:10.1080/00071667408416100.

Mirabella, N., Castellani, V. and Sala, S. (2014) 'Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review', *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 28–41. doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.051.

Miranda, C.D., Cammack, J.A. and Tomberlin, K. (2019) 'Life-History Traits of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera : Stratiomyidae), Reared on Three Manure Types', *Animals*, 9, p. 281.

Mirwandhono, E., Nasution, M.I.A. and Yunilas, Y. (2022) 'Extraction of chitin and chitosan black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupa phase on characterization and yield Extraction of chitin and chitosan black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupa phase on characterization and yield', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1114(1), p. 012019. doi:10.1088/1755-1315/1114/1/012019.

Mohd-Noor, S.N. *et al.* (2017) 'Optimization of self-fermented period of waste coconut endosperm destined to feed black soldier fly larvae in enhancing the lipid and protein yields', *Renewable Energy*, 111, pp. 646–654. doi:10.1016/j.renene.2017.04.067.

Mohd Yusoff, N.A., Hai, C.T. and Komilus, C.F. (2022) 'Proximate Composition of Larvae, Prepupae and Adult in Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*)', *Journal Of Agrobiotechnology*, 13(1S), pp. 109–117. doi:10.37231/jab.2022.13.1s.320.

Moretta, A. *et al.* (2020) 'A bioinformatic study of antimicrobial peptides identified in the Black Soldier Fly (BSF) *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–14. doi:10.1038/s41598-020-74017-9.

Motte, C. *et al.* (2019) 'Replacing fish meal with defatted insect meal (Yellow mealworm *Tenebrio molitor*) improves the growth and immunity of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Animals*, 9(5). doi:10.3390/ani9050258.

Moula, N. *et al.* (2018) 'Effects of dietary black soldier fly larvae on performance of broilers mediated

or not through changes in microbiota', *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(1), pp. 31–42. doi:10.3920/JIFF2017.0011.

Mourtzinis, S. *et al.* (2018) 'Characterizing soybean meal value variation across the united states: A swine case study', *Agronomy Journal*, 110(6), pp. 2343–2349. doi:10.2134/agronj2017.11.0624.

Mukherjee, S. and Mukherjee, A. (2022) 'Small-scale breeding and harvesting of house cricket Acheta domesticus', *Acta Entomology and Zoology*, 3(2), pp. 112–115. doi:10.33545/27080013.2022.v3.i2b.82.

Munsch-Masset, P. *et al.* (2023) 'The reproductive tract of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) is highly differentiated and suggests adaptations to sexual selection', *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 171(11), pp. 857–866. doi:10.1111/eea.13358.

Mutafela, R.N. (2015) *High Value Organic Waste Treatment via Black Soldier Fly Bioconversion : Onsite Pilot Study*.

Mwaniki, Z. *et al.* (2020) 'Complete replacement of soybean meal with defatted black soldier fly larvae meal in Shaver White hens feeding program (28–43 wks of age): impact on egg production, egg quality, organ weight, and apparent retention of components', *Poultry Science*, 99(2), pp. 959–965. doi:10.1016/j.psj.2019.10.032.

Nakamura, S. *et al.* (2016) 'Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing', *Applied Entomology and Zoology*, 51(1), pp. 161–166. doi:10.1007/s13355-015-0376-1.

Nesara, K.M. and Anand, P.P. (2018) 'Nutritional requirement of fresh water prawn and shrimps: A review', *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(4), pp. 1526–1532.

Newton, G.L. *et al.* (2004) 'The Black Soldier Fly *Hermetia illucens* as a manure management/ resource recovery tool', pp. 0–5.

Newton, L., Sheppard, C., *et al.* (2005) 'Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure', *Journal Korean Entomology and Applied Science*, 36(12), p. 17.

Newton, L., Craig, S., *et al.* (2005) 'Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure', *Journal Korean Entomology and Applied Science*, 36(12), p. 17 pp.

Ng, W.K. (2001) 'Potential of mealworm (Tenebrio molifor) as an alternative protein source in practical diets for African catfish, *Clarias gariepinus*', *Aquaculture Research*, 32(SUPPL. 1), pp. 273–280. doi:10.1046/j.1355-557x.2001.00024.x.

Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K. and Vanlaerhoven, S. (2013) 'Influence of Resources on *Hermetia*

illucens (Diptera: Stratiomyidae) Larval Development', *Journal of Medical Entomology*, 50(4), pp. 898–906. doi:10.1603/me12260.

Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K. and Vanlaerhoven, S. (2015) 'Ability of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae to Recycle Food Waste', *Environmental Entomology*, 44(2), pp. 406–410. doi:10.1093/ee/nvv002.

Nogales-Mérida, S. *et al.* (2018) 'Insect meals in fish nutrition', *Reviews in Aquaculture*, 11(4), pp. 1080–1103. doi:10.1111/raq.12281.

Nordquist, R.E. *et al.* (2011) 'Laying hens selected for low mortality: Behaviour in tests of fearfulness, anxiety and cognition', *Applied Animal Behaviour Science*, 131(3–4), pp. 110–122. doi:10.1016/j.applanim.2011.02.008.

Novriadi, R. *et al.* (2024) 'Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as an Alternative to Marine Ingredients Elicits Superior Growth Performance and Resistance to Vibrio harveyi Infection for Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(1). doi:10.4194/TRJFAS24343.

Nowak, V. *et al.* (2016) 'Review of food composition data for edible insects', *Food Chemistry*, 193, pp. 39–46. doi:10.1016/j.foodchem.2014.10.114.

Nunes, A.J.P. *et al.* (2014) 'Practical supplementation of shrimp and fish feeds with crystalline amino acids', *Aquaculture*, 431, pp. 20–27. doi:10.1016/j.aquaculture.2014.04.003.

Nyakeri, E.M. *et al.* (2017) 'An open system for farming black soldier fly larvae as a source of proteins for smallscale poultry and fish production', *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(1), pp. 51–56. doi:10.3920/JIFF2016.0030.

Nyakeri, E.M. *et al.* (2019) 'An optimal feeding strategy for black soldier fly larvae biomass production and faecal sludge reduction', *Journal of Insects as Food and Feed*, 5(3), pp. 201–213. doi:10.3920/JIFF2018.0017.

Nyffeler, M. and Benz, G. (1987) 'Spiders in natural pest control : A review', *Journal of Applied Entomology*, 103, pp. 321–339.

Ogawa, T. *et al.* (2020) 'Bioconversion From Docosahexaenoic Acid to Eicosapentaenoic Acid in the Marine Bacterium Shewanella livingstonensis Ac10', *Frontiers in Microbiology*, 11(May), pp. 1–12. doi:10.3389/fmicb.2020.01104.

Ogunji, J.O. *et al.* (2006) 'Housefly maggot meal (magmeal): an emerging substitute of fishmeal in Tilapia diets', *Conference on International Agricultural Research for Development*, (1981), p. 7.

Oliveira, F. *et al.* (2015) 'Assessment of Diptera : Stratiomyidae , genus *Hermetia illucens* (L ., 1758) using electron microscopy', *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(5), pp. 147–152.

Oliver, L. *et al.* (2020) 'Producing omega-3 polyunsaturated fatty acids: A review of sustainable sources and future trends for the EPA and DHA market', *Resources*, 9(12), pp. 1–15. doi:10.3390/resources9120148.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2010) 'An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption', *PLoS ONE*, 5(12), pp. 1–7. doi:10.1371/journal.pone.0014445.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2016) 'Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black soldier fly (*Hermetia illucens*) informing the design of LED-based illumination to enhance indoor reproduction', *Journal of Insect Physiology*, 95, pp. 133–139. doi:10.1016/j.jinsphys.2016.10.006.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2020) 'Dietary enrichment of edible insects with omega 3 fatty acids', *Insect Science*, 27(3), pp. 500–509. doi:10.1111/1744-7917.12669.

Oonincx, D.G.A.B. and de Boer, I.J.M. (2012) 'Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment', *PLoS ONE*, 7(12), pp. 1–5. doi:10.1371/journal.pone.0051145.

Opare, L.O. *et al.* (2023) 'High larval densities and high temperatures lead to a stronger immune response in the black soldier fly', *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(9), pp. 1177–1186. doi:10.3920/JIFF2022.0109.

Pal, P. and Roy, S. (2014) 'Edible Insects: Future of Human Food - A Review', *International Letters of Natural Sciences*, 26, pp. 1–11. doi:10.56431/p-kt2z1i.

Pamintuan, K.R.S., Agustin, H.A.T. and Deocareza, E.D. (2020) 'Growth and Nutritional Performance of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Reared in Fermented Rice Straw and Duck Manure', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1), p. 8. doi:10.1088/1755-1315/505/1/012030.

Park, K.-H. *et al.* (2010) 'Seasonal Pupation, Adult Emergence and Mating of Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) in Artificial Rearing System', *International Journal of Industrial Entomology*, 21(2), pp. 189–191.

Park, K. *et al.* (2016) 'Effect of adult population density on egg production in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Industrial Entomology*, 33, pp. 92–95. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Pastor, B. *et al.* (2015) 'Conversion of organic wastes into fly larval biomass: Bottlenecks and challenges', *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(3), pp. 179–193. doi:10.3920/JIFF2014.0024.

Patterson, P.H. *et al.* (2021) 'The impact of dietary Black Soldier Fly larvae oil and meal on laying hen performance and egg quality', *Poultry Science*, 100(8), p. 101272. doi:10.1016/j.psj.2021.101272.

Paul, A. *et al.* (2016) 'Grasshoppers as a food source ? A review', *Biotechology, Agronomy, Society and Environnement*, 20(1), p. 16.

Penido, W.D. *et al.* (2023) 'Potential use of the Black Soldier Fly (BSF) in Poultry Production', in *A LOOK AT DEVELOPMENT*. doi:10.56238/alookdevelopv1-194.

Philibert, T., Lee, B.H. and Fabien, N. (2017) 'Current Status and New Perspectives on Chitin and Chitosan as Functional Biopolymers', *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181(4), pp. 1314–1337. doi:10.1007/s12010-016-2286-2.

Philippe, F.X. *et al.* (2020) 'Comparison of egg production, quality and composition in three production systems for laying hens', *Livestock Science*, 232(December 2019), p. 103917. doi:10.1016/j.livsci.2020.103917.

Piedad-Pascual, F. (1989) 'Mineral requirements of Penaeids', in *Actes de colloques Ifremer, Tahiti, French Polynesia, 20 Feb - 4 Mar 1989, n°9, chap. 30*, pp. 309–218.

Pope, M. *et al.* (2023) 'Quantifying the value of soybean meal in poultry and swine diets', *Journal of Applied Poultry Research*, 32(2), p. 100337. doi:10.1016/j.japr.2023.100337.

Porter, S.D. *et al.* (2016) 'A half-century of production-phase greenhouse gas emissions from food loss & waste in the global food supply chain', *Science of the Total Environment*, 571, pp. 721–729. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.041.

Poulet, S. and Lazard, J. (2022) 'Encyclopédie : Question sur … La pêche minotière', (Académie d'Agriculture de France), pp. 1–4.

Premalatha, M. *et al.* (2011) 'Energy-efficient food production to reduce global warming and ecodegradation: The use of edible insects', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), pp. 4357–4360. doi:10.1016/j.rser.2011.07.115.

Putra, R.E. *et al.* (2021) 'Omega-3 Content Of Black Soldier Fly Prepupa (*Hermetia illucens*) Fed With Marine Fish Offal And Tofu Dreg', *Biotropia*, 28(1), pp. 64–73. doi:10.11598/btb.2021.28.1.1082.

van Raamsdonk, L.W.D., van der Fels-Klerx, H.J. and de Jong, J. (2017) 'New feed ingredients: the insect opportunity', *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 34(8), pp. 1384–1397. doi:10.1080/19440049.2017.1306883.

Rageau, J. (1956) 'Les Arthropodes Parasites De L' Homme Et Des Animaux Domestiques Dans Les Territoire Francais Du Pacifique'.

Rahmi, F.A., Yamin, M. and Sasaerila, Y. (2020) 'Effect of Different Organic Wastes on the Growth of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae', 8(Iccesi 2019), pp. 113–116. doi:10.2991/absr.k.200513.019.

Raimondi, S. *et al.* (2020) 'Effect of Rearing Temperature on Growth and Microbiota Composition of

Hermetia illucens', *Microorganisms*, 8(6), p. 902. doi:10.3390/microorganisms8060902.

Rakos-elorduy, J. and Pino, J.K. (1990) 'Variation de la valeur nutritivede *Tenebrio molitor* L. élevé sur differents substrats', in *International working conference on stored-product protection*, pp. 201–210.

Ramos-Bueno, R.P. *et al.* (2016) 'Fatty acid profiles and cholesterol content of seven insect species assessed by several extraction systems', *European Food Research and Technology*, 242(9), pp. 1471–1477. doi:10.1007/s00217-016-2647-7.

Ramos-Elorduy, J. *et al.* (2002) 'Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens.', *Journal of economic entomology*, 95(1), pp. 214–220. doi:10.1603/0022-0493-95.1.214.

Ramos-Elorduy, J., Pino Moreno, J.M. and Martínez Camacho, V.H. (2009) 'Edible aquatic Coleoptera of the world with an emphasis on Mexico', *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 5(11), p. 13. doi:10.1186/1746-4269-5-11.

Raubenheimer, D. and Rothman, J.M. (2013) 'Nutritional ecology of entomophagy in humans and other primates', *Annual Review of Entomology*, 58, pp. 141–160. doi:10.1146/annurev-ento-120710-100713.

Rawski, M. *et al.* (2021) 'Black soldier fly full-fat larvae meal is more profitable than fish meal and fish oil in siberian sturgeon farming: The effects on aquaculture sustainability, economy and fish GIT development', *Animals*, 11(3), pp. 1–14. doi:10.3390/ani11030604.

Rehman, K. ur *et al.* (2017) 'Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.)', *Journal of Cleaner Production*, 154, pp. 366–373. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.019.

Renna, M. *et al.* (2017) 'Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets', *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), pp. 1–13. doi:10.1186/s40104-017-0191-3.

Ribeiro, N., Costa, R. and Ameixa, O.M.C.C. (2022) 'The Influence of Non-Optimal Rearing Conditions and Substrates on the Performance of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*)', *Insects*, 13(7). doi:10.3390/insects13070639.

Richard, L. *et al.* (2010) 'Maintenance and growth requirements for nitrogen, lysine and methionine and their utilisation efficiencies in juvenile black tiger shrimp, *Penaeus monodon*, using a factorial approach', *British Journal of Nutrition*, 103(7), pp. 984–995. doi:10.1017/S0007114509992844.

Rodrigues, D.P. *et al.* (2022) 'Improving the Lipid Profile of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae for Marine Aquafeeds: Current State of Knowledge', *Sustainability*, 14(11), p. 6472. doi:10.3390/su14116472.

Rumpold, B.A. and Schlüter, O.K. (2013a) 'Nutritional composition and safety aspects of edible

insects', *Molecular Nutrition and Food Research*, 57(5), pp. 802–823. doi:10.1002/mnfr.201200735.

Rumpold, B.A. and Schlüter, O.K. (2013b) 'Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production', *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, pp. 1–11. doi:10.1016/j.ifset.2012.11.005.

Rushikesh Jadhav, C. *et al.* (2020) 'Soldier Fly/Larvae: A Weapon for Solid Waste Management and Alternative Feed for Poultry and Aquatic Industries International Journal of Life science and Pharma Research Black Soldier Fly/Larvae: A Weapon for Solid Waste Management and Alternative Feed fo', *Int. J. Life Sci. Pharma Res*, 10(5), pp. 113–120. doi:10.22376/ijpbs/lpr.2020.10.5.L113-120.

Saadoun, H.J. *et al.* (2020) 'Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, Stratiomyidae) reared on by-products from different food chains', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(9), pp. 3648–3657. doi:10.1002/jsfa.10397.

Sachs, J.D. (2009) 'Rethinking macroeconomics', *Capitalism and Society*, 4(3), pp. 14–16. doi:10.2202/1932-0213.1065.

Sales, K. *et al.* (2018) 'Experimental heatwaves compromise sperm function and cause transgenerational damage in a model insect', *Nature Communications*, 9(1), pp. 1–11. doi:10.1038/s41467-018-07273-z.

Samayoa, A.C. and Hwang, S.Y. (2018) 'Degradation capacity and diapause effects on oviposition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Economic Entomology*, 111(4), pp. 1682–1690. doi:10.1093/jee/toy078.

Sánchez-Muros, M.J., Barroso, F.G. and Manzano-Agugliaro, F. (2014) 'Insect meal as renewable source of food for animal feeding: A review', *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 16–27. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.068.

Schiavone, A., De Marco, M., *et al.* (2017) 'Nutritional value of a partially defatted and a highly defatted black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) meal for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility', *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), pp. 1–9. doi:10.1186/s40104-017-0181-5.

Schiavone, A., Cullere, M., *et al.* (2017) 'Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: Effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality', *Italian Journal of Animal Science*, 16(1), pp. 93–100. doi:10.1080/1828051X.2016.1249968.

Schmitt, E. and de Vries, W. (2020) 'Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction', *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, p. 100335. doi:10.1016/j.cogsc.2020.03.005.

Schneider, J.C. (2020) 'Effects of light intensity on mating of the black soldier fly (*Hermetia illucens*,

Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(2), pp. 111–119. doi:10.3920/jiff2019.0003.

Schönfeldt, H.C. and Hall, N.G. (2012) 'Dietary protein quality and malnutrition in Africa', *British Journal of Nutrition*, 108(SUPPL. 2). doi:10.1017/S0007114512002553.

Schuchardt, J.P. *et al.* (2016) 'Effects of docosahexaenoic acid supplementation on PUFA levels in red blood cells and plasma', *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 115(August), pp. 12–23. doi:10.1016/j.plefa.2016.10.005.

SDR (2001) *L 'élevage des poules pondeuses*.

Secci, G. *et al.* (2018) 'Quality of eggs from Lohmann Brown Classic laying hens fed black soldier fly meal as substitute for soya bean', *Animal*, 12(10), pp. 2191–2197. doi:10.1017/S1751731117003603.

Sharma, A. *et al.* (2022) 'Silkworm as an edible insect: A review', *~ 1667 ~ The Pharma Innovation Journal*, 11(2), pp. 1667–1674. Available at: http://www.thepharmajournal.com.

Sheileja, T. *et al.* (2022) 'Nutritive value of bamboo worm *Omphisa fuscidentalis* (Lepidoptera: Crambidae): An edible insect as protein rich food', *~ 2229 ~ The Pharma Innovation Journal*, 11(7), pp. 2229–2233. Available at: www.thepharmajournal.com.

Shelomi, M. (2020) 'Nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*)', in *African Edible Insects As Alternative Source of Food, Oil, Protein and Bioactive Components*, pp. 195–212. doi:10.1007/978-3-030-32952-5_13.

Sheppard, D.C. *et al.* (2002) 'Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Medical Entomology*, 39(4), pp. 695–698. doi:10.1603/0022-2585-39.4.695.

Sheppard, D.C. and Newton, G.L. (1994) 'A value added manure management system using the black sldier fly', *Bioresource Technology*, 50, pp. 275–279.

Shumo, M., Khamis, F.M., *et al.* (2019) 'Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya', *Animals*, 9(3). doi:10.3390/ani9030079.

Shumo, M., Osuga, I.M., *et al.* (2019) 'The nutritive value of black soldier fly larvae reared on common organic waste streams in Kenya', *Scientific Reports*, 9(1), pp. 1–13. doi:10.1038/s41598-019-46603-z.

Siddiqui, S.A. *et al.* (2021) 'The potential of chitin and chitosan from dead black solier fly (BSF) (*Hermetia illucens*) for biodegradable packaging material - A critical review', *Pharmacological Research*, p. 105593. doi:10.1016/j.psep.2024.06.108.

Siddiqui, S.A. *et al.* (2022) 'Manipulation of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* ; Diptera: Stratiomyidae) fatty acid profile through the substrate', *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(8), pp. 1–20. doi:10.3920/jiff2021.0162.

Silva, L.F.P., Brown, G.W. and James, P.J. (2020) 'Nutritional Value of Black Soldier Fly Grown on Abattoir Waste', *Proceedings*, 36(1), p. 216. doi:10.3390/proceedings2019036216.

da Silva, R.F.B. *et al.* (2023) 'Complex relationships between soybean trade destination and tropical deforestation', *Scientific reports*, 13(1), p. 11254. doi:10.1038/s41598-023-38405-1.

Singh, A. *et al.* (2022) 'Effect of Different Organic Substrates on Selected Life History Traits and Nutritional Composition of Black Soldier fly (*Hermetia illucens*)', *Environmental Entomology*, 51(1), pp. 182–189. doi:10.1093/ee/nvab135.

De Smet, J. *et al.* (2018) 'Microbial Community Dynamics during Rearing of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) and Impact on Exploitation Potential', *Applied and Environmental Microbiology*, 84(9), pp. 1–17. doi:https://doi.org/10.1128/AEM .02722-17.

Soetemans, L., Uyttebroek, M. and Bastiaens, L. (2020) 'Characteristics of chitin extracted from black soldier fly in different life stages', *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, pp. 3206–3214. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.11.041.

Sogari, G. *et al.* (2019) 'The potential role of insects as feed: A multi-perspective review', *Animals*, 9(4), pp. 1–15. doi:10.3390/ani9040119.

Soulé, M. *et al.* (1986) 'The millenium ark: How long a voyage, how many staterooms, how many passengers?', *Zoo Biology*, 5(2), pp. 101–113. doi:10.1002/zoo.1430050205.

Sprangers, T. *et al.* (2017) 'Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrate', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, (97), pp. 2594–2600.

Sripontan, Y. *et al.* (2017) 'Egg-trapping of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) with various wastes and the effects of environmental factors on egg-laying Nesting ecology of termites View project Foraging ecology of termites View project', *Khon Kaen Agriculture Journal*, 45(1), pp. 179–184. Available at: https://www.researchgate.net/publication/314204690.

St-Hilaire, S. *et al.* (2007) 'Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in omega-3 fatty acids', *Journal of the World Aquaculture Society*, 38(2), pp. 309–313. doi:10.1111/j.1749-7345.2007.00101.x.

Stack Whitney, K. (2023) 'Ladybugs: The (Natural) Enemy of My Enemy Is My Friend? Enlisting Ladybugs into the War on Insect Pests', *Catalyst: Feminism, Theory, Technoscience*, 9(1), pp. 1–11. doi:10.28968/cftt.v9i1.38252.

Stanley, D. and Kim, Y. (2020) 'Why most insects have very low proportions of C20 polyunsaturated fatty acids: The oxidative stress hypothesis', *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 103(1), pp. 1–5. doi:10.1002/arch.21622.

Star, L. *et al.* (2020) 'Gradual provision of live black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae to older laying hens: Effect on production performance, egg quality, feather condition and behavior', *Animals*, 10(2). doi:10.3390/ani10020216.

Steinfeld, H. *et al.* (2006) *Livestock's long shadow. Environmental issues and options. Rome, FAO*. doi:10.1177/0030727020915206.

Straif, S.C. *et al.* (1998) 'Midgut Bacteria in *Anopheles gambiae* and An. funestus (Diptera: Culicidae) from Kenya and Mali', *Journal of Medical Entomology*, 35(3), pp. 222–226. doi:10.1093/jmedent/35.3.222.

Stuber, E. (2017) 'Caractérisation du gisement de bio-déchets Île de Tahiti', pp. 1–24.

Sun, J. *et al.* (2022) 'Insights into plastic biodegradation: Community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials', *Microbial Genomics*, 8(6). doi:10.1099/mgen.0.000842.

Surendra, K.C. *et al.* (2016) 'Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming', *Renewable Energy*, 98, pp. 197–202. doi:10.1016/j.renene.2016.03.022.

Tacon, A.G.J. and Metian, M. (2008) 'Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects', *Aquaculture*, 285(1–4), pp. 146–158. doi:10.1016/j.aquaculture.2008.08.015.

Tacon, A.G.J. and Metian, M. (2015) 'Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture', *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 23(1), pp. 1–10. doi:10.1080/23308249.2014.987209.

Tahamtani, F.M. *et al.* (2021) 'Feeding live Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) to laying hens: effects on feed consumption, hen health, hen behavior, and egg quality', *Poultry Science*, 100(10), p. 101400. doi:10.1016/j.psj.2021.101400.

Tirtawijaya, G. and Choi, J.S. (2022) 'Enrichment of polyunsaturated fatty acids in black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) fortified with squid liver oil', *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(4), pp. 387–398. doi:10.3920/JIFF2021.0030.

Tocher, D.R. (2010) 'Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish', *Aquaculture Research*, 41(5), pp. 717–732. doi:10.1111/j.1365-2109.2008.02150.x.

Tocher, D.R. (2015) 'Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids and aquaculture in perspective', *Aquaculture*, 449, pp. 94–107. doi:10.1016/j.aquaculture.2015.01.010.

Tomberlin, J.K. (2001) 'Biological, Behavioral, and Toxicological Studies on the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Encyclopedia of Parasitology*, (2), pp. 1245–1245. doi:10.1007/978-3-662-43978-4_1446.

Tomberlin, J.K., Adler, P.H. and Myers, H.M. (2009) 'Development of the Black Soldier Fly (Diptera:

Stratiomyidae) in Relation to Temperature', *Environmental Entomology*, 38(3), pp. 930–934. doi:10.1603/022.038.0347.

Tomberlin, J.K. and van Huis, A. (2020) 'Black soldier fly from pest to "crown jewel" of the insects as feed industry: An historical perspective', *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1), pp. 1–4. doi:10.3920/JIFF2020.0003.

Tomberlin, J.K. and Sheppard, D.C. (2001) 'Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Florida Entomologist*, 84(4), pp. 729–730. doi:10.2307/3496413.

Tomberlin, J.K. and Sheppard, D.C. (2002) 'Factors Influencing Mating and Oviposition of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) in a Colony', *Journal of Entomological Science*, 37(4), pp. 345–352. doi:10.18474/0749-8004-37.4.345.

Tomberlin, J.K., Sheppard, D.C. and Joyce, J.A. (2002) 'Selected Life-History Traits of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) Reared on Three Artificial Diets', *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3), pp. 379–386. doi:10.1603/0013-8746(2002)095[0379:slhtob]2.0.co;2.

Traughber, Z.T. *et al.* (2021) 'Effect of crude fiber and total dietary fiber on the calculated nitrogen-free extract and metabolizable energy content of various dog foods fed to client-owned dogs with osteoarthritis', *American Journal of Veterinary Research*, 82(10), pp. 787–794. doi:10.2460/ajvr.82.10.787.

Trostle, R. (2008) *Global agricultural supply and demand: Factors contributing to the recent increase in food commodity prices*.

Turlings, T.C.J. *et al.* (1995) 'How caterpillar-damaged plants protect themselves by attracting parasitic wasps', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(10), pp. 4169–4174. doi:10.1073/pnas.92.10.4169.

Tveterås, S. and Tveterås, R. (2010) 'The global competition for wild fish resources between livestock and aquaculture', *Journal of Agricultural Economics*, 61(2), pp. 381–397. doi:10.1111/j.1477-9552.2010.00245.x.

U.N. (2017) 'World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables', in *Department of Economic and Social Affairs, Population division*, p. 46.

Ushakova, N.A. *et al.* (2016) 'Characteristics of lipid fractions of larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 468(1), pp. 209–212. doi:10.1134/S1607672916030145.

Usman *et al.* (2021) 'The utilization of black soldier fly larvae meal as a substitution of fish meal in diet for white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, grow-out', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860. doi:10.1088/1755-1315/860/1/012023.

Vargas, R.I. *et al.* (2007) 'Impact of Introduction of Bactrocera dorsalis (Diptera: Tephritidae) and Classical Biological Control Releases of Fopius arisanus (Hymenoptera: Braconidae) on Economically Important Fruit Flies in French Polynesia', *Journal of Economic Entomology*, 100(3), pp. 670–679. doi:10.1603/0022-0493(2007)100[670:IOIOBD]2.0.CO;2.

Vargas, R.I. *et al.* (2012) 'Population dynamics of three Bactrocera spp. fruit flies (Diptera: Tephritidae) and two introduced natural enemies, Fopius arisanus (Sonan) and Diachasmimorpha longicaudata (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae), after an invasion by Bactrocera dorsalis (Hen', *Biological Control*, 60(2), pp. 199–206. doi:10.1016/j.biocontrol.2011.10.012.

Veldkamp, T *et al.* (2012) 'Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets : a feasibility study = Insecten als duurzame diervoedergrondstof in varkens- en pluimveevoeders : een haalbaarheidsstudie', *food chemistry*, 50, pp. 192–195. Available at: http://www.livestockresearch.wur.nl (Accessed: 23 February 2021).

Veldkamp, T. *et al.* (2012) 'Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study', *Wageningen UR Livestock Research*, 638(October), p. 62.

Veldkamp, T. and Vernooij, A.G. (2021) 'Use of insect products in pig diets', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), pp. 781–793. doi:10.3920/JIFF2020.0091.

Villazana, J. and Alyokhin, A. (2019) 'Tolerance of Immature Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) to Cold Temperatures Above and Below Freezing Point', *Journal of economic entomology*, 112(6), pp. 2632–2637. doi:10.1093/jee/toz186.

Vongvichith, B. *et al.* (2020) 'Evaluation of the efficacy of aquaculture feeds for the climbing perch *Anabas testudineus*: replacement of fishmeal by black soldier fly *Hermetia illucens* prepupae', *Fisheries Science*, 86(1), pp. 145–151. doi:10.1007/s12562-019-01381-5.

Wang, F. *et al.* (2014) 'Advanced silk material spun by a transgenic silkworm promotes cell proliferation for biomedical application', *Acta Biomaterialia*, 10(12), pp. 4947–4955. doi:10.1016/j.actbio.2014.06.031.

Wang, F. *et al.* (2018) 'Fabrication of the FGF1-functionalized sericin hydrogels with cell proliferation activity for biomedical application using genetically engineered *Bombyx mori* (B. mori) silk', *Acta Biomaterialia*, 79(August), pp. 239–252. doi:10.1016/j.actbio.2018.08.031.

Wang, H. *et al.* (2020) 'Physicochemical structure of chitin in the developing stages of black soldier fly', *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, pp. 901–907. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.01.293.

Wang, S.Y. *et al.* (2020) 'Reproductive potential and nutritional composition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) prepupae reared on different organic wastes', *Journal of Economic Entomology*, 113(1), pp. 527–537. doi:10.1093/jee/toz296.

Wang, Y.-S. and Shelomi, M. (2017) 'Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food', *Foods*, 6(10), p. 23. doi:10.3390/foods6100091.

Wang, Yinghui *et al.* (2023) 'Temperature dependent development of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) from Yangtze River Delta region of China', *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 26(4), p. 102163. doi:10.1016/j.aspen.2023.102163.

Wu, G. (2021) *Amino Acids in Nutrition and Health*, *Amino Acids*. Available at: http://www.springer.com/series/5584%0Ahttps://link.springer.com/10.1007/978-3-030-74180-8.

Xia, J., Ge, C. and Yao, H. (2021) 'Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming', *Animals*, 11(7). doi:10.3390/ani11071937.

Xiong, A. *et al.* (2023) 'Extraction of Chitin from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) and Its Puparium by Using Biological Treatment', *Life*, 13(7), pp. 1–12. doi:10.3390/life13071424.

Yahouédo, G.A. *et al.* (2014) 'Effect of three larval diets on larval development and male sexual performance of *Anopheles gambiae* s.s.', *Acta Tropica*, 132(1), pp. 96–101. doi:10.1016/j.actatropica.2013.11.014.

Yang, J. *et al.* (2014) *Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms*, *Environmental Science and Technology*. doi:10.1021/es504038a.

Yang, L.H. and Gratton, C. (2014) 'Insects as drivers of ecosystem processes', *Current Opinion in Insect Science*, 2, pp. 26–32. doi:10.1016/j.cois.2014.06.004.

Yeul, V.S. and Rayalu, S.S. (2013) 'Unprecedented Chitin and Chitosan: A Chemical Overview', *Journal of Polymers and the Environment*, 21(2), pp. 606–614. doi:10.1007/s10924-012-0458-x.

Yin, J. *et al.* (2014) 'Improving production of volatile fatty acids from food waste fermentation by hydrothermal pretreatment', *Bioresource Technology*, 171, pp. 323–329. doi:10.1016/j.biortech.2014.08.062.

Younes, I. and Rinaudo, M. (2015) 'Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications', *Marine Drugs*, 13(3), pp. 1133–1174. doi:10.3390/md13031133.

Yu, M. *et al.* (2020) 'Evaluation of full-fat *Hermetia illucens* larvae meal as a fishmeal replacement for weanling piglets: Effects on the growth performance, apparent nutrient digestibility, blood parameters and gut morphology', *Animal Feed Science and Technology*, 264(December 2019), p. 114431. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114431.

Yun, J.H. *et al.* (2014) 'Insect gut bacterial diversity determined by environmental habitat, diet, developmental stage, and phylogeny of host', *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), pp. 5254–5264. doi:10.1128/AEM.01226-14.

Zhang, J. *et al.* (2010) ‘ An Artificial Light Source Influences Mating and Oviposition of Black Soldier Flies, *Hermetia illucens* ’, *Journal of Insect Science*, 10(202), pp. 1–7. doi:10.1673/031.010.20201.

Zhen, Y. *et al.* (2020) ‘Impacts of killing process on the nutrient content, product stability and in vitro digestibility of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meals’, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(17). doi:10.3390/app10176099.

Zheng, X. *et al.* (2019) ‘Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes’, *Nature*, 572(7767), pp. 56–61. doi:10.1038/s41586-019-1407-9.

Zhou, F. *et al.* (2013) ‘Developmental and waste reduction plasticity of three black soldier fly strains (Diptera: Stratiomyidae) raised on different livestock manures’, *Journal of Medical Entomology*, 50(6), pp. 1224–1230. doi:10.1603/ME13021.

Zulkifli, N.F.N.M. *et al.* (2022) ‘Nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processed by different methods’, *PLoS ONE*, 17(2 February), pp. 1–14. doi:10.1371/journal.pone.0263924.

Conclusion du chapitre

Ces travaux ont permis de caractériser différents gisements ainsi que leur impact sur la qualité nutritionnelle des larves de BSF et leurs performances zootechniques de bioconversion de la MO. Sur la base de nos résultats, le régime optimal pour un développement industriel de la production de larves de BSF dépend de l'objectif du projet. En effet, l'optimisation d'un système de production de larves de BSF à grande échelle repose sur :

- la réduction du temps de traitement de la MO par les larves (ce qui correspond à une croissance rapide des larves),
- le traitement d'une grande quantité de MO sur la période de croissance fixée,
- la production d'une grande quantité de larves à valoriser en alimentation animale
- la qualité nutritionnelle des larves produites et leur compétitivité face aux autres ingrédients conventionnellement utilisés dans l'alimentation animale,
- la production d'un résidu de bioconversion de bonne qualité pour la fertilisation en agriculture.

Les substrats à base de restes alimentaires et de co-produits de pêche, en particulier les régimes (d) et (e), se sont montrés particulièrement intéressants pour la production de biomasse larvaire, tandis que les larves élevées sur les tourteaux de coprah (b) ont montré de meilleures performances en termes de traitement de grande quantité de déchets. Les régimes (d) et (e) ont également montré des performances de dégradation intéressantes pour la production de grandes quantités de résidu de bioconversion. Bien que les tourteaux de coprah aient été expérimentés dans le cadre de ces travaux, leur production a nettement diminué depuis le début du projet, permettant au marché local d'absorber l'intégralité du gisement qui est essentiellement acheté par les éleveurs. L'industrialisation du procédé de bioconversion par les larves de BSF sera donc axée sur d'autres gisements.

D'un point de vue logistique, les gisements ‘’restes alimentaires’’ et co-produits de la pêche nécessitent les mêmes étapes de préparation : la collecte de ces gisements, une étape de broyage et d'homogénéisation du substrat avant d'être utilisé pour nourrir les larves. Au moment du nourrissage, les restes alimentaires procurent de meilleures performances de croissance et de survie que les co-produits de pêche, même s'il n'est pas exclu que l'amélioration des conditions de production (broyage plus fin du substrat, maitrise du taux d'humidité) permettent d'augmenter les performances des larves sur les co-produits de pêche.

La connaissance des paramètres de bioconversion est indispensable pour étudier la faisabilité du projet à l'échelle industrielle. Ces indicateurs permettent de connaitre les ordres de grandeur des volumes de production attendus (larves, résidus) en fonction des volumes de MO à traiter. Les objectifs de production de larves de BSF permettent également de dimensionner la colonie captive. Le besoin en œufs est déduit du besoin en larves en tenant compte de la survie, ce qui permet de calculer, sur la base des performances de reproduction abordées dans le chapitre 1, le nombre de géniteurs et le nombre de cages de reproduction nécessaires.

En plus des performances zootechniques, il faut s'intéresser à la qualité nutritionnelle des gisements et par conséquent à la qualité des larves produites sur ces gisements. Les co-produits de la pêche ont l'avantage d'être riches en protéines, tandis que les restes alimentaires sont une source de glucides. Ces deux gisements, riches en nutriments, ont un fort potentiel de valorisation par bioconversion, pour produire des larves de BSF riches en nutriments de haute qualité. Les larves produites présentent un profil protéique riche (47-56% MS) avec la présence de tous les acides aminés essentiels en quantité intéressante pour l'alimentation animale. Les larves produites sont également particulièrement riches en lipides (25-43% MS). Les acides gras présents sont majoritairement des acides gras saturés, mais il est possible d'enrichir spécifiquement la biomasse larvaire en acides gras polyinsaturés tels que l'EPA ou le DHA lorsqu'ils sont contenus dans le substrat de croissance larvaire (co-produits de la pêche notamment). Un gradient d'enrichissement a par ailleurs été observé : les larves nourries sur les restes alimentaires (d) ne contenaient pas d'EPA ni de DHA ; tandis que les larves nourries sur le régime (e) correspondant au mélange restes alimentaires et co-produits de la pêche ont témoigné de taux d'EPA et de DHA plus élevés ; enfin, les larves élevées exclusivement sur les co-produits de pêche (c) sont celles qui ont atteint des taux d'EPA et de DHA maximaux.

Pour faire suite à ce travail sur la production de larves, les perspectives du projet Ra'o Puha sont de mettre en place le pilote de transformation des larves de BSF à l'échelle semi-industrielle, pour maitriser et optimiser la production de farine et d'huile de larves de BSF. Si ce chapitre a permis de caractériser la qualité des larves (analyses proximales, acides aminés, acides gras) produites sur différents gisements de déchets, la caractérisation des produits transformés sera également nécessaire avant d'envisager des essais avec le fabricant d'aliment du territoire. Ce travail de transformation et de valorisation des larves à petite échelle a été entamé et est présenté dans le chapitre suivant.

Enfin, ce travail de recherche a été principalement dédié à la production et à la caractérisation des larves de BSF. Les prochaines étapes du projet prévoient une caractérisation approfondie

du résidu de bioconversion pour évaluer son potentiel en tant qu'amendement organique. Des tests agricoles et des analyses agronomiques sont envisagés.

CHAPITRE 4 – TRANSFORMATION ET INTÉGRATION DES LARVES DE BSF A L'ALIMENTATION ANIMALE

Introduction du chapitre

La croissance démographique mondiale ainsi que l'élévation du niveau de vie des pays en développement engendrent une hausse de la demande de produits d'origine animale et végétale qui va se renforcer au cours des années à venir (FAO, 2009). En effet, d'ici 2050 la population mondiale devrait atteindre 9,6 milliards de personnes et la consommation de produits d'origine animale devrait augmenter de 60 à 70% par rapport à 2005/2007 (FAO, 2013b). Cette demande croissante de produits et en particulier de protéines d'origine animale implique nécessairement une augmentation des besoins en ressources pour nourrir ces animaux. Pour être en mesure de répondre aux besoins de l'alimentation humaine et animale, il est nécessaire de trouver des alternatives durables et respectueuses de l'environnement qui limitent l'utilisation des terres et de l'eau, modèrent la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre et qui ne participent pas significativement à l'appauvrissement de la biodiversité, aussi bien marine que terrestre. En plus de leur impact environnemental, les denrées traditionnellement utilisées voient leur disponibilité chuter et leur utilisation dans l'alimentation animale entre par conséquent en compétition avec leur utilisation dans l'alimentation humaine (Van Huis, 2013). L'appauvrissement de ces matières premières se répercute fatalement sur leurs prix, faisant à leur tour augmenter le prix des aliments fabriqués pour la production animale.

Les systèmes de production d'animaux ont des besoins conséquents et exigeants en nutriments. Tout l'enjeu réside donc dans le fait de trouver des ingrédients alternatifs de qualité et durables qui permettront de garantir un maintien des performances de productivité des élevages. Le territoire polynésien est d'autant plus soumis à ces pressions du fait de son isolement géographique. En effet, le secteur primaire est particulièrement vulnérable car fortement dépendant des importations.

Dans ce contexte, la larve de BSF se révèle être une option attrayante, offrant une biomasse larvaire riche en nutriments, pouvant ainsi remplacer les ingrédients traditionnellement utilisés dans l'alimentation animale (Halloran and Vantomme, 2013; Sánchez-Muros, Barroso and Manzano-Agugliaro, 2014; Fisher *et al.*, 2020; Rushikesh Jadhav *et al.*, 2020). Le précédent

chapitre a notamment décrit la qualité du profil nutritionnel des larves entières de BSF et la possibilité de moduler cette qualité en fonction des gisements de MO utilisés. Néanmoins, pour être valorisées à l'échelle industrielle, les larves de BSF subissent des étapes de transformation, permettant la production de farine et d'huile de larves de BSF, qui sont les véritables candidats au remplacement des farines et huiles végétales et animales conventionnellement utilisées.

La transformation des larves de BSF comprend différentes étapes. Contrairement aux matières premières d'origine végétale, une étape de mise à mort consécutive à la récole des larves est nécessaire. Les méthodes les plus communes de mise à mort des insectes sont l'ébouillantage (100°C, 40s) et la congélation (-20°C) (Larouche *et al.*, 2019; Zhen *et al.*, 2020). Les larves sont ensuite généralement stabilisées, via une réduction de l'activité de l'eau par séchage afin de limiter la dégradation des produits transformés (Melgar-Lalanne, Hernández-Álvarez and Salinas-Castro, 2019). Plusieurs méthodes de séchage sont possibles, on citera par exemple l'utilisation d'une étuve de séchage, d'un séchoir solaire ou encore d'un micro-ondes (Van Huis and Tomberlin, 2017). Enfin, une étape de dégraissage permet d'extraire les lipides d'une part sous forme d'huile et de concentrer les protéines d'autre part via des méthodes chimiques, mécaniques ou enzymatiques (Azzollini *et al.*, 2020; Hurtado-Ribeira *et al.*, 2023). La portion protéique obtenue est finalement broyée ou moulue pour avoir sa forme finale, tandis que l'huile peut subir une étape de raffinage. Suivant les méthodes utilisées à chaque étape de transformation, la qualité et la valeur ajoutée du produit transformé va varier (Schiavone, De Marco, *et al.*, 2017; Caligiani *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019; Leni, Caligiani and Sforza, 2019; Cantero-Bahillo *et al.*, 2022; Hurtado-Ribeira *et al.*, 2023).

Bien que le processus complet de transformation des larves de BSF ait été décrit ci-dessus, il existe plusieurs façons d'intégrer les larves de BSF à l'alimentation des filières animales, avec des niveaux de transformation différents. Ce chapitre présente trois formes de valorisation de la larve de BSF et les expérimente sous forme de tests d'appétence. Dans un premier temps, la larve de BSF est utilisée entière dans l'alimentation des poules pondeuses, en complément alimentaire. Dans un second temps, l'utilisation de la farine de BSF dégraissée est expérimentée comme substitut à la poudre de foie de bœuf dans l'alimentation de larves de moustiques (*Aedes aegypti*). Enfin, la larve de BSF est intégrée à la formulation d'un aliment complet pour l'alimentation de la crevette bleue (*Litopenaeus stylirostris*). Dans les trois cas, les performances zootechniques des animaux nourris sont mesurées afin d'évaluer l'impact de la larve de BSF sur ces performances.

Impact de la complémentation de l'alimentation des poules pondeuses avec des larves de BSF sur les performances de ponte

Introduction

En Polynésie française, la production locale d'œufs de poules pondeuses permet globalement de subvenir aux besoins en œufs pour l'alimentation de la population. Dans le cadre de la transition agroécologique, le Pays souhaite promouvoir l'évolution de la filière avicole avec un développement des modèles d'élevage type « plein air » et « bio » à Tahiti mais également dans les autres archipels de la Polynésie française (IRAM/CANC/PTPU/CIRAD, 2021). Ceci permettra, en s'appuyant sur des circuits courts et en valorisant les ressources présentes sur les différentes îles, de répondre à la demande de diversification des produits (œufs plein air, œufs bio) et de générer de nouveaux emplois liés aux productions dans les îles.

Quatre élevages industriels sont recensés à Tahiti (30 000 à 80 000 poules par élevage) et deux sont situés aux îles sous le vent (7 000 à 12 000 poules), sans compter les petits éleveurs aux installations « artisanales » (plus de 80 producteurs pour un total de 23 000 poules pondeuses) (IRAM/CANC/PTPU/CIRAD, 2021).

L'alimentation pour ces élevages repose sur des intrants, tous importés, généralement depuis la Nouvelle-Zélande ou la France. Ces importations représentent 6000 à 8000 tonnes de marchandise par an (Figure 4.1.1) pour un coût total livré compris entre 359 et 494 millions de francs pacifiques (ISPF) soit 59833 à 61750 XPF la tonne. La dépendance aux importations pour l'approvisionnement en aliments (mais également en poussins) rend la filière avicole, ainsi que les autres filières animales, vulnérables.

Par ailleurs, le schéma directeur « Agriculture » en Polynésie française 2021-2030 met l'accent sur la nécessité de développer la souveraineté alimentaire, dans une démarche de développement durable à Tahiti mais également au sein des différents archipels. Afin de développer la souveraineté alimentaire du Pays et donc de réduire la dépendance aux importations des différentes filières animales, il est nécessaire de produire localement des ressources nutritives de qualité, pouvant complémenter ou substituer une partie des aliments industriels importés.

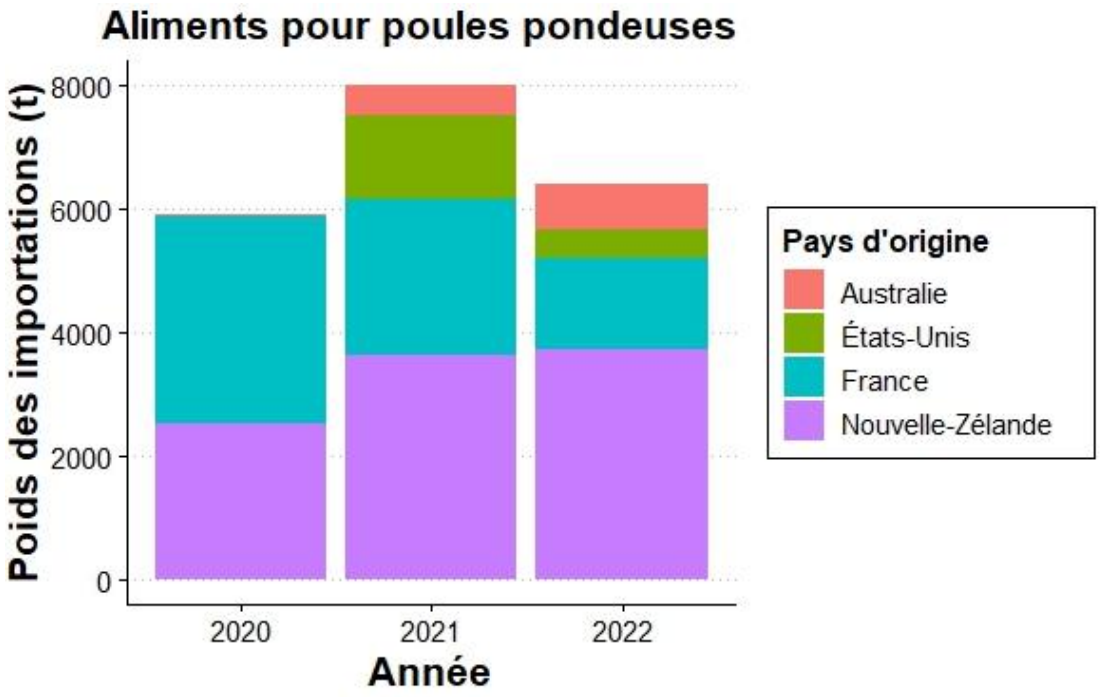


Figure 4.1.1 : Poids des importations (en tonnes) des aliments pour poules pondeuses (code SH8 23099010), depuis les trois dernières années, par pays d'origine. Source : Institut de la Statistique de la Polynésie française (ISPF).

Les insectes faisant partie intégrante de l'alimentation naturelle des volailles (Bovera *et al.*, 2016), les larves de BSF apparaissent comme un candidat idéal pour substituer les protéines conventionnelles utilisées pour la formulation d'aliments pour les poules pondeuses et poulets de chair. L'apport de larves de BSF dans l'alimentation des poules procure des bienfaits sur la santé des volailles. Grace à leurs hauts niveaux d'acide laurique et de chitine, les larves de BSF possèdent des propriétés antimicrobiennes et antifongiques (Faruck, Yusof and Chowdhury, 2016; Ewald *et al.*, 2020). Ces molécules contribuent notamment à la modulation de la flore intestinale des poules (Erickson *et al.*, 2004; Dabbou *et al.*, 2021) et à la résistance aux agents pathogènes (Józefiak *et al.*, 2018; Moula *et al.*, 2018).

L'intégration des larves de BSF pour le remplacement partiel ou total du soja dans l'alimentation des poules a été expérimentée sous différentes formes. Patterson et al. (2021) ont montré que la substitution de l'huile de soja par de l'huile de BSF était possible sans impacter la production d'œufs ni leur qualité. Ils ont également montré qu'une substitution de la farine et de l'huile de soja par de la farine de larves de BSF à un taux d'inclusion de 24% dans la formulation (en substitution de 98% de la farine de soja) réduisait le poids corporel et la production d'œufs des poules pondeuses, tandis qu'un taux d'inclusion de 16% dans la formulation (en substitution de 65% de la farine de soja) était plus adapté, car sans impact

négatif sur les performances des poules pondeuses. Kawasaki et al., (2019) ont substitué avec succès 47% de farine de soja et 100% d'huile de soja dans le régime des pondeuses par des larves de BSF séchées sans affecter leurs poids corporel ni leurs performances de pontes. Secci et al., (2018) ont expérimenté le remplacement total de la farine de soja par de la farine dégraissée de larves BSF sans affecter la qualité des œufs (compositions proximales du jaune d'œuf et de l'albumine, profil d'acides gras du jaune d'œufs quasiment inchangé), cependant l'impact sur les performances de pontes n'a pas été évalué. L'utilisation de larves de BSF vivantes a également été expérimentée. Les larves de BSF vivantes ont été distribuées en complément de l'alimentation classique avec des portions quotidiennes de larves vivantes représentant 0, 10 et 20% des apports journaliers prévus en matière sèche (Tahamtani *et al.*, 2021). Les résultats ont notamment confirmé l'appétence des poules pour ces larves, l'intégralité des larves de BSF étant consommée par les poules dans les conditions 10% et 20% de complémentation en moins de 5 minutes. L'intégration des larves à l'alimentation des poules n'a eu aucun impact négatif sur les performances de ponte ni sur la qualité des œufs.

Bien que l'ambition du programme Ra'o Puha soit de produire des ingrédients issus de la transformation des larves (farines dégraissées et huiles de larves de BSF), la larve entière est une ressource d'intérêt qu'un aviculteur peut intégrer directement à l'alimentation de son cheptel. L'étude présentée dans cette partie a pour objectif d'évaluer l'impact de l'utilisation des larves de BSF entières comme compléments dans l'alimentation des poules pondeuses sur leurs performances de ponte. Les larves utilisées dans cet essai sont distribuées entières et congelées, ce qui correspond au niveau de transformation le plus simple.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du thème 1 du programme PROTEGE (Projet Régional Océanien des Territoires pour la Gestion durable des Ecosystèmes). Ce programme est financé par l'Union Européenne et est coordonné par la Communauté du Pacifique (CPS). Les travaux présentés ont été menés en collaboration avec la Direction de l'Agriculture (DAG).

Matériels et méthodes

Zone d'étude et cheptel de poules pondeuses

Cette étude a été menée au sein de l'exploitation d'un éleveur de poules pondeuses localisée dans la commune de Hitia'a O Te Ra (Tahiti, Polynésie française). L'exploitation se situe dans une zone peu fréquentée et entourée de verdure, à proximité d'autres activités agricoles telles que des cultures maraichères et des élevages d'autres animaux (chèvres, cochons, chevaux). Le

cheptel de poules pondeuses, composé de 226 individus âgés de deux ans, est élevé dans un poulailler avec parcours.

Régimes expérimentaux

Deux alimentations sont testées dans le cadre de cette étude.

- Un régime de contrôle (CON) composé exclusivement de granulés industriels, distribués sur la base d'une ration de 110g de granulés par jour et par poule ;
- Un régime expérimental (SUP) composé de granulés industriels, distribués sur la base d'une ration de 110g de granulés par jour et par poule, supplémenté de larves de BSF congelées sur la base de 16g par jour et par poule. Cette supplémentation correspond à un apport de 2,2g de protéines par poule, soit 12% des besoins journaliers en protéines.

Les larves de BSF ont été produites au sein du pilote expérimental du programme Ra'o Puha situé à Paea. Les œufs fraichement pondus par des femelles BSF sauvages sont collectés, déposés sur une coupelle en plastique et placés dans un bac de nurserie (16,5x16,5x10,5 cm) où les œufs éclosent au bout de 3 jours. Les larves néonates sont nourries avec une alimentation larvaire consistant en un mélange de tourteaux de coprah et d'eau (1 :2 V/V) après 4 semaines de fermentation. Une semaine après la date de récolte, les larves sont transférées dans des bacs de croissance (57x37x23 cm) et sont nourries à volonté avec la même alimentation larvaire à base de tourteaux de coprah. Au jour 20 post éclosion, les larves sont séparées du résidu de digestion à l'aide d'un tamis. La mise à mort est effectuée par congélation puis les larves sont stockées à -18°C. Au total, ce sont près de 63 kg de larves de BSF congelées qui ont été produits pour la réalisation de ces tests alimentaires.

Les granulés industriels pour poules pondeuses sont distribués par le producteur d'aliment pour animaux Mainfeeds (Nouvelle-Zélande). Le granulé est formulé à partir de céréales, de protéines végétales, de protéines animales, d'huiles végétales, de minéraux, d'acides aminés et d'un mélange de vitamines et d'oligoéléments.

Les larves produites au sein du pilote expérimental ont été analysées par le Centre d'Analyses Industrielles et de Recherche Appliquée pour le Pacifique (CAIRAP) et la composition nutritionnelle du granulé correspond à celle indiquée sur l'emballage. Ces informations sont regroupées dans le tableau 4.1.1. La composition des régimes expérimentaux CON et SUP ainsi que leurs apports respectifs sont présentés dans le tableau 4.1.2.

Tableau 4.1.1 : Composition nutritionnelle des larves de BSF et des granulés commerciaux utilisés pour les tests d'appétence. Les résultats sont exprimés en pourcentage de poids brut (% PB)

Composition	Larves de BSF	Granulés commerciaux
Matière sèche (MS) (%)	35	100
Protéines (% PB)	14	17
Lipides (% PB)	9,5	6,0
Energie (kcal/kg PB)	1415	2700
Calcium (% PB)	0,06	4,0

Tableau 4.1.2 : Composition des régimes expérimentaux (exprimée en g par ration journalière et par poule) et apports respectifs calculés

Ingrédients (g/jour/poule)	Régimes expérimentaux	
	CON	SUP
Granulé industriel	110	110
Larves de BSF	0	16
Apports (g/jour/poule)		
Protéines	18,7	20,9
Lipides	6,6	8,1
Energie	2970	3196
Calcium	4,4	4,4

Design expérimental

Pour les besoins de l'expérience, le poulailler ainsi que le parcours ont été divisés en deux zones de surface équivalente (Figure 4.1.1). Les poules, également réparties en deux lots de 113 individus, ont été acclimatées à ce nouvel environnement de vie pendant 10 jours avant le début de l'expérience.

Afin de perturber au minimum les poules dans leurs habitudes, la séparation du poulailler et du parcours avait été initiée deux semaines avant le début des essais, tout en laissant un passage entre les deux poulaillers nouvellement formés. Puis dix jours avant le début des essais, le cheptel a été divisé en deux lots de 113 poules, et le passage entre les deux poulaillers a été condamné.

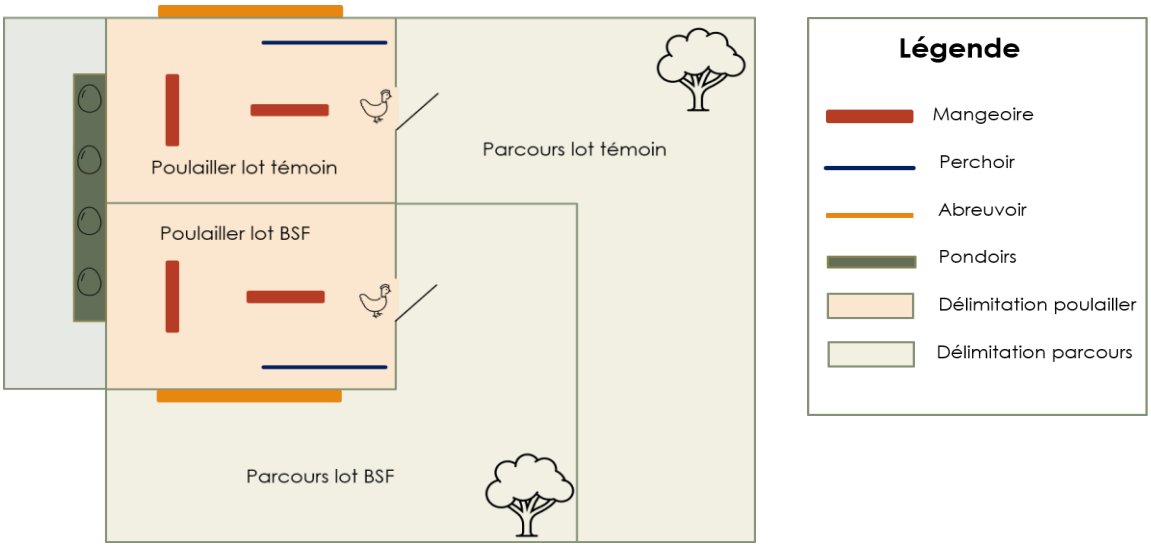


Figure 4.1.1 : Schéma de l'exploitation de l'aviculteur avec les aménagements effectués pour la réalisation des tests d'appétence

Suivi des performances

Les données de santé (survie) et de pontes ont été relevées quotidiennement pendant 5 semaines, correspondant à 35 jours. Le nombre total d'œufs pondus dans chaque condition est déterminé par comptage. Les œufs sont catégorisés suivant leurs poids dans 3 catégories : œufs moyens de 53 à 63g, œufs gros de 63 à 73g et œufs jumbo avec un poids excédant 73g (Règlement CE n°589/2008 du 23 juin 2008). Le taux de ponte journalier correspond au nombre total d'œufs pondus par jour divisé par le nombre de poules pondeuses dans la zone expérimentale concernée. Le nombre d'œufs fêlés et cassés a également été relevé comme indicateur de qualité des œufs.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec RStudio (version 4.2.0). Les moyennes présentées sont effectuées à partir des données journalières, moyennées sur les 35 jours d'expérience. Un test-t de Student avec un intervalle de confiance de 95% est effectué pour tester la différence statistique des performances moyennes des cheptels entre les deux conditions expérimentales (CON et SUP). La normalité de la distribution et l'homogénéité des variances des variables sont préalablement vérifiées avec les tests de Shapiro-Wilk et Levene, respectivement.

Résultats et discussion

Survie

Le suivi de la survie des poules est présenté dans la figure 4.1.2. Le nombre initial d'individus était de 113 poules par condition expérimentale. Les individus du cheptel de contrôle (régime

CON) ont subi un épisode de mortalité au jour 15 faisant passer la population de 113 à 102 individus. Cette population a été maintenue jusqu'à la fin de l'expérience. Dans le cheptel expérimental (régime SUP), 3 individus sont morts, 2 au jour 15 et 1 au jour 32. Au total, une mortalité plus importante a été observée au sein du cheptel de poules alimentées sur le régime de contrôle (10%) par rapport au régime supplémenté (3%).

La mortalité au sein des élevages de poules pondeuses est un facteur critique que les éleveurs peinent parfois à maitriser. D'après l'expérience des éleveurs rencontrés au cours du programme PROTEGE, les pics de mortalité sont souvent liés à des événements stressants tels que des modifications d'environnement (changement de lieu d'élevage, changement des conditions météorologiques) ou des modifications dans les habitudes des poules pondeuses (changement de régime alimentaire). Ce stress peut être exprimé par une modification du comportement des individus qui se montrent plus hostiles avec leurs congénères (picage des plumes, cannibalisme) (Nordquist *et al.*, 2011). Cela peut entrainer des blessures ou même la mort des victimes, menaçant le bien-être du cheptel et sa viabilité économique.

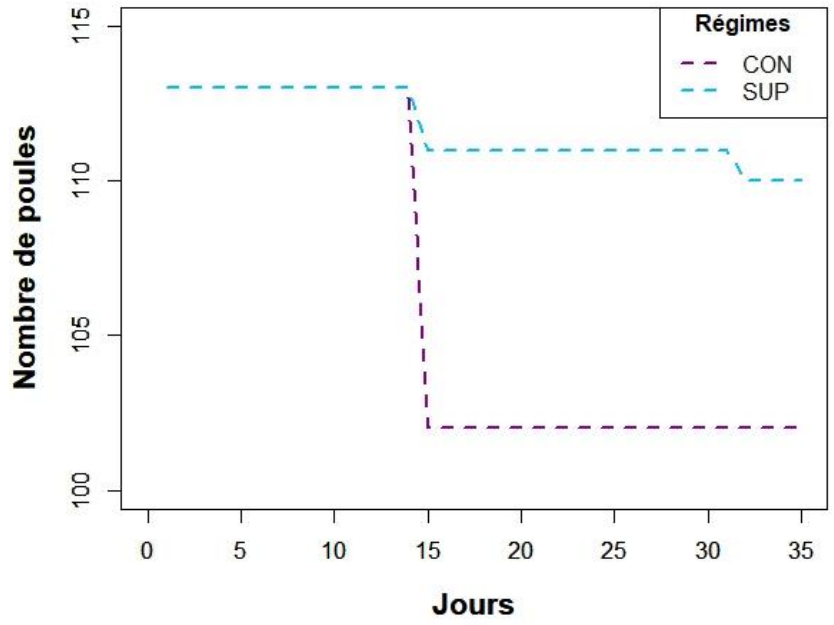


Figure 4.1.2 : Suivi de la survie au cours du temps dans les deux conditions expérimentales CON : Régime de contrôle, SUP : Régime supplémenté avec des larves de BSF

Les causes de mortalité des poules pondeuses sont variées. Des facteurs génétiques et environnementaux sont des causes connues. Le facteur génétique semble ici écarté car les lots en expérimentation proviennent du même cheptel. Les mortalités peuvent être d'origine

bactériennes, virales, parasitaires (Fossum *et al.*, 2009). Les poules peuvent aussi avoir un comportement de cannibalisme lié à de multiple causes qu'il sera difficile de démêler dans cette étude préliminaire. Reste à savoir si ces mortalités sont liées à l'aliment commercial auquel cas le complément par les larves de BSF s'avèrerait bénéfique à la santé des poules pondeuses. Dans les autres travaux consacrés à l'intégration de larves d'insectes en aviculture, il y a généralement absence de mortalité et de morbidité chez les individus, avec ou sans utilisation de larves de BSF dans l'alimentation du cheptel (Abd El-Hack *et al.*, 2020).

Performances de pontes

La production journalière d'œufs est présentée en figure 4.3.1 et les taux de pontes dans le Tableau 4.1.3. Pour la condition CON, les quantités d'œufs pondus chaque jour sont compris entre 34 et 67 œufs, correspondant à des taux de ponte de 0,30 à 0,66 œufs/poule/jour. Dans la condition SUP, entre 55 et 81 œufs sont pondus chaque jour, équivalant à des taux de ponte de 0,50 à 0,73 œufs/poule/jour. En moyenne, le taux de ponte du cheptel nourri avec le régime SUP (0,63 œufs/poule/jour) est significativement plus élevé ($p<0,0001$) que celui du cheptel nourri avec le régime témoin CON (0,45 œufs/poule/jour). Par conséquent, la quantité totale d'œufs pondus au cours de l'expérience est nettement différente entre les deux régimes (1669 contre 2486 œufs) avec une augmentation de près de 50% du nombre d'œufs pondus dans le cas de l'alimentation supplémentée en larves de BSF.

Cette différence de performance peut être expliquée par une prise alimentaire augmentée et diversifiée dans la condition SUP, se traduisant par des apports en protéines et en lipides supérieurs grâce à l'introduction des larves de BSF dans l'alimentation du cheptel SUP (Tableau 4.1.2). En effet, nous avons pu constater au cours de l'expérience que les mangeoires des deux conditions expérimentales n'étaient jamais vides, la ration de granulé de chaque jour n'étant jamais entièrement consommée par les poules, contrairement à la ration de larves de BSF qui était épuisée au bout de quelques minutes. Les poules étaient donc nourries à satiété dans les deux cas et nous avons pu constater que la présence de larves de BSF dans la ration a exalté le comportement de recherche d'aliment par picorage et a stimulé la prise alimentaire. La présence d'insectes permet aux poules d'exprimer leur comportement naturel notamment dans la recherche de nourriture, ce qui contribue positivement au bien-être de l'animal (Star *et al.*, 2020).

Malgré la perte de 9 poules au jour 15 dans la condition CON (Figure 4.1.2), la figure 4.1.3 ne montre pas de baisse du nombre d'œufs pondus à partir du jour 16. Le Tableau 4.1.3 confirme

par ailleurs que les valeurs de taux de ponte s'améliorent à partir du jour 16, avec des taux de ponte compris entre 0,35 et 0,66 œufs/poule/jour alors qu'ils n'excédaient pas 0,43 avant le jour 15. Ces données montrent que les poules de la condition CON qui sont mortes ne contribuaient probablement pas à la production d'œufs depuis le début de l'essai, et que leur forme physique ainsi que leur santé devaient déjà être altérées, les rendant d'autant plus vulnérables face aux changements liés à la tenue de cette expérience. Il est donc difficile d'attribuer ces mortalités à la qualité du régime alimentaire.

Généralement, les poulettes sont livrées aux éleveurs à l'âge de 3 mois pour entrer en ponte vers l'âge de 4 à 5 mois. Le taux de ponte augmente assez rapidement en début de ponte pour atteindre 0,9 œufs/poule/jour puis décroit lentement avec l'âges des poules pour descendre à 0,5-0,6 œufs/poule/jour au bout d'un an (SDR, 2001). Philippe et al., (2020) ont par exemple observé des taux de pontes moyens compris entre 0,77 et 0,96 suivant l'environnement d'élevage des poules (élevage en volière et élevage en batterie) avec des individus de 23 semaines (4 mois et demi) au moment du lancement des essais qui ont duré 9 semaines).

Dans le cadre de la présente expérimentation, les essais ont débuté avec des poules âgées de 2 ans, qui ont largement dépassé leur période de productivité maximale. Cinq mois avant le lancement de l'expérience, le cheptel de l'éleveur était de 260 poules d'un an et demi, avec un taux de ponte de 0,7 œufs/poules/jour. Les taux de ponte observés dans le cadre de cette expérience sont inférieurs à ce dernier, mais cette baisse n'est pas surprenante compte tenu du vieillissement du cheptel, dont la productivité était déjà étonnamment importante au vu de l'âge avancé des poules. Ce cheptel de poules avait un bon statut nutritionnel au début de l'expérience pouvant expliquer cette productivité inattendue. En effet, avant le lancement des tests alimentaires, l'alimentation du cheptel était particulièrement variée. En plus du granulé commercial, l'alimentation des poules était complétée par des tourteaux (de coprah et/ou de soja), du sable, parfois des fruits tels que le noni, le potiron ou le concombre) ou des drèches de blé en fonction des jours et de ce que l'éleveur avait à sa disposition. Les poules avaient donc pour habitude d'avoir accès à un régime varié et modulable. Cette démarche, propre à l'éleveur, avait pour objectif d'une part d'apporter à ses poules une alimentation la plus complète possible afin d'optimiser les performances de ponte ainsi que la santé de son cheptel, et d'autre part, d'avoir un élevage de poules pondeuses moins dépendant des granulés industriels afin d'abaisser les coûts de production, l'éleveur ayant accès gratuitement aux autres ressources citées précédemment. Pour en revenir aux faibles taux de ponte et à la mortalité dans la condition CON, nous attribuons ces baisses de performances à la perturbation liée au

changement de régime alimentaire moins riche, basé exclusivement sur l'aliment commercial. L'apport de larves de BSF (SUP) a limité ou même compensé la restriction alimentaire.

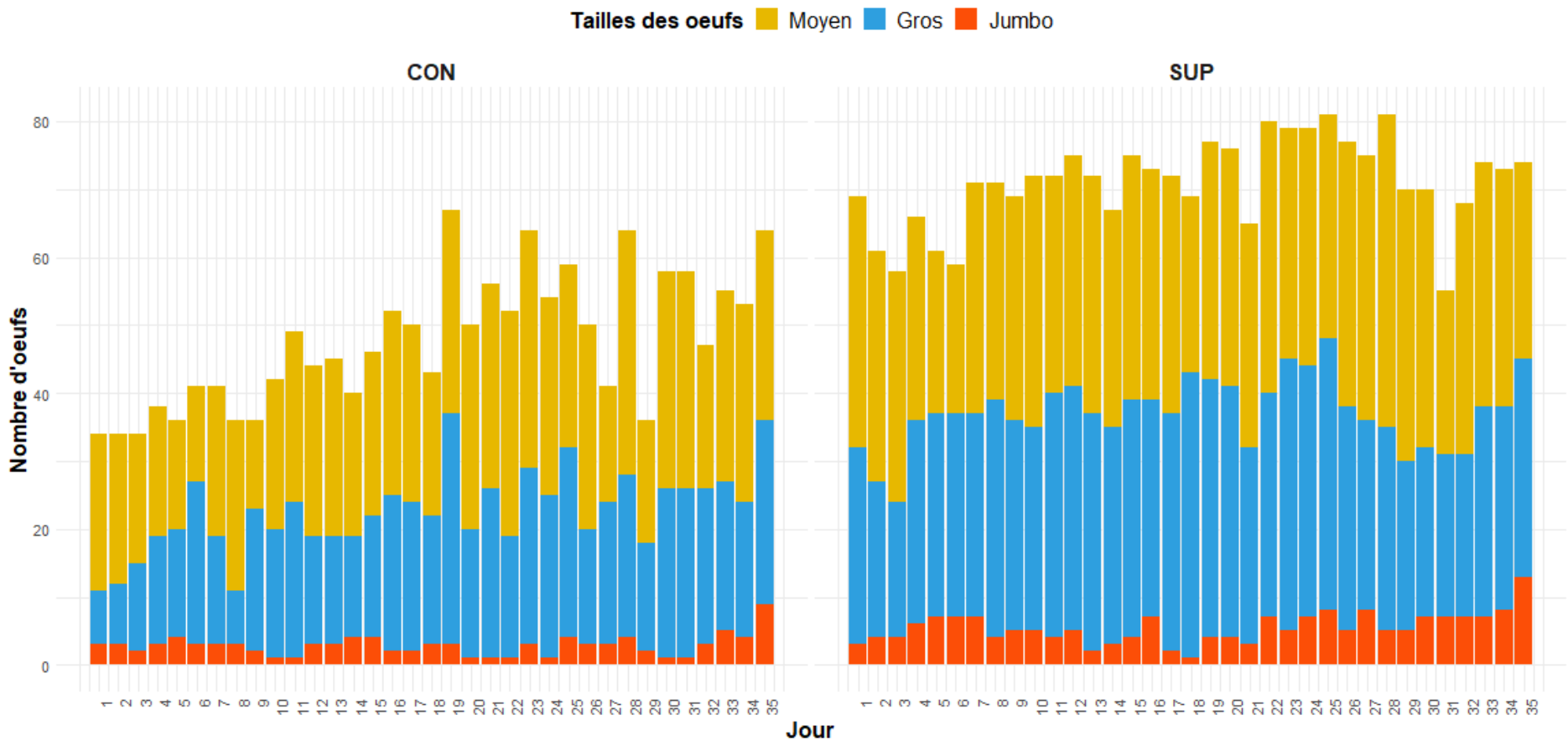


Figure 4.1.3 : Nombre d'œufs pondus chaque jour, catégorisés par taille, dans chaque condition expérimentale.

CON : Régime de contrôle, SUP : Régime supplémenté avec des larves de BSF

Tableau 4.1.3 : Taux de ponte journaliers sur la période expérimentale. La moyenne des taux de ponte est calculée en bas du tableau et présentée sous la forme moyenne ± écart-type (n=35) par régimes expérimentaux. Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents (p<0,05). CON : Régime de contrôle, SUP : Régime supplémenté avec des larves de BSF

Jour	**Régimes expérimentaux**	
	CON	**SUP**
1	0,30	0,61
2	0,30	0,54
3	0,30	0,51
4	0,34	0,58
5	0,32	0,54
6	0,36	0,52
7	0,36	0,63
8	0,32	0,63
9	0,32	0,61
10	0,37	0,64
11	0,43	0,64
12	0,39	0,66
13	0,40	0,64
14	0,35	0,59
15	0,45	0,68
16	0,51	0,66
17	0,49	0,65
18	0,42	0,62
19	0,66	0,69
20	0,49	0,68
21	0,55	0,59
22	0,51	0,72
23	0,63	0,71
24	0,53	0,71
25	0,58	0,73
26	0,49	0,69
27	0,40	0,68
28	0,63	0,73

29	0,35	0,63
30	0,57	0,63
31	0,57	0,50
32	0,46	0,62
33	0,54	0,67
34	0,52	0,66
35	0,63	0,67
Moyenne	$0,45 \pm 0,10^{a}$	$0,63 \pm 0,06^{b}$
Nombre total d'œufs pondus	1669	2486

Le Tableau 4.1.4 présente le pourcentage moyen des œufs pondus catégorisés par poids, dans chaque condition expérimentale et la figure 4.1.3 permet de visualiser les quantités respectives d'œufs petits, moyens et gros pondus chaque jour. Dans les deux conditions expérimentales, les poules pondent majoritairement des œufs moyens et gros. Le régime CON a permis la production d'une proportion significativement plus élevée ($p<0,01$) d'œufs moyens (52,6%) par rapport au régime SUP (47,8%). La production d'œufs gros est équivalente dans les deux conditions expérimentales, tandis que la production d'œufs jumbo est supérieure ($p<0,05$) pour le régime SUP (7,7%) par rapport au régime CON (6,0%). De précédentes études relèvent un poids moyen des œufs compris entre 58,6g et 60,8g (Aerni *et al.*, 2005; Philippe *et al.*, 2020) ce qui est inférieur aux résultats de cette expérimentation, avec un poids moyen de 66,0 g pour les œufs de la condition CON, et un poids moyen de 65,7 g pour les œufs de la condition SUP. Cette différence peut être expliquée par les origines différentes des poules pondeuses suivant les études. La production d'œufs jumbo, dont le poids excède 73g, est un facteur de vulnérabilité pour les poules. En effet, les œufs jumbos sont plus gros que la normale, et peuvent rendre la ponte difficile voire provoquer des blessures chez les poules pondeuses. Les poules blessées sont affaiblies et vulnérables face aux autres poules du cheptel. Elles peuvent donc être victimes d'attaques et avoir un accès limité aux mangeoires, menaçant la pérennité et la productivité du cheptel.

Les œufs fêlés et cassés ont également été dénombrés dans le cadre de cette expérience car ils sont un indicateur de la qualité des œufs, auquel les aviculteurs sont particulièrement attentifs. En effet, un apport trop faible en calcium dans l'alimentation des poules pondeuses va résulter en une fragilisation des œufs (Hervo, 2023), menaçant la pérennité de l'activité économique de l'éleveur qui ne pourra pas vendre ces œufs.

Tableau 4.1.4 : Pourcentage des œufs pondus dans chaque condition expérimentale, catégorisés par poids. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=35). Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents ($p<0,05$). CON : Régime de contrôle, SUP : Régime supplémenté avec des larves de BSF

Catégories des œufs	**Régimes expérimentaux**	
	CON	**SUP**
Œufs moyens (%)	$52,6 \pm 7,8^{a}$	$47,8 \pm 5,5^{b}$
Œufs gros (%)	$41,4 \pm 7,9^{a}$	$44,5 \pm 5,7^{a}$
Œufs jumbo (%)	$6,0 \pm 3,0^{a}$	$7,7 \pm 3,3^{b}$

Comme indiqué dans le Tableau 4.1.5, il n'y a pas de différence entre les deux conditions expérimentales pour le pourcentage d'œufs cassés (1,5% pour le régime de contrôle contre 1,4% pour le régime supplémenté). En revanche, plus d'œufs fêlés ont été produits par le cheptel nourri sur le régime CON (1,3%) comparé au cheptel nourri sur le régime SUP (0,7%). Ces valeurs restent acceptables pour l'éleveur car faibles et proches de celles obtenues en condition normale de production. Elles témoignent néanmoins du potentiel bénéfice qu'une alimentation enrichie en BSF peut avoir sur une exploitation à grande échelle, en réduisant le taux d'œufs fêlés, qui représentent un manque à gagner pour l'éleveur.

Tableau 4.1.5 : Pourcentage d'œufs cassés et fêlés par rapport à la production totale d'œufs sur la durée de l'expérience, dans chaque condition expérimentale.
CON : Régime de contrôle, SUP : Régime supplémenté avec des larves de BSF)

Qualité des œufs	**Régimes expérimentaux**	
	CON	**SUP**
Œufs cassés (%)	1,5	1,4
Œufs fêlés (%)	1,3	0,7

La coquille d'œuf de poule contient environ 380 mg de calcium par gramme (Bartter *et al.*, 2018). La fragilité des œufs est souvent associée à une carence en calcium. L'effet du calcium dans l'alimentation des poules pondeuses sur la solidité des coquilles des œufs est documenté depuis de nombreuses années (Mehring and Titus, 1964). Il a en effet été montré que la restriction de la quantité de calcium dans l'alimentation des poules pondeuses diminuait

considérablement leur production d'œufs et rendait la coquille de leurs œufs plus fine (Buckner and Martin, 1920). Les caractéristiques productives et l'immunité des poules pondeuses diminuent fortement au cours de la phase tardive de la ponte en raison du vieillissement, ce qui affecte négativement le métabolisme et le statut hormonal des animaux (Attia, Al-Harthi and Abo El-Maaty, 2020). Dans notre cas, les apports théoriques en calcium des régimes CON et SUP sont les mêmes (Tableau 4.1.2) mais il peuvent différer si la prise alimentaire est augmentée dans une des deux conditions, ce qui semblait être le cas pour la condition SUP.

Conclusion

Dans cette partie de l'étude, j'explore une des voies de valorisation rapide des larves de BSF sous la forme brute congelée. L'objectif était de déterminer l'impact de la supplémentation de l'alimentation des poules pondeuses avec des larves de BSF sur les performances de pontes. Même supplémentées sous forme congelée, les larves de BSF ont stimulé la consommation de l'aliment commercial par les poules. L'ajout de larves de BSF dans l'alimentation de ce cheptel de poules pondeuses s'est traduit par des performances de pontes augmentées de près de 50%. Bien qu'une survie plus élevée ait été observée dans le régime supplémenté, des biais expérimentaux tels que l'âge avancé des poules et la perturbation de leurs habitudes ne permet pas d'attribuer cette conséquence exclusivement au régime alimentaire.

Les perspectives de recherches sont nombreuses, en premier lieu il serait pertinent de valider les résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation, en répétant l'expérience pour augmenter la puissance statistique des résultats. Vu l'appétence des poules pour les larves distribuées sous forme congelée, l'utilisation de larves vivantes est une approche prometteuse ne nécessitant aucune étape de transformation. Par ailleurs, un suivi approfondi de la santé des poules et de leurs comportements permettrait de renseigner sur l'impact du régime alimentaire sur le bien-être des individus. Si dans le cas présent nous avons expérimenté la complémentation de l'alimentation des poules avec des larves de BSF, la prochaine étape serait de diminuer la ration de granulés industriels et de compléter le déficit protéique par les protéines des larves de BSF, avec un suivi des performances de pontes mais également une caractérisation de la qualité nutritionnelle et organoleptique des œufs pondus. La faisabilité de ces prochaines expérimentations est néanmoins incertaine. En effet, bien que nous ayons eu la chance et l'opportunité de collaborer avec un aviculteur pour mener ces essais, tous ne sont pas enclins à mettre à disposition leurs infrastructures ainsi que leurs cheptels pour des raisons évidentes, d'ordre :

- économique, leurs revenus étant dépendants de la santé et de la productivité de leur cheptel,
- logistique, le plan de charge des éleveurs est généralement dense, ce qui leur laisse peu de temps pour participer à l'acquisition rigoureuse des données,
- sanitaire, pour éviter tout risque de contamination et de propagation des maladies, la présence d'une personne extérieure au sein de leur exploitation est généralement proscrite.

La mise en place de structures avicoles expérimentales serait un atout pour mener des expérimentations de façon rigoureuse et répétée, sans compromettre l'activité des éleveur. Cette configuration permettrait d'être plus libres dans le choix des conditions expérimentales et donc dans l'établissement des protocoles.

Cette expérience a permis de mettre en exergue le potentiel des larves de BSF dans le régime alimentaire des poules pondeuses. Bien qu'utilisées comme complément alimentaire dans le cadre de cette expérience, l'autre objectif du programme Ra'o Puha est de transformer et de fractionner par ailleurs les nutriments contenus dans les larves sous forme de farines et d'huiles de larves de BSF. Ces ingrédients seront alors de potentiels substituts aux sources conventionnelles importées de protéines et de lipides dans l'alimentation animale. A l'échelle locale, un seul fabriquant d'aliment est spécialisé dans la production d'aliments pour l'aviculture, l'élevage porcin et les chevaux. A travers de futures collaborations, des essais d'intégration de farines ou d'huiles de larves de BSF dans les formulations de ce fabricant sont envisagées afin de tester le remplacement partiel des ressources importées. Ces nouveaux aliments pourront alors faire l'objet de tests d'alimentation au cours desquels les performances de pontes mais également la santé des poules seront observés.

Remplacement de la poudre de foie de bœuf par de la farine de BSF dans l'alimentation des larves de moustiques *Aedes aegypti* : suivi des performances zootechniques

Introduction

Le Laboratoire d'Entomologie Médicale (LEM) de l'Institut Louis Malardé (ILM) développe des programmes de lutte innovante contre deux principales espèces de moustiques vecteurs de maladies *Aedes aegypti* (vecteur de la dengue, du Zika et du chikungunya) et *Aedes polynesiensis* (vecteur de la filariose lymphatique en plus des virus précités). Ces programmes de lutte innovante sont menés en partenariat avec la direction de la santé et le centre d'hygiène et de salubrité publique, et sont au cœur de collaborations scientifiques (locales, régionales, nationales et internationales).

La technique de l'insecte incompatible (TII) est l'une des méthodes de lutte anti vectorielle innovante mise en œuvre par l'ILM. Ce procédé repose sur la production et le lâcher de moustiques mâles stérilisants. Les moustiques mâles, contrairement aux femelles, ne piquent pas. Ils ne sont donc ni source de nuisances, ni vecteurs de maladies. La stérilisation se fait par un processus d'incompatibilité dite cytoplasmique induit par la bactérie naturelle *Wolbachia*. Les mâles incompatibles (porteurs de *Wolbachia*), une fois lâchés dans les zones infestées, stérilisent les moustiques femelles sauvages lors de l'accouplement, qui ne produiront pas de descendance. Il en résulte un effondrement de la population de moustiques cible et donc de la nuisance (piqûres des femelles) et du risque associé de transmission des maladies. La TII a été expérimentée avec succès sur l'atoll de Tetiaroa (Bossin *et al.*, 2016), l'efficacité de cette technique étant conditionnée par la régularité et la fréquence des lâchers.

La technique de l'insecte stérile (TIS) est une autre méthode de lutte anti vectorielle développée par l'ILM. Cette technique, toujours basée sur la production et le lâcher de mâles, utilise des mâles stériles dont l'accouplement avec les femelles sauvages empêche la reproduction. Cette méthode, de même que la TII, nécessite d'estimer la densité de moustiques cible dans la zone infestée à traiter. En effet, les mâles stériles doivent être lâchés en nombre suffisant, de l'ordre de 10 mâles stériles pour chaque mâle sauvage, pour augmenter la probabilité d'accouplement entre un mâle stérile et une femelle sauvage, et diminuer la probabilité d'accouplement entre un mâle sauvage et une femelle sauvage. La stérilisation des moustiques mâles est effectuée

avec un stérilisateur à rayons X, dont l'ILM a fait l'acquisition dans le cadre du nouveau centre INNOVENTOMO au LEM à Paea.

Le centre INNOVENTOMO permettra d'industrialiser le procédé de production de moustiques et d'augmenter considérablement la capacité de production de mâles destinés à alimenter les programmes de lutte innovante (TII et TIS). Ce changement d'échelle permettra de s'intéresser à des zones de traitement bien plus vastes (communes, îles entières). Le programme PACSIT, entamé mi 2023 et porté par l'ILM en partenariat avec l'IRD et d'autres partenaires scientifiques de l'Indopacifique (Iles Cook, Rapa Nui, Australie, Singapour, etc.), a pour objectif d'évaluer l'efficacité opérationnelle de la TIS sur trois sites pilotes que sont Tetiaroa, Tahiti (Paea) et Aitutaki (Iles Cook). Ce programme est financé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), le Fonds Pacifique (État) et le Centre pour le Contrôle et la Prévention des maladies (Center for Disease Control and Prevention, CDC).

L'élevage des moustiques au LEM dans le cadre de la lutte antivectorielle nécessite une alimentation de qualité au stade larvaire. Les larves de moustiques sont ainsi nourries à l'aide d'une solution riche en protéines à base de poudre de foie de bœuf dégraissée. Or, au prix élevé de cette source de protéines importée des Etats-Unis, s'ajoutent des contraintes de biosécurité, imposant un traitement sanitaire à haute température. La capacité d'approvisionnement de cette ressource est menacée par les coûts et les délais de transport international de marchandises et fait face à un manque de disponibilité croissant.

De récents travaux (Bimbilé Somda *et al.*, 2019; Mamai *et al.*, 2019; Ernawan *et al.*, 2023) ont montré que les farines de BSF sont des ingrédients prometteurs pour l'alimentation des élevages de masse de moustiques. Le taux de lipides dans l'aliment est un facteur à ne pas négliger, car il peut être responsable de la formation d'un biofilm bactérien à la surface de l'eau des plateaux d'élevage qui asphyxie les larves de moustiques induisant une forte mortalité. Des farines de BSF dégraissées ont donc été expérimentées dans le cadre de cette étude. Ces travaux ont donc pour objectif d'évaluer le potentiel de remplacement total des protéines contenues dans la poudre de foie de bœuf par des protéines de BSF pour l'élevage de larves de moustiques *Aedes aegypti*. Les performances zootechniques des individus aux différents stades de croissance (larve, nymphe, adulte) seront donc mesurées.

Matériels et méthodes

Zone d'étude et colonie

Les essais sont menés au sein du centre INNOVENTOMO de l'ILM (Paea, Tahiti), en utilisant une colonie de moustiques *Aedes aegypti* originaire de Papeete (Tahiti), établie depuis quatre générations. Cette colonie est élevée en conditions de laboratoire, dans un environnement contrôlé avec une température de 27±2°C, une humidité relative dans l'air de 80±15% et une photopériode de 12h de jour, 12h de nuit avec les phases naturelles d'aube et de crépuscule. Dans ces conditions, le cycle de développement aquatique complet (de la larve L1 de 1er stade jusqu'à la nymphe) prend 6 à 7 jours.

Régimes expérimentaux

Trois régimes sont expérimentés pour l'alimentation des larves de moustique *Aedes aegypti*. Le taux de protéines et de lipides dans chaque régime a été préalablement déterminé au sein du Centre d'Analyses Industrielles et de Recherche Appliquée pour le Pacifique (CAIRAP). Les résultats sont donnés dans le Tableau 4.2.1.

- La poudre de foie de bovin (PFB), alimentation larvaire de référence utilisée au sein du LEM de l'ILM pour l'élevage de masse des moustiques, distribuée par American Laboratories (Omaha, Nebraska, USA), société spécialisée dans la fabrication et la distribution d'ingrédients pour l'alimentation humaine et l'alimentation des animaux de compagnie et la transformation d'aliments.

- La farine de BSF commerciale (BSF-COM) préalablement dégraissée, sourcée auprès d'InnovaFeed (Évry, France) société spécialisée dans l'élevage d'insectes pour l'alimentation animale (protéines et lipides d'insectes) et végétale (amendement organique).

- La farine de BSF produite au sein du pilote de production du programme Ra'o Puha, dégraissée par voie chimique (BSF-RP-C).

Les larves de BSF du pilote de production du programme Ra'o Puha ont été élevées comme suit. Les œufs fraichement pondus par des femelles BSF sauvages sont collectés, déposés sur une coupelle en plastique et placés dans un bac de nurserie (16,5x16,5x10,5 cm) où les œufs éclosent au bout de 3 jours. Les larves néonates sont nourries avec une alimentation larvaire consistant en un mélange de tourteaux de coprah et d'eau (1:2 V/V) après 4 semaines de fermentation. Une semaine après la date de récolte, les larves sont transférées dans des bacs de

croissance (57x37x23 cm) et sont nourries à volonté avec la même alimentation larvaire à base de tourteaux de coprah. Au jour 15 post éclosion, les larves sont séparées du résidu de digestion à l'aide d'un tamis. La mise à mort est effectuée par congélation puis les larves sont stockées à -18°C. Les larves de BSF sont ensuite séchées pendant 24h à 65°C dans une étuve de séchage. Une fois séchées les larves sont réduites en farine à l'aide d'une machine à moudre.

Le dégraissage par voie chimique est effectué suivant la méthode décrite par (Cantero-Bahillo *et al.*, 2022). L'extraction solide-liquide est réalisée avec de l'hexane 95% avec un rapport échantillon/solvant de 1 :5 (poids/volume). L'échantillon de farine de larves de BSF est donc homogénéisé dans l'hexane à l'aide d'un vortex (11 000 rpm) pendant 5 minutes. Puis le mélange est centrifugé à 4500 rpm pendant 10 minutes à 20°C. Le surnageant est retiré et le précipité est dégraissé à nouveau en suivant la même procédure. L'hexane est éliminé à l'aide d'un évaporateur rotatif sous vide (40°C ; 450 mbar). La farine dégraissée obtenue est à nouveau moulue pour homogénéisée la taille des grains.

Tableau 4.2.1 : Analyse des taux de protéines et de lipides des régimes expérimentaux (résultats exprimés en pourcentage de poids brut)

	PFB	**BSF-COM**	**BSF-RP-C**
Protéines (%)	83,2	59,9	61,8
Lipides (%)	8,7	9,2	6,5

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Design expérimental et suivi zootechnique

Chaque condition expérimentale (PFB, BSF-COM, BSF-RP-C) est répliquée 4 fois. Dans des plateaux transparents en plastique de 20x13.5x9cm, sont placées 300 larves de moustiques *Aedes aegypti* au stade L1 dans un volume de 1000mL d'eau (densité de 1,11 larves/cm²). Les plateaux sont couverts pour la durée de l'expérience. Les larves sont comptées avec un compteur de L1 (Larvae dispensing system, Orrino Technology, Singapour, annexe 1). Les régimes sont distribués en quantités iso-protéiques. Pour chaque régime expérimental, 1,664 mg de protéines par larve ont été apportés (Contreras-Perera *et al.*, 2023) en deux nourrissages espacés de 3 jours (0,555 mg de protéines par larve à J0 et 1,109 mg de protéines par larve à J3). Les quantités de farines correspondantes sont présentées dans le Tableau 4.2.2.

Tableau 4.2.2 : Masses des régimes expérimentaux apportées au cours des 2 nourrissages pour respecter un apport total de 1,664 mg de protéines par larve, pour 300 L1

	Quantité de protéines à apporter pour 300 L1 (mg)	**Masse de PFB (mg)**	**Masse de BSF-COM (mg)**	**Masse de BSF-RP-C (mg)**
Nourrissage 1	166,4	200	277,8	269,3
Nourrissage 2	332,8	400	555,6	538,5
Total	499,2	600	833,4	807,8

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Au bout de 6 jours de croissance larvaire, les nymphes sont séparées des larves et sont sexées sur la base de leur épaisseur à l'aide d'un séparateur mécanique (séparateur de type Fay-Morlan, annexe 2) (Focks, 1980), puis dénombrées. Les larves n'ayant pas encore nymphosé sont remises en croissance dans leur plateau pour un jour supplémentaire. Au jour 7, l'opération de séparation des larves et des nymphes est réitérée. Les nymphes sexées et comptées sont placées dans des pots en plastique contenant 200mL d'eau. Les pots de nymphes sont enfin placés dans des cages Bugdorm (30x30x30cm) pendant 48h, durée de l'émergence des nymphes en moustiques adultes. A l'issue de l'émergence, le nombre de moustiques effectivement émergés est déterminé par comptage. Le schéma du design expérimental est donné en Figure 4.2.1.

Différents paramètres zootechniques sont mesurés afin d'évaluer l'impact de la substitution des protéines de la poudre de foie par celles de la farine de BSF.

- Le taux de nymphose correspond au pourcentage de larves ayant atteint le stade de nymphe. Ce taux est calculé pour les mâles, pour les femelles et de façon globale ;
- Le sexe ratio est calculé comme le ratio entre le nombre total de mâles et le nombre total de femelles pour chaque traitement ;
- L'épaisseur des nymphes mâles et femelles, indicateur de croissance, est mesurée à l'aide d'un appareil (Pupae qualification system, Orinno Technology, Singapour, annexe 3). Pour chaque réplica et chaque traitement, 25 nymphes mâles et 25 nymphes femelles sont échantillonnées aléatoirement et mesurées ;

- Le taux d'émergence correspond au pourcentage de moustiques adultes ayant effectivement émergés des nymphes. De la même façon que précédemment, ce taux est calculé pour les mâles, pour les femelles et de façon globale ;
- La survie de L1 à adulte correspond au pourcentage de larves L1 ayant atteint le stade adulte.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec RStudio (version 4.2.0). La normalité de la distribution et l'homogénéité des variances des variables sont vérifiées avec les tests de Shapiro-Wilk et de Levene respectivement. Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) avec un intervalle de confiance de 95% est effectuée pour la comparaison des performances entre les régimes. Quand une différence statistique est trouvée, un test Post-hoc de Tukey par paires est effectué avec un intervalle de confiance de 95%. Pour l'épaisseur des nymphes, un test-t de Student est effectué pour tester la différence statistique des moyennes entre mâles et femelles.

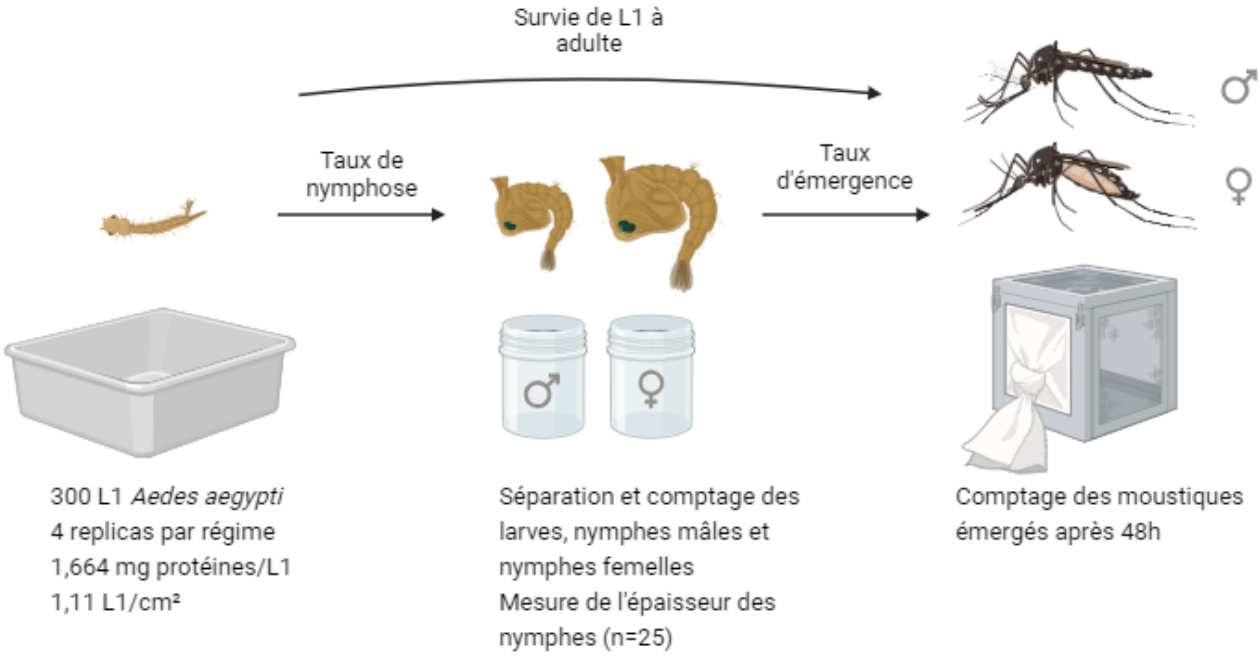


Figure 4.2.1 : Schéma du design expérimental (créé avec Biorender.com)

Résultats

Nymphose

Les larves d'*Aedes aegypti* nourries avec le régime PFB ont montré un taux de nymphose global significativement plus élevé ($p<0,05$) que celles élevées sur les régimes BSF-COM et BSF-RP-C (Tableau 4.2.3). Une différence dans la cinétique de développement larvaire et de nymphose est également observée. Chez les mâles de la condition PFB, la nymphose est la plus avancée dès le jour 6, avec 59,1% (177 nymphes mâles) de nymphose, tandis que seulement 35,3% (106 nymphes mâles) des larves du régime BSF-RP-C ont atteint le stade de nymphe mâle ($p<0.05$). Au jour 6, près de 96,3% des nymphes mâles du régime PFB se sont déjà transformées, contre 83,4% pour le régime BSF-COM et 68,8% pour le régime BSF-RP-C (Tableau 4.2.4). Malgré ce décalage dans la cinétique de nymphose des mâles, il n'y a pas de différences significatives entre les taux de nymphose des mâles des différentes conditions expérimentales ($p=0,057$) à l'issue de l'expérience comme le montre la Figure 4.2.2. La même tendance est observée pour la cinétique de nymphose des femelles. La nymphose des femelles est significativement plus élevée au jour 6 pour la condition PFB ($p<0,05$) avec 31,2% (94 nymphes femelles) de nymphose contre 11,3% (34 nymphes femelles) pour le régime BSF-COM et 5.6% (17 nymphes femelles) pour le régime BSF-RP-C (Tableaux 3 et 4). Au jour 6, 88,4% des nymphes femelles se sont déjà transformées pour le régime PFB, contre seulement la moitié (49,6%) pour le régime BSF-COM et moins du quart pour le régime BSF-RP-C (23,4%). De même que chez les mâles, le retard de nymphose est rattrapé au jour 7. Bien que le taux de nymphose des femelles au jour 7 soit plus élevé pour le régime PFB (35,3%) que pour les deux autres (23,5 et 24,4% pour BSF-COM et BSF-RP-C respectivement), les tests de comparaison par paires (Post-Hoc de Tukey) n'ont pas montré de différences significatives entre les 3 régimes (Figure 4.2.3).

Tableau 4.2.3 : Taux de nymphose des mâles et des femelles aux jours 6 et 7 de l'expérience suivant le régime expérimental. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=4). Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents (p<0,05)

Paramètres	**PFB**	**BSF-COM**	**BSF-RP-C**
Taux de nymphose global (%)	96,7 ± 1,8^{a}	75,9 ± 8,9^{b}	77,8 ± 12,3^{b}
Taux de nymphose des mâles à J6 (%)	59,1 ± 4,0^{a}	45,4 ± 6,9^{b}	35,3 ± 3,8^{c}
Taux de nymphose global des mâles (%)	61,3 ± 4,3^{a}	54,3 ± 5,1^{a}	51,5 ± 5,7^{a}
Taux de nymphose des femelles à J6 (%)	31,2 ± 0,047^{b}	11,3 ± 3,5^{a}	5,6 ± 1,1^{a}
Taux de nymphose global des femelles (%)	35,3 ± 5,0^{a}	23,5 ± 8,7^{a}	24,4 ± 3,7^{a}
Larves n'ayant pas nymphosé (%)	1,9 ± 1,1^{a}	4,7 ± 1,4^{b}	3,2 ±1,6^{ab}

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

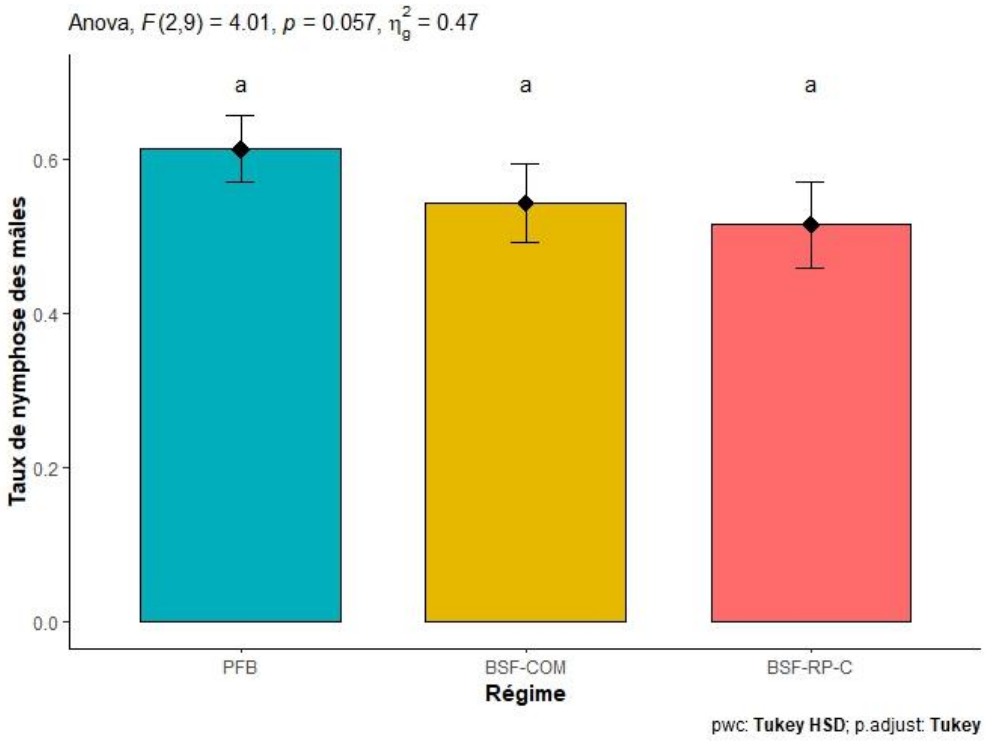


Figure 4.2.2 : Taux de nymphose des mâles suivant le régime expérimental. Les lettres différentes indiquent une différence significative (p<0,05). PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Tableau 4.2.4 : Nombre et pourcentage de nymphes ayant déjà nymphosé au jour 6 suivant le régime expérimental. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=4) . Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents (p<0,05)

Paramètres	**PFB**	**BSF-COM**	**BSF-RP-C**
Nombre de nymphes mâles sortis au jour 6	177 ± 12^{a}	136 ± 21^{b}	106 ± 12^{c}
Nymphes mâles sortis au jour 6 (% mâles)	96,3 ± 0,5^{a}	83,4 ± 8,5^{b}	68,8 ± 6,3^{c}
Nombre de nymphes femelles sorties au jour 6	94 ± 14^{a}	34 ± 10^{b}	17 ± 3^{b}
Nymphes femelles sorties au jour 6 (% femelles)	88,4 ± 3,1^{a}	49,6 ± 8,1^{b}	23,4 ± 6,1^{c}

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

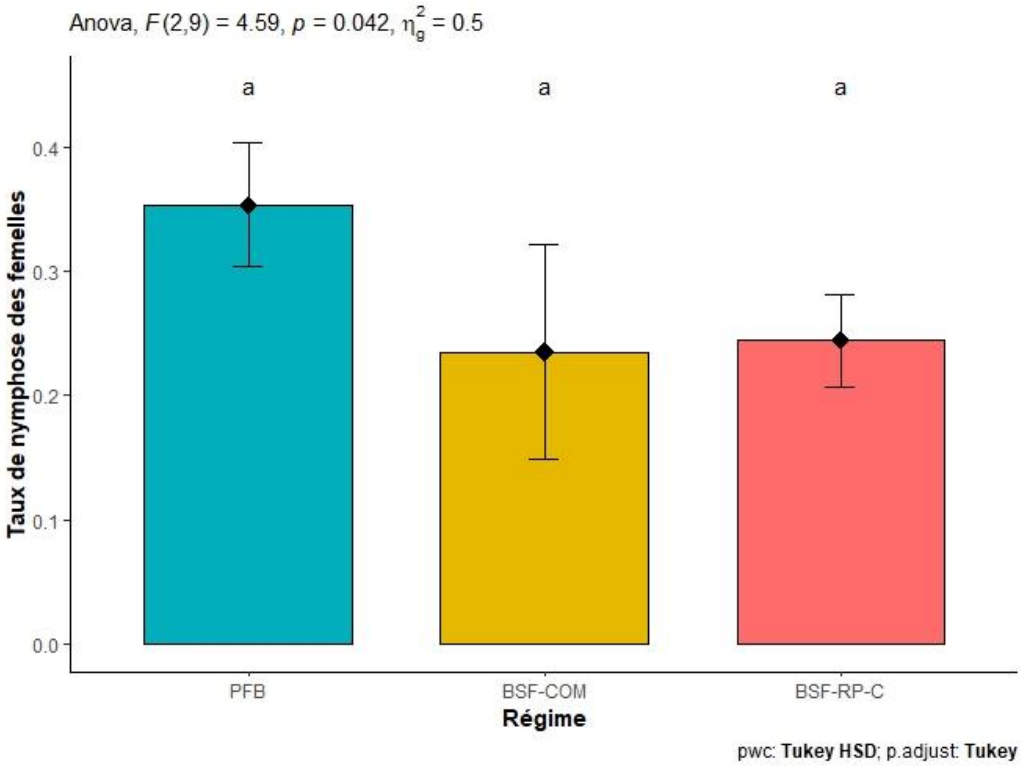


Figure 3 : Taux de nymphose des femelles suivant le régime expérimental. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=4). Les lettres différentes indiquent une différence significative (p<0,05). PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Le régime larvaire a affecté significativement ($p<0,05$) le nombre final de nymphes produites, qui est plus élevé avec le régime PFB (290 nymphes) qu'avec les régimes à base de farine de BSF (234 et 229 nymphes pour BSF-COM et BSF-RP-C respectivement, Tableau 4.2.5). Les régimes à base de BSF ont un sexe ratio M : F plus important avec une production relative de mâles de 67,9% (ratio M/F 2,1 ; BSF-RP-C) à 70,5% (ratio M/F 2,5 ; BSF-COM) contre 63,5% (ratio M/F 1,8) pour le traitement PFB, mais cet écart n'est pas significatif ($p=0,057$).

Tableau 4.2.5 : Nombre, pourcentage et sexe ratio des nymphes en fonction des régimes expérimentaux à l'issue de l'expérience (au jour 7). Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=4). Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents ($p<0,05$)

Paramètres	**PFB**	**BSF-COM**	**BSF-RP-C**
Nombre de nymphes mâles	184 ± 12^{a}	163 ± 15^{a}	155 ± 17^{a}
Nymphes mâles (% total)	$63,5 \pm 4,9^{a}$	$70,5 \pm 6,9^{a}$	$67,9 \pm 2,3^{a}$
Nombre de nymphes femelles	106 ± 15^{a}	71 ± 26^{a}	73 ± 11^{a}
Nymphes femelles (% total)	$36,5 \pm 4,9^{a}$	$29,5 \pm 6,9^{a}$	$32,1 \pm 2,3^{a}$
Ratio (mâle : femelle)	$1,8 \pm 0,4^{a}$	$2,5 \pm 0,8^{a}$	$2,1 \pm 0,2^{a}$
Nombre total de nymphes	$290 \pm 5,3^{a}$	234 ± 37^{b}	229 ± 27^{b}
Nombre de larves n'ayant pas nymphosé	6 ± 3^{a}	14 ± 4^{b}	10 ± 5^{ab}

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Épaisseur des nymphes

L'épaisseur des nymphes est un indicateur de croissance. Ce paramètre a été mesuré après séparation des nymphes femelles et des nymphes mâles. Cette séparation est possible grâce au dimorphisme sexuel qui existe entre mâles, plus fins, et femelles, plus épaisses. Ce dimorphisme sexuel est utilisé dans le processus de production à grande échelle pour séparer les femelles afin de ne lâcher que des moustiques mâles sur le terrain. Il est donc nécessaire que les conditions d'élevage industriel utilisées préservent ce dimorphisme pour éviter toute "contamination" des lâchers de moustiques mâles par des moustiques femelles. La Figure 4.2.4 présente les résultats de mesure de l'épaisseur des nymphes mâles et femelles sous forme de boîte moustache.

L'annexe 4 permet d'observer la distribution normale des épaisseurs des nymphes par régimes. Les nymphes de la condition BSF-COM, en plus d'être significativement plus épaisses ($p<0,0001$) semblent être celles pour lesquelles la différence de taille entre mâles et femelles est la plus marquée. Le test-t de Student montre une différence significative entre l'épaisseur des nymphes mâles et femelles ($p<0,0001$) pour tous les régimes. Le dimorphisme sexuel a donc bien été conservé, et est suffisamment marqué pour séparer les nymphes mâles des nymphes femelles comme le montre la photo en annexe 2.

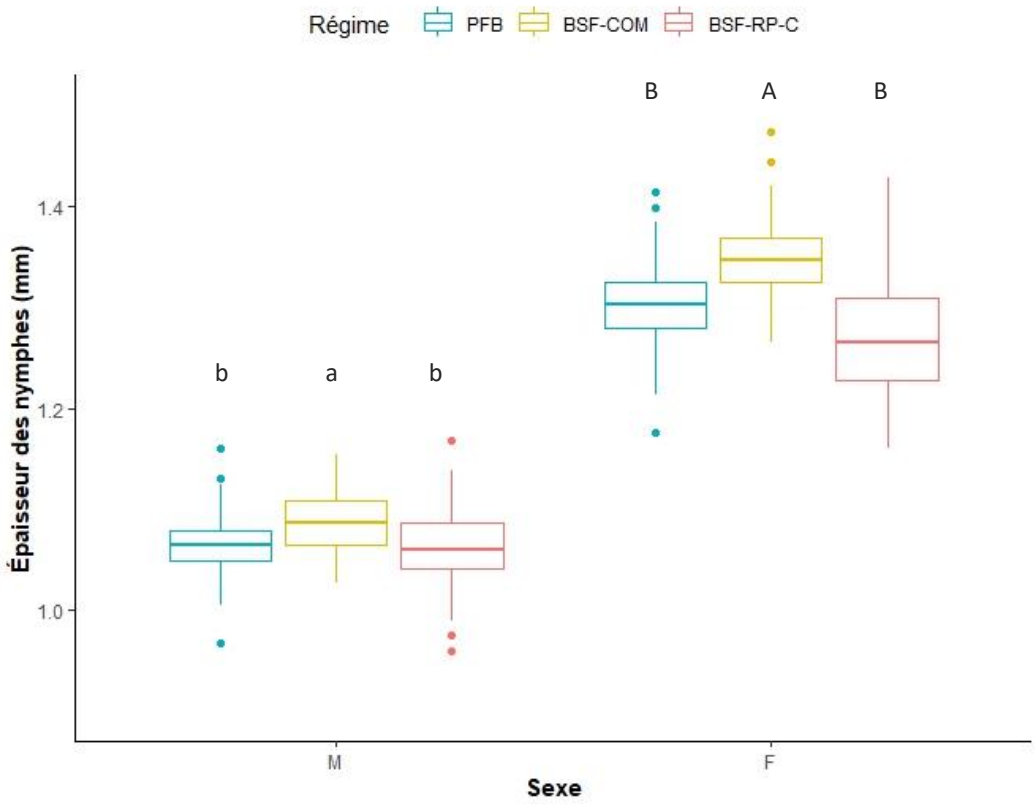


Figure 4.2.4 : Epaisseur des nymphes mâles (M) et femelles (F) suivant le régime expérimental (n=100). Les différences significatives entre régimes sont indiquées par des lettres différentes en minuscules (mâles) et en majuscules (femelles). PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Taux d'émergence et survie de L1 à adulte

Il n'y a pas de différence significative entre les régimes pour les taux d'émergence des mâles ($p=0.17$) et des femelles ($p=0,089$), qui sont tous supérieurs à 97%. Le régime qui permet de maximiser le nombre d'individus adultes est le régime PFB, avec un taux de survie de L1 à

adulte de 94,1%, significativement plus élevé que les taux des régimes BSF-COM (75,8%) et BSF-RP-C (72,6%) qui perdent près de 25% des individus au cours de la croissance (Tableau 4.2.6).

Tableau 4.2.6 : Taux d'émergence des moustiques mâles et femelles et taux de survie de L1 à adulte suivant le régime expérimental. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=4) . Les résultats d'une même ligne avec différentes lettres sont significativement différents ($p<0,05$)

Paramètres	**PFB**	**BSF-COM**	**BSF-RP-C**
Taux d'émergence des mâles (%)	$98,8 \pm 0,8^{a}$	$98,9 \pm 1,3^{a}$	$97,0 \pm 1,6^{a}$
Taux d'émergence des femelles (%)	$97,6 \pm 0,8^{a}$	$98,6 \pm 2,0^{a}$	$96,4 \pm 3,8^{a}$
Taux d'émergence (%)	$98,3 \pm 0,7^{a}$	$98,9 \pm 0,7^{a}$	$96,9 \pm 1,7^{a}$
Survie de L1 à adulte (%)	$94,1 \pm 2,4^{b}$	$75,8 \pm 12,5^{a}$	$72,6 \pm 9,7^{a}$

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.

Discussion

Cette étude est menée dans le but d'évaluer l'effet du remplacement des protéines apportées par la PFB par des protéines issues des farines de BSF sur le cycle de vie en laboratoire du moustique *Aedes aegypti*, du stade larvaire à l'émergence des adultes.

Généralement chez les moustiques, les mâles atteignent le stade de nymphes plus rapidement que les femelles (Mercer, Schoergendorfer and Vandyke, 2008; Bellini *et al.*, 2018). Ce phénomène, appelé protandrie, a bien été observé dans le cadre de cette étude. Les premières nymphes mâles sont apparues au 5ème jour de développement, avec une nymphose de la majorité des mâles au jour 6 notamment pour le régime PFB. Pour ce régime la majorité des femelles ont également nymphosé au jour 6, tandis qu'il faudra attendre le jour 7 pour les régimes à base de farine de BSF pour avoir une nymphose massive des femelles. Ce phénomène de décalage entre nymphose des mâles et des femelles est exploité par le laboratoire pour faciliter la séparation des deux sexes et limiter les risques de contamination des lots de mâles par des femelles au moment de l'opération de séparation des individus. En effet, il est possible d'effectuer le tri des nymphes au moment où la majorité des nymphes mâles sont développés alors que seule une minorité des femelles ont nymphosé. C'est notamment le cas au jour 6 avec

le régime BSF-COM où 83% des mâles ont déjà nymphosé alors que seulement la moitié des nymphes femelles se sont développées (Tableau 4.2.4).

La nymphose a été interrompue au jour 7 mais il restait encore quelques larves qui ne s'étaient pas transformées : 1,9% (6 larves) des larves pour PFB, 4,7% (14 larves) pour BSF-COM et 3,2% (10 larves) pour BSF-RP-C (Tableaux 4.2.3 et 4.2.5). La transformation des larves vivantes restantes a pris quelques heures supplémentaires. Bien que les larves des régimes BSF-RP-C et BSF-COM nymphosent un peu plus tard que celles du régime PFB, la cinétique de croissance reste proche de celle obtenue dans d'autres études. Mamai et al., (2019) observent une nymphose des mâles *Aedes aegypti* au bout de 7,5 jours en moyenne, et la nymphose des femelles au bout de 8,5 jours en moyenne.

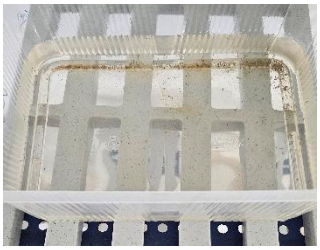
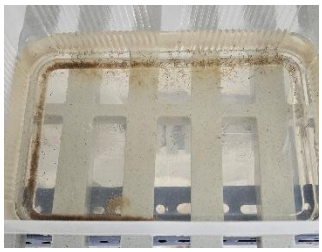
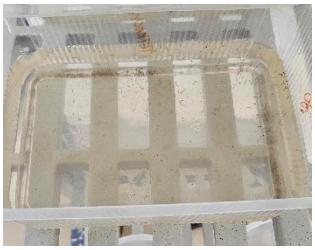
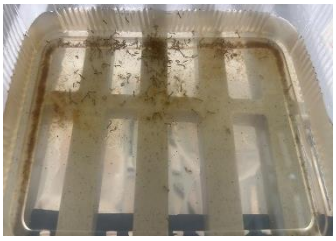
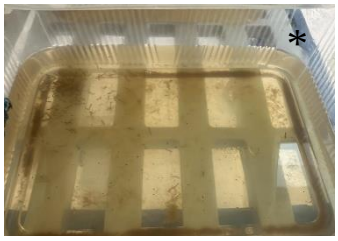
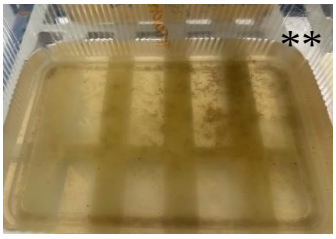
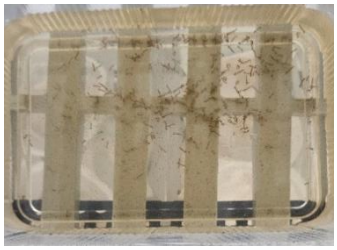
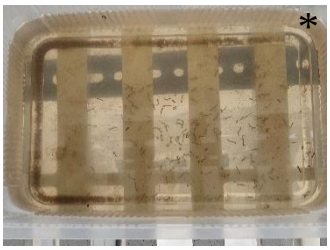
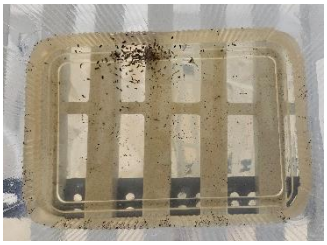
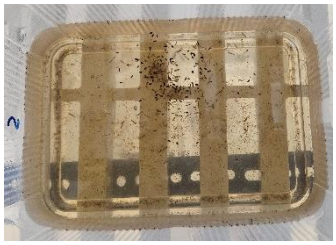
L'utilisation de la farine de BSF dans cette expérience a permis la production de nymphes avec un sexe ratio M : F compris entre 2,1 et 2,5. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Ernawan et al., (2023), avec la production de 71,9% de nymphes mâles, 28,1% de nymphes femelles et un sexe ratio M : F de 2,55 pour des larves nourries avec de la farine de BSF. Avec des taux d'émergence similaires entre les différents régimes et supérieurs à 96%, la PFB correspond au régime permettant la production d'un maximum d'individus, et donc d'un maximum de mâles à lâcher sur le terrain. L'étape du cycle de vie du moustique ayant montré le plus de disparités entre les traitements dans le cadre de cette étude est la nymphose. Plusieurs facteurs sont envisagés pour expliquer ce constat.

L'observation des plateaux de croissance a mis en évidence l'apparition d'un biofilm au sein de tous les réplicas des régimes BSF-COM et BSF-RP-C (Tableau 4.2.7). En effet, au jour 4, les plateaux des régimes BSF-COM et BSF-RP-C ont atteint un pic de turbidité du milieu de croissance, à la suite du second nourrissage des larves. Aux jours 4 et 5, ce sont les plateaux du régime BSF-RP-C qui étaient les plus troubles. Cette turbidité s'est estompée au jour 6, une fois la nourriture consommée. Nous formulons l'hypothèse que ces épisodes de turbidité sont associés au développement de communautés bactériennes et au potentiel déséquilibre entre le développement de ces dernières et celui des larves de moustiques.

En effet, de même que pour les larves de BSF, l'environnement dans lequel les larves de moustiques se développent correspond également à leur alimentation. Il y a donc une compétition possible entre les larves de moustiques et les micro-organismes présents dans le milieu, notamment pour l'accès aux ressources nutritives. Dans notre cas, nous suggérons que les régimes à base de farines de larves de BSF (BSF-COM et BSF-RP-C) ont apporté des

bactéries différentes de celles apportées par la PFB ayant subi un traitement chimique et thermique préalable. La prolifération de ces communautés bactériennes a entrainé la formation d'un biofilm bactérien, pouvant impacter la respiration et limiter ainsi l'apport en oxygène aux larves et aux nymphes de moustiques et entrainer des retards de croissance ou de la mortalité (Ernawan *et al.*, 2023).

Tableau 4.2.7 : Evolution visuelle des plateaux de croissance au cours du temps pour chaque régime expérimental (Photo d'un seul réplica par condition expérimentale)

Jour	PFB	BSF-COM	BSF-RP-C
3			
4		 *	 **
5		 *	 *
6			

PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement ; * trouble ; ** très trouble.

D'autre part, chez les moustiques, une grande partie du microbiote intestinal des larves provient de leur environnement aquatique (Boissière *et al.*, 2012; Yun *et al.*, 2014; Coon, Brown and Strand, 2016), et une partie de ce microbiote est transmis aux adultes au cours de la métamorphose (Coon *et al.*, 2014) mais également aux générations suivantes (Straif *et al.*, 1998; Lindh, Borg-Karlson and Faye, 2008; Chen *et al.*, 2020).

Nous pouvons donc également émettre l'hypothèse que si la colonie avait été élevée sur une farine à base de BSF sur plusieurs générations (comme ça a été le cas avec cette souche, 4ème génération avec la poudre de foie comme régime larvaire), il y aurait une diminution voire une disparition du biofilm bactérien pour les plateaux contenant de la farine de BSF grâce à une adaptation du microbiote intestinal. Une réduction du biofilm bactérien pourrait également être observée avec l'utilisation d'un mélange de farine de BSF et de poudre de foie comme régime larvaire. Ces deux hypothèses restent à expérimenter mais les travaux en cours montrent que l'utilisation combinée de ces farines est prometteuse pour la bonne croissance des larves et le maintien des performances à l'âge adulte du moustique *Aedes aegypti* (Mamai *et al.*, 2019).

Le léger décalage de croissance observé sur les individus nourris avec de la farine de larves de BSF peut également être lié à une métabolisation des nutriments plus lente, également observée par (Ernawan *et al.*, 2023). Face à la faible vitesse d'assimilation des farines de BSF par les larves de moustiques, le développement bactérien devient prépondérant et se traduit par la formation du biofilm. Ce phénomène pourrait être limité en mettant en place un nourrissage plus fractionné (par exemple tous les jours) afin d'éviter les pics de concentration des nutriments dans l'eau. Les hypothèses évoquées pour expliquer l'assimilation plus lente des nutriments sont celles d'une texture plus dense de la farine de larves de BSF en comparaison aux autres farines utilisées, résultant en la formation d'agglomérats et d'une granulométrie de la farine non homogène. Ceci pourrait être dû aux niveaux élevés de fibres dans la farine de larves de BSF, compris entre 5 et 30% (Shumo, Osuga, *et al.*, 2019; Mohd Yusoff, Hai and Komilus, 2022; Ernawan *et al.*, 2023) Les fibres peuvent en effet altérer la digestibilité des nutriments, ce qui se traduit par une baisse des performances de croissance. La seconde hypothèse est celle d'un niveau plus bas en glucides non structuraux et digestibles (16% dans l'étude de Ernawan et al., (2023) contre des niveaux supérieurs à 57% dans les autres ingrédients expérimentés), impliqués dans le processus de métabolisation des nutriments (Traughber *et al.*, 2021). Chez les insectes et notamment chez le moustique, le développement de l'individu est conditionné par la qualité des réserves en protéines, en acides aminés, en glycogène et en acides gras et leur assimilabilité (Chambers and Klowden, 1990; Arrese and

Soulages, 2010). Ainsi, la caractérisation des niveaux de fibres, de la granulométrie, des profils d'acides aminés et d'acides gras des régimes expérimentaux serait pertinente afin de comparer la qualité et l'assimilabilité des régimes larvaires. Le régime de référence formulé par l'AIEA pour l'élevage de masse de l'espèce *Aedes aegypti* correspond à une mélange de poudre de foie de bovin (36%), de farine de poisson (50%) et de levure de bière (14%) (FAO/IAEA, 2020). Ce régime a été formulé pour apporter acides gras, protéines et vitamines en quantités suffisantes pour un développement larvaire optimal. Malgré les performances larvaires obtenues à partir de ce régime, le laboratoire de lutte des insectes nuisibles (Insect Pest Control Laboratory, IPCL) de l'AIEA étudie le potentiel remplacement de la PFB pour des raisons économiques et en raison des difficultés croissantes d'approvisionnement de cette ressource. La PFB est une source importante de protéines, la farine de poisson une source de protéines et d'acides gras, et la levure de bière est une source de glucides (Yahouédo *et al.*, 2014). L'utilisation de la farine de BSF en complément d'autres ingrédients tel que cela est montré dans le chapitre 3 de ce manuscrit pourrait donc permettre d'optimiser les performances de croissance des larves mais également les performances à l'âge adulte.

En effet, l'efficacité des méthodes de TIS ou de TII repose sur la production de mâles de qualité (compétitifs sur le terrain avec les mâles sauvages). Bien que cette étude soit centrée sur les performances des larves, des nymphes et sur l'émergence des moustiques dans un premier temps, d'autres paramètres restent à évaluer dans une prochaine expérimentation : longévité, capacité d'envol et compétitivité sexuelle des mâles adultes.

Conclusion

Cette partie du chapitre 4 avait pour objectif d'expérimenter le potentiel et l'impact du remplacement total des protéines apportées par la poudre de foie de bœuf par des protéines de larves de BSF sur les performances zootechniques de l'élevage de moustiques *Aedes aegypti*. Ces travaux ont nécessité la transformation des larves de BSF qui ont subi des étapes de séchage, dégraissage et broyage. Les résultats obtenus sont très encourageants et indiquent que la farine de BSF peut être utilisée en remplacement de la poudre de foie de bovin malgré une diminution du taux de nymphose de l'ordre de 20%.

Afin d'améliorer les performances zootechniques des individus et d'approfondir cet axe de recherche plusieurs pistes sont identifiées. L'inclusion de probiotiques au régime larvaire de moustique est envisagée pour optimiser les performances de croissance en complément de la farine de BSF. La caractérisation plus précise des différents régimes expérimentaux (taux de

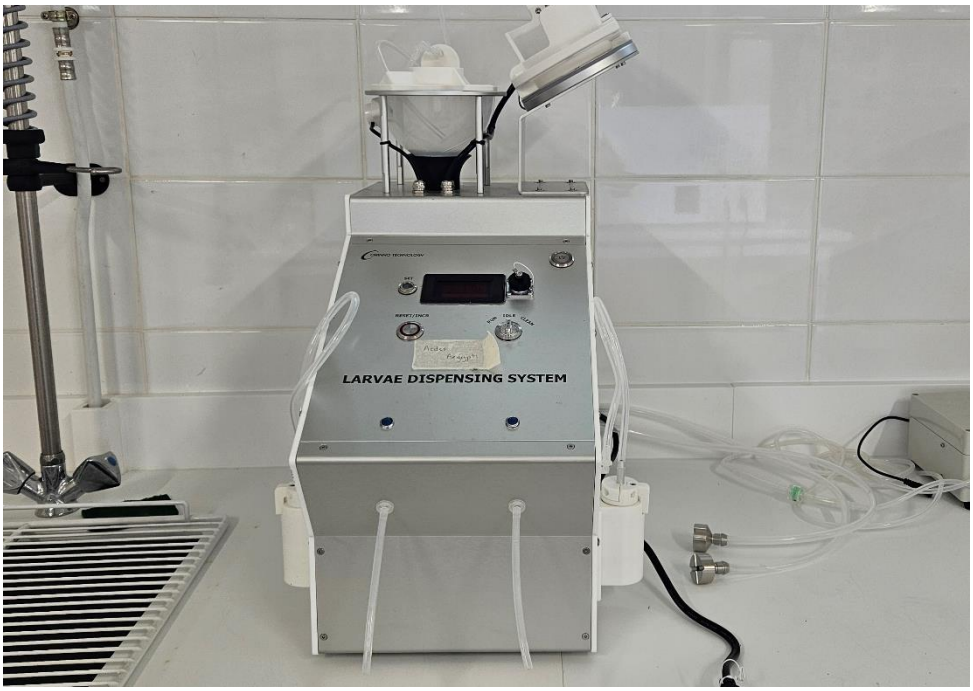
fibres, profils d'acides gras, profils d'acides aminés, vitamines et minéraux) permettra de mieux cerner les apports de chaque ingrédient et par conséquent les besoins spécifiques des larves de moustiques. La démarche expérimentale sera poursuivie avec le suivi et la mesure des performances à l'âge adulte afin de vérifier le potentiel de la farine de larves de BSF comme régime larvaire pour le maintien de la colonie du LEM, mais également comme régime larvaire garantissant la compétitivité des moustiques adultes mâles lâchés sur le terrain face aux moustiques mâles sauvages. D'autres approches pourront être testées avec notamment l'expérimentation d'assemblages de poudre de foie de bovin et de farine de BSF pour déterminer le point d'équilibre entre maintien des performances zootechniques et réduction des coûts liés à l'alimentation larvaire. Enfin, le centre INNOVENTOMO oeuvrant par ailleurs à l'élevage de masse de moustiques *Aedes polynesiensis,* et bientôt à l'élevage de moustiques *Culex quinquefasciatus,* les mêmes expérimentations pourront être menées sur ces espèces.

A l'échelle du pilote de production du programme Ra'o Puha, nos efforts seront consacrés à l'amélioration puis à la standardisation des techniques de transformation des larves de BSF en farine dégraissée, pour la production d'une farine à la granulométrie homogène et fine, afin d'améliorer l'assimilabilité des nutriments. Bien que la voie chimique ait été utilisée pour le dégraissage de la farine de BSF issue du pilote de production, la maitrise du dégraissage par voie mécanique est une de nos priorités pour l'industrialisation de nos procédés et de notre production.

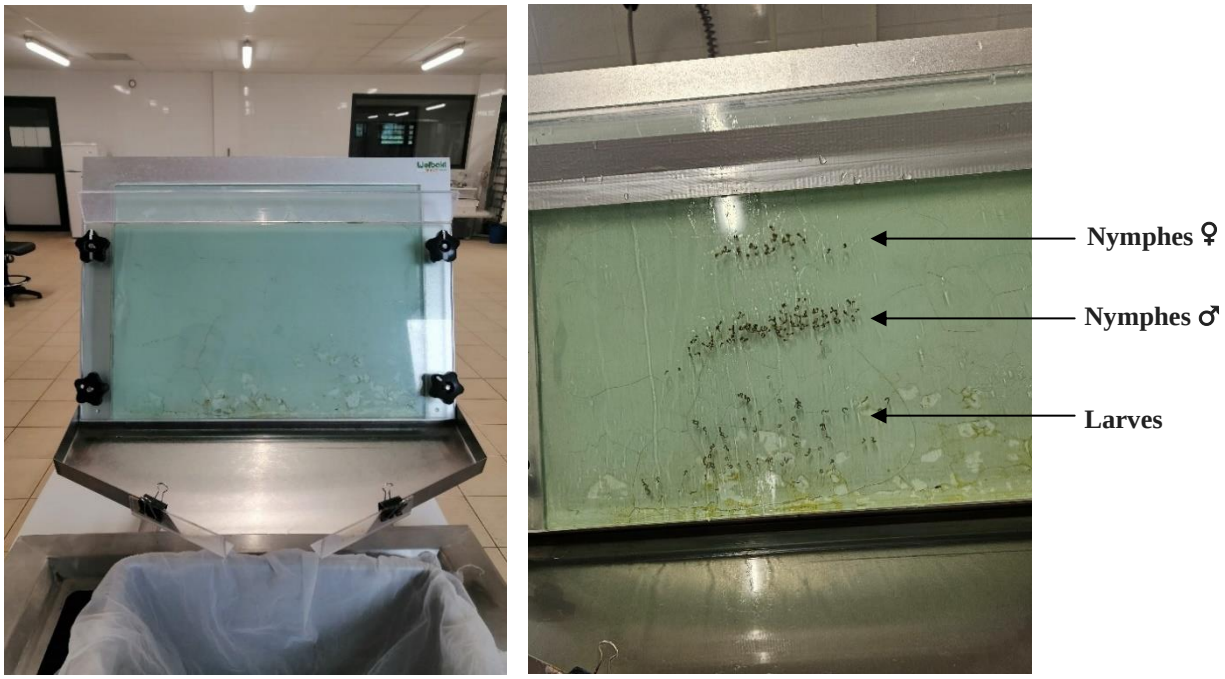
La valorisation des larves de BSF dans la filière de l'entomologie médicale est particulièrement intéressante car elle ne nécessite pas l'intervention d'un fabricant d'aliment. La farine de larves de BSF pourrait être vendue en direct au laboratoire et être utilisée telle quelle. Les ambitions du LEM sont de multiplier par 50 leur capacité de production de moustiques, ce qui correspond à un besoin en poudre de foie de bovin de l'ordre de 1 tonne par an au prix actuel de 68 $USD/kg (7280 XPF/kg) prix départ d'usine en Californie, ce qui représente une dépense de l'ordre de 8000 à 9000 XPF/kg toutes charges comprises pour le laboratoire. Bien que ce marché soit de petite taille, il s'agit d'un débouché direct pour la commercialisation de la farine dégraissée de larves de BSF, que l'unité pilote du programme Ra'o Puha devrait être en mesure d'approvisionner prochainement.

Annexes

Annexe 4.2.1 : Compteur de L1 (Larvae dispensing system, Orrino Technology, Singapour)

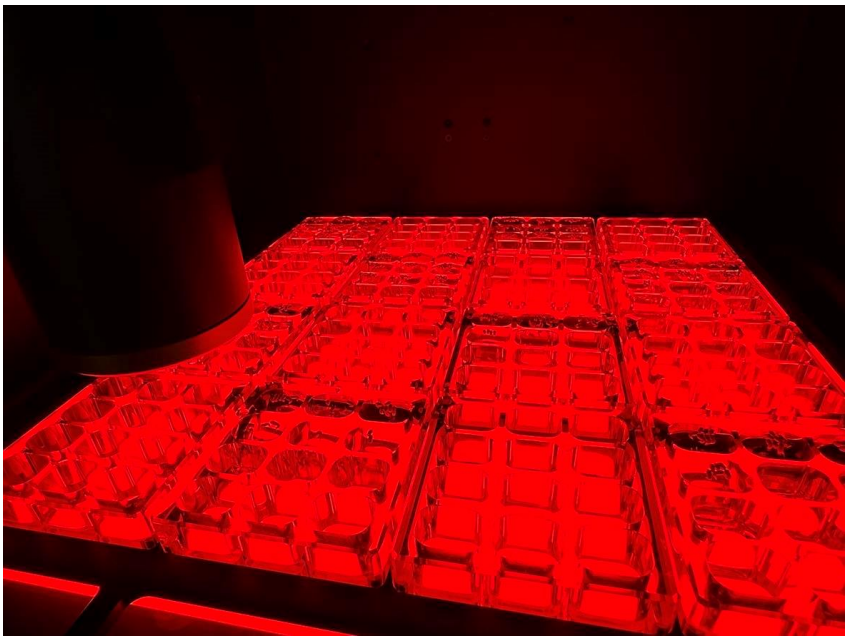


Annexe 4.2.2 : Séparateur mécanique de larves et de nymphes (séparateur de type Fay-Morlan)

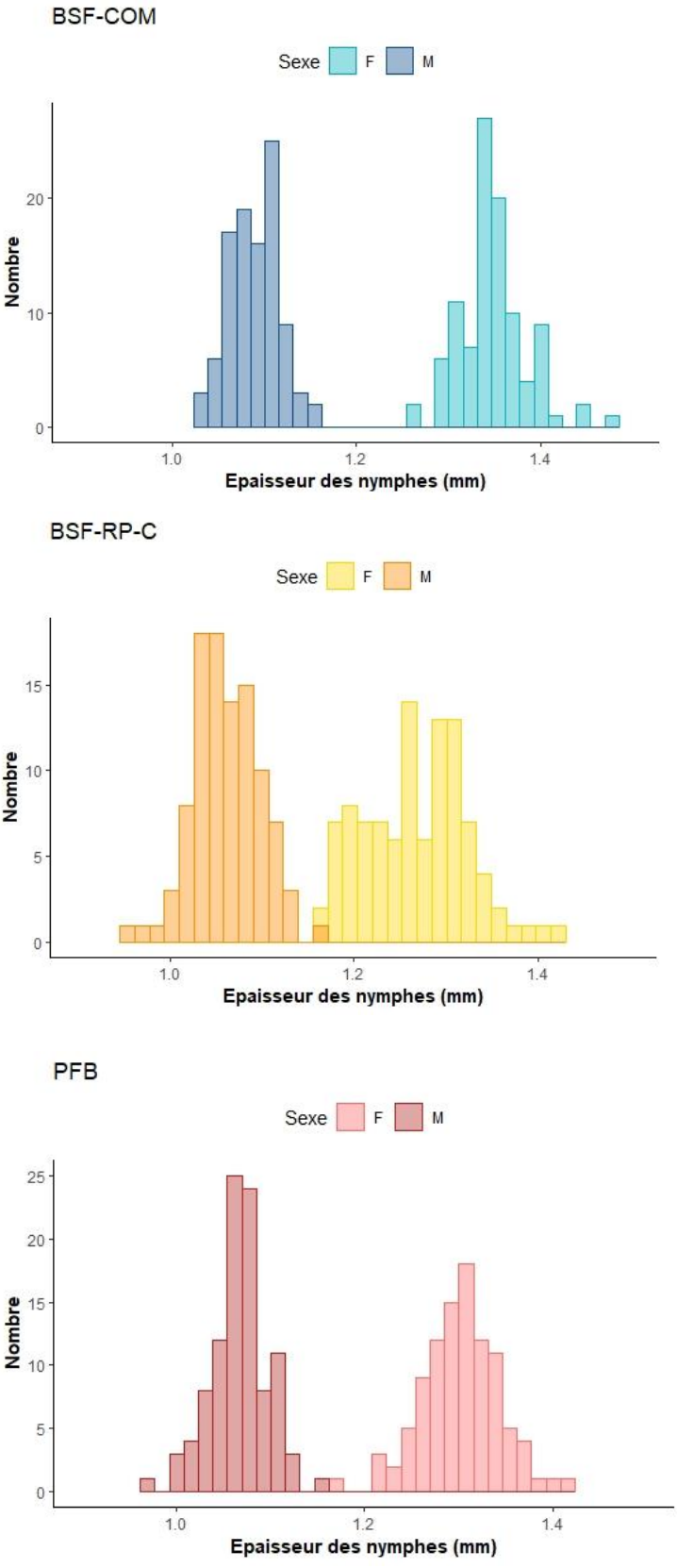


Annexe 4.2.3 : Mesure de l'épaisseur des nymphes (Pupae qualification system, Orinno Technology, Singapour) : photos des cellules de mesure





Annexe 4.2.4 : Histogrammes par classe de l'épaisseur des nymphes femelles (F) et mâles (M) suivant les régimes expérimentaux. PFB : Poudre de foie de bovin, BSF-COM : Farine de BSF commerciale, BSF-RP-C : Farine de BSF Ra'o Puha, dégraissée chimiquement.



Développement d'un outil d'aide à la formulation et intégration des larves dans un aliment en aquaculture pour la crevette bleue *Litopenaeus stylirostris*

Introduction

Avec son caractère insulaire et l'étendue de ses surfaces marines récifo-lagonaires, la Polynésie française est un territoire de choix pour promouvoir le développement de la filière aquacole. L'aquaculture en Polynésie française est en premier lieu représentée par la perliculture (l'huitre perlière *Pinctada margaritifera*), qui est la seconde source de revenus du Pays après le tourisme, et qui représentait en 2021 près de 52% de la valeur des exportations locales (ISPF). En dehors de la perliculture, la filière aquacole est tournée vers la production de la crevette bleue *Litopenaeus stylirostris* principalement en bassins à terre et nouvellement en cages ainsi que vers la pisciculture lagonaire avec l'élevage du poisson lune *Platax orbicularis,* communément appelé « Paraha peue » (DRM, 2024). On assiste également au retour du poisson *Lates calcarifer* (loup tropical) qui est exploité en aquaponie par une exploitation maraichère située sur la plateau de Taravao. Enfin, l'aquaculture de bénitiers *Tridacna maxima* est orientée vers l'exportation de jeunes bénitiers pour l'aquariophilie et le réensemencement des lagons pour la consommation humaine.

En 2021, la quantité de crevettes produites sur Tahiti a excédé les 160 tonnes, nécessitant l'importation d'environ 350 tonnes d'aliments. Les perspectives de production de crevettes en Polynésie avec la création de la zone Biomarine Aruhotu de Faratea permettent d'envisager un triplement de cette production. Cela signifie que la filière crevetticole aura besoin d'au moins 1000 tonnes d'aliment par an pour atteindre cet objectif. D'autre part, la filière « Paraha peue », lorsqu'elle aura résolu le problème des mortalités survenant à la mise en cages, deviendra aussi demandeuse de grande quantité d'aliment dont la totalité est actuellement importée. Il y a donc un enjeux important en Polynésie française pour sécuriser ses productions aquacoles en commençant à produire ses propres aliments.

Les farines et huiles de BSF sont étudiées notamment pour le remplacement des farines et huiles de poisson dans les aliments aquacoles. En effet, la farine de BSF a des valeurs nutritives proches de celles de la farine de poisson (Rumpold and Schlüter, 2013b) et l'intégration de co-produits de la pêche à l'alimentation des larves de BSF permet d'enrichir les taux d'acides gras

polyinsaturés (AGPI) de la biomasse larvaire (voir chapitre 3 de ce manuscrit), la rendant plus intéressante pour l'alimentation des espèces marines (St-Hilaire *et al.*, 2007). Magalhães et al., (2017) ont substitué avec succès 45% de la farine de poisson par de la farine de BSF dans l'alimentation du bar européen (*Dicentrarchus labrax*) sans altérer les performances de croissance ou de digestibilité des individus. De même, jusqu'à 50% de substitution de farine de poisson par de la farine de BSF dans l'alimentation de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) a été possible sans altérer les performances de croissance, de survie et la morphologie intestinale des poissons (Renna *et al.*, 2017). La substitution de 100% de la farine de poisson dans l'alimentation du saumon atlantique (*Salmo salar*) a été réalisée sans effets négatifs sur les performances de croissance, de digestibilité, ni sur les qualités gustatives du filet (Belghit *et al.*, 2019). La santé du foie, indicateur de la santé du saumon en raison de ses nombreuses fonctions (dans le métabolisme, comme indicateur de toxicité, ou encore pour son rôle dans la réponse immunitaire du poisson) n'a pas été impactée par la substitution de la farine de poisson par la farine de larves de BSF.

A l'échelle nationale et internationale, les leaders sur le marché de la production de farines et huiles de BSF pour l'alimentation animale ciblent diverses filières et notamment les filières aquacoles. Le producteur de larves de BSF Innovafeed propose par exemple des ingrédients spécifiques, spécialement formulés pour l'aquaculture : Hilucia™ Protein for Salmonids, Hilucia™ Protein for Shrimps et Hilucia™ Oil for Aqua. En 2018, plusieurs acteurs de la filière aquacole se sont réunis afin d'offrir aux consommateurs français la première truite sous le label « Vive l'insecte ». Cette initiative a vu le jour grâce à l'union du producteur Innovafeed, du formulateur d'aliment Skretting, de l'éleveur Truite Service, du label Mister GoodFish et du distributeur Auchan. En bref, 50% de la farine de poisson dans l'alimentation de la truite ont été remplacés par de la farine de BSF et ce sont 50 magasins français qui ont distribué les truites labellisées « Vive l'insecte ».

L'objectif du projet Ra'o Puha, est de parvenir à insuffler une dynamique similaire au sein de l'écosystème polynésien, notamment sur la filière de la crevette bleue. Bien que cela reste un projet ambitieux en l'absence de producteur local d'aliments pour l'aquaculture, la possibilité de distribuer des aliments pour crevettes à base de farine et/ou d'huiles de BSF, issus d'une production locale et durable, permettrait de dynamiser l'économie polynésienne, de générer des emplois et de rendre la filière plus autonome.

Le remplacement de la farine de poisson par la farine de larves de BSF dans l'alimentation des crevettes est à l'étude afin de déterminer le seuil de substitution permettant un maintien voire

une amélioration des performances zootechniques. La littérature sur le sujet concerne essentiellement la crevette blanche du Pacifique (*Litopenaeus vannamei*) : Novriadi et al., (2024) ont utilisé de la farine de BSF pour substituer 0,5 à 5% de la farine de poisson d'une part, et de l'huile de BSF pour substituer 0,5 à 5% d'huile de poisson d'autre part. Leurs résultats montrent que l'inclusion de farines et d'huiles de BSF permet d'augmenter significativement le taux de survie, d'augmenter la réponse immunitaire et d'améliorer les profils histopathologiques des tissus hépatopancréatiques. Des essais menés par Usman et al., (2021) montrent que de 0% à 22.5% de substitution de la farine de poisson dans l'aliment, il n'y a pas de différences significatives sur les performances zootechniques des crevettes nourries. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Cummins et al., (2017) indiquant que les performances zootechniques des crevettes sont maintenues, tant que le niveau de substitution de la farine de poisson reste inférieur à 25%.

A l'inverse des deux filières présentées précédemment dans ce chapitre (aviculture et entomoculture), pour intégrer la larve de BSF à l'alimentation de la crevette bleue, il est nécessaire de formuler un aliment complet, dans lequel la BSF n'est qu'un ingrédient. Avant de mener des tests d'appétence, il est donc nécessaire d'être en mesure de formuler puis de fabriquer un aliment complet, répondant aux besoins nutritionnels de la crevette. Nous décrirons donc dans cette partie la méthode utilisée pour développer un outil de formulation. Deux exemples d'application de cet outil seront donnés pour la formulation d'un aliment type industriel, formulés à base d'ingrédients communément utilisés dans la filière aquacole. N'ayant pas sur le territoire polynésien les moyens techniques de produire ce type d'aliment, nous appliquerons cet outil pour la formulation et la fabrication d'un aliment humide artisanal. Enfin, l'appétence de cet aliment pour les crevettes sera évaluée.

La formulation d'un aliment sec ou humide nécessite plusieurs étapes. La première consiste à définir précisément la composition nutritionnelle souhaitée pour l'aliment final. Ensuite, il est essentiel d'identifier les ingrédients nécessaires à la préparation de cet aliment. Une fois ces ingrédients sélectionnés, on procède à une analyse détaillée de leur composition nutritionnelle. Cette analyse inclut la composition proximale, le profil d'acides aminés, le profil d'acides gras, ainsi que la teneur en vitamines et en minéraux. Les informations recueillies sont ensuite saisies dans un tableur Excel. Cette étape permet de calculer les apports nutritionnels de chaque ingrédient en fonction de sa quantité dans l'aliment final. Par exemple, la teneur finale en protéines de l'aliment est obtenue en additionnant les apports protéiques de chacun des ingrédients. Pour atteindre le profil nutritionnel visé, il peut être nécessaire d'ajuster la quantité

de chaque ingrédient dans la formulation finale. Cet ajustement permet de s'assurer que l'aliment final correspond parfaitement aux critères nutritionnels définis au début du processus.

Après avoir identifié la composition cible de l'aliment et la liste des ingrédients composant cet aliment, cette méthode permet d'ajuster via un tableur Excel, la quantité relative de chaque ingrédient dans la recette afin de trouver la formulation dont la composition nutritionnelle correspond à la composition ciblée.

Formulation d'un aliment commercial incluant de la farine de BSF

Les aliments industriels à destination des poissons d'élevage ou des crevettes contiennent généralement des protéines animales (telles que les farines de poisson, farines de crustacées), des protéines végétales (telles que les farines de soja), des sources de lipides (huiles de poisson ou huiles végétales), des glucides (blé, maïs) et la formulation est généralement complétée avec des vitamines, des minéraux et des additifs tels que des liants. Les farines dégraissées de larves de BSF (LBSF) peuvent être utilisées en substitution des sources de protéines, et l'huile de LBSF en substitution des sources de lipides. Le fractionnement des nutriments de LBSF sous forme de farine dégraissée d'une part et d'huile d'autre part permet de faciliter le travail de formulation pour ajuster de façon indépendante les taux de protéines et de lipides.

Avec pour référence la fiche technique du granulé utilisé en crevetticulture à Tahiti (Ridley Prawn Enhance Grower 1, Annexe 4.3.1), la composition visée pour la formulation d'un aliment commercial est la suivante : protéines 38% minimum, lipides 6% minimum, fibres 3% maximum et cendres 13% maximum.

Les ingrédients sélectionnés pour cette recette sont :

- Protéines animales : farine de poisson, farine de crevette, farine de BSF dégraissée
- Protéines végétales : farine de soja
- Source de lipides : huile de poisson
- Glucides : Blé

Les formulateurs rajoutent généralement un mélange de minéraux, de vitamines et un liant pour formuler l'aliment final.

La composition proximale des ingrédients est donnée dans le tableau 4.3.1, le détail des profils d'acides aminés, profils d'acides gras, vitamines et minéraux est donné en Annexe 4.3.2. Les données sont issues de la base de données de l'Institut national de recherche pour l'agriculture,

l'alimentation et l'environnement (INRAE) « Composition et valeurs nutritionnelles des matières premières » disponibles sur le lien suivant : https://feedtables.com/fr.

Tableau 4.3.1 : Composition proximale des ingrédients utilisés dans la formulation des aliments complets (% matière sèche) (Source INRAE : https://feedtables.com/fr)

Ingrédients	Protéines	Lipides	Fibres	Cendres
Farine de poisson	69	9,1	0	14,4
Farine de crevettes	39,5	4,7	13	24,9
Farine de BSF dégraissée	51,9	11	14,8	12,4
Farine de soja	43,5	1,7	6,3	6,7
Huile de poisson	0	100	0	0
Blé	39,5	4,7	13	24,9

Deux aliments sont formulés en utilisant la méthodologie décrite ci-dessus. Un premier aliment standard (Aliment STD) sans farine de BSF, et un second aliment (Aliment BSF) dans lequel la farine de BSF dégraissée est intégrée. Un extrait du tableur Excel utilisé pour déterminer les compositions finales est présenté en Annexe 4.3.3. Les compositions des deux aliments sont décrites dans le tableau 4.3.2 et les détails des profils d'acides gras, acides aminés et minéraux sont présentés en tableaux 4.3.3.

La formulation de l'aliment STD (ingrédients et leurs pourcentages respectifs dans l'aliment final) est très proche de celle décrite par Cuzon & Aquacop, (1998), pour la préparation d'un aliment semi-industriel pour la crevette bleue, avec une fabrication à Tahiti. L'aliment semi-industriel est moins riche en protéines (37,0%) et en lipides (5,7%) que celui formulé dans ce manuscrit. Les auteurs expliquent que la teneur cible en protéines (42% dans leur cas) n'a pas pu être atteinte pour des raisons économiques.

Dans la proposition de formulation de l'aliment BSF, la farine de BSF représente 25% de la composition totale de l'aliment complet et a permis de réduire de 48% la quantité de farine de poisson utilisée. Les deux aliments formulés présentent les mêmes niveaux de protéines, de lipides et de cendres. Les aliments industriels doivent avoir des niveaux de fibres les plus bas possible, n'excédant pas 4%, car les fibres ont tendance à réduire la stabilité des granulés et donc à diminuer leur tenue à l'eau (Nesara and Anand, 2018). Par ailleurs, le système digestif des crevettes ne permet pas de digérer correctement les aliments contenant de hauts niveaux de fibres, avec pour conséquence une augmentation de la production fécale et donc une pollution

de l'eau dans laquelle sont élevées les crevettes (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992). En raison du taux élevé de fibres dans la farine de BSF dégraissée (14,8% MS) par rapport à la farine de poisson (0%) (Tableau 4.3.1), il est difficile de formuler un aliment dont le pourcentage de fibres est inférieur à 3% quand l'inclusion de farine de BSF dans la formulation finale excède 20%. Dans la farine dégraissée de LBSF, la forte teneur en fibres est essentiellement due à la chitine, polymère insoluble (N-acétylglucosamine) présent dans l'exosquelette des larves (FAO, 2013a; Barragan-Fonseca, Dicke and van Loon, 2017). Bien que la farine dégraissée de LBSF présentée dans ce manuscrit présente des taux élevés de fibres, il existe des méthodes permettant d'abaisser ces niveaux, via des procédés de fractionnement ou via l'ajout d'enzymes permettant de décomposer les fibres (Younes and Rinaudo, 2015; Hahn *et al.*, 2022; Xiong *et al.*, 2023).

Tableau 4.3.2 : Ingrédients et composition proximale des deux aliments (% matière sèche)

Ingrédients (%)	**Aliments formulés**	
	Aliment STD	Aliment BSF
Farine de poisson	40	21
Farine de crevettes	9	9
Farine de BSF dégraissée	0	25
Farine de soja	15	17
Huile de poisson	2	1
Blé	34	27
Analyse proximale (%)		
Protéines	41,1	41,1
Lipides	6,7	6,7
Fibres	3,0	6,6
Cendres	9,6	9,6

Effets des ingrédients sur la qualité des nutriments contenus dans l'aliment formulé

Les acides aminés sont des éléments constitutifs des protéines et sont des précurseurs de synthèse du glucose et des lipides. Leur rôle est donc crucial dans le développement (croissance, reproduction), la santé et le métabolisme énergétique de la crevette (Wu, 2021). La comparaison des profils d'acides aminés des deux aliments formulés montre quelques différences. Bien que les niveaux des différents acides aminés soient très proches dans les deux aliments, on remarque

une augmentation de la tyrosine, de 13,2 g/kg dans l'aliment STD à 17,1 g/kg dans l'aliment BSF (Tableau 4.3.3-a). A l'inverse, une diminution de la quantité d'acide glutamique est observée, de 59,0 g/kg dans l'aliment STD à 55,1 g/kg dans l'aliment BSF (Tableau 4.3.3-a). Les acides aminés essentiels chez la crevette sont l'arginine, la méthionine, la valine, la thréonine, l'isoleucine, la leucine, la lysine, l'histidine, la phénylalanine et le tryptophane (Fox *et al.*, 2006). Les niveaux des différents acides aminés (essentiels et non essentiels) dans les aliments STD et BSF sont en accord avec les niveaux attendus et requis dans un aliment industriel pour la crevette bleue (Cuzon and Aquacop, 1998) et pour les crevettes pénéides (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992).

Tableau 4.3.3-a : Profil d'acides aminés des aliments complets formulés (g/kg)

Acides aminés (g/kg)	**Aliment STD**	**Aliment BSF**
Lysine	27,976	25,513
Thréonine	16,387	16,008
Méthionine	9,971	8,703
Cystine	4,524	4,099
Méthionine + cystine	14,553	12,855
Tryptophane	4,518	5,046
Isoleucine	17,209	17,431
Valine	20,158	21,55
Leucine	29,083	28,867
Phénylalanine	17,39	17,412
Tyrosine	13,192	17,134
Phénylalanine + tyrosine	30,573	34,537
Histidine	9,878	10,653
Arginine	26,687	24,552
Alanine	23,185	23,308
Acide aspartique	37,665	37,893
Acide glutamique	59,009	55,102
Glycine	23,416	22,985
Sérine	16,802	17,219
Proline	18,894	20,793

La littérature sur l'espèce *Penaeus monodon* décrit quatre acide gras essentiels pour les crevettes, notamment pour les performances de croissance : l'acide linoléique (18 :2n-6), l'acide linolénique (18 :3n-3), l'acide eicosapentaénoïque (EPA, 20 :5n-3) et l'acide docosahexaénoïque (DHA, 22:6n-3). Les deux derniers correspondant à des acides gras hautement polyinsaturés, particulièrement importants (Glencross *et al.*, 2002). Les acides gras sont impliqués dans des processus physiologiques et métaboliques. Ils sont une source d'énergie et les AGPI sont des précurseurs de prostaglandines, molécules bioactives exerçant des fonctions biologiques (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992). Les prostaglandines participent notamment à la régulation de l'inflammation et de la réponse immunitaire, à la reproduction, ou encore à la digestion (Bell and Sargent, 2003). Les profils d'acides gras des aliments formulés sont plus impactés par le changement des ingrédients que les profils d'acides aminés. En raison des taux élevés d'acide laurique (12 :0) dans les larves de BSF (Annexe 4.3.2-b), l'aliment BSF se retrouve particulièrement riche en cet acide (10,4 g/kg) par rapport à l'aliment STD (0,18 g/kg) (Tableau 4.3.3-b). L'intégration de la farine de BSF dégraissée à la formulation permet d'élever les niveaux d'acide linoléique (18 :2n-6) de 3,9 g/kg dans l'aliment STD à 4,9 g/kg dans l'aliment BSF, mais abaisse les niveaux d'acide linolénique (18 :3n-3) de 9,97 g/kg dans l'aliment STD à 8,9 g/kg dans l'aliment BSF (Tableau 4.3.3-b). On note une baisse des niveaux d'AGPI tels que l'EPA (de 5,2 à 3,0 g/kg) et le DHA (3,7 à 2,2 g/kg) (Tableau 4.3.3-b), liés à l'utilisation moins importante de la farine et de l'huile de poisson dans l'aliment BSF (Tableau 4.3.2), principales sources d'acides gras (Annexe 4.3.2-b). Les niveaux d'acides gras recommandés dans les aliments pour crevettes pénéides sont de l'ordre de 0,4% pour l'acide linoléique, l'EPA et le DHA, et de 0,3% pour l'acide linolénique (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992). Dans l'aliment STD, les niveaux d'acide linoléique et de DHA sont en accord avec ces recommandations, tandis que les niveaux d'acide linolénique et d'EPA sont au-dessus des recommandations. Dans l'aliment BSF, les niveaux d'acide linoléique et linoléniques sont supérieurs aux recommandations, alors que les niveaux d'EPA et de DHA sont en dessous des recommandations. Cette tendance met en avant la nécessité d'utiliser dans la formulation des ingrédients contenant des niveaux suffisants d'AGPI pour répondre au mieux aux besoins exigeants de la filière. La farine de LBSF ayant subi un dégraissage, il est important de compléter la recette par une source d'EPA et de DHA. L'huile de poisson est la source d'AGPI communément utilisée dans la formulation des aliments aquacoles, mais il existe des sources alternatives d'AGPI, telles que les microalgues (Makri *et al.*, 2011; Oliver *et al.*, 2020) ou les champignons oléagineux (Kothri *et al.*, 2020).

En l'absence de références littéraires décrivant le profil vitaminique de la farine de LBSF dégraissée (Annexe 4.3.2-c), les profils vitaminiques des aliments STD et BSF ne sont pas comparés dans le cadre de ce manuscrit.

Tableau 4.3.3-b : Profil d'acides gras des aliments complets formulés (g/kg)

Acides gras (g/kg)	Aliment STD	Aliment BSF
C12:0	0,1864	10,4286
C14:0	3,7893	3,5635
C16:0	10,239	8,573
C16:1(n-7)	4,4487	3,2813
C18:0	1,9672	1,6756
C18:1(n-9)	7,367	7,227
C18:2(n-6)	3,901	4,928
C18:3(n-3)	0,997	0,89
C18:4(n-3)	0,48	0,325
C20:0	0,165	0,0928
C20:1(n-9)	2,312	1,2794
C20:4(n-6)	0,886	0,522
C20:5(n-3)	5,263	3,003
C22:0	0,129	0,0722
C22:1(n-9)	2,21	1,1714
C22:5(n-3)	1,038	0,565
C22:6(n-3)	3,799	2,223
C24:0	0,0345	0,0201

Les minéraux ont de nombreuses fonctions physiologiques chez la crevette. Certains sont nécessaires en grande quantités, ils s'agit des macronutriments tandis que d'autres sont requis en quantités moindres, les micronutriments. Les macronutriments recommandés dans l'alimentation des crevettes sont le calcium (Ca), le phosphore (P), le magnésium (Mg), le potassium (K), et les micronutriments recommandés sont le cuivre (Cu), le sélénium (Se) et le zinc (Zn) (Davis and Gatlin, 1996). Les minéraux sont des constituants de l'exosquelette des crevettes (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992), le Ca, P et Mg sont importants pour la mue, la formation et la solidité de la carapace ; le Na et le K interviennent dans le processus d'osmorégulation et le maintien de l'équilibre acido-basique dans les fluides corporels ; le Zn,

le Cu et le Fe interviennent dans des activités enzymatiques et métaboliques ; le Se et le Zn sont impliqués dans la fonction immunitaire (Piedad-Pascual, 1989). L'intégration de la farine de LBSF dans la formulation de l'aliment complet a eu un effet différent suivant les nutriments concernés ; une augmentation des niveaux de Ca (de 22,6 à 26,6 g/kg), de Zn (de 56,5 à 64,0 mg/kg) et de Mn (de 16,6 à 72,5 mg/kg) et une baisse des niveaux de P (de 12,4 à 9,8 g/kg), de Cl (de 7,2 à 4,9 g/kg) et de Fe (de 170,9 à 163 mg/kg) (Tableau 4.3.3-c). Les niveaux de Cu, Se, K et Mg sont très proches dans les deux aliments formulés (Tableau 4.3.3-c). Les niveaux de macronutriments obtenus dans les aliments formulés sont en accord avec les recommandations pour les pénéides, à l'inverse, les niveaux de micronutriments sont inférieurs aux valeurs recommandées (Akiyama, Dominy and Lawrence, 1992). Néanmoins cela n'est pas un facteur limitant car les formulations sont généralement enrichies en vitamines et en minéraux pour répondre aux besoins spécifiques des filières ciblées.

Tableau 4.3.3-c : Minéraux des aliments complets formulés

Minéraux	**Aliment STD**	**Aliment BSF**
Calcium (g/kg)	22,604	26,621
Phosphore (g/kg)	12,382	9,774
Phosphore phytique (g/kg)	1,405	1,304
Magnésium (g/kg)	2,396	2,853
Potassium (g/kg)	8,794	9,628
Sodium (g/kg)	4,4716	3,0779
Chlore(g/kg)	7,163	4,962
Soufre (g/kg)	4,332	3,941
Manganèse (mg/kg)	16,58	72,54
Zinc (mg/kg)	56,51	64,00
Cuivre (mg/kg)	9,38	10,85
Fer (mg/kg)	170,87	163,21
Sélénium (mg/kg)	0,253	0,181
Cobalt (mg/kg)	0,8756	0,5953
Molybdène (mg/kg)	0,85	1,007
Iodine (mg/kg)	1,2456	0,6713

Conclusion partielle

Cette première application de l'outil d'aide à la formulation a permis de proposer deux recettes pour la préparation de deux aliments iso-protéiques et iso-lipidique. Le premier aliment (STD) est formulé sur le modèle d'un aliment standard, à base d'ingrédients conventionnellement utilisés dans les aliments pour crevettes. Le second aliment (BSF) inclut de la farine dégraissée de larves de BSF, en substitution partielle des sources de protéines et de lipides. L'intégration de la farine de larves de BSF dans cet aliment a permis de diminuer de 48% la quantité de la farine de poisson, a diminué de moitié la quantité d'huile de poisson et a réduit de 20% la quantité de blé par rapport à l'aliment STD. Les effets de cette substitution sur la qualité des nutriments a été examinée. Les hauts niveaux de fibres dans la farine de LBSF enrichissent significativement le taux de fibres dans les aliments formulés. Ceci peut altérer la tenue à l'eau de l'aliment final mais également avoir des effets négatifs sur la croissance et la santé des crevettes en raison de la faible digestibilité des fibres, majoritairement représentées par la chitine. Néanmoins, des procédés chimiques, biologique ou encore enzymatiques existent pour extraire la chitine et ainsi la séparer des protéines et des lipides. Si les profils d'acides aminés des aliments formulés répondent aux recommandations pour l'alimentation des crevettes, les niveaux d'AGPI dans l'aliment BSF sont inférieurs aux niveaux requis. Afin d'y remédier, il est possible d'ajuster les quantités relatives de chaque ingrédient ou d'utiliser d'autres ingrédients enrichis en AGPI. L'utilisation d'huile de LBSF dont les larves ont été préalablement nourries avec de la matière organique riche en AGPI est un exemple d'ingrédient alternatif, qui peut être utilisé en combinaison avec d'autres sources d'AGPI citées précédemment notamment dans le chapitre 3. Enfin, les niveaux de minéraux sont intéressants, en particulier pour les macronutriments. Les faibles niveaux de micronutriments relevés dans cet exemple peuvent être ajustés avec des concentrés de minéraux.

Afin de tester les effets de la substitution des sources conventionnelles de protéines et de lipides par des larves de BSF dans un aliment sur les performances zootechniques de la crevette, une deuxième application de l'outil est présentée, pour la fabrication d'un aliment humide expérimental, qui sera ensuite utilisé pour des tests d'appétence.

Formulation et essai biologique d'un aliment humide expérimental

La fabrication d'un aliment type granulé commercial nécessitant des installations et une expertise spécifiques, la fabrication artisanale d'un aliment humide expérimental est proposée, dans le but de l'utiliser pour réaliser des tests d'appétence suite à l'intégration de larves de BSF dans l'alimentation de la crevette bleue.

Les aliments sont formulés et fabriqués sur la base d'un aliment « ACAL », dont la recette a été mise au point par Aquacop, (1983) au centre Ifremer du Pacifique. Le protocole de fabrication utilisé est décrit en annexe 4.3.4. On se propose de formuler et de fabriquer trois aliments expérimentaux humides contenant 16% de protéines et 6% de lipides. Les ingrédients utilisés dans la recette de l'ACAL sont du calamar cru, des crevettes crues, des œufs frais, de l'huile de foie de morue (HFM), ainsi qu'un complexe vitaminique et de l'alginate comme liant. A cette liste sont rajoutées les larves fraiches de BSF en substitution partielle aux œufs, crevettes et HFM. Les compositions proximales des ingrédients crus (calamar, crevettes, œufs, huile de foie de morue) sont issues de la base de données de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (https://ciqual.anses.fr/). La composition des larves de BSF est issue de nos précédents résultats d'analyses (chapitre 3). Ces informations sont regroupées dans le tableau 4.3.4 pour la composition proximale, et les données relatives aux acides aminés, acides gras et minéraux sont présentées en annexe 4.3.5.

Tableau 4.3.4 : Composition proximale des ingrédients utilisés dans la formulation des aliments complets (% matière fraiche) (Source :*https://ciqual.anses.fr/, **chapitre 3).

Ingrédients	Protéines	Lipides	Glucides	Cendres	Eau
*Calamar cru	14,4	1,19	2,17	1,35	80,9
*Crevettes crues	19,7	0,84	3,21	1,99	74,3
*Œufs	12,7	9,83	0,27	0,96	76,3
*Huile de foie de morue	0	100	0	0	0
**Larves de BSF fraiches	16,69	9,28	2,24	1,68	70

Trois aliments expérimentaux sont formulés : un aliment correspondant à la recette classique de l'ACAL, ne contenant pas de larves de BSF (BSF0) et deux autres aliments BSF20 et BSF40 où les larves de BSF représentent respectivement 20% et 40% de la composition de l'aliment. Les compositions des trois aliments expérimentaux sont décrites dans le tableau 4.3.5.

Tableau 4.3.5 : Ingrédients et composition proximale des trois aliments frais expérimentaux formulés.

Ingrédients (g/kg)	**BSF0**	**BSF20**	**BSF40**
Œufs	284	207	204
Calmars	259	259	184
Crevettes	431	311	204
Larves de BSF	0	207	408
Huile de foie de morue	26	16	0
Vitamines	4	4	4
Alginate	40	40	40
Composition théorique (% matière humide)			
Protéines (%)	15,78	15,79	15,81
Lipides (%)	6,04	6,03	6,08
Glucides (%)	2,02	2,06	1,99
Cendres (%)	1,48	1,50	1,51
Energie (kcal/100g)	125,3	125,7	126,1
Humidité (%)	74	74	73
Minéraux (% matière humide)			
Calcium (%)	0,06	0,67	1,26
Phosphore (%)	0,19	0,29	0,38
Acides aminés essentiels (% matière humide)			
Histidine (%)	0,09	0,22	0,33
Isoleucine (%)	0,71	0,75	0,75
Leucine (%)	1,21	1,25	1,26
Lysine (%)	1,40	1,38	1,35
Méthionine (%)	0,58	0,52	0,49
Phénylalanine (%)	0,72	0,75	0,78
Thréonine (%)	0,87	0,86	0,89
Tryptophane (%)	0,34	0,33	0,35
Valine (%)	0,69	0,81	0,89
Acides gras (% matière humide)			
Acides gras saturés (%)	1,48	2,08	2,71
Acides gras monoinsaturés (%)	2,38	2,14	1,91

Acides gras polyinsaturés (%)	1,35	1,18	0,97
Dont EPA (%)	0,28	0,28	0,22
Dont DHA (%)	0,43	0,37	0,23

Effets des niveaux d'intégration de la larve de BSF sur les profils nutritionnels des aliments formulés

L'outil d'aide à la formulation a permis de préparer trois aliments isoprotéiques et isolipidiques, dont les valeurs énergétiques sont également similaires (comprises entre 125,3 et 126,1 kcal/100g). On note une augmentation des niveaux de Ca et de P liée aux niveaux croissants d'intégration de la larve de BSF dans la composition de l'aliment humide expérimental. Les profils d'acides aminés dans les trois aliments sont proches. L'augmentation de la quantité de larves de BSF dans la recette se traduit par des niveaux croissants d'histidine, d'isoleucine, de leucine et de phénylalanine, avec des écarts relativement faibles. En revanche, les écarts sont bien plus marqués concernant les familles d'acides gras. La part croissante de larves de BSF dans la formulation se traduit par une augmentation des niveaux d'acides gras saturés (AGS) et une diminution des acides gras monoinsaturés (AGMI) et polyinsaturés (AGPI). La baisse des niveaux de DHA est par ailleurs plus marquée que celle des niveaux d'EPA. Dans l'aliment BSF20, la quantité d'huile de foie de morue a été diminuée de 38% par rapport à BSF0, alors qu'elle a été complètement substituée dans l'aliment BSF40. L'huile de foie de morue étant la source principale d'AGPI (Annexe 4.3.5) son remplacement total dans la recette se traduit inévitablement par une chute des niveaux d'AGPI et plus spécifiquement d'EPA et de DHA, en l'absence d'une autre source équivalente.

Effets des niveaux d'intégration de la larve de BSF sur les performances zootechniques de la crevette bleue

Matériels et méthodes

Cet essai a été mené au sein des installations de la Direction des Ressources Marines (DRM) sur le site de l'IFREMER (Vairao, Tahiti).

Régimes expérimentaux

Trois régimes expérimentaux BSF0, BSF20 et BSF40 sont fabriqués de façon artisanale suivant le mode opératoire décrit dans l'annexe 4.3.4. Les ingrédients et compositions théoriques des régimes expérimentaux sont donnés en tableau 4.3.1 précédemment décrit. Les ingrédients sont achetés en grande surface ou en pharmacie, à l'exception des larves de BSF qui sont issues du

pilote expérimental de production Ra'o Puha. Les conditions d'élevage des larves de BSF sont les mêmes que dans la précédente partie de ce chapitre 4. Le granulé industriel Ridley est utilisé comme témoin d'une croissance normale avec un aliment commercial sec dans les installations expérimentales.

Design expérimental

Cet essai s'est tenu sur une durée de trois semaines, au sein d'une salle expérimentale équipée de bacs alimentée en eau de mer filtrée avec deux systèmes de filtrations : une filtration à poches (25, 10, 5 et 1 µm) et une filtration UV (3 filtres UV de 2m^3/h) (Figure 4.3.1). Le renouvellement de l'eau de mer dans les bacs se fait en continu.

Les animaux testés sont des crevettes de l'espèce *Litopenaeus stylirostris* d'un poids moyen de 9±1g (stade de grossissement). Les 300 individus étaient élevés en bassin terre avant d'être répartis aléatoirement dans les 12 bacs d'élevage de 180L, chaque bac contenant 25 crevettes et chaque condition expérimentale étant répliquée 3 fois (Figure 4.3.1). Les crevettes sont acclimatées 2 semaines avant le début du test d'appétence.

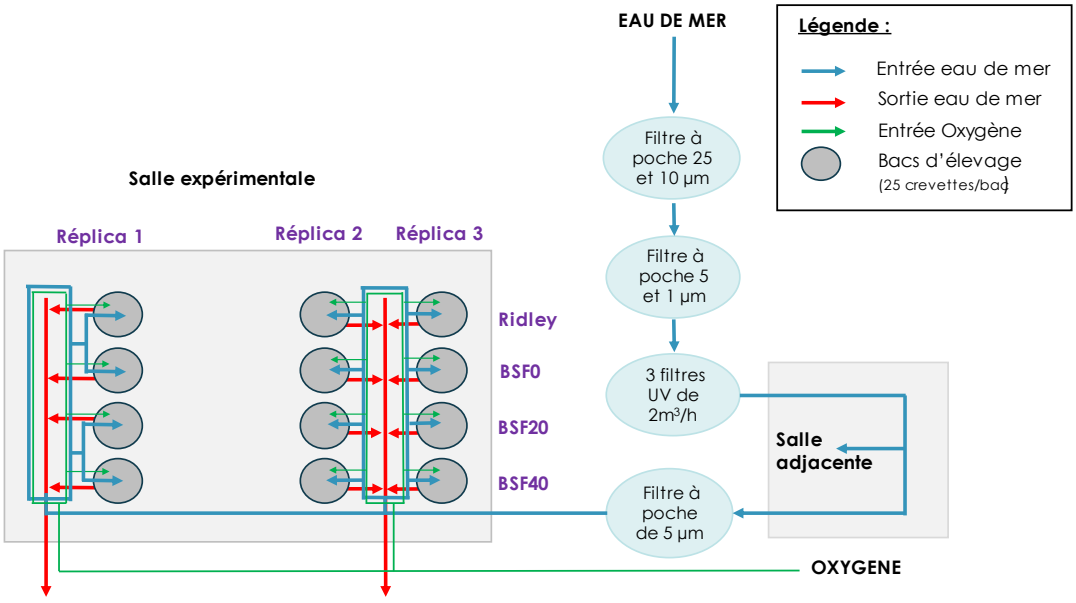


Figure 4.3.1 : Schéma de la salle et du design expérimental

Les bacs d'élevage sont cylindro-coniques avec une crépine centrale de 5mm de vide de maile. Les bacs sont équipés d'un système d'oxygénation par bullage et de recirculation d'eau. Les résidus alimentaires et les fèces sont siphonnés tous les jours. Les régimes expérimentaux sont distribués en deux fois chaque jour suivant un taux d'alimentation de 7,4-5,0% par jour. Les taux de rationnement alimentaires exprimés en pourcentage du poids moyen des crevettes, se

réfèrent aux taux utilisés par la Coopérative des Aquaculteurs de Polynésie française (CAPF), prestataire en charge de l'écloserie de crevettes VAIA à Vairao (Tableau 4.3.6). Les quantités d'aliments expérimentaux (BSF0, BSF20, BSF40) à distribuer chaque jour sont calculées en fonction du poids moyen réel mesuré en début de semaine, du nombre de crevettes présentes dans chaque bac en prenant en compte les mortalités et de l'apport en protéines visé. En d'autres termes, les régimes BSF0, BSF20 et BSF40 sont apportés en quantité suffisante pour égaler les apports en protéines des rations de Ridley.

Tableau 4.3.6 : Recommandations de la CAPF sur le taux d'alimentation des crevettes en granulé industriel Ridley, en pourcentage du poids moyen des crevettes, ainsi que les quantités d'aliments et de protéines correspondants

Poids moyen (g)	**Taux d'alimentation aliment de référence (%)**	**Ration aliment de référence (mg /crevette/jour)**	**Equivalent protéines (mg protéines/ crevette/jour)**
8-9	7,4	620	236
9-10	6,4	666	254
10-12	6,2	714	272
12-14	6,0	786	298
14-16	5,0	858	326

Suivi zootechnique des crevettes

Les crevettes sont échantillonnées chaque semaine à raison de 5 crevettes par réplica. Ces mesures individuelles permettent de déterminer le poids moyen (Pm) par condition expérimentale (n=15) chaque semaine. La courbe de croissance est présentée dans la figure 4.3.2.

Le calcul des poids moyens permet également de déterminer le gain de poids (Weight Gain, WG) correspondant à la différence des poids moyens entre la fin et le début des essais (Pm_f et Pm_i respectivement).

$$WG\ (g) = Pm_f - Pm_i \quad (1)$$

Le taux de croissance spécifique (Specific Growth Rate, SGR) est calculé à partir de la différence des logarithmes népériens des poids moyens entre la fin et le début de l'expérience sur la durée de l'expérience en jours (d).

$$SGR\ (\%/jour) = \frac{\ln(Pm_f) - \ln(Pm_i)}{d} \times 100 \quad (2)$$

L'indice de conversion (IC) est un indicateur permettant de connaitre la quantité d'aliment distribué pour produire 1kg de crevettes. Il est calculé à partir de la quantité d'aliments secs distribuées (Q) divisée par le gain de poids des crevettes (WG)

$$IC = \frac{Q}{WG} \quad (3)$$

Le taux de survie (Survival Rate, SR) correspond au ratio du nombre d'individus en fin d'expérience (N_f), par rapport au nombre d'individus en début d'expérience (N_i)

$$SR\ (\%) = \frac{N_f}{N_i} \times 100 \quad (4)$$

Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec RStudio (version 4.2.0). La normalité de la distribution et l'homogénéité des variances des variables sont vérifées avec les tests de Shapiro-Wilk et de Levene respectivement. Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) avec un intervalle de confiance de 95% est effectuée pour la comparaison des performances entre les régimes. Quand une différence statistique est trouvée, un test Post-hoc de Tukey par paires est effectué avec un intervalle de confiance de 95%. Si les conditions de normalité et d'homogénéité des variances ne sont pas remplies, le test non-paramétrique de Kruskall-Wallis est utilisé pour comparer les performances entre les régimes, suivi d'un test de Wilcoxon pour les comparaisons par paires.

Résultats et discussion

Performances zootechniques des animaux

La mesure des poids moyens tout au long de l'expérience a permis d'obtenir la courbe de croissance présentée en figure 4.3.2. Les poids moyens des crevettes nourries sur les régimes Ridley et BSF0 ne sont pas significativement différents, quel que soit le jour de mesure ($p>0,05$).

Au jour 7, le Pm des crevettes du régime BSF20 est significativement plus faible que celui des crevettes des régimes Ridley et BSF0 ($p<0,05$). Au jour 14, les crevettes des régimes BSF20 et BSF40 ont des Pm significativement plus bas que les crevettes des régimes témoin Ridley et

BSF0 ($p<0,05$). Au jour 22, les crevettes du régime BSF40 ont un Pm significativement plus faible ($p<0,05$) que celles du régime Ridley (Tableau 4.3.7).

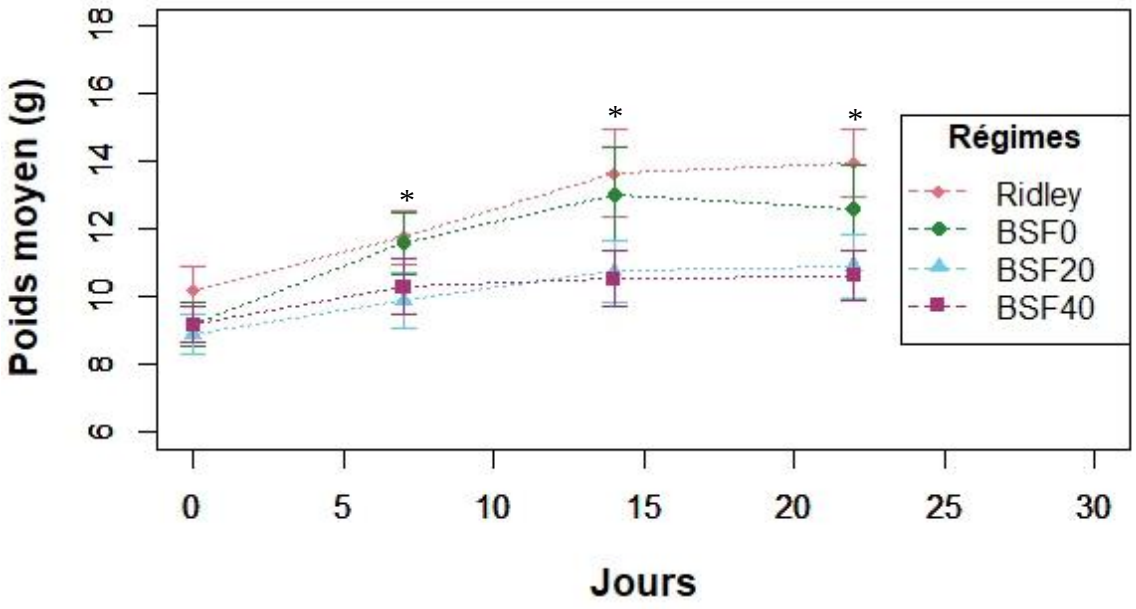


Figure 4.3.2 : Evolution du poids moyen des crevettes au cours du temps en fonction des régimes. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type (n=15).

Une tendance est observée pour les gains de poids (WG) : plus l'inclusion des protéines de BSF est importante et plus le WG est faible, avec des performances similaires entre les crevettes du régime Ridley et du régime BSF0. Malgré cette tendance, les tests statistiques révèlent que seuls les WG des régimes Ridley et BSF40 sont significativement différents ($p<0,05$). La même tendance est observée pour les taux de croissance spécifiques (SGR), néanmoins les tests statistiques ne révèlent aucune différence significative entre les conditions expérimentales ($p>0,05$). Les taux de survie et les indices de conversion (IC) entre les régimes ne sont pas significativement différents ($p>0,05$), en raison d'une grande variabilité intra-régime, conduisant à d'importants écart-types.

Les performances zootechniques mesurées dans le cadre de cette expérience ne sont pas comparables à celles observées en conditions réelles et les effets ne peuvent pas être exclusivement expliqués par la qualité du régime alimentaire distribué. En effet, les performances médiocres observées sur le régime Ridley alertent sur le fait que les conditions environnementales ne sont pas favorables au bon développement des individus : le taux de survie est faible (30%), le WG et par conséquent le SGR est relativement bas par rapport à ce qui est attendu en conditions normales d'élevage et il en résulte un IC aberrant (très élevé), lié

à la faible augmentation du poids des crevettes au cours de l'expérience. En conditions classiques d'élevage de la CAPF en bassins en terre, les individus nourris sur de l'aliment Ridley montrent des taux de survie supérieurs à 85%, avec des WG compris entre 1 et 3 g par semaine (données internes à la CAPF, non publiées).

Tableau 4.3.7 : Performances de croissance des crevettes élevées sur les différents régimes. Les résultats sont présentés sous la forme moyenne ± écart-type. Les valeurs d'une même ligne avec la même lettre en exposant n'ont montré aucune différence significative (p>0,05).

Indicateurs	**n**	**Régimes expérimentaux**			
		Ridley	BSF0	BSF20	BSF40
Poids moyen initial (g/ind)	15	10,2 ± 1,4	9,2 ± 1,3	8,9 ± 1,2	9,2 ± 1,0
Poids moyen final (g/ind)	15	13,9 ± 2,0^{a}	12,6 ± 2,5^{ab}	10,9 ± 1,8^{bc}	10,6 ± 1,5^{c}
WG (g)	3	3,8 ± 0,6^{a}	3,4 ± 0,5^{ab}	2,0 ± 1,0^{ab}	1,5 ± 1,0^{b}
SGR (%/jour)	3	1,4 ± 0,2^{a}	1,4 ± 0,2^{a}	0,9 ± 0,4^{a}	0,6 ± 0,4^{a}
IC	3	224 ± 49^{a}	168 ± 26^{a}	231 ± 133^{a}	394 ± 238^{a}
Survie (%)	3	30 ± 4^{a}	49 ± 30^{a}	56 ± 4^{a}	39 ± 22^{a}

Ridley : Régime de référence ; BSF0 : 0% de substitution de protéines par des protéines de BSF ; BSF20 : 20% de substitution des protéines par des protéines de BSF ; BSF40 :40% de substitution des protéines par des protéines de BSF

Plusieurs causes sont identifiées pour expliquer les mauvaises performances des crevettes. La faible croissance des individus est liée aux conditions d'élevage précédant la phase expérimentale. En effet, l'objectif initial était de travailler avec des individus au stade de pré-grossissement, avec un poids moyen de l'ordre de 2-3g. Pour diverses raisons, le début des manipulations a été retardé. Le taux d'alimentation des crevettes élevées en bassin de terre (en attente d'être échantillonnées puis transférées dans les bacs expérimentaux) a donc été diminuée, afin de ralentir leur vitesse de croissance et d'éviter d'avoir des individus trop gros au début de l'expérience. Néanmoins, le ralentissement de leur croissance avant la phase expérimentale s'est répercuté sur les performances pendant les tests d'alimentation, se traduisant par les faibles WG et SGR mesurés. Par ailleurs, le poids moyen des crevettes était déjà très important au début de l'essai, qui a démarré avec une densité très élevée de l'ordre de 1,25 g de crevette par litre d'eau, densité deux fois supérieure à ce qui est habituellement pratiqué par la CAPF (données non publiées).

Cette forte densité dans les bacs a engendré des comportements de cannibalisme, comportement renforcé par la forme cylindro-conique des bacs d'élevage expérimentaux (Figure 4.3.2). En effet, en raison de cette forme, les crevettes ne peuvent stationner sur le fond et glissent au centre du cône où elle se retrouvent agglutinées. Pendant les épisodes de mues, les crevettes se retrouvent vulnérables face à leurs congénères, et le manque d'espace dans les bacs renforce leur statut de proie facile. Une forte mortalité a également été observée lors d'un épisode de fortes pluies sur une durée de 3 jours, avec pour conséquence un mauvais renouvellement en eau des bacs situés en fin de réseau d'alimentation, dû au colmatage des filtres à poches (Figure 4.3.1)

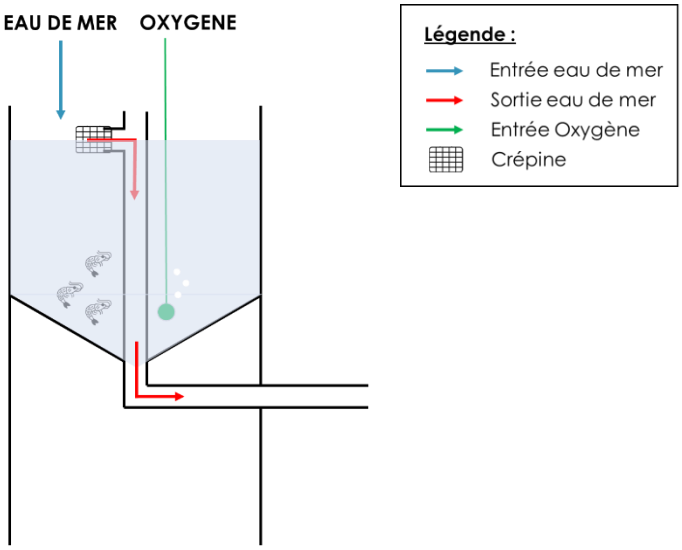


Figure 4.3.2 : Schéma des bacs expérimentaux

Si on analyse les résultats de manière positive, on perçoit que l'intégration de la BSF à 20% dans l'aliment permet d'obtenir une vitesse de croissance similaire aux 2 témoins (Ridley et BSF0). La faible croissance des crevettes avec le régime BSF40 est probablement due à la richesse en chitine des LBSF qui diminue la digestibilité de l'aliment.

Au-delà des conditions expérimentales, des axes d'amélioration ont été identifiés par rapport au protocole décrit ci-dessus dans le matériels et méthodes. Dans un premier temps, il est indispensable de débuter l'expérience avec des individus qui sont en phase exponentielle de croissance (1 à 2g) afin de se placer dans des conditions idéales de densité, si le volume des bacs reste le même que dans ces conditions expérimentales (180L) et d'autre part, afin d'observer des évolutions de Pm plus importantes et plus rapides. Deuxièmement, augmenter le nombre de réplicas par condition expérimentale afin de gagner en puissance statistique.

Enfin, dans l'idéal, distribuer la ration journalière non pas en deux fois mais en quatre fois afin de limiter les pertes et les matières en suspension dans l'eau.

Conclusion partielle

Cette seconde application de l'outil d'aide à la formulation a permis de formuler puis de fabriquer trois aliments humides, suivant un protocole de fabrication artisanale. La fabrication de trois aliments isoprotéiques et isolipidiques avec 3 niveaux d'intégration de la larve de BSF (0%, 20% et 40%) a été réalisée avec succès. L'étude de la composition des différents aliments formulés montre que les niveaux d'énergie et que les profils d'acides aminés essentiels sont proches entre les 3 régimes expérimentaux. En revanche, comme dans le premier exemple d'application, les profils d'acides gras sont plus impactés par l'intégration croissante de la larve de BSF dans la recette, en particulier les niveaux d'EPA et de DHA qui baissent lorsque l'intégralité de l'HFM est remplacée par les larves de BSF (BSF40), montrant l'importance d'une source complémentaire d'AGPI.

Cette démarche avait pour objectif de réaliser un test d'appétence, afin d'évaluer les effets de l'intégration de la larve de BSF dans l'alimentation de la crevette bleue sur ses performances zootechniques. Durant la phase expérimentale des tests d'alimentation, des difficultés d'ordre techniques et biologiques ont impacté les conditions expérimentales, induisant des biais expérimentaux. De ce fait, les performances zootechniques des crevettes ne peuvent pas être exclusivement expliquées par la qualité de leur alimentation, et il n'est pas possible de conclure quant aux effets de l'intégration des larves de BSF dans l'aliment expérimental.

Malgré les aléas rencontrés, cette expérience a permis de collecter des informations précieuses qui serviront lors des prochains tests d'appétence sur le modèle biologique de la crevette bleue. Pour les conditions expérimentales de tests d'appétence, des bacs à fond plat avec une hauteur d'eau d'un mètre minimum seraient plus appropriés au comportement des crevettes de nage et de repos. Le système de filtration d'eau devra être efficient (changement régulier des filtres à poches ou utilisation d'un filtre à sable) afin que les conditions expérimentales ne soient pas dégradées en fonction des conditions météorologiques extérieures. Le système d'arrivée d'eau devra permettre de distribuer de l'eau dans tous les bacs avec un débit identique. Par ailleurs, l'absence d'un atelier local de nutrition permettant la formulation et la fabrication d'aliments expérimentaux limite les initiatives de production d'aliments alternatifs qui pourraient directement intégrer la filière. Dans cette expérience, nous avons fait le choix de fabriquer un aliment humide type ACAL par manque d'équipements et de savoir-faire pour produire un

aliment type granulé industriel. Bien que l'utilisation expérimentale de l'aliment ACAL dans une démarche scientifique aurait pu permettre d'observer les effets de l'intégration des larves de BSF dans l'alimentation des crevettes sur leurs performances, cet aliment n'est pas comparable aux granulés industriels habituellement utilisés en crevetticulture. Les effets observés ne permettent donc pas de se projeter sur les effets attendus à l'échelle de la filière. Pour y parvenir, il est nécessaire de fabriquer, puis d'expérimenter via des tests d'appétence, des aliments de type granulé industriel. Si un tel atelier de production d'aliment n'est pas présent sur le territoire, il serait envisageable de faire appel à un prestataire en charge de la fabrication de l'aliment tel que le Centre Technique Aquacole (CTA) de l'ADECAL Technopole en Nouvelle-Calédonie.

Conclusion

Le test sur les crevettes a permis d'expérimenter, à l'aide d'un outil de formulation, la fabrication d'un aliment composé contenant des larves de BSF puis de tester l'appétence de cet aliment et son impact sur les performances zootechniques. La première application de l'outil d'aide à la formulation a permis de mettre en avant l'impact du remplacement partiel d'ingrédients (tels que la farine de poisson, le blé et l'huile de poisson) sur la qualité nutritionnelle de l'aliment composé. Bien que ces préoccupations soient généralement celles du fabricant d'aliment, il est important de les comprendre pour inclure toutes les étapes de transformation (par exemple l'extraction de la chitine pour abaisser les niveaux de fibres dans la farine) nécessaires à la production d'un ingrédient (farine, huile de larves de BSF) de qualité. La seconde application de l'outil d'aide à la fabrication intervenait dans le cadre de tests d'appétence, suite à la fabrication artisanale d'un aliment humide. S'il n'est pas possible de conclure quant à l'impact de l'intégration de la larve de BSF à l'alimentation de la crevette bleue sur ses performances zootechniques, ces essais ont montré le besoin de mettre en place à l'échelle locale un atelier de nutrition et de fabrication d'aliments.

Cet atelier serait aussi une plateforme de choix pour les chercheurs ou porteurs de projets souhaitant expérimenter la fabrication d'aliments pour l'alimentation animale à partir d'ingrédients locaux par exemple, avec des procédés similaires à ceux utilisés dans les provenderies industrielles. Ceci participerait au développement de la filière de fabrication d'aliments locaux, et permettrait de réaliser des tests d'appétence avec des aliments comparables aux aliments industriels utilisés par les éleveurs des différentes filières. De la sorte, les résultats obtenus seront plus pertinents, plus cohérents par rapport aux besoins de la filières et d'autant plus intéressants pour les éleveurs eux-mêmes.

Par ailleurs, comme indiqué précédemment, un seul fabricant d'aliment est présent sur le territoire, dont la production est destinée essentiellement aux élevages avicoles, porcins ainsi qu'aux chevaux. C'est pourquoi, avant d'envisager la production d'ingrédients pour l'aquaculture avec le programme Ra'o Puha, l'enjeu principal est l'installation d'un provendier pour aliment aquacole qui pourra réunir les conditions d'une fabrication locale de bonne qualité au prix du marché international. En effet, l'intégralité des aliments pour l'aquaculture est aujourd'hui importée. Si une production locale d'aliments pour crevettes venait à être établie sur le territoire, l'aliment devra être compétitif face au Ridley qui satisfait globalement les producteurs de crevettes à un prix de 300 XPF/kg. Au-delà du prix, les producteurs sont généralement réticents à l'idée de changer leurs aliments dans les fermes. La qualité de l'aliment local et l'obtention de performances (survie, croissance, indice de conversion) à minima identiques seront donc incontournables.

Annexes

Annexe 4.3.1 : Fiche technique de l'aliment industriel Ridley

RIDLEY AQUA FEED

Prawn Enhance™ and Prawn MR™

A complete range of formulated diets for the intensive grow-out culture of Black Tiger prawns, *Penaeus monodon*, Banana prawn, *Penaeus merguiensis*, Blue Shrimp, *Penaeus stylirostris* and other Penaeid species

TYPICAL ANALYSIS

PRAWN ENHANCE	Starter	Grower 1	Grower 2
Crude protein (min)	44%	38%	38%
Crude fat (min)	6%	6%	6%
Crude fibre (max)	3%	3%	3%
Ash (max)	13%	13%	13%

PRAWN MR	Starter	Grower 1	Grower 2
Crude protein (min)	47%	47%	47%
Crude fat (min)	6%	6%	6%
Crude fibre (max)	3%	3%	3%
Ash (max)	13%	13%	13%

INGREDIENTS

Fish meal, wheat, crustacean meal, oilseed meal, phospholipids, astaxanthin (on request), vitamins and minerals.

ASTAXANTHIN

For simplicity, Ridley Aqua-Feed prices all Penaeid diets to contain no astaxanthin. The use of astaxanthin can enhance the colour of the fresh and cooked shrimp. Ridley Aqua-Feed recommends that astaxanthin should be used during the growth cycle.

Store in a cool, dry place. Protect from rain and direct sunlight. For guarantee of vitamin levels use within six months of manufacture date.

PARTICLE SIZE

Product Name	Pellet Size (mm) Diameter
Starter Crumble #1	1.2
Starter Pellet #2	1.5
Starter Pellet #3	1.8
Grower Pellet #1	2.0
Grower Pellet #2	2.2

FEATURES

- ✓ Wide range of crumble and pellet sizes allows smooth transition from one feed type to the next
- ✓ Excellent water stability with minimal leaching of nutrients in water
- ✓ Includes astaxanthin (on request), phospholipids, vitamin and mineral premixes specifically formulated for Penaeid species

FEEDING TABLE

Ave. Body Weight (grams)	Daily Feed Rate (% Body Wt)	Feed Type
0.3 – 1.0	20 – 16	Starter #1
1 – 3	10 – 6	Starter #2
3 – 8	6.0 – 4.5	Starter #3
8 – 16	4.5 – 4.0	Grower #1
>16	4.0 – 3.5	Grower #2

** Use only as a guide. Adjust according to appetite and feeding activity of prawns.*

ISO & HACCP CERTIFIED

Ridley Aqua-Feed is certified under AS/NZS ISO 9001:2000 and HACCP 9000:2002 standards. Certification no: QHAC00156

For pricing and other inquiries, please call 1800 268 200 or e-mail aquafeed@ridley.com.au

RAP PRODMAN Doc: 6.1.1 Rev: 5 Issued: 01-Jan-13

This information and advice has been prepared specifically and exclusively for the use of the Company's customers. The company believes the information and advice in it is accurate, but subject to those terms implied by statute which cannot lawfully be excluded, restricted or modified, no warranty of accuracy or reliability is given and no responsibility to the customer or any other person is accepted for errors or omissions howsoever arising, including matters arising through negligence by the Company, it's Directors, employees or agents.

Annexe 4.3.2-a : Profil d'acides aminés des ingrédients utilisés dans la formulation des aliments complets (g/kg) (Source : https://feedtables.com/fr)

Acides aminés (g/kg)	Farine de poisson	Farine de crevettes	Farine de BSF dégraissée	Farine de soja	Huile de poisson	Blé
Lysine	52	20	28,6	27	0	3,9
Thréonine	28,6	14,5	19,8	16,8	0	3,3
Méthionine	19,2	8,7	9,5	6,2	0	1,7
Cystine	5,8	3,5	2,9	6,7	0	2,6
Méthionine + cystine	25	12,3	12,4	13	0	4,4
Tryptophane	7,1	3,9	7,4	5,9	0	1,3
Isoleucine	29	14,8	22,4	19,9	0	3,8
Valine	34,3	18,4	31,3	21	0	4,8
Leucine	49,5	23,8	35,9	33,1	0	6,4
Phénylalanine	26,8	21,2	19,9	22	0	4,3
Tyrosine	21,3	14,7	31,6	15,3	0	3,1
Phénylalanine + tyrosine	48,1	35,8	51,5	37,3	0	7,4
Histidine	16,4	8,3	15,3	11,7	0	2,4
Arginine	45	23,5	24,6	31,8	0	5,3
Alanine	42,7	20,3	32,6	19	0	4,2
Acide aspartique	62,7	33,4	46,5	48,9	0	6,6
Acide glutamique	87,5	47,1	51,4	77,4	0	24
Glycine	43,1	21,5	30,8	18,3	0	4,4

Sérine	26,9	15,3	21,7	20,9	0	4,5
Proline	27,9	16,9	29,5	21,7	0	8,7

Annexe 4.3.2-b : Profil d'acides gras des ingrédients utilisés dans la formulation des aliments complets (g/kg) (Source : https://feedtables.com/fr)

Acides gras (g/kg)	**Farine de poisson**	**Farine de crevettes**	**Farine de BSF dégraissée**	**Farine de soja**	**Huile de poisson**	**Blé**
C12:0	0,09	1,3	41,1	0	1,5	0,01
C14:0	4	2,2	6,1	0,03	99	0,02
C16:0	11,8	6,5	11	1,4	209	1,6
C16:1(n-7)	4,8	0	4	0,01	125	0,08
C18:0	2,4	2,5	2	0,5	34	0,08
C18:1(n-9)	8,1	7,6	10,9	2,9	130	1,2
C18:2(n-6)	1,4	2,4	6,6	6,9	11	5,5
C18:3(n-3)	1,2	0,2	0,9	0,9	8	0,6
C18:4(n-3)	1	0	0,3	0	4	0
C20:0	0,2	0,1	0	0,04	3,5	0
C20:1(n-9)	4,4	1,5	0	0,02	19	0,1
C20:4(n-6)	1,6	1,4	0	0	6	0
C20:5(n-3)	6	4,7	0,4	0	122	0
C22:0	0,2	0	0	0,06	2	0
C22:1(n-9)	5,1	0,3	0	0,02	7	0

C22:5(n-3)	1,7	0,2	0,08	0	17	0
C22:6(n-3)	4,4	5,1	0,2	0	79	0
C24:0	0	0	0	0,03	1,5	0

Annexe 4.3.2-c : Vitamines et minéraux des ingrédients utilisés dans la formulation des aliments complets (Source : https://feedtables.com/fr)

Vitamines	**Farine de poisson**	**Farine de crevettes**	**Farine de BSF dégraissée**	**Farine de soja**	**Huile de poisson**	**Blé**
Vitamine C (mg/kg)	0	na	na	0	0	0
Vitamine E (mg/kg)	19,6	na	na	4,8	219	1
Vitamine K (mg/kg)	2,2	na	na	na	1,5	na
Vitamine B1 (mg/kg)	0,3	na	na	3	0	3,1
Vitamine B2 (mg/kg)	9,4	na	na	3	0	1,6
Vitamine B6 (mg/kg)	4,9	na	na	7	0	13,8
Vitamine B12 (µg/kg)	416	na	na	0	0	0
Niacine (mg/kg)	103	na	na	39,9	0	18,2
Acide pantothénique (mg/kg)	15,2	na	na	15	0	5,8
Acide folique (mg/kg)	0,4	na	na	na	0	0,1
Biotine (mg/kg)	0,4	na	na	0,3	0	na
Choline (mg/kg)	4702	na	na	2792	0	445
Minéraux						
Calcium (g/kg)	31,1	105	39,6	3,4	0	0,6
Phosphore (g/kg)	22,9	13	7,4	6,2	0	3,3

Phosphore phytique (g/kg)	0	0	0	3,7	0	2,5
Magnésium (g/kg)	2,1	8,3	3,5	2,9	0	1,1
Potassium (g/kg)	8,7	4,7	9,6	21,5	0	4,9
Sodium (g/kg)	9,19	8,48	1,42	0,08	0	0,06
Chlore(g/kg)	14,3	13,1	2,2	0,4	0	0,6
Soufre (g/kg)	6,7	6,4	3,6	4	0	1,4
Manganèse (mg/kg)	12	2	236	32	0	20
Zinc (mg/kg)	95	55	106	36	0	24
Cuivre (mg/kg)	9	22	13	14	0	5
Fer (mg/kg)	289	63	181	240	0	40
Sélénium (mg/kg)	0,4	0,7	na	0,2	0	na
Cobalt (mg/kg)	2	na	0,4	0,3	0	0,09
Molybdène (mg/kg)	0,2	na	0,6	4	0	0,5
Iodine (mg/kg)	3	na	na	1	0	0,09

Annexe 4.3.3 : Extrait du tableur Excel et de son utilisation pour la détermination de la formulation des aliments STD et BSF.

Composition cible de l'aliment final

	Matière sèche (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)
Aliment final	90	>38	>6	<3	<13

Liste des ingrédients et composition respective

Ingrédients	Matière sèche (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)
Farine de poisson	92,2	69	9,1	0	14
Farine de soja	87,7	43,5	1,7	6,3	6,5
Farine de LBSF dégraissée	91,7	51,9	11	14,8	11,8
Blé	86,8	10	1,2	2,5	1,8
Farine de crevettes	91,2	39,5	4,7	13	23,8
Huile de poisson	100	0	100	0	0

Formulation aliment STD

Ingrédients	% dans la recette	Matière sèche (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)
Farine de poisson	40%	36,88	27,60	3,64	0,00	5,60
Farine de soja	15%	13,16	6,53	0,26	0,95	0,98
Farine de LBSF dégraissée	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Blé	34%	29,51	3,40	0,41	0,85	0,61
Farine de crevettes	9%	8,21	3,56	0,42	1,17	2,14
Huile de poisson	2%	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00
Σ	100%	89,76	41,08	6,73	2,97	9,33

Formulation aliment BSF

Ingrédients	% dans la recette	Matière sèche (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)
Farine de poisson	21%	19,36	14,49	1,91	0,00	2,94
Farine de soja	17%	14,91	7,40	0,29	1,07	1,11
Farine de LBSF dégraissée	25%	22,93	12,98	2,75	3,70	2,95
Blé	27%	23,44	2,70	0,32	0,68	0,49
Farine de crevettes	9%	8,21	3,56	0,42	1,17	2,14
Huile de poisson	1%	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Σ	100%	89,84	41,12	6,70	6,62	9,62

1. Définition de la composition nutritionnelle de l'aliment final

2. Identification des ingrédients composants l'aliment final

3 et 4. Détermination et saisie de la composition nutritionnelle de chaque ingrédient

5. Calcul des apports de chaque ingrédient en fonction de leur composition respective et de leur % dans la formulation finale

Ex : E20 = E11 × C20

6. Calcul de la composition de l'aliment final en fonction de la contribution de chaque ingrédient

Ex : G24 = somme(G17 :G22)

7. Ajustement du pourcentage de chaque ingrédient dans la recette pour obtenir le profil nutritionnel visé

→ Composition des aliments finaux

Annexe 4.3.4 : Protocole de fabrication de l'aliment humide type « ACAL »

Ce protocole de fabrication est adapté de (Aquacop, 1983) . Les ingrédients (calmar, crevettes et larves de BSF) sont conservés congelés avant le début de la fabrication de l'aliment. Les crevettes doivent être décortiquées, et le bec ainsi que l'arête centrale des calmars retirés. Les œufs de poules doivent être frais. En fonction de la quantité totale d'aliment à préparer et de sa composition nutritionnelle visée, les ingrédients sont préalablement pesés (Tableau 4.3.5). A l'aide d'un hachoir à viande, les crevettes, le calmar et les larves de BSF sont hachés. Les chaires hachées sont mélangées et les œufs de poules sont ajoutés, suivis par les vitamines et l'huile de foie de morue. Le mélange est homogénéisé et enfin l'alginate est incorporé pour lier la mixture. D'autre part, un bain de chlorure de calcium (10g/L) est préparé dans un récipient à fond plat. Le mélange des ingrédients est passé au broyeur. Grace à l'alginate contenu dans le mélange, il sort du broyeur des spaghettis, qui sont placés dans le bain de chlorure de calcium. Les spaghettis sont immergés dans le bain pendant 5 minutes pour favoriser leur durcissement. Cette étape d'extrusion du mélange et de durcissement des spaghettis dans le bain peut être répétée une seconde fois. Enfin, les spaghettis obtenus sont égouttés, placés sur une planche propre et sèche, et sont découpés au couteau pour former des granulés. L'aliment humide ainsi formé est conservé au congélateur à -18°C avant d'être utilisé dans le cadre des tests d'alimentation chez la crevette.



Photos de l'extrusion des spaghettis, de leur durcissement et aperçu de l'aliment égoutté avant d'être découpé. © J.TETOHU

Annexe 4.3.5 : Composition en minéraux, acides aminés et acides gras des ingrédients utilisés dans la formulation de l'aliment expérimental humide

Ingrédients	Calmar cru	Crevette crue	Œufs de poule	Huile de foie de morue	Larves de BSF
Minéraux					
Ca (mg/100g)	0,02	0,08	0,08	0,0012	0,58
P (mg/100g)	0,17	0,20	0,20	0	0,25
Acides aminés					
Histidine (g/100g)	0,35	-	-	0	0,65
Isoleucine (g/100g)	0,78	1	0,29	0	0,85
Leucine (g/100g)	1,3	1,6	0,66	0	1,88
Lysine (g/100g)	1,3	1,8	1,04	0	1,33
Méthionine (g/100g)	0,4	0,57	0,82	0	0,32
Phénylalanine (g/100g)	0,66	0,86	0,64	0	0,88
Thréonine (g/100g)	0,76	0,82	1,15	0	0,85
Tryptophane (g/100g)	0,2	0,29	0,59	0	0,34
Valine (g/100g)	0,79	1	0,19	0	1,23
Acides gras					
Acides gras saturés (g/100 g)	0,28	0,21	2,64	22	5,11

Acides gras monoinsaturés (g/100 g)	0,11	0,26	3,66	46,5	2,70
Acides gras polyinsaturés (g/100 g)	0,39	0,36	1,65	24,3	1,21
Dont EPA (g/100g)	0,12	0,09	0	8,39	0,44
Dont DHA (g/100g)	0,27	0,09	0,09	11,4	0,35

Conclusion du chapitre

L'utilisation de la larve de BSF dans l'alimentation animale est en plein essor et a pris une importance considérable ces dernières années, dans un contexte de gestion durable des matières organiques (Diener, Studt Solano, *et al.*, 2011; Banks, Gibson and Cameron, 2014; Rehman *et al.*, 2017; Dzepe *et al.*, 2021) et du besoin croissant de sources alternatives de protéines et de lipides (Gasco *et al.*, 2019; Shelomi, 2020; Tomberlin and van Huis, 2020; Penido *et al.*, 2023). La considération de nouvelles approches dans la production alimentaire, énergétique et dans la gestion des déchets organiques est la conséquence de diverses pressions telles que la croissance démographique, l'empreinte écologique élevée des pratiques de gestion des matières organiques et des pratiques agricoles. A travers ce dernier chapitre, nous avons exploré le potentiel des larves de BSF en tant qu'ingrédient pour la production avicole (poules pondeuses), entomologique (larves de moustiques) et aquacole (crevettes bleues) en mettant en lumière les avantages de cet ingrédient mais aussi les défis liés à leur transformation et leur incorporation dans un aliment complet.

L'utilisation des larves de BSF sous forme congelée comme complément alimentaire pour les poules pondeuses a permis d'augmenter significativement le taux de pontes avec une hausse de près de 50% du nombres d'œufs pondus sur la durée de l'expérimentation (5 semaines). Ce travail a cependant démontré qu'en l'absence de structures expérimentales en aviculture sur le territoire, il est difficile de mettre en place des expérimentations avec des conditions strictes, une acquisition rigoureuse des données, et il est encore plus difficile répéter les expériences. Ceci ne diminue en rien l'attrait des éleveurs pour cet ingrédient prometteur, qui sont demandeurs d'alternatives pouvant leur conférer plus d'autonomie vis-à-vis de l'alimentation de leur cheptel. Certains ont d'ailleurs la volonté de produire des ressources nutritives directement au sein de leur exploitation et c'est en ce sens que nous avons développé, durant le programme PROTEGE et en collaboration avec la DAG, des kits de production de larves de BSF ainsi que le guide d'élevage associé. Malgré des capacités de production limitées, ces kits permettent aux éleveurs d'expérimenter et d'évaluer les avantages de l'intégration de larves vivantes de BSF à l'alimentation de leurs poules pondeuses, ce qui contribue à la sensibilisation de la population au sujet du potentiel des larves de BSF.

Concernant la filière entomologique, l'utilisation de larves de BSF dans l'alimentation des larves de moustiques *Aedes aegypti* a nécessité des étapes de transformation afin d'obtenir une farine dégraissée de larves de BSF. Ces travaux ont montré que le remplacement total des

protéines apportées par la poudre de foie de bovin peut être effectué avec de la farine dégraissée de larves de BSF, avec cependant des performances de survie et de croissance légèrement altérées. Ce travail préliminaire ouvre de nombreuses perspectives avec notamment des analyses complémentaires pour caractériser la qualité des différents régimes expérimentaux, l'expérimentation d'assemblages d'ingrédients, la mesure de performances à l'âge adulte, la répétition des essais sur deux autres espèces de moustiques et enfin l'amélioration de la qualité des farines issues du pilote du programme Ra'o Puha. La collaboration de TECHNIVAL avec le LEM de l'ILM sera ainsi poursuivie afin de répondre à ces diverses perspectives de recherches.

Enfin, la dernière filière explorée dans le cadre de ces travaux de thèse est la crevetticulture. L'approche proposée décrit l'utilisation de larves de BSF comme ingrédient dans la formulation d'un aliment complet, fabriqué de façon conventionnelle (industrielle) ou de façon artisanale. La vocation de l'unité de production de larves de BSF du programme Ra'o Puha est de produire des ingrédients (farines et huiles), et non pas des aliments dont l'expertise revient aux provendiers. Cependant, la réalisation de tests d'appétence en crevetticulture nécessitait la production d'un aliment complet. En l'absence d'atelier de nutrition et de fabrication d'aliment à l'échelle locale, nous avons expérimenté la fabrication et l'utilisation d'un aliment composé humide, pour le grossissement des crevettes bleues *Litopenaeus stylirostris*. Bien que les conditions techniques et expérimentales n'aient pas permis de conclure quant à l'impact de la larve de BSF sur les performances zootechniques des crevettes, cette approche a mis en lumière les contraintes auxquelles les ingrédients doivent répondre pour favoriser la bonne assimilation et la digestibilité des nutriments. Par ailleurs, en l'absence de fabricant d'aliments spécialisé en aquaculture sur le territoire, la filière aquacole n'est pas, à ce jour, un marché potentiel pour l'utilisation des farines et huiles de larves de BSF du programme Ra'o Puha.

Les perspectives sur cet axe global de valorisation des larves de BSF pour l'alimentation animale sont de valider puis d'optimiser les étapes de transformation des larves de BSF à l'échelle pilote, puis industrielle. Les différents produits transformés feront l'objet d'analyses telles que la caractérisation du profil nutritionnel mais également l'analyses des métaux lourds ainsi que des analyses microbiologiques afin d'attester de la qualité et de l'innocuité des produits issus de la transformation. Avec l'augmentation des volumes de production de larves et de produits transformés, des essais de formulation et de fabrication d'aliments pourront être envisagés avec le provendier local.

CHAPITRE 5 – DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le programme Ra'o Puha est un programme de recherche appliquée portant sur l'étude de la valorisation industrielle d'un procédé de production de larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) par bioconversion de déchets agricoles et agro-industriels pour l'alimentation animale. Ce travail s'inscrit dans le contexte polynésien, caractérisé par sa forte dépendance au commerce extérieur et confronté à des problématiques spécifiques dans le domaine de la gestion des déchets, en lien avec son caractère insulaire. L'industrialisation du procédé de bioconversion par les larves de BSF nécessite de maitriser les différentes étapes de production, elles-mêmes regroupées en pôles fonctionnels que sont l'élevage des géniteurs, l'unité de bioconversion et l'unité de transformation. Ces trois unités fonctionnelles ont défini les trois principaux axes de recherche de ce travail de thèse.

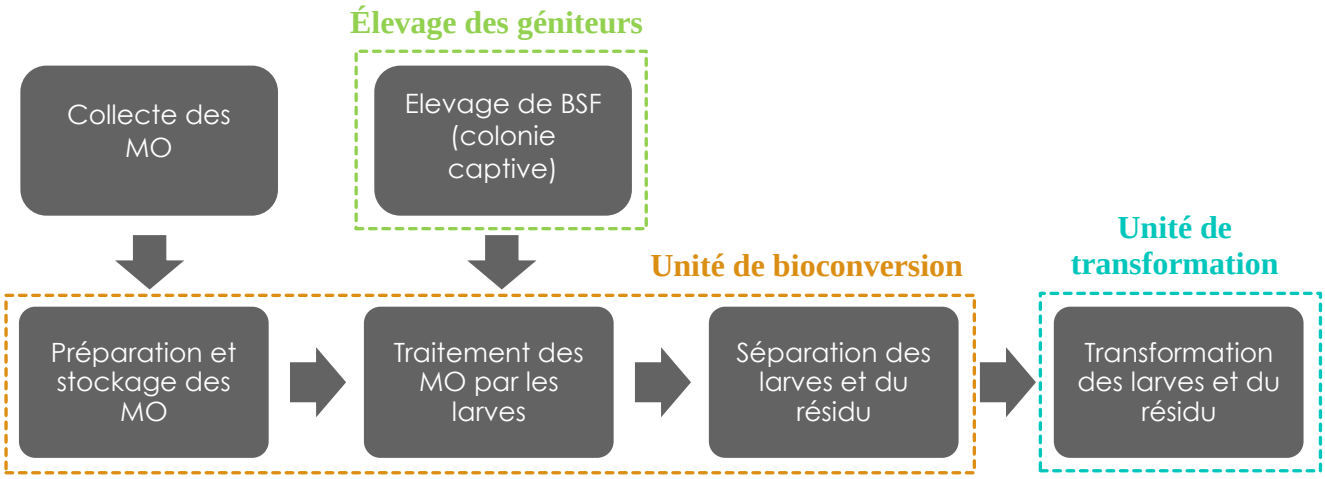


Figure 5.1 : Schéma des différents pôles d'une unité de production de larves de BSF

Principaux résultats et implications pour le développement d'une unité de production

Importance de la domestication

Le chapitre 2 a permis dans un premier temps de caractériser la dynamique des pontes sauvages au sein du site pilote du programme Ra'o Puha situé à Paea. Ces travaux ont mis en exergue au cours de l'année 2021 le manque de régularité et de prévisibilité des récoltes d'œufs. En l'absence de corrélations significatives entre variations saisonnières et performances de ponte, on peut supposer que le climat tropical de Tahiti n'est pas limitant pour le maintien des colonies sauvages tout au long de l'année mais que d'autres facteurs, que nous supposons anthropiques, impactent la présence et le déplacement préférentiel des femelles sauvages gravides.

Pour pallier ce faible recrutement, l'élevage d'une colonie de géniteurs devient indispensable. La suite du chapitre 2 a donc porté sur l'établissement et le maintien en captivité d'une colonie de BSF à partir de pontes sauvages dans un objectif de domestication. Ce travail a permis de lever un frein considérable au développement à grande échelle de ce projet, qui n'aurait pas été réalisable sans l'atteinte de cet objectif de maitrise de la reproduction en captivité. Bien que des améliorations soient à apporter, l'application d'un protocole de gestion standardisé est une avancée majeure du processus de domestication.

Les perspectives en recherche et développement pour le pilote sont de sécuriser la colonie avec une meilleure isolation thermique, d'améliorer la synchronisation des différents stades de vie et d'augmenter les performances de ponte des femelles captives dont la fécondité actuelle (64 à 240 œufs/femelle) a un fort potentiel d'amélioration pour atteindre des valeurs de l'ordre de 350 à 500 œufs par femelle (Dortmans *et al.*, 2017; Bertinetti, Samayoa and Hwang, 2019). Ceci permettra par la suite d'envisager une augmentation progressive de la taille de la colonie, pour garantir un approvisionnement constant et suffisant en œufs pour les besoins de l'unité de bioconversion. En parallèle, la caractérisation génétique des populations sauvages et domestiquées permettrait de mettre en œuvre une stratégie de sélection, pour cibler des caractéristiques d'intérêt, afin de produire des individus dont les performances sont optimales.

Les enjeux de la bioconversion

D'après le dictionnaire Larousse, la bioconversion correspond à un changement de forme de l'énergie ou de la matière ayant pour agent un être vivant. Dans notre cas précis, la bioconversion est le processus au cours duquel la matière organique est convertie en biomasse

larvaire par le mécanisme de digestion. Cette propriété est ce qui confère à la larve de BSF un potentiel remarquable en tant qu'agent de gestion des MO.

Les gisements de MO disponibles à Tahiti qui ont été ciblés dans ce travail de recherche sont les tourteaux de coprah, les restes alimentaires et les co-produits de la pêche (seuls ou assemblés). Le chapitre 3 s'est attaché à mesurer les performances zootechniques des larves sur ces différents gisements. La connaissance de ces indicateurs est indispensable pour projeter les rendements de production d'une unité de bioconversion et par conséquent pour la dimensionner de façon adéquate. D'autre part, les larves étant destinées à intégrer le marché local de l'alimentation animale, leur qualité intrinsèque a été caractérisée pour connaitre les teneurs en protéines et en lipides des larves, et plus spécifiquement la qualité des profils d'acides aminés et des profils d'acides gras. Ces informations seront cruciales pour les provendiers qui peuvent ainsi préparer des formules adaptées aux besoins des différentes espèces animales.

En plus de ces données liées à la production des larves, l'aspect mobilisable des gisements de MO est un facteur clé qui intervient dans le processus de décision de l'entreprise quant au gisement ciblé pour le développement industriel de l'unité de production de larves de BSF. A l'heure actuelle, le marché local de l'alimentation animale suffit à absorber l'intégralité des tourteaux de coprah produits par l'Huilerie de Tahiti. La gestion des co-produits du port de pêche fait l'objet de discussions entre les acteurs de la pêche et le Pays face à l'urgence de trouver un plan de gestion de ce gisement. Malgré son fort potentiel de valorisation, le coût annoncé par les prestataires candidats, Technival y compris, pour la collecte et le traitement du gisement a constitué jusqu'à présent un frein aux précédentes initiatives.

Le modèle économique de l'unité de production envisagée dans le cadre du programme Ra'o Puha ne sera durable que s'il intègre les coûts associés au traitement de la MO. Par conséquent, le choix du gisement s'est porté sur les restes alimentaires, c'est donc sur ce gisement que les projections techniques et économiques ont été réalisées. Le centre d'enfouissement technique (CET) reçoit actuellement de la matière organique catégorisée « déchets alimentaires » à un tarif de 45 000 XPF/tonne (Délibération n°08/2023/FENUA MA du 21 Mars 2023, tarifs applicables au 01/06/2023). Nos ambitions sont donc d'offrir aux producteurs de ce type de gisement une alternative vertueuse, avec une solution de traitement durable pour le traitement de leur MO à un coût compétitif par rapport l'enfouissement technique.

Diverses approches pour la valorisation des larves de BSF

Le chapitre 4 a abordé plusieurs niveaux de transformation des larves de BSF pour leur intégration dans l'alimentation de filières animales que sont l'aviculture (larves de BSF congelées), l'entomoculture pour l'alimentation de larves de moustiques (larves de BSF sous forme de farine dégraissée) et la crevetticulture (larves de BSF intégrées à la formulation d'un aliment complet). Ce travail, bien qu'à la marge de notre activité de gestion de MO et de production de ressources pour l'alimentation animale, était nécessaire pour évaluer le potentiel de la larve de BSF comme nouvel ingrédient, pour appréhender les attentes des filières et identifier les débouchés potentiels. Deux principaux marchés apparaissent pour la larve de BSF. D'une part, celui de la vente en direct, par exemple de larves vivantes ou d'œufs de BSF, à des particuliers ou à des petits éleveurs. D'autre part, celui de la vente de produits transformés (farine dégraissée et huile de larves de BSF) au provendier pour la fabrication d'aliments. Il s'agit de deux modèles économiques complémentaires, le premier vise la vente de petites quantités de produits à des prix plus élevés, tandis que le second cible la vente en gros à des professionnels nécessitant alors des prix compétitifs par rapport à ceux des autres ingrédients achetés et utilisés par les fabricants d'aliments. Par ailleurs, l'activité de production de larves de BSF génère des co-produits (résidu de bioconversion et chitine) qui après transformation peuvent également être commercialisés et générer des revenus. La figure 5.2 liste les différents produits générés par l'activité de production de larves de BSF et pouvant être mis sur le marché.

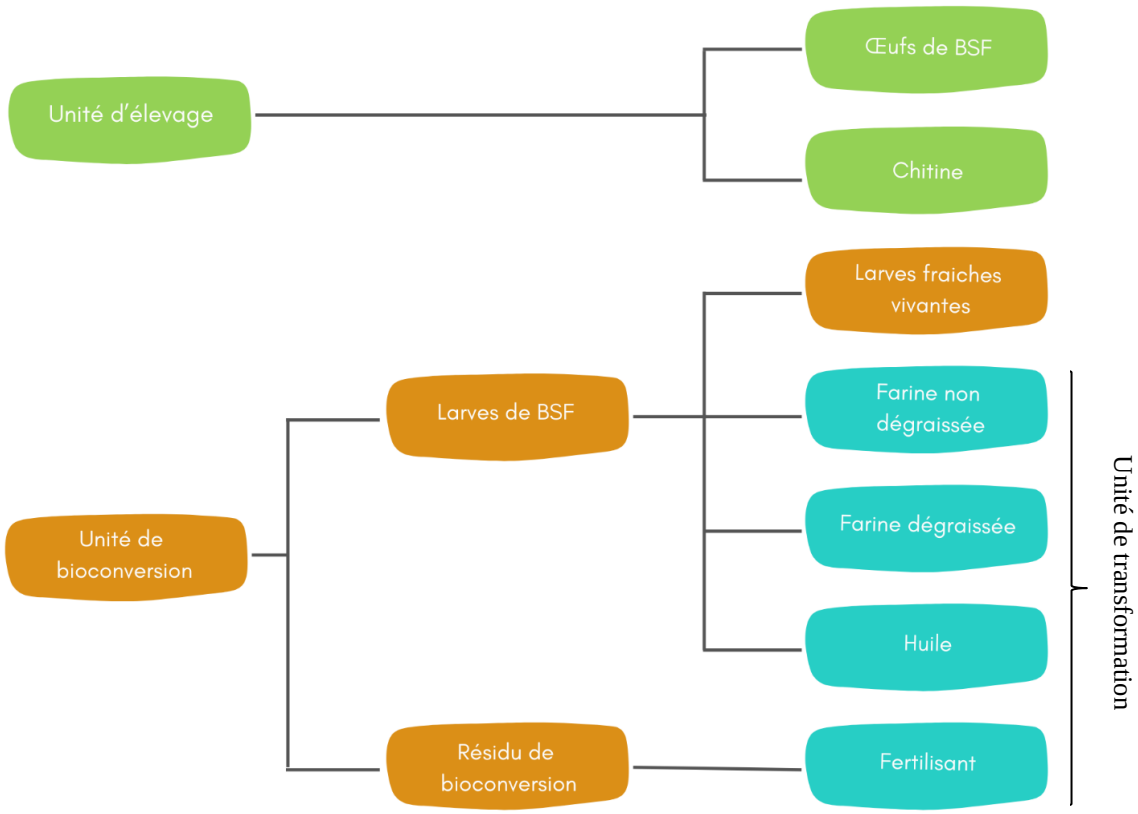


Figure 5.2 : Les produits issus de l'activité de production et du processus de bioconversion par les larves de BSF

- Les œufs de BSF peuvent être proposés à la vente aussi bien pour des particuliers que pour des professionnels. En effet, ils peuvent être utilisés pour démarrer une petite production artisanale de larves de BSF tout comme ils peuvent être exportés pour approvisionner d'autres unités de bioconversion qui externalisent ou débutent la partie nurserie (élevage des adultes et récolte des pontes en captivité). Ces ventes ne représentent pas nécessairement de gros volumes, mais les prix peuvent être élevés.

- La vente de larves vivantes est également possible, aux différents stades de développement larvaire (larve de 4 à 5 jours, larve de 10 jours, prénymphe). Tout comme les œufs, les larves peuvent être utilisées pour initier une petite production artisanale de larves de BSF, ou pour nourrir certains animaux tels que les reptiles ou les volailles, les insectes faisant partie de leur alimentation naturelle. Les larves de 4 à 5 jours peuvent également être utilisées en aquaponie pour nourrir les poissons tels que le tilapia et le barramundi. La commercialisation de ces larves vivantes nécessite une bonne organisation avec le réseau d'acheteurs pour limiter les pertes liées à des invendus, ou à la transformation des larves en prénymphes ou nymphes dans le cas où les larves ne sont pas distribuées rapidement.

- Les stocks de larves invendus peuvent être congelés sous vide pour conserver les qualités nutritionnelles permettant un délai pour la vente.
- Les larves peuvent être séchées puis moulues afin d'obtenir une farine complète qui contient à la fois les protéines et les lipides. Cette farine est alors dite non dégraissée.
- Les larves peuvent également subir une transformation qui consiste à fractionner les nutriments : les protéines sous forme de farine, et les lipides sous forme d'huile. Les farines et huiles de BSF sont des produits qui s'adressent directement aux provendiers et fabricants d'aliments. Ce sont des ingrédients qui intègrent la formulation des granulés commerciaux, pour l'alimentation des différentes filières animales. Leurs prix doivent être compétitifs par rapport à ceux des matières premières (farine de soja, huile de soja, farine de poisson, céréales) habituellement achetées par les provendiers, pour promouvoir la substitution partielle ou totale de ces ressources.
- Le résidu de bioconversion qui contient les mues des larves et la matière digérée puis excrétée par les larves, est un co-produit d'intérêt pour le secteur agricole. Il peut être vendu aussi bien aux particuliers qu'aux professionnels, sous forme de compost, pour fertiliser les cultures. Au Canada, le marché des résidus de bioconversion ou « frass » est particulièrement lucratif. En effet, les bienfaits de ce résidu sont utilisés dans le cadre de la culture du cannabis.
- Le processus de production des larves et d'élevage des adultes génère un ultime co-produit, regroupant les mues, les coquilles vides des nymphes après l'émergence de la mouche adulte, ainsi que l'exosquelette des mouches mortes en fin d'élevage en captivité. Tous ces éléments contiennent de la chitine, constituant de la cuticule des insectes. Après un traitement chimique, la chitine peut être transformée en chitosan, molécule à haute valeur ajoutée avec de nombreuses applications notamment en cosmétiques, en agro-alimentaire ou encore en agriculture (Philibert, Lee and Fabien, 2017; Nyakeri *et al.*, 2019; Siddiqui *et al.*, 2021).

Industrialisation du procédé

Dimensionnement d'une unité de production à Tahiti

Les données générées dans le cadre de ces travaux de thèse permettent de projeter la capacité de production de l'unité industrielle. La projection présentée ci-après simule le traitement de 1000 t/an de MO de type « restes alimentaires » (RA) par an, avec un fonctionnement 7j/7, 365 jours par an, ce qui équivaut à un traitement de 3t/jour.

- **Estimation de la production journalière de larves**

A partir des paramètres de bioconversion calculés dans le chapitre 3, pour 3t de RA ajoutés, 900 kg sont consommés (OD=30%). La consommation de 900 kg de RA confère un gain de poids de 450 kg de biomasse larvaire (FCR=2). Sur la base de ces indicateurs, nous pouvons considérer que pour 3t de RA à traiter, 450 kg de larves seront produits. Les performances de croissances relevées dans le chapitre 3 indiquent un poids larvaire final d'environ 150 mg/larve au bout de 10 jours d'alimentation sur à régime à base de RA. Les 450 kg de larves correspondent donc à 3 millions de larves.

Les larves sont réparties à raison de 10 000 larves par bac d'élevage (Dortmans *et al.*, 2021), soit un total de 300 bacs. Les bacs peuvent être empilés sur 6 étages, soit 50 piles. En considérant qu'une pile occupe une empreinte au sol de l'ordre de 0,24m² (60x40cm), les 50 piles occupent à elles seules 12m². En considérant des zones de circulation, une surface de 70m² semble adaptée au bon fonctionnement de l'unité de bioconversion (Figure 5.3)

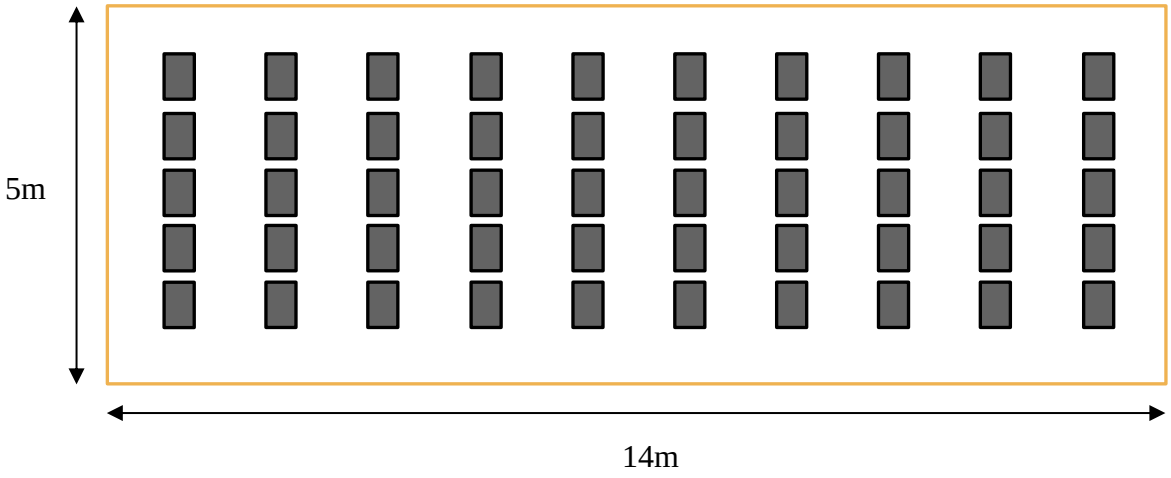


Figure 5.3 : Exemple de configuration de la zone de bioconversion

- **Estimation des besoins journaliers en œufs**

Les données du chapitre 3 montrent une mortalité de 18% concernant la croissance larvaire sur RA. Pour faciliter les calculs, nous arrondissons cette valeur à 20%. Ainsi, pour obtenir 3 millions de larves en fin de croissance larvaire, il est nécessaire d'avoir 3,75 millions de mini-larves en sortie de la nurserie. Le poids moyen d'un œuf de BSF étant de 0,025 mg, cela équivaut à 93,75 g d'œufs. En considérant que seuls 60% des œufs éclosent et survivent jusqu'au transfert dans l'unité de bioconversion, le besoin en œufs est de 156,25 g, que nous arrondissons à 160 g d'œufs pour les besoins de l'unité de bioconversion.

- **Estimation de la taille de la colonie**

L'amplification de la taille de la colonie de géniteurs nécessitera de changer la taille des volières (ou cages de reproduction), qui seront adaptées à une production industrielle et non plus à une production expérimentale. Dortmans *et al.*, (2021) recommandent l'utilisation de volières de dimensions 75x75x150 cm, chargées avec 10 000 mouches adultes par cage. Dans cette configuration, il est possible de récolter jusqu'à 75g d'œufs par cage sur un total de 4 jours. Ces données correspondent à une fécondité d'environ 600 œufs par femelle, ce qui est supérieur aux performances de notre colonie actuelle, décrites dans le chapitre 2 (64 à 240 œufs par femelle). Si de tels objectifs de production sont atteints (75g d'œufs en 4 jours), la production journalière par cage avoisinera les 19g d'œufs. Il faudra donc déployer 9 à 10 cages de ce type pour atteindre une production journalière d'œufs répondant aux besoins de l'unité de bioconversion, ce qui correspond à la production journalière d'environ 100 000 mouches adultes prêtes à se reproduire.

Ces 100 000 mouches peuvent être obtenues à partir de 8,5g d'œufs de poids moyen égal à 0,025mg, dont 60% éclosent et atteignent le stade de larves de 5 jours, dont 82% survivent jusqu'à la mise en émergence, dont 60% émergent en mouches adultes.

En définitive, pour couvrir les besoins de maintien des colonies et d'approvisionnement de l'unité de bioconversion, nous pouvons raisonnablement définir un objectif de production journalier de 170 à 200g d'œufs, nécessitant le déploiement de 10 à 12 cages de reproduction. Chaque cage ayant une empreinte au sol de 0,56m², il faut une surface de 6,75m² pour accueillir 12 cages. En considérant des zones de circulation et des espaces entre chaque cage, un espace

de 18m² semble adapté pour accueillir l'ensemble des cages et les opérateurs en charge de l'élevage (Figure 5.4).

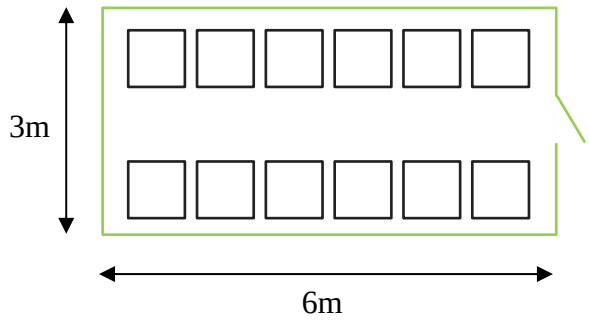


Figure 5.4 : Exemple de configuration pour la salle de reproduction des géniteurs

- **Estimation de la production quotidienne de « frass »**

Le coefficient de dégradation (DC=0,7) indique que pour 3t de RA digérés par les larves de BSF, 2,1t de résidus de bioconversion sont mobilisables pour être valorisés en agriculture.

- **Estimation de la quantité de produits transformés**

La larve de BSF contient en moyenne 35% de matière sèche, le séchage de 450 kg de larves permet d'obtenir 157 kg de larves sèches, qui peuvent être broyées pour obtenir l'équivalent en poids de farine de larves de BSF non dégraissée. Si les nutriments dans les larves sont fractionnés, par exemple avec une presse à froid, l'huile brute représente environ 20% du poids (31,4 kg) et le tourteau de larves 70% du poids (110 kg) (Dortmans *et al.*, 2021). Un fois filtrée, la quantité finale d'huile de larve de BSF avoisine les 20 kg, tandis que le tourteau de larves est moulu pour obtenir 110 kg de farine dégraissée de larves de BSF.

Comme indiqué dans la figure 5.2, la chitine pourrait être une source de revenus à ne pas négliger. En effet ce biopolymère permet, après une étape de désacétylation, d'obtenir le chitosan, dont les applications sont nombreuses par exemple en pharmaceutique, en agroalimentaire, ou cosmétique (Gortari and Hours, 2013; Yeul and Rayalu, 2013). La chitine peut être extraite de sous-produits liés à l'activité de production de larves de BSF que sont les mouches mortes, les mues des larves ou encore les exuvies après l'émergence de la mouche adulte. L'extraction de la chitine correspond à un traitement acide (déminéralisation) suivi d'un traitement basique (déprotéinisation). Une étude menée par Wang *et al.*, (2020) a montré que

les taux de chitine sont significativement différents suivant les stades de croissance, les exuvies étant les plus riches (14%) et les mouches adultes les plus pauvres (3%). Au sein d'une unité de production, les mouches mortes sont plus faciles à collecter que les exuvies ou les mues qui nécessitent une étape de tri pour être isolées. La production journalière de 100 000 mouches mortes par jour, contenant 60% de matière sèche (Soetemans, Uyttebroek and Bastiaens, 2020) et avec un poids moyen de l'ordre de 25mg par mouche (Données internes, non publiées), permettrait d'extraire 45g de chitine.

- **Bilan annuel pour le traitement de 1000t de MO de type RA**

En résumé, nous pouvons projeter les ordres de grandeurs des quantités produites au bout d'une année (Figure 5.5). La bioconversion de 1000 t de MO de RA conduit à la production de 164 t de larves fraiches et de 766 t de résidus de bioconversion ou « frass ». Les 164 t de larves fraiches équivalent à 57 t de larves sèches, permettant la production de 7,3 t d'huile de larves de BSF et de 40,15 t de farine de larves de BSF dégraissée. Si l'extraction de chitine est faite uniquement à partir des mouches adultes, la production annuelle sera de l'ordre de 16 kg. Ces quantités sont minimes mais elles pourraient être augmentées avec l'extraction de la chitine contenue dans les exuvies (autant d'exuvies que de mouches mortes). Les molécules de chitine et de chitosan peuvent être vendues plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'euros par kilogramme (Martin, 1995; Arrouze *et al.*, 2017; Cogollo-Herrera *et al.*, 2018) en fonction de la qualité, de la pureté ou de l'origine des molécules.

Le développement de ce volet de valorisation pourrait être la base d'une filière chitine/chitosan en Polynésie française, ces molécules pouvant aussi être extraites d'organismes marins (Younes and Rinaudo, 2015; Brigham, 2017), par exemple des mues des crevettes d'élevage ou des copépodes.

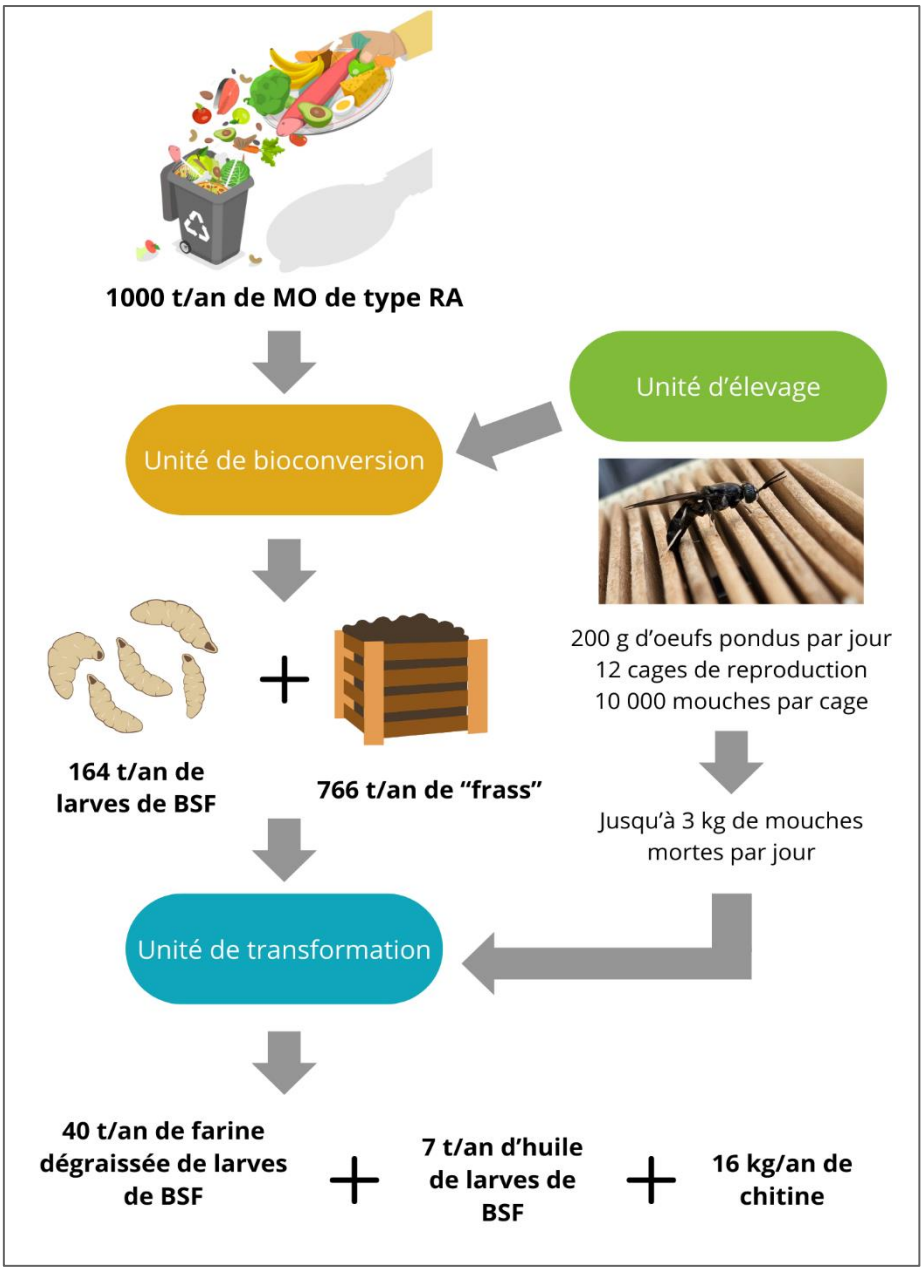


Figure 5.5 : Simulation d'une unité de production de larves de BSF pour le traitement de 1000t de restes alimentaires (RA) par an.

Les aspects techniques et économiques

Les valeurs calculées dans le cadre de ce dimensionnement sont basées sur les performances zootechniques des larves élevées à l'échelle expérimentale. La prochaine étape du programme Ra'o Puha est d'acquérir d'ici le début de l'année 2025 le matériel destiné à la production industrielle, d'opérer dans les unités d'élevage, de bioconversion et de transformation avec ces équipements et de relever les performances de production dans ces nouvelles conditions.

Ce nouveau jeu de données permettra d'affiner la projection sur les volumes de production et la définition des produits ciblés pour la commercialisation. Cette phase intermédiaire permettra également de mieux appréhender les besoins en énergie, en ressources humaines ainsi que les surfaces et infrastructures nécessaires pour l'unité industrielle.

L'acquisition de ce matériel fait l'objet d'un investissement de l'entreprise TECHNIVAL pour le déploiement de l'unité pilote sur le site de Paea, avec le soutien de l'ADEME. L'augmentation des volumes de production rendra possible la réalisation de tests de fabrication d'aliments avec les acteurs locaux. Le projet prévoit d'augmenter les volumes de production au sein du pilote de façon progressive sur les trois prochaines années, avant un passage à l'échelle industrielle sur un autre site.

Les aspects réglementaires

Les insectes dans l'alimentation animale

S'il n'y a pas de doutes quant à la capacité des larves à digérer les différents gisements de MO, l'utilisation des larves produites comme ingrédients dans l'alimentation animale n'est pas encore cadrée juridiquement en Polynésie française. Comme abordé dans l'introduction, la règlementation européenne au sujet de la production et de l'utilisation des insectes dans l'alimentation animale est récente et ne cesse d'évoluer. Ces évolutions ouvrent de plus en plus de possibilités que ce soit dans les espèces d'insectes autorisées, les formes de transformation de ces insectes ou les filières animales pouvant intégrer ces insectes comme ingrédients. Cependant, à l'heure actuelle, la règlementation européenne exclut les produits carnés ou à base de poisson, les restes alimentaires après consommation, les déchets d'abattoirs et les fumiers d'élevage de la liste des gisements pouvant être utilisés pour l'alimentation des insectes, eux-mêmes destinés à l'alimentation animale. Les perspectives du programme Ra'o Puha sont de démontrer qu'en mettant en place des mesures adaptées, les gisements tels que les co-produits de l'industrie alimentaire ou les co-produits de la pêche ne sont pas des « déchets ». Le code de l'environnement de la Polynésie française prévoit la sortie du statut de déchet, en particulier dans les articles LP. 4211-3 et LP. 4211-4 explicités ci-après (DIREN, 2020).

- **Art. LP. 4211-3**.- Certains déchets spécifiques cessent d'être regardés comme des déchets lorsqu'ils font l'objet d'un traitement de valorisation, tel que le recyclage, ou la préparation en vue de la réutilisation, et s'ils répondent aux critères spécifiques remplissant l'ensemble des conditions suivantes :

1° la substance ou produit est couramment utilisé à des fins spécifiques ou remplit les exigences techniques aux fins spécifiques ;

2° il existe une demande pour une telle substance ou un tel produit, ou encore ils répondent à un marché ;

3° la substance ou produit respecte les législations et normes applicables aux produits ;

4° l'usage de la substance ou du produit n'a pas d'effets négatifs sur la santé ou l'environnement.

- **Art. LP. 4211-4**.- Une matière ou un produit résultant d'un processus de production qui ne vise pas en priorité la production de cette matière ou produit, peut être considérée uniquement comme un sous-produit et non pas comme un déchet, si les conditions suivantes sont remplies :

1° l'utilisation ultérieure de la substance ou du produit est certaine ;

2° la substance ou le produit peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes ;

3° la substance ou le produit fait partie intégrante d'un processus de production ;

4° la substance ou produit respecte les législations et normes applicables aux produits, à l'environnement et à la santé humaine pour l'utilisation ultérieure ;

5° l'usage de la substance ou du produit n'a pas d'effets négatifs sur la santé ou l'environnement.

Les perspectives du projet sont donc d'expérimenter et d'organiser la mise en place de telles mesures, en partenariat avec les producteurs de MO, pour que le futur cadre règlementaire polynésien prévoie l'utilisation de ces gisements dans le cas de la bioconversion par les larves de BSF, et pour que les larves produites puissent être intégrées à l'alimentation animale, si l'innocuité de ces produits est prouvée.

Une telle avancée juridique permettrait de contribuer à la réalisation de certains objectifs du schéma territorial de prévention et de gestion des déchets en Polynésie française (DIREN, 2024) tels que :

- diminuer l'enfouissement de déchets de catégorie 2 de 50% à l'échéance 2032 par rapport à 2020 (Orientation B),

- limiter le gaspillage des ressources (Orientation B),
- favoriser l'économie circulaire (Orientation B),
- développer la collecte séparative des biodéchets sur Tahiti afin de les orienter vers des filières de valorisation organique (Orientation C),
- favoriser la valorisation matière localement (Orientation C).

Les frass comme fertilisants

La mise sur le marché de matières fertilisantes est régie par les règlementations européenne et nationale. Le règlement (UE) 2021/1925 modifie l'annexe 1 du règlement (UE) 142/2011 afin d'y inclure la définition de « frass » : « un mélange d'excréments d'insectes d'élevage, de substrat alimentaires, de parties d'insectes d'élevage et d'œufs morts, dont la teneur en insectes d'élevage morts ne dépasse pas 5% en volume et 3% en poids ». Les frass sont donc autorisés en tant que fertilisants dans l'Union Européenne et sont soumis aux exigences de l'annexe XI du règlement 142/2011 concernant la mise sur le marché des lisiers transformés. En France, la commercialisation de fertilisants nécessite, sauf en cas de dispense, de faire une demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) auprès de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). En Polynésie française ces procédures ne sont pour l'instant pas appliquées.

Conclusion

En conclusion, ces travaux de recherche ont permis de valider le processus de production de larves de BSF à partir d'une colonie domestiquée à l'échelle du laboratoire. Les caractéristiques nutritionnelles des larves de BSF ont été décrites et sont malléables en fonction des substrats alimentaires proposés pendant la croissance des larves. Les tests nutritionnels réalisés sur les poules pondeuses, les larves de moustiques et les crevettes en élevage ont permis de vérifier que les larves de BSF sous différentes formes peuvent s'intégrer au régime alimentaire classique. Les infrastructures de l'unité pilote sont en cours d'aménagement avec le matériel requis pour une production semi-industrielle, afin de valider le processus de production à une échelle plus importante.

Ce travail a ouvert de nombreuses perspectives de recherche, avec notamment la caractérisation génétique des populations sauvages et domestiquées de l'insecte ainsi que la caractérisation

agronomique des résidus de bioconversion en vue de leur valorisation en agriculture. A l'échelle du pilote, des pistes techniques sont également identifiées pour l'optimisation des conditions d'élevage et la synchronisation des stades de vie des spécimens produits. A moyen terme, des essais de fabrication d'aliments avec un provendier sont attendus pour l'intégration des farines et huiles de larves de BSF dans la production locale d'aliments.

L'industrialisation de l'unité de production contribuera au développement d'une nouvelle filière de traitement des matières organiques et à la production d'ingrédients locaux. L'utilisation des larves de BSF dans l'alimentation animale et l'utilisation des résidus de bioconversion en agriculture seront conditionnées par la mise en place d'un cadre règlementaire ou d'une adaptation locale des textes nationaux ou de l'Union Européenne. Cette nouvelle activité pourrait par ailleurs participer à l'émergence d'une filière chitine sur le territoire.

Ces travaux de thèse ont fait l'objet de nombreuses collaborations, à l'échelle locale, nationale et internationale. Dans un premier temps, ce travail a bénéficié du soutien financier de la Délégation à la Recherche de Polynésie française et de l'accueil de l'Institut Louis Malardé sur le site du Laboratoire d'Entomologie Médicale à Paea. Les aspects relatifs à la valorisation des larves dans l'alimentation animale ont été développés en collaboration avec la Direction de l'Agriculture, le Laboratoire d'Entomologie médicale de l'Institut Louis Malardé et la Direction des Ressources Marines. Les tests d'appétence en aviculture se sont déroulés grâce à la collaboration et à l'investissement d'un éleveur volontaire. La Chambre d'Agriculture et de la Pêche Lagonaire a également été un partenaire sur des thématiques telles que la valorisation des sous-produits de pêche et sur la production locale et artisanale d'aliments pour l'aquaculture. La plateforme LIPIDOCEAN, située au sein de l'Institut Universitaire Européen de la Mer de l'Université de Bretagne Occidentale s'est avérée être un partenaire privilégié en termes de formation pour acquérir de nouvelles compétences de laboratoire et en terme scientifique pour la caractérisation des profils lipidiques des échantillons étudiés. Enfin, le projet a également bénéficié d'un partenariat avec l'Université de LAVAL au Québec axé sur les aspects de gestion de colonies. Ces échanges et collaborations ont nourri significativement ce travail de recherche appliquée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abd El-Hack, M.E. *et al.* (2020) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal as a promising feed ingredient for poultry: A comprehensive review', *Agriculture (Switzerland)*, 10(8), pp. 1–31. doi:10.3390/agriculture10080339.

Aerni, V. *et al.* (2005) 'Productivity and mortality of laying hens in aviaries: A systematic review', *World's Poultry Science Journal*, 61(1), pp. 130–142. doi:10.1079/WPS200450.

Aguilar-Miranda, E.D. *et al.* (2002) 'Characteristics of maize flour tortilla supplemented with ground *Tenebrio molitor* larvae', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(1), pp. 192–195. doi:10.1021/jf010691y.

Aila, N. *et al.* (2018) 'Usage of palm oil, palm kernel oil and their fractions as confectionery fats', *Journal of oil palm research*, 29(3), pp. 301–310. doi:10.21894/jopr.2017.2903.01.

Akiyama, D.M., Dominy, W.G. and Lawrence, A.L. (1992) 'Penaeid Shrimp Nutrition', in *Marine Shrimp Culture : Principles and Practices*. Third Edit. Elsevier B.V., pp. 535–568. doi:10.1016/b978-0-444-88606-4.50031-x.

Aquacop (1983) 'Production of feeds to support shrimp farming in Tahiti (French Polynesia)', in *1st International Biennal Conference on Warm Water Aquaculture - Crustacea 02/9-11/83 Brigham Young University. Hawai*, pp. 417–425.

Arabzadeh, G. *et al.* (2022) 'Diet Composition Influences Growth Performance, Bioconversion of Black Soldier Fly Larvae: Agronomic Value and In Vitro Biofungicidal Activity of Derived Frass', *Agronomy*, 12(8), p. 1765. doi:10.3390/agronomy12081765.

Arabzadeh, G. *et al.* (2023) 'Assessment of Antifungal/Anti-Oomycete Activity of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae to Control Plant Pathogens in Horticulture: Involvement of *Bacillus velezensis*', *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). doi:10.3390/su151410957.

Arrese, E.L. and Soulages, J.L. (2010) 'Insect Fat Body: Energy, Metabolism, and Regulation', *Annual Review of Entomology*, 55(1), pp. 207–225. doi:10.1146/annurev-ento-112408-085356.

Arriaga-Hernández, D. *et al.* (2021) 'Fish meal replacement by soybean products in aquaculture feeds for white snook, *Centropomus viridis*: Effect on growth, diet digestibility, and digestive capacity', *Aquaculture*, 530(August 2020), p. 735823. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.735823.

Arrouze, F. *et al.* (2017) 'Chitin and chitosan: Study of the possibilities of their production by

valorization of the waste of crustaceans and cephalopods rejected in Essaouira', *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(7), pp. 2251–2258.

Asche, F., Oglend, A. and Tveteras, S. (2013) 'Regime Shifts in the Fish Meal/Soybean Meal Price Ratio', *Journal of Agricultural Economics*, 64(1), pp. 97–111. doi:10.1111/j.1477-9552.2012.00357.x.

Attia, Y.A., Al-Harthi, M.A. and Abo El-Maaty, H.M. (2020) 'Calcium and Cholecalciferol Levels in Late-Phase Laying Hens: Effects on Productive Traits, Egg Quality, Blood Biochemistry, and Immune Responses', *Frontiers in Veterinary Science*, 7(July). doi:10.3389/fvets.2020.00389.

Auza, F.A. *et al.* (2020) 'Antibacterial activities of black soldier flies (*Hermetia illucens*. l) extract towards the growth of *Salmonella typhimurium*, E.coli and *Pseudomonas aeruginosa*', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 492(1). doi:10.1088/1755-1315/492/1/012024.

Ayadi, F.Y., Rosentrate, K.A. and Muthukumar, K. (2012) 'Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds', *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, 4(1), pp. 1–26. doi:10.3923/joafsnu.2012.1.26.

Ayelo, P.M. *et al.* (2017) 'Host species and vegetable fruit suitability and preference by the parasitoid wasp *Oncorhynchus mykiss*', *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 163(1), pp. 70–81. doi:10.1111/eea.12561.

Azzollini, D. *et al.* (2020) 'Mechanical and Enzyme Assisted Fractionation Process for a Sustainable Production of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Ingredients', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(June). doi:10.3389/fsufs.2020.00080.

Baci, G.M., Moise, A.R. and Dezmirean, D.S. (2021) 'Utilization of transgenic *Bombyx mori* for biomaterials production.', *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies*, 54(1), pp. 110–116. Available at: http://spasb.ro/index.php/spasb/article/view/2703.

Ballou, J.D. (1997) 'Genetic and demographic modeling for animal colony and population management', *ILAR Journal*, 38(2), pp. 69–75. doi:10.1093/ilar.38.2.69.

Banks, I.J., Gibson, W.T. and Cameron, M.M. (2014) 'Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation', *Tropical Medicine and International Health*, 19(1), pp. 14–22. doi:10.1111/TMI.12228.

Barragan-Fonseca, K.B. (2018) *Flies are what they eat Tailoring nutrition of black soldier fly for larval biomass production and fitness*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Barragan-Fonseca, K.B. *et al.* (2019) 'Effects of dietary protein and carbohydrate on life-history traits

and body protein and fat contents of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Physiological Entomology*, 44(2), pp. 148–159. doi:10.1111/phen.12285.

Barragan-Fonseca, K.B., Dicke, M. and van Loon, J.J.A. (2017) 'Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review', *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), pp. 105–120. doi:10.3920/JIFF2016.0055.

Barros, L.M. *et al.* (2019) 'Morphological description of the immature stages of *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Stratiomyidae)', *Microscopy Research and Technique*, 82(3), pp. 178–189. doi:10.1002/jemt.23127.

Barroso, F.G. *et al.* (2014) 'The potential of various insect species for use as food for fish', *Aquaculture*, 422–423, pp. 193–201. doi:10.1016/j.aquaculture.2013.12.024.

Barroso, F.G. *et al.* (2017) 'Insects as food: Enrichment of larvae of *Hermetia illucens* with omega 3 fatty acids by means of dietary modifications', *Journal of Food Composition and Analysis*, 62, pp. 8–13. doi:10.1016/j.jfca.2017.04.008.

Barroso, F.G. *et al.* (2019) 'Production of n-3-rich insects by bioaccumulation of fishery waste', *Journal of Food Composition and Analysis*, 82(November 2018), p. 103237. doi:10.1016/j.jfca.2019.103237.

Bartter, J. *et al.* (2018) 'Use of chicken eggshell to improve dietary calcium intake in rural sub-Saharan Africa', *Maternal and Child Nutrition*, 14(June), pp. 1–10. doi:10.1111/mcn.12649.

Belghit, I. *et al.* (2019) 'Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*)', *Aquaculture*, 503(December), pp. 609–619. doi:10.1016/j.aquaculture.2018.12.032.

Bell, J.G. and Sargent, J.R. (2003) 'Arachidonic acid in aquaculture feeds: Current status and future opportunities', *Aquaculture*, 218(1–4), pp. 491–499. doi:10.1016/S0044-8486(02)00370-8.

Bellini, R. *et al.* (2018) 'Exploring protandry and pupal size selection for *Aesdes albopictus* sex separation', *Parasites and Vectors*, 11(Suppl 2). doi:10.1186/s13071-018-3213-x.

Bertinetti, C., Samayoa, A.C. and Hwang, S.Y. (2019) 'Effects of feeding adults of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on longevity, oviposition, and egg hatchability: Insights into optimizing egg production', *Journal of Insect Science*, 19(1), pp. 1–7. doi:10.1093/jisesa/iez001.

Beynen, A. (2018) 'Insect-based petfood', *Creature companion*, (September), p. 7.

Bimbilé Somda, N.S. *et al.* (2019) 'Insects to feed insects - feeding *Aedes* mosquitoes with flies for

laboratory rearing', *Scientific Reports*, 9(1), pp. 1–13. doi:10.1038/s41598-019-47817-x.

Boissière, A. *et al.* (2012) 'Midgut microbiota of the malaria mosquito vector *Anopheles gambiae* and interactions with Plasmodium falciparum infection', *PLoS Pathogens*, 8(5), pp. 1–12. doi:10.1371/journal.ppat.1002742.

Bondari, K. and Sheppard, D.C. (1987) 'Soldier fly larvae as feed for channel catfish and blue tilapia', *Aquaculture and fisheries management*, (1981), pp. 209–220.

Booth, D.C. and Sheppard, C. (1984) 'Oviposition of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Eggs, Masses, Timing, and Site Characteristics', *Environmental Entomology*, 13(2), pp. 421–423. doi:10.1093/ee/13.2.421.

Borrelli, L. *et al.* (2017) 'Insect-based diet, a promising nutritional source, modulates gut microbiota composition and SCFAs production in laying hens', *Scientific Reports*, 7(1), pp. 1–11. doi:10.1038/s41598-017-16560-6.

Bortolini, S. *et al.* (2020) '*Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy', *Journal of Cleaner Production*, 262, p. 121289. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121289.

Bosch, G. and Swanson, K.S. (2021) 'Effect of using insects as feed on animals: pet dogs and cats', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), pp. 795–805. doi:10.3920/JIFF2020.0084.

Bossin, H. *et al.* (2016) 'Releases of Wolbachia mosquito males to sterilize and suppress a population of *Aedes polynesiensis* on Tetiaroa atoll, french polyneisa', in *International Congress for Tropical Medecine and Malaria*. Birbane, p. 1.

Ben Boulaïd, M. (2019) *Lutte biologique par l'utilisation de la coccinelle Coccinella algerica Kovar , 1977 , issues d'élevage dans les conditions contrôlées . Contribution à l'évaluation de son efficacité contre les pucerons de la culture des solanacées sous serre à Biskra*.

Bourtzis, K. and Vreysen, M.J.B. (2021) 'Sterile insect technique (Sit) and its applications', *Insects*, 12(7). doi:10.3390/insects12070638.

Bovera, F. *et al.* (2016) 'Use of *Tenebrio molitor* larvae meal as protein source in broiler diet: Effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits', *Journal of Animal Science*, 94(2), pp. 639–647. doi:10.2527/jas.2015-9201.

Brett C., R. (2006) 'Scarab beetles in human culture', *Coleopterists Society Monograph*, 5, pp. 85–101.

Brigham, C. (2017) 'Chitin and Chitosan: Sustainable, Medically Relevant Biomaterials', *International*

Journal of Biotechnology for Wellness Industries, 6(2), pp. 41–47. doi:10.6000/1927-3037.2017.06.02.1.

Bruni, L. *et al.* (2021) 'Is it possible to cut down fishmeal and soybean meal use in aquafeed limiting the negative effects on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet quality and consumer acceptance?', *Aquaculture*, 543(May), p. 736996. doi:10.1016/j.aquaculture.2021.736996.

Bruno, D. *et al.* (2020) 'An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Arthropod Structure and Development*, 58, p. 100969. doi:10.1016/j.asd.2020.100969.

Buckner, G.D. and Martin, J.H. (1920) 'Effect of Calcium on the Composition of the Eggs and Carcass of Laying Hens', *Journal of Biological Chemistry*, 41(2), pp. 195–203. doi:10.1016/s0021-9258(18)87217-9.

Bullock, N. *et al.* (2013) 'The black soldier fly How- to- guide', *BioSystems Design Blog*, p. 12. Available at: http://hdl.handle.net/2027/umn.31951000441419j.

Caligiani, A. *et al.* (2018) 'Influence of the killing method of the black soldier fly on its lipid composition', *Food Research International*, 116(July 2018), pp. 276–282. doi:10.1016/j.foodres.2018.08.033.

Cammack, J.A. and Tomberlin, J.K. (2017) 'The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae)', *Insects*, 8(2). doi:10.3390/insects8020056.

Cantero-Bahillo, E. *et al.* (2022) 'Supercritical-CO2 for defatting and production of bioactive extracts from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae', *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(12), pp. 1441–1453. doi:10.3920/JIFF2021.0210.

Caruso, D. *et al.* (2014) *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens, Stratiomyidae*. Available at: https://uved-formation-aquaculture.cirad.fr/content/download/4328/32130/version/3/file/BLACK+SOLDIER+Technical+Handbook.pdf.

Casillas-Vargas, G. *et al.* (2021) 'Antibacterial fatty acids: An update of possible mechanisms of action and implications in the development of the next-generation of antibacterial agents', *Progress in Lipid Research*, 82(January). doi:10.1016/j.plipres.2021.101093.

Chambers, G.M. and Klowden, M.J. (1990) 'Correlation of nutritional reserves with a critical weight

for pupation in larval *Aedes aegypti* mosquitoes.', *Journal of the American Mosquito Control Association*, 6(3), pp. 394–399.

Chandel, N.S. (2021) 'Amino acid metabolism', *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(4), pp. 1–18. doi:10.1101/CSHPERSPECT.A040584.

Chen, H.Y., Leu, Y.T. and Roelants, I. (1992) 'Quantification of arginine requirements of juvenile marine shrimp, *Penaeus monodon*, using microencapsulated arginine', *Marine Biology*, 114(2), pp. 229–233. doi:10.1007/BF00349523.

Chen, S. *et al.* (2020) 'Multiple Factors Determine the Structure of Bacterial Communities Associated With *Aesdes albopictus* Under Artificial Rearing Conditions', *Frontiers in Microbiology*, 11(April). doi:10.3389/fmicb.2020.00605.

Chia, Shaphan Y. *et al.* (2018) 'Effects of waste stream combinations from brewing industry on performance of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *PeerJ*, 2018(11), pp. 1–26. doi:10.7717/peerj.5885.

Chia, Shaphan Yong *et al.* (2018) 'Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens* : Implications for mass production', *PLoS ONE*, 9, pp. 1–26.

Chodová, D. and Tůmová, E. (2020) 'Insects in chicken nutrition. A review', *Agronomy Research*, 18(2), pp. 376–392. doi:10.15159/AR.20.003.

Choo, J. (2010) 'Potential ecological implications of human entomophagy by subsistence groups of the Neotropics', *Terrestrial Arthropod Reviews*, 1(1), pp. 81–93. doi:10.1163/187498308x345442.

Čičková, H. *et al.* (2015) 'The use of fly larvae for organic waste treatment', *Waste Management*, 35, pp. 68–80. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.026.

Clifford, C.W. and Woodring, J.P. (1990) 'Methods for rearing the house cricket, *Acheta domesticus* (L.), along with baseline values for feeding rates, growth rates, development times, and blood composition', *Journal of Applied Entomology*, 109(1–5), pp. 1–14. doi:10.1111/j.1439-0418.1990.tb00012.x.

Cochereau, P. (1974) 'Ébauche d'un inventaire faunistique de l'Ile Mangareva (Archipel des Gambier)', *Cah. Pac.*, 18(2)(18), pp. 479–532.

Cogollo-Herrera, K. *et al.* (2018) 'Techno-economic sensitivity analysis of large scale chitosan production process from shrimp shell wastes', *Chemical Engineering Transactions*, 70, pp. 2179–2184. doi:10.3303/CET1870364.

Contreras-Perera, Y. *et al.* (2023) 'Different larval diets for *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) under laboratory conditions: in preparation for a mass-rearing system', *Biologia*, 78(12), pp. 3387–3399. doi:10.1007/s11756-023-01469-5.

Coon, K.L. *et al.* (2014) 'Mosquitoes rely on their gut microbiota for development', *Molecular Ecology*, 23(11), pp. 2727–2739. doi:10.1111/mec.12771.

Coon, K.L., Brown, M.R. and Strand, M.R. (2016) 'Mosquitoes host communities of bacteria that are essential for development but vary greatly between local habitats', *Molecular Ecology*, 25(22), pp. 5806–5826. doi:10.1111/mec.13877.

Council, N.R. (2011) *Nutrient requirements of fish and shrimp*. Washington, DC: The national Academies Press, Washington, DC. doi:10.1007/s10499-011-9480-6.

Cummins, Vaun C *et al.* (2017) 'Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Aquaculture*, 473, pp. 337–344. doi:10.1016/j.aquaculture.2017.02.022.

Cutrignelli, M.I. *et al.* (2018) 'Evaluation of an insect meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute: Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens', *Research in Veterinary Science*, 117, pp. 209–215. doi:10.1016/j.rvsc.2017.12.020.

Cuzon, G. and Aquacop (1998) 'Nutritional Review of *Penaeus stylirostris*', *Reviews in fisheries science*, 6(1–2), pp. 129–141. doi:10.1080/10641269891314249.

Dabbou, S. *et al.* (2021) 'Modified black soldier fly larva fat in broiler diet: Effects on performance, carcass traits, blood parameters, histomorphological features and gut microbiota', *Animals*, 11(6). doi:10.3390/ani11061837.

Davis, D.A. and Gatlin, D.M. (1996) 'Reviews in Fisheries Sciences Dietary Mineral Requirements of Fish and Marine Crustaceans', *Reviews in Fisheries Science*, 4(1), pp. 75–99.

Dawood, M.A.O. *et al.* (2022) 'Fruit processing by-products in the aquafeed industry: A feasible strategy for aquaculture sustainability', *Reviews in Aquaculture*, 14(4), pp. 1945–1965. doi:10.1111/raq.12680.

Dayalan, D. (2019) *The Origin of Silk Production, Archaeological survey of India*. Available at: https://www.academia.edu/38239669/The_Origin_of_Silk_Production_pdf.

DeFoliart, G.R. (1989) 'The Human Use of Insects as Food and as Animal Feed', *Bulletin of the Entomological Society of America*, 35(1), pp. 22–36. doi:10.1093/besa/35.1.22.

Dicke, M. (2018) ‘Insects as feed and the Sustainable Development Goals’, *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(3), pp. 147–156. doi:10.3920/JIFF2018.0003.

Diclaro, J.W. and Kaufman, P.E. (2009) ‘Black soldier fly *Hermetia illucens* Linnaeus (Insecta : Diptera : Stratiomyidae)’, *IFAS Extension*, p. 5. Available at: http://sfyl.ifas.ufl.edu/about/.

Diener, S., Studt Solano, N.M., *et al.* (2011) ‘Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae’, *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), pp. 357–363. doi:10.1007/s12649-011-9079-1.

Diener, S., Zurbrugg, C., *et al.* (2011) ‘Black soldier fly larvae for organic waste treatment - prospects and constraints’, *WasteSafe 2011 2nd International Conference on Solid Waste Management in Developing Countries 1315 February 2011 Khulna Bangladesh* [Preprint], (June 2014).

Diener, S., Zurbrügg, C. and Tockner, K. (2009) ‘Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates’, *Waste Management and Research*, 27(6), pp. 603–610. doi:10.1177/0734242X09103838.

DIREN (2020) *Code de l’environnement de la polynesie française*. Available at: https://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/ELECTRONIC/111276/138584/F908441022/FRA-111276.pdf.

DIREN (2024) *Schéma territorial de prévention et de gestion des déchets de la Polynésie française Quelle stratégie de prévention et de gestion Consultation publique 2024 Sommaire*.

Donkpegan, A.S.L. *et al.* (2022) ‘Development of genomic resources in black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) via throughput DNA pool sequencing’, in *Proceedings of the 12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP)*, pp. 2524–2527. doi:10.3920/978-90-8686-940-4_610.

Dortmans, B. *et al.* (2017) *Black Soldier Fly Biowaste Processing*. doi:10.1117/12.464354.

Dortmans, B. *et al.* (2021) *Black Soldier Fly Biowaste Processing - 2nd Edition, Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO)*.

DRM (2024) *Les filières de l’aquaculture en Polynésie française*. Available at: http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB 2.pdf.

Dzepe, D. *et al.* (2021) ‘Feeding strategies for small-scale rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as organic waste recycler’, *SN Applied Sciences*, 3(2), pp. 1–13. doi:10.1007/s42452-020-04039-5.

Ebenezer, A.E. (2019) *Establishment of laboratory colony of black soldier fly, Hermetia illucens L. (DIPTERA : STRATIOMYIDAE)*.

Egonyu, J.P. *et al.* (2021) 'Global overview of locusts as food, feed and other uses', *Global Food Security*, 31(September), p. 100574. doi:10.1016/j.gfs.2021.100574.

El-Dakar, M.A., Ramzy, R.R. and Ji, H. (2021) 'Influence of substrate inclusion of quail manure on the growth performance, body composition, fatty acid and amino acid profiles of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)', *Science of the Total Environment*, 772, p. 145528. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145528.

Emerenciano, M.G.C. *et al.* (2022) 'Intensification of Penaeid Shrimp Culture: An Applied Review of Advances in Production Systems, Nutrition and Breeding', *Animals*, 12(3). doi:10.3390/ani12030236.

Erickson, M.C. *et al.* (2004) 'Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly', *Journal of Food Protection*, 67(4), pp. 685–690. doi:10.4315/0362-028X-67.4.685.

Ernawan, B. *et al.* (2023) 'Evaluation of black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) larvae flour as larval diet for dengue vector mosquito *Aedes aegypti* (Diptera : Culicidae)', *Agriculture and natural resources*, 57, pp. 877–884.

Erwin, T.L. (2004) *The Biodiversity Question. How Many Species of Terrestrial Arthropods Are There?* Second Edi, *Forest Canopies: Second Edition*. Second Edi. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-012457553-0/50019-8.

Ewald, N. *et al.* (2020) 'Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) – Possibilities and limitations for modification through diet', *Waste Management*, 102, pp. 40–47. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.014.

Ezlin, N. *et al.* (2022) 'Comparison of Black Soldier Fly Larvae (BSFL) Growth and Frass Production Fed with Fermented Food Waste, Coconut Dregs and Cow Manure', *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, 71(4), pp. 1201–1209. Available at: http://philstat.org.ph.

FAO/IAEA (2020) *Guidelines for Mass-rearing of Aedes Mosquitoes*.

FAO (2008) 'Forest insects as food : humans bite back', in *Asia-Pacific resources and their potential for development*, p. 241. doi:10.1016/S0009-9260(03)00123-5.

FAO (2009) *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*, *Le point sur l'élevage*. Rome, Italie. doi:10.2307/1530623.

FAO (2011) *Global Food losses and food waste: Extent, causes and prevention, Rome, Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions*. Rome, Italy. doi:10.4337/9781788975391.

FAO (2013a) *Edible insects. Future prospects for food and feed security, Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

FAO (2013b) *Food wastage footprint : impacts on natural resources : summary report, Fao*. Rome, Italy. Available at: www.fao.org/publications.

FAO (2014) *Insectes comestibles: Perspectives pour la sécurité alimentaire et l 'alimentation animale, Fao*. Available at: http://www.fao.org/3/a-i3253f.pdf.

FAO (2016) *The state of world fisheries and aquaculture, Contributing to food security and nutrition for all*. Rome.

Faruck, M.O., Yusof, F. and Chowdhury, S. (2016) 'An overview of antifungal peptides derived from insect', *Peptides*, 80(June), pp. 80–88. doi:10.1016/j.peptides.2015.06.001.

Feng, S. (2018) '*Tenebrio molitor* L., entomophagy and processing into ready to use therapeutic ingredients: a review', *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(3), pp. 280–285. doi:10.15406/jnhfe.2018.08.00283.

Fisher, H.J. *et al.* (2020) 'Black soldier fly larvae meal as a protein source in low fish meal diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)', *Aquaculture*, 521, p. 734978. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.734978.

Focks, D.A. (1980) 'An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae).', *Journal of medical entomology*, 17(6), pp. 567–568. doi:10.1093/jmedent/17.6.567.

Folch, J., Lees, M. and Sloane Stanley, G.H. (1957) 'A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues.', *The Journal of biological chemistry*, 226(1), pp. 497–509. doi:10.1016/s0021-9258(18)64849-5.

Fossum, O. *et al.* (2009) 'Causes of mortality in laying hens in different housing systems in 2001 to 2004', *Acta Veterinaria Scandinavica*, 51(1), pp. 1–9. doi:10.1186/1751-0147-51-3.

Fox, J.M. *et al.* (2006) 'Current status of amino acid requirement research with marine penaeid shrimp', *Avances en Nutrición Acuícola*, 8, pp. 182–196.

Fox, J.M., Lawrence, A.L. and Li-Chan, E. (1995) 'Dietary requirement for lysine by juvenile *Penaeus vannamei* using intact and free amino acid sources', *Aquaculture*, 131(3–4), pp. 279–290.

doi:10.1016/0044-8486(94)00348-R.

Furman, D.P., Young, R.D. and Catts, P.E. (1959) '*Hermetia illucens* (Linnaeus) as a Factor in the Natural Control of *Musca domestica* Linnaeus', *Journal of Economic Entomology*, 52(5), pp. 917–921. doi:10.1093/JEE/52.5.917.

Gabriel, D. and Tscharntke, T. (2007) 'Insect pollinated plants benefit from organic farming', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1–4), pp. 43–48. doi:10.1016/j.agee.2006.04.005.

Gao, Q. *et al.* (2017) 'Influences of chromium and cadmium on the development of black soldier fly larvae', *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), pp. 8637–8644. doi:10.1007/s11356-017-8550-3.

Gao, Z. *et al.* (2019) 'Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw', *Journal of Cleaner Production*, 230, pp. 974–980. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.074.

Gasco, L. *et al.* (2018) *Fishmeal Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-77941-6_1.

Gasco, L. *et al.* (2019) 'Animals fed insect-based diets: State-of-the-art on digestibility, performance and product quality', *Animals*, 9(4), pp. 1–32. doi:10.3390/ani9040170.

Ghaly, A.E. and Alkoaik, F.N. (2009) 'The yellow mealworm as a novel source of protein', *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 4(4), pp. 319–331. doi:10.3844/ajabssp.2009.319.331.

Giunti, G. *et al.* (2018) 'Male courtship behaviour and potential for female mate choice in the black soldier fly *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae)', *Entomologia Generalis*, 38(1), pp. 29–46. doi:10.1127/entomologia/2018/0657.

Gladun, V. V. (2019) 'The first record of *Hermetia illucens* (Diptera, stratiomyidae) from russia', *Nature Conservation Research*, 4(4), pp. 111–113. doi:10.24189/ncr.2019.063.

Glencross, B.D. *et al.* (2002) 'The effects of dietary lipid amount and fatty-acid composition on the digestibility of lipids by the prawn, *Penaeus monodon*', *Aquaculture*, 205(1–2), pp. 157–169. doi:10.1016/S0044-8486(01)00686-X.

Gobbi, P., Martínez-Sánchez, A. and Rojo, S. (2013) 'The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *European Journal of Entomology*, 110(3), pp. 461–468. doi:10.14411/eje.2013.061.

Gold, M. *et al.* (2020) 'Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates', *Waste Management*, 102, pp. 319–329. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.036.

Gollnow, F. *et al.* (2018) 'Property-level direct and indirect deforestation for soybean production in the Amazon region of Mato Grosso, Brazil', *Land Use Policy*, 78(July), pp. 377–385. doi:10.1016/j.landusepol.2018.07.010.

Gortari, M.C. and Hours, R.A. (2013) 'Biotechnological processes for chitin recovery out of crustacean waste: A mini-review', *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(3). doi:10.2225/vol16-issue3-fulltext-10.

Griffin, L. *et al.* (2023) 'Estimating mosquito abundance and population suppression in an incompatible insect technique study', *Journal of Applied Ecology*, 60(9), pp. 1803–1815. doi:10.1111/1365-2664.14465.

Hackewitz, V.L. (2018) *The house cricket Acheta domesticus, a potential source of protein for human consumption*, *Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences*. Available at: https://stud.epsilon.slu.se/13728/.

Hahn, T. *et al.* (2022) 'Purification of Chitin from Pupal Exuviae of the Black Soldier Fly', *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), pp. 1993–2008. doi:10.1007/s12649-021-01645-1.

Halloran, A. and Vantomme, P. (2013) 'La contribution des insectes à La sécurité alimentaire, aux moyens de subsistance et à l'environnement', *Fao* [Preprint]. Available at: http://www.fao.org/docrep/018/i3264f/i3264f00.pdf.

Harnden, L.M. and Tomberlin, J.K. (2016) 'Effects of temperature and diet on black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), development', *Forensic Science International*, 266, pp. 109–116. doi:10.1016/j.forsciint.2016.05.007.

Hasbenli, A. (2003) 'The first record of *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera , Stratiomyidae) from the Near East', *Studia dipterologica*, 10, pp. 181–185.

Hassan, A.O. *et al.* (2021) 'The Role of Common Housefly as a Mechanical Vector of Pathogenic Microorganisms', *AJOSR*, 3(1), pp. 261–269. Available at: www.achieversciencejournal.org.

Hem, S. and Fahmi, M.R. (2009) 'Production of live insect "mini-larvae" and use thereof for feeding aquarium fish, alevins of farm fish and pets'.

Henry, M. *et al.* (2015) 'Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future', *Animal*

Feed Science and Technology, 203(1), pp. 1–22. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001.

Hervo, F. (2023) *Optimisation de l'utilisation digestive de calcium et du phospore chez la poule pondeuse - Vers un nouveau système d'évaluation des besoins par une approche de modélisation*. Université Laval.

Heussler, C.D. *et al.* (2018) 'Influence of three artificial light sources on oviposition and half-life of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing', *PLoS ONE*, 13(5), pp. 40–45. doi:10.1371/journal.pone.0197896.

Hoc, B. *et al.* (2019) 'Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction', *PLoS ONE*, 14(4), pp. 1–13. doi:10.1371/journal.pone.0216160.

Hoc, B. *et al.* (2020) 'About lipid metabolism in *Hermetia illucens* (L. 1758): on the origin of fatty acids in prepupae', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–8. doi:10.1038/s41598-020-68784-8.

Hodar, A.R. *et al.* (2020) 'Fish meal and fish oil replacement for aqua feed formulation by using alternative sources: a review', *Journal of Experimental Zoology India*, 23(January), pp. 13–21. Available at: https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue9/PartI/10-8-322-305.pdf.

Hogsette, J.A. (1992) 'New diets for production of house flies and stable flies (Diptera: Muscidae) in the laboratory.', *Journal of economic entomology*, 85(6), pp. 2291–2294. doi:10.1093/jee/85.6.2291.

Holmes, L.A., Vanlaerhoven, S.L. and Tomberlin, J.K. (2012) ' Relative Humidity Effects on the Life History of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) ', *Environmental Entomology*, 41(4), pp. 971–978. doi:10.1603/en12054.

Van Huis, A. (2013) 'Potential of insects as food and feed in assuring food security', *Annual Review of Entomology*, 58, pp. 563–583. doi:10.1146/annurev-ento-120811-153704.

van Huis, A. and Oonincx, D.G.A.B. (2017) 'The environmental sustainability of insects as food and feed. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5). doi:10.1007/s13593-017-0452-8.

Van Huis, A. and Tomberlin, J.K. (2017) *Insects as food and feed: from production to consumption*, *Insects as food and feed: from production to consumption*. Wageningen Academic Publishers. doi:10.3920/978-90-8686-849-0.

Hurtado-Ribeira, R. *et al.* (2023) 'The Interaction of Slaughtering, Drying, and Defatting Methods Differently Affects Oxidative Quality of the Fat from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae', *Insects*, 14(4), p. 17. doi:10.3390/insects14040368.

Hussein, M. *et al.* (2017) 'Sustainable production of housefly (*Musca domestica*) larvae as a protein-rich feed ingredient by utilizing cattle manure', *PLoS ONE*, 12(2), pp. 1–19. doi:10.1371/journal.pone.0171708.

Ibadurrohman, K. *et al.* (2020) 'The potential analysis of food waste management using bioconversion of the organic waste by the black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in the cafeteria of the faculty of engineering, universitas Indonesia', *Evergreen*, 7(1), pp. 61–66. doi:10.5109/2740946.

IEOM (2022) *RAPPORT ANNUEL ÉCONOMIQUE 2022 Polynésie française*.

IPIFF (2020) 'The insect sector milestones towards sustainable food supply chains', *The International Platform of Insects for Food and Feed*, (May), pp. 1–24.

IPIFF (2024) *Guide on good hygiene practices*.

IRAM/CANC/PTPU/CIRAD (2021) *Schéma directeur « Agriculture » en Polynésie française 2021 – 2030*.

Isibika, A. *et al.* (2023) 'Food industry waste - An opportunity for black soldier fly larvae protein production in Tanzania', *Science of the Total Environment*, 858(August 2022), p. 159985. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159985.

Janssen, R.H. *et al.* (2017) 'Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Three Edible Insects : *Tenebrio molitor, Alphitobius diaperinus* and *Hermetia illucens*', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(11), pp. 2275–2278. doi:10.1021/acs.jafc.7b00471.

Jones, B.M., Tomberlin, J.K. and Stull, V. (2019) 'Impact of Larval Competition on Life-History Traits of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Annals of the Entomological Society of America*, 112(6), pp. 505–510. doi:10.1093/aesa/saz014.

Joyner, C., Mills, M.K. and Nayduch, D. (2013) '*Pseudomonas aeruginosa* in *Musca domestica* L.: Temporospatial examination of bacteria population dynamics and house fly antimicrobial responses', *PLoS ONE*, 8(11). doi:10.1371/journal.pone.0079224.

Józefiak, A. *et al.* (2018) 'Full-fat insect meals as feed additive – the effect on broiler chicken growth performance and gastrointestinal tract microbiota', *Journal of Animal and Feed Sciences*, 27(2), pp. 131–139. doi:10.22358/jafs/91967/2018.

Julita, U., Fatimah, S., *et al.* (2020) 'Bioconversion of Food Waste by Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* larvae (Diptera: Stratiomyidae L.) for Alternative Animal Feed Stock', in. doi:10.4108/eai.11-7-2019.2297613.

Julita, U., Lusianti F, L., *et al.* (2020) 'Mating Success and Reproductive Behavior of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) in Tropics', *Journal of Entomology*, 17(3), pp. 117–127. doi:10.3923/je.2020.117.127.

Kaku, H. *et al.* (2006) 'Plant cells recognize chitin fragments for defense signaling through a plasma membrane receptor', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(29), pp. 11086–11091. doi:10.1073/pnas.0508882103.

Kappally, S., Shirwaikar, Arun and Shirwaikar, Annie (2015) 'Coconut oil - A review of potential applications', *Hygeia - Journal for drugs and mecicines*, (November), pp. 34–41. doi:10.15254/H.J.D.Med.7.2015.149.

Karthikeyani, T. *et al.* (2024) 'The Efficiency of Black Soldier Fly Larvae with Vegetable, Fruit and Food Waste as Biological Tool for Sustainable Management of Organic Waste', *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), pp. 441–448. doi:10.9734/ijecc/2024/v14i23959.

Kawasaki, K. *et al.* (2019) 'Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and pre-pupae raised on household organic waste, as potential ingredients for poultry feed', *Animals*, 9(3). doi:10.3390/ani9030098.

Kawasaki, K. *et al.* (2020) 'Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)', *Sustainability (Switzerland)*, 12, p. 14. doi:10.3390/SU12124920.

Kaya, C. *et al.* (2021) 'Global population genetic structure and demographic trajectories of the black soldier fly, *Hermetia illucens*', *BMC Biology*, 19(1), pp. 1–22. doi:10.1186/s12915-021-01029-w.

Kevan, P.G., Clark, E.A. and Thomas, V.G. (1990) 'Insect pollinators and sustainable agriculture', *American Journal of Alternative Agriculture*, 5(1), pp. 13–22. doi:10.1017/S0889189300003179.

Khosropanah, M.H. *et al.* (2022) 'Biomedical applications of silkworm (*Bombyx mori*) proteins in regenerative medicine (a narrative review)', *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 16(2), pp. 91–109. doi:10.1002/term.3267.

Kim, B. *et al.* (2020) 'Evaluation of black soldier fly larvae oil as a dietary fat source in broiler chicken diets', *Journal of Animal Science and Technology*, 62(2), pp. 187–197. doi:10.5187/jast.2020.62.2.187.

Kim, J.-G. *et al.* (2008) 'Ecology of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratmyidae) in Korea', *Korean journal of applied entomology*, 47(4), pp. 337–343. doi:10.5656/ksae.2008.47.4.337.

Kim, S.K., Weaver, C.M. and Choi, M.K. (2016) 'Proximate composition and mineral content of five

edible insects consumed in Korea', *CYTA - Journal of Food*, 15(1), pp. 143–146. doi:10.1080/19476337.2016.1223172.

Kim, S.W. *et al.* (2019) 'Removal of fat from crushed black soldier fly larvae by carbon dioxide supercritical extraction', *Journal of Animal and Feed Sciences*, 28(1), pp. 83–88. doi:10.22358/jafs/105132/2019.

Kim, W. *et al.* (2011) 'Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), pp. 11–14. doi:10.1016/j.aspen.2010.11.003.

Kothri, M. *et al.* (2020) 'Microbial sources of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) and the prospect of organic residues and wastes as growth media for PUFA-producing microorganisms', *FEMS Microbiology Letters*, 367(5), pp. 1–11. doi:10.1093/femsle/fnaa028.

Kozanayi, W. and Frost, P. (2002) 'Marketing of Mopane Worm in Southern Zimbabwe', *Processing*, (January), pp. 1–31.

Kumar, K. *et al.* (2017) 'Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds', *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1). doi:10.1186/s40643-017-0148-6.

Lacey Rachael (2016) *Crickets as food : The perceptions of and barriers to entomophagy and the potential for widespread incorporation of cricket flour in American diets*.

Lalander, C. *et al.* (2013) 'Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) - From a hygiene aspect', *Science of the Total Environment*, 458–460(May), pp. 312–318. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.033.

Lalander, C. *et al.* (2019) 'Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*)', *Journal of Cleaner Production*, 208, pp. 211–219. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.017.

Larouche, J. *et al.* (2019) 'Effects of killing methods on lipid oxidation, colour and microbial load of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae', *Animals*, 9(4), pp. 1–19. doi:10.3390/ani9040182.

Lees, R.S. *et al.* (2015) 'Back to the future: the sterile insect technique against mosquito disease vectors', *Current Opinion in Insect Science*, 10, pp. 156–162. doi:10.1016/j.cois.2015.05.011.

Leni, G., Caligiani, A. and Sforza, S. (2019) 'Killing method affects the browning and the quality of the protein fraction of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) prepupae: a metabolomics and proteomic insight', *Food Research International*, 115(May 2018), pp. 116–125.

doi:10.1016/j.foodres.2018.08.021.

Li, L., Wang, Y. and Wang, J. (2016) ‘Intra-puparial development and age estimation of forensically important *Hermetia illucens* (L.)’, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(1), pp. 233–237. doi:10.1016/j.aspen.2016.01.006.

Li, Q. *et al.* (2011) ‘From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible’, *Fuel*, 90(4), pp. 1545–1548. doi:10.1016/j.fuel.2010.11.016.

Liland, N.S. *et al.* (2017) ‘Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media’, *PLoS ONE*, 12(8), p. 23. doi:10.1371/journal.pone.0183188.

Lindh, J.M., Borg-Karlson, A.K. and Faye, I. (2008) ‘Transstadial and horizontal transfer of bacteria within a colony of *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae) and oviposition response to bacteria-containing water’, *Acta Tropica*, 107(3), pp. 242–250. doi:10.1016/j.actatropica.2008.06.008.

Liu, Q. *et al.* (2008) ‘Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae Reduce *Escherichia coli* in Dairy Manure’, *Environmental Entomology*, 37(6), pp. 1525–1530. doi:10.1603/0046-225x-37.6.1525.

Liu, T. *et al.* (2020) ‘Effects of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) on food waste and sewage sludge composting’, *Journal of Environmental Management*, 256(December 2019), p. 109967. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109967.

Liu, T. *et al.* (2021) ‘Effects of replacing fish meal with soybean meal on growth performance, feed utilization and physiological status of juvenile redlip mullet Liza haematocheila’, *Aquaculture Reports*, 20, p. 100756. doi:10.1016/j.aqrep.2021.100756.

Liu, X. *et al.* (2017) ‘Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly’, *PLoS ONE*, 12(8), pp. 1–21. doi:10.1371/journal.pone.0182601.

Liu, Z. *et al.* (2021) ‘Reproduction of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Under Different Adult Densities and Light Regimes’, *Journal of Economic Entomology*, 115(1), pp. 37–45. doi:10.1093/jee/toab225.

Louzada, J.N.C. and Nichols, E.S. (2012) ‘Detritivorous Insects’, in *Insect Bioecology and Nutrition for Integrated Pest Management*, pp. 397–416. doi:10.1201/b11713-24.

Lucas, P.-D. (2012) ‘Les coccinelles de la Martinique : une ressource biologique méconnue pour la protection durable des cultures’, in *ACOREP-France : Coléoptères des Petites Antilles. Tome 1*, pp. 86–94.

Lupi, D. *et al.* (2019) 'Feeding in the adult of *Hermetia illucens* (Diptera Stratiomyidae): Reality or fiction?', *Journal of Entomological and Acarological Research*, 51(1). doi:10.4081/jear.2019.8046.

Macavei, L.I. *et al.* (2020) 'Optimization of *Hermetia illucens* (L.) egg laying under different nutrition and light conditions', *PLoS ONE*, 15(4), pp. 1–18. doi:10.1371/journal.pone.0232144.

Magalhães, R. *et al.* (2017) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*)', *Aquaculture*, 476, pp. 79–85. doi:10.1016/j.aquaculture.2017.04.021.

Makkar, H.P.S. *et al.* (2014) 'State-of-the-art on use of insects as animal feed', *Animal Feed Science and Technology*, 197, pp. 1–33. doi:10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008.

Makri, A. *et al.* (2011) 'Lipid synthesized by micro-algae grown in laboratory- and industrial-scale bioreactors', *Engineering in Life Sciences*, 11(1), pp. 52–58. doi:10.1002/elsc.201000086.

Malawey, A.S. *et al.* (2019) 'Adult Reproductive Tract Morphology and Spermatogenesis in the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Annals of the Entomological Society of America*, 112(6), pp. 576–586. doi:10.1093/aesa/saz045.

Malawey, A.S. *et al.* (2021) 'Interaction of Age and Temperature on Heat Shock Protein Expression, Sperm Count, and Sperm Viability of the Adult Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(1), pp. 21–33. doi:10.3920/JIFF2020.0017.

Mamai, W. *et al.* (2019) 'Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae powder as a larval diet ingredient for mass-rearing Aedes mosquitoes', *Parasite*, 26. doi:10.1051/parasite/2019059.

Mannucci, A. *et al.* (2024) 'From Food Waste to Functional Biopolymers : Characterization of Chitin and Chitosan Produced from Prepupae of Black Soldier Fly Reared with Different Food Waste-Based Diets', *Foods*, 13(278), p. 14.

Maquart, P.-O., Richard, D. and Willems, J. (2020) 'First record of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, in the Western regions of France (Vendée, Loire-Atlantique, Ille-et-Vilaine) with notes on its worldwide repartition (Diptera, Stratiomyidae)', *Bulletin de la Société entomologique de France*, 125(1), pp. 13–18. doi:10.32475/bsef_2104.

De Marco, M. *et al.* (2015) 'Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy', *Animal Feed Science and Technology*, 209(January 2016), pp. 211–218. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.08.006.

Martin, G.P. (1995) ‘Applications and Environmental Aspects of Chitin and Chitosan’, *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 32(4), pp. 629–640.

Masson, M. (Chambre d’agriculture du P. (2018) *Les auxiliaires des cultures. Les connaitre et les favoriser*. doi:10.3726/978-3-0352-6383-1/25.

Masuda, T. and Goldsmith, P.D. (2009) ‘World soybean production: Area harvested, yield, and long-term projections’, *International Food and Agribusiness Management Review*, 12(4), pp. 143–162. doi:10.22004/ag.econ.92573.

Matthäus, B. *et al.* (2019) ‘Renewable Resources from Insects: Exploitation, Properties, and Refining of Fat Obtained by Cold-Pressing from *Hermetia illucens* (Black Soldier Fly) Larvae’, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121(7), pp. 1–11. doi:10.1002/ejlt.201800376.

Mazza, L. *et al.* (2020) ‘Management of chicken manure using black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae assisted by companion bacteria’, *Waste Management*, 102, pp. 312–318. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.055.

Mehring, A.L. and Titus, H.W. (1964) ‘The Effects of Low Levels of Calcium in the Diet of Laying Chickens’, *Poultry Science*, 43(6), pp. 1405–1414. doi:10.3382/ps.0431405.

Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A.J. and Salinas-Castro, A. (2019) ‘Edible Insects Processing: Traditional and Innovative Technologies’, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 00, pp. 1–26. doi:10.1111/1541-4337.12463.

Meneguz, M. *et al.* (2018) ‘Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae’, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), pp. 5776–5784. doi:10.1002/jsfa.9127.

Mercer, D.R., Schoergendorfer, A. and Vandyke, R. (2008) ‘Sexual differences in larval molting rates in a protandrous mosquito (Diptera: Culicidae) species, *Aedes sierrensis*’, *Journal of Medical Entomology*, 45(5), pp. 861–866. doi:10.1603/0022-2585(2008)45[861:SDILMR]2.0.CO;2.

Millamena, O.M. *et al.* (1998) ‘Requirements of juvenile marine shrimp, *Penaeus monodon* (Fabricius) for lysine and arginine’, *Aquaculture*, 164(1–4), pp. 95–104. doi:10.1016/S0044-8486(98)00179-3.

Millamena, O.M. *et al.* (1999) ‘Quantitative dietary requirements of postlarval tiger shrimp, *Penaeus monodon*, for histidine, isoleucine, leucine, phenylalanine and tryptophan’, *Aquaculture*, 179(1–4), pp. 169–179. doi:10.1016/S0044-8486(99)00160-X.

Miller, B.F., Teotia, J.S. and Thatcher, T.O. (1974) ‘Digestion of poultry manure by *Musca domestica*’,

British Poultry Science, 15(2), pp. 231–234. doi:10.1080/00071667408416100.

Mirabella, N., Castellani, V. and Sala, S. (2014) 'Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review', *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 28–41. doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.051.

Miranda, C.D., Cammack, J.A. and Tomberlin, K. (2019) 'Life-History Traits of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera : Stratiomyidae), Reared on Three Manure Types', *Animals*, 9, p. 281.

Mirwandhono, E., Nasution, M.I.A. and Yunilas, Y. (2022) 'Extraction of chitin and chitosan black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupa phase on characterization and yield Extraction of chitin and chitosan black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupa phase on characterization and yield', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1114(1), p. 012019. doi:10.1088/1755-1315/1114/1/012019.

Mohd-Noor, S.N. *et al.* (2017) 'Optimization of self-fermented period of waste coconut endosperm destined to feed black soldier fly larvae in enhancing the lipid and protein yields', *Renewable Energy*, 111, pp. 646–654. doi:10.1016/j.renene.2017.04.067.

Mohd Yusoff, N.A., Hai, C.T. and Komilus, C.F. (2022) 'Proximate Composition of Larvae, Prepupae and Adult in Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*)', *Journal Of Agrobiotechnology*, 13(1S), pp. 109–117. doi:10.37231/jab.2022.13.1s.320.

Moretta, A. *et al.* (2020) 'A bioinformatic study of antimicrobial peptides identified in the Black Soldier Fly (BSF) *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–14. doi:10.1038/s41598-020-74017-9.

Motte, C. *et al.* (2019) 'Replacing fish meal with defatted insect meal (Yellow mealworm *Tenebrio molitor*) improves the growth and immunity of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Animals*, 9(5). doi:10.3390/ani9050258.

Moula, N. *et al.* (2018) 'Effects of dietary black soldier fly larvae on performance of broilers mediated or not through changes in microbiota', *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(1), pp. 31–42. doi:10.3920/JIFF2017.0011.

Mourtzinis, S. *et al.* (2018) 'Characterizing soybean meal value variation across the united states: A swine case study', *Agronomy Journal*, 110(6), pp. 2343–2349. doi:10.2134/agronj2017.11.0624.

Mukherjee, S. and Mukherjee, A. (2022) 'Small-scale breeding and harvesting of house cricket *Acheta domesticus*', *Acta Entomology and Zoology*, 3(2), pp. 112–115.

doi:10.33545/27080013.2022.v3.i2b.82.

Munsch-Masset, P. *et al.* (2023) 'The reproductive tract of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) is highly differentiated and suggests adaptations to sexual selection', *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 171(11), pp. 857–866. doi:10.1111/eea.13358.

Mutafela, R.N. (2015) *High Value Organic Waste Treatment via Black Soldier Fly Bioconversion : Onsite Pilot Study*.

Mwaniki, Z. *et al.* (2020) 'Complete replacement of soybean meal with defatted black soldier fly larvae meal in Shaver White hens feeding program (28–43 wks of age): impact on egg production, egg quality, organ weight, and apparent retention of components', *Poultry Science*, 99(2), pp. 959–965. doi:10.1016/j.psj.2019.10.032.

Nakamura, S. *et al.* (2016) 'Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing', *Applied Entomology and Zoology*, 51(1), pp. 161–166. doi:10.1007/s13355-015-0376-1.

Nesara, K.M. and Anand, P.P. (2018) 'Nutritional requirement of fresh water prawn and shrimps: A review', *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(4), pp. 1526–1532.

Newton, G.L. *et al.* (2004) 'The Black Soldier Fly *Hermetia illucens* as a manure management/ resource recovery tool', pp. 0–5.

Newton, L., Sheppard, C., *et al.* (2005) 'Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure', *Journal Korean Entomology and Applied Science*, 36(12), p. 17.

Newton, L., Craig, S., *et al.* (2005) 'Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure', *Journal Korean Entomology and Applied Science*, 36(12), p. 17 pp.

Ng, W.K. (2001) 'Potential of mealworm (Tenebrio molifor) as an alternative protein source in practical diets for African catfish, *Clarias gariepinus*', *Aquaculture Research*, 32(SUPPL. 1), pp. 273–280. doi:10.1046/j.1355-557x.2001.00024.x.

Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K. and Vanlaerhoven, S. (2013) 'Influence of Resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) Larval Development', *Journal of Medical Entomology*, 50(4), pp. 898–906. doi:10.1603/me12260.

Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K. and Vanlaerhoven, S. (2015) 'Ability of Black Soldier Fly (Diptera:

Stratiomyidae) Larvae to Recycle Food Waste', *Environmental Entomology*, 44(2), pp. 406–410. doi:10.1093/ee/nvv002.

Nogales-Mérida, S. *et al.* (2018) 'Insect meals in fish nutrition', *Reviews in Aquaculture*, 11(4), pp. 1080–1103. doi:10.1111/raq.12281.

Nordquist, R.E. *et al.* (2011) 'Laying hens selected for low mortality: Behaviour in tests of fearfulness, anxiety and cognition', *Applied Animal Behaviour Science*, 131(3–4), pp. 110–122. doi:10.1016/j.applanim.2011.02.008.

Novriadi, R. *et al.* (2024) 'Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as an Alternative to Marine Ingredients Elicits Superior Growth Performance and Resistance to Vibrio harveyi Infection for Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)', *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(1). doi:10.4194/TRJFAS24343.

Nowak, V. *et al.* (2016) 'Review of food composition data for edible insects', *Food Chemistry*, 193, pp. 39–46. doi:10.1016/j.foodchem.2014.10.114.

Nunes, A.J.P. *et al.* (2014) 'Practical supplementation of shrimp and fish feeds with crystalline amino acids', *Aquaculture*, 431, pp. 20–27. doi:10.1016/j.aquaculture.2014.04.003.

Nyakeri, E.M. *et al.* (2017) 'An open system for farming black soldier fly larvae as a source of proteins for smallscale poultry and fish production', *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(1), pp. 51–56. doi:10.3920/JIFF2016.0030.

Nyakeri, E.M. *et al.* (2019) 'An optimal feeding strategy for black soldier fly larvae biomass production and faecal sludge reduction', *Journal of Insects as Food and Feed*, 5(3), pp. 201–213. doi:10.3920/JIFF2018.0017.

Nyffeler, M. and Benz, G. (1987) 'Spiders in natural pest control : A review', *Journal of Applied Entomology*, 103, pp. 321–339.

Ogawa, T. *et al.* (2020) 'Bioconversion From Docosahexaenoic Acid to Eicosapentaenoic Acid in the Marine Bacterium *Shewanella livingstonensis* Ac10', *Frontiers in Microbiology*, 11(May), pp. 1–12. doi:10.3389/fmicb.2020.01104.

Ogunji, J.O. *et al.* (2006) 'Housefly maggot meal (magmeal): an emerging substitute of fishmeal in Tilapia diets', *Conference on International Agricultural Research for Development*, (1981), p. 7.

Oliveira, F. *et al.* (2015) 'Assessment of Diptera : Stratiomyidae , genus *Hermetia illucens* (L ., 1758) using electron microscopy', *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(5), pp. 147–152.

Oliver, L. *et al.* (2020) 'Producing omega-3 polyunsaturated fatty acids: A review of sustainable sources and future trends for the EPA and DHA market', *Resources*, 9(12), pp. 1–15. doi:10.3390/resources9120148.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2010) 'An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption', *PLoS ONE*, 5(12), pp. 1–7. doi:10.1371/journal.pone.0014445.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2016) 'Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black soldier fly (*Hermetia illucens*) informing the design of LED-based illumination to enhance indoor reproduction', *Journal of Insect Physiology*, 95, pp. 133–139. doi:10.1016/j.jinsphys.2016.10.006.

Oonincx, D.G.A.B. *et al.* (2020) 'Dietary enrichment of edible insects with omega 3 fatty acids', *Insect Science*, 27(3), pp. 500–509. doi:10.1111/1744-7917.12669.

Oonincx, D.G.A.B. and de Boer, I.J.M. (2012) 'Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment', *PLoS ONE*, 7(12), pp. 1–5. doi:10.1371/journal.pone.0051145.

Opare, L.O. *et al.* (2023) 'High larval densities and high temperatures lead to a stronger immune response in the black soldier fly', *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(9), pp. 1177–1186. doi:10.3920/JIFF2022.0109.

Pal, P. and Roy, S. (2014) 'Edible Insects: Future of Human Food - A Review', *International Letters of Natural Sciences*, 26, pp. 1–11. doi:10.56431/p-kt2z1i.

Pamintuan, K.R.S., Agustin, H.A.T. and Deocareza, E.D. (2020) 'Growth and Nutritional Performance of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Reared in Fermented Rice Straw and Duck Manure', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1), p. 8. doi:10.1088/1755-1315/505/1/012030.

Park, K.-H. *et al.* (2010) 'Seasonal Pupation, Adult Emergence and Mating of Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) in Artificial Rearing System', *International Journal of Industrial Entomology*, 21(2), pp. 189–191.

Park, K. *et al.* (2016) 'Effect of adult population density on egg production in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Industrial Entomology*, 33, pp. 92–95. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Pastor, B. *et al.* (2015) 'Conversion of organic wastes into fly larval biomass: Bottlenecks and

challenges', *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(3), pp. 179–193. doi:10.3920/JIFF2014.0024.

Patterson, P.H. *et al.* (2021) 'The impact of dietary Black Soldier Fly larvae oil and meal on laying hen performance and egg quality', *Poultry Science*, 100(8), p. 101272. doi:10.1016/j.psj.2021.101272.

Paul, A. *et al.* (2016) 'Grasshoppers as a food source ? A review', *Biotechology, Agronomy, Society and Environnement*, 20(1), p. 16.

Penido, W.D. *et al.* (2023) 'Potential use of the Black Soldier Fly (BSF) in Poultry Production', in *A LOOK AT DEVELOPMENT*. doi:10.56238/alookdevelopv1-194.

Philibert, T., Lee, B.H. and Fabien, N. (2017) 'Current Status and New Perspectives on Chitin and Chitosan as Functional Biopolymers', *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181(4), pp. 1314–1337. doi:10.1007/s12010-016-2286-2.

Philippe, F.X. *et al.* (2020) 'Comparison of egg production, quality and composition in three production systems for laying hens', *Livestock Science*, 232(December 2019), p. 103917. doi:10.1016/j.livsci.2020.103917.

Piedad-Pascual, F. (1989) 'Mineral requirements of Penaeids', in *Actes de colloques Ifremer, Tahiti, French Polynesia, 20 Feb - 4 Mar 1989, n°9, chap. 30*, pp. 309–218.

Pope, M. *et al.* (2023) 'Quantifying the value of soybean meal in poultry and swine diets', *Journal of Applied Poultry Research*, 32(2), p. 100337. doi:10.1016/j.japr.2023.100337.

Porter, S.D. *et al.* (2016) 'A half-century of production-phase greenhouse gas emissions from food loss & waste in the global food supply chain', *Science of the Total Environment*, 571, pp. 721–729. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.041.

Poulet, S. and Lazard, J. (2022) 'Encyclopédie : Question sur … La pêche minotière', (Académie d'Agriculture de France), pp. 1–4.

Premalatha, M. *et al.* (2011) 'Energy-efficient food production to reduce global warming and ecodegradation: The use of edible insects', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), pp. 4357–4360. doi:10.1016/j.rser.2011.07.115.

Putra, R.E. *et al.* (2021) 'Omega-3 Content Of Black Soldier Fly Prepupa (*Hermetia illucens*) Fed With Marine Fish Offal And Tofu Dreg', *Biotropia*, 28(1), pp. 64–73. doi:10.11598/btb.2021.28.1.1082.

van Raamsdonk, L.W.D., van der Fels-Klerx, H.J. and de Jong, J. (2017) 'New feed ingredients: the insect opportunity', *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure*

and Risk Assessment, 34(8), pp. 1384–1397. doi:10.1080/19440049.2017.1306883.

Rageau, J. (1956) 'Les Arthropodes Parasites De L' Homme Et Des Animaux Domestiques Dans Les Territoire Francais Du Pacifique'.

Rahmi, F.A., Yamin, M. and Sasaerila, Y. (2020) 'Effect of Different Organic Wastes on the Growth of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae', 8(Iccesi 2019), pp. 113–116. doi:10.2991/absr.k.200513.019.

Raimondi, S. *et al.* (2020) 'Effect of Rearing Temperature on Growth and Microbiota Composition of *Hermetia illucens*', *Microorganisms*, 8(6), p. 902. doi:10.3390/microorganisms8060902.

Rakos-elorduy, J. and Pino, J.K. (1990) 'Variation de la valeur nutritivede *Tenebrio molitor* L. élevé sur differents substrats', in *International working conference on stored-product protection*, pp. 201–210.

Ramos-Bueno, R.P. *et al.* (2016) 'Fatty acid profiles and cholesterol content of seven insect species assessed by several extraction systems', *European Food Research and Technology*, 242(9), pp. 1471–1477. doi:10.1007/s00217-016-2647-7.

Ramos-Elorduy, J. *et al.* (2002) 'Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens.', *Journal of economic entomology*, 95(1), pp. 214–220. doi:10.1603/0022-0493-95.1.214.

Ramos-Elorduy, J., Pino Moreno, J.M. and Martínez Camacho, V.H. (2009) 'Edible aquatic Coleoptera of the world with an emphasis on Mexico', *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 5(11), p. 13. doi:10.1186/1746-4269-5-11.

Raubenheimer, D. and Rothman, J.M. (2013) 'Nutritional ecology of entomophagy in humans and other primates', *Annual Review of Entomology*, 58, pp. 141–160. doi:10.1146/annurev-ento-120710-100713.

Rawski, M. *et al.* (2021) 'Black soldier fly full-fat larvae meal is more profitable than fish meal and fish oil in siberian sturgeon farming: The effects on aquaculture sustainability, economy and fish GIT development', *Animals*, 11(3), pp. 1–14. doi:10.3390/ani11030604.

Rehman, K. ur *et al.* (2017) 'Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.)', *Journal of Cleaner Production*, 154, pp. 366–373. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.019.

Renna, M. *et al.* (2017) 'Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets', *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), pp. 1–13. doi:10.1186/s40104-017-0191-3.

Ribeiro, N., Costa, R. and Ameixa, O.M.C.C. (2022) 'The Influence of Non-Optimal Rearing Conditions and Substrates on the Performance of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*)', *Insects*, 13(7). doi:10.3390/insects13070639.

Richard, L. *et al.* (2010) 'Maintenance and growth requirements for nitrogen, lysine and methionine and their utilisation efficiencies in juvenile black tiger shrimp, *Penaeus monodon*, using a factorial approach', *British Journal of Nutrition*, 103(7), pp. 984–995. doi:10.1017/S0007114509992844.

Rodrigues, D.P. *et al.* (2022) 'Improving the Lipid Profile of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae for Marine Aquafeeds: Current State of Knowledge', *Sustainability*, 14(11), p. 6472. doi:10.3390/su14116472.

Rumpold, B.A. and Schlüter, O.K. (2013a) 'Nutritional composition and safety aspects of edible insects', *Molecular Nutrition and Food Research*, 57(5), pp. 802–823. doi:10.1002/mnfr.201200735.

Rumpold, B.A. and Schlüter, O.K. (2013b) 'Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production', *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, pp. 1–11. doi:10.1016/j.ifset.2012.11.005.

Rushikesh Jadhav, C. *et al.* (2020) 'Soldier Fly/Larvae: A Weapon for Solid Waste Management and Alternative Feed for Poultry and Aquatic Industries International Journal of Life science and Pharma Research Black Soldier Fly/Larvae: A Weapon for Solid Waste Management and Alternative Feed fo', *Int. J. Life Sci. Pharma Res*, 10(5), pp. 113–120. doi:10.22376/ijpbs/lpr.2020.10.5.L113-120.

Saadoun, H.J. *et al.* (2020) 'Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, Stratiomyidae) reared on by-products from different food chains', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(9), pp. 3648–3657. doi:10.1002/jsfa.10397.

Sachs, J.D. (2009) 'Rethinking macroeconomics', *Capitalism and Society*, 4(3), pp. 14–16. doi:10.2202/1932-0213.1065.

Sales, K. *et al.* (2018) 'Experimental heatwaves compromise sperm function and cause transgenerational damage in a model insect', *Nature Communications*, 9(1), pp. 1–11. doi:10.1038/s41467-018-07273-z.

Samayoa, A.C. and Hwang, S.Y. (2018) 'Degradation capacity and diapause effects on oviposition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Economic Entomology*, 111(4), pp. 1682–1690. doi:10.1093/jee/toy078.

Sánchez-Muros, M.J., Barroso, F.G. and Manzano-Agugliaro, F. (2014) 'Insect meal as renewable source of food for animal feeding: A review', *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 16–27.

doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.068.

Schiavone, A., De Marco, M., *et al.* (2017) 'Nutritional value of a partially defatted and a highly defatted black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) meal for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility', *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), pp. 1–9. doi:10.1186/s40104-017-0181-5.

Schiavone, A., Cullere, M., *et al.* (2017) 'Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: Effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality', *Italian Journal of Animal Science*, 16(1), pp. 93–100. doi:10.1080/1828051X.2016.1249968.

Schmitt, E. and de Vries, W. (2020) 'Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction', *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, p. 100335. doi:10.1016/j.cogsc.2020.03.005.

Schneider, J.C. (2020) 'Effects of light intensity on mating of the black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae)', *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(2), pp. 111–119. doi:10.3920/jiff2019.0003.

Schönfeldt, H.C. and Hall, N.G. (2012) 'Dietary protein quality and malnutrition in Africa', *British Journal of Nutrition*, 108(SUPPL. 2). doi:10.1017/S0007114512002553.

Schuchardt, J.P. *et al.* (2016) 'Effects of docosahexaenoic acid supplementation on PUFA levels in red blood cells and plasma', *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 115(August), pp. 12–23. doi:10.1016/j.plefa.2016.10.005.

SDR (2001) *L 'élevage des poules pondeuses*.

Secci, G. *et al.* (2018) 'Quality of eggs from Lohmann Brown Classic laying hens fed black soldier fly meal as substitute for soya bean', *Animal*, 12(10), pp. 2191–2197. doi:10.1017/S1751731117003603.

Sharma, A. *et al.* (2022) 'Silkworm as an edible insect: A review', *~ 1667 ~ The Pharma Innovation Journal*, 11(2), pp. 1667–1674. Available at: http://www.thepharmajournal.com.

Sheileja, T. *et al.* (2022) 'Nutritive value of bamboo worm *Omphisa fuscidentalis* (Lepidoptera: Crambidae): An edible insect as protein rich food', *~ 2229 ~ The Pharma Innovation Journal*, 11(7), pp. 2229–2233. Available at: www.thepharmajournal.com.

Shelomi, M. (2020) 'Nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*)', in *African Edible Insects As Alternative Source of Food, Oil, Protein and Bioactive Components*, pp. 195–212.

doi:10.1007/978-3-030-32952-5_13.

Sheppard, D.C. *et al.* (2002) ‘Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)’, *Journal of Medical Entomology*, 39(4), pp. 695–698. doi:10.1603/0022-2585-39.4.695.

Sheppard, D.C. and Newton, G.L. (1994) ‘A value added manure management system using the black sldier fly’, *Bioresource Technology*, 50, pp. 275–279.

Shumo, M., Khamis, F.M., *et al.* (2019) ‘Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya’, *Animals*, 9(3). doi:10.3390/ani9030079.

Shumo, M., Osuga, I.M., *et al.* (2019) ‘The nutritive value of black soldier fly larvae reared on common organic waste streams in Kenya’, *Scientific Reports*, 9(1), pp. 1–13. doi:10.1038/s41598-019-46603-z.

Siddiqui, S.A. *et al.* (2021) ‘The potential of chitin and chitosan from dead black solier fly (BSF) (*Hermetia illucens*) for biodegradable packaging material - A critical review’, *Pharmacological Research*, p. 105593. doi:10.1016/j.psep.2024.06.108.

Siddiqui, S.A. *et al.* (2022) ‘Manipulation of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* ; Diptera: Stratiomyidae) fatty acid profile through the substrate’, *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(8), pp. 1–20. doi:10.3920/jiff2021.0162.

Silva, L.F.P., Brown, G.W. and James, P.J. (2020) ‘Nutritional Value of Black Soldier Fly Grown on Abattoir Waste’, *Proceedings*, 36(1), p. 216. doi:10.3390/proceedings2019036216.

da Silva, R.F.B. *et al.* (2023) ‘Complex relationships between soybean trade destination and tropical deforestation’, *Scientific reports*, 13(1), p. 11254. doi:10.1038/s41598-023-38405-1.

Singh, A. *et al.* (2022) ‘Effect of Different Organic Substrates on Selected Life History Traits and Nutritional Composition of Black Soldier fly (*Hermetia illucens*)’, *Environmental Entomology*, 51(1), pp. 182–189. doi:10.1093/ee/nvab135.

De Smet, J. *et al.* (2018) ‘Microbial Community Dynamics during Rearing of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) and Impact on Exploitation Potential’, *Applied and Environmental Microbiology*, 84(9), pp. 1–17. doi:https://doi.org/10.1128/AEM .02722-17.

Soetemans, L., Uyttebroek, M. and Bastiaens, L. (2020) ‘Characteristics of chitin extracted from black soldier fly in different life stages’, *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, pp. 3206–3214. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.11.041.

Sogari, G. *et al.* (2019) 'The potential role of insects as feed: A multi-perspective review', *Animals*, 9(4), pp. 1–15. doi:10.3390/ani9040119.

Soulé, M. *et al.* (1986) 'The millenium ark: How long a voyage, how many staterooms, how many passengers?', *Zoo Biology*, 5(2), pp. 101–113. doi:10.1002/zoo.1430050205.

Spranghers, T. *et al.* (2017) 'Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(8), pp. 2594–2600. doi:10.1002/JSFA.8081.

Sripontan, Y. *et al.* (2017) 'Egg-trapping of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) with various wastes and the effects of environmental factors on egg-laying Nesting ecology of termites View project Foraging ecology of termites View project', *Khon Kaen Agriculture Journal*, 45(1), pp. 179–184. Available at: https://www.researchgate.net/publication/314204690.

St-Hilaire, S. *et al.* (2007) 'Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in omega-3 fatty acids', *Journal of the World Aquaculture Society*, 38(2), pp. 309–313. doi:10.1111/j.1749-7345.2007.00101.x.

Stack Whitney, K. (2023) 'Ladybugs: The (Natural) Enemy of My Enemy Is My Friend? Enlisting Ladybugs into the War on Insect Pests', *Catalyst: Feminism, Theory, Technoscience*, 9(1), pp. 1–11. doi:10.28968/cftt.v9i1.38252.

Stanley, D. and Kim, Y. (2020) 'Why most insects have very low proportions of C20 polyunsaturated fatty acids: The oxidative stress hypothesis', *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 103(1), pp. 1–5. doi:10.1002/arch.21622.

Star, L. *et al.* (2020) 'Gradual provision of live black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae to older laying hens: Effect on production performance, egg quality, feather condition and behavior', *Animals*, 10(2). doi:10.3390/ani10020216.

Steinfeld, H. *et al.* (2006) *Livestock's long shadow. Environmental issues and options. Rome, FAO*. doi:10.1177/0030727020915206.

Straif, S.C. *et al.* (1998) 'Midgut Bacteria in *Anopheles gambiae* and An. funestus (Diptera: Culicidae) from Kenya and Mali', *Journal of Medical Entomology*, 35(3), pp. 222–226. doi:10.1093/jmedent/35.3.222.

Stuber, E. (2017) 'Caractérisation du gisement de bio-déchets Île de Tahiti', pp. 1–24.

Sun, J. *et al.* (2022) 'Insights into plastic biodegradation: Community composition and functional

capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials', *Microbial Genomics*, 8(6). doi:10.1099/mgen.0.000842.

Surendra, K.C. *et al.* (2016) 'Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming', *Renewable Energy*, 98, pp. 197–202. doi:10.1016/j.renene.2016.03.022.

Tacon, A.G.J. and Metian, M. (2008) 'Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects', *Aquaculture*, 285(1–4), pp. 146–158. doi:10.1016/j.aquaculture.2008.08.015.

Tacon, A.G.J. and Metian, M. (2015) 'Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture', *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 23(1), pp. 1–10. doi:10.1080/23308249.2014.987209.

Tahamtani, F.M. *et al.* (2021) 'Feeding live Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) to laying hens: effects on feed consumption, hen health, hen behavior, and egg quality', *Poultry Science*, 100(10), p. 101400. doi:10.1016/j.psj.2021.101400.

Tirtawijaya, G. and Choi, J.S. (2022) 'Enrichment of polyunsaturated fatty acids in black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) fortified with squid liver oil', *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(4), pp. 387–398. doi:10.3920/JIFF2021.0030.

Tocher, D.R. (2010) 'Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish', *Aquaculture Research*, 41(5), pp. 717–732. doi:10.1111/j.1365-2109.2008.02150.x.

Tocher, D.R. (2015) 'Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids and aquaculture in perspective', *Aquaculture*, 449, pp. 94–107. doi:10.1016/j.aquaculture.2015.01.010.

Tomberlin, J.K. (2001) 'Biological, Behavioral, and Toxicological Studies on the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Encyclopedia of Parasitology*, (2), pp. 1245–1245. doi:10.1007/978-3-662-43978-4_1446.

Tomberlin, J.K., Adler, P.H. and Myers, H.M. (2009) 'Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature', *Environmental Entomology*, 38(3), pp. 930–934. doi:10.1603/022.038.0347.

Tomberlin, J.K. and van Huis, A. (2020) 'Black soldier fly from pest to "crown jewel" of the insects as feed industry: An historical perspective', *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1), pp. 1–4. doi:10.3920/JIFF2020.0003.

Tomberlin, J.K. and Sheppard, D.C. (2001) 'Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae)', *Florida Entomologist*, 84(4), pp. 729–730. doi:10.2307/3496413.

Tomberlin, J.K. and Sheppard, D.C. (2002) 'Factors Influencing Mating and Oviposition of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) in a Colony', *Journal of Entomological Science*, 37(4), pp. 345–352. doi:10.18474/0749-8004-37.4.345.

Tomberlin, J.K., Sheppard, D.C. and Joyce, J.A. (2002) 'Selected Life-History Traits of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) Reared on Three Artificial Diets', *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3), pp. 379–386. doi:10.1603/0013-8746(2002)095[0379:slhtob]2.0.co;2.

Traughber, Z.T. *et al.* (2021) 'Effect of crude fiber and total dietary fiber on the calculated nitrogen-free extract and metabolizable energy content of various dog foods fed to client-owned dogs with osteoarthritis', *American Journal of Veterinary Research*, 82(10), pp. 787–794. doi:10.2460/ajvr.82.10.787.

Trostle, R. (2008) *Global agricultural supply and demand: Factors contributing to the recent increase in food commodity prices*.

Turlings, T.C.J. *et al.* (1995) 'How caterpillar-damaged plants protect themselves by attracting parasitic wasps', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(10), pp. 4169–4174. doi:10.1073/pnas.92.10.4169.

Tveterås, S. and Tveterås, R. (2010) 'The global competition for wild fish resources between livestock and aquaculture', *Journal of Agricultural Economics*, 61(2), pp. 381–397. doi:10.1111/j.1477-9552.2010.00245.x.

U.N. (2017) 'World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables', in *Department of Economic and Social Affairs, Population division*, p. 46.

Ushakova, N.A. *et al.* (2016) 'Characteristics of lipid fractions of larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*', *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 468(1), pp. 209–212. doi:10.1134/S1607672916030145.

Usman *et al.* (2021) 'The utilization of black soldier fly larvae meal as a substitution of fish meal in diet for white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, grow-out', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860. doi:10.1088/1755-1315/860/1/012023.

Vargas, R.I. *et al.* (2007) 'Impact of Introduction of Bactrocera dorsalis (Diptera: Tephritidae) and Classical Biological Control Releases of *Oncorhynchus mykiss* (Hymenoptera: Braconidae) on Economically Important Fruit Flies in French Polynesia', *Journal of Economic Entomology*, 100(3), pp. 670–679. doi:10.1603/0022-0493(2007)100[670:IOIOBD]2.0.CO;2.

Vargas, R.I. *et al.* (2012) 'Population dynamics of three Bactrocera spp. fruit flies (Diptera: Tephritidae) and two introduced natural enemies, *Oncorhynchus mykiss* (Sonan) and *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae), after an invasion by Bactrocera dorsalis (Hen', *Biological Control*, 60(2), pp. 199–206. doi:10.1016/j.biocontrol.2011.10.012.

Veldkamp, T *et al.* (2012) 'Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets : a feasibility study = Insecten als duurzame diervoedergrondstof in varkens- en pluimveevoeders : een haalbaarheidsstudie', *food chemistry*, 50, pp. 192–195. Available at: http://www.livestockresearch.wur.nl (Accessed: 23 February 2021).

Veldkamp, T. *et al.* (2012) 'Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study', *Wageningen UR Livestock Research*, 638(October), p. 62.

Veldkamp, T. and Vernooij, A.G. (2021) 'Use of insect products in pig diets', *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), pp. 781–793. doi:10.3920/JIFF2020.0091.

Villazana, J. and Alyokhin, A. (2019) 'Tolerance of Immature Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) to Cold Temperatures Above and Below Freezing Point', *Journal of economic entomology*, 112(6), pp. 2632–2637. doi:10.1093/jee/toz186.

Vongvichith, B. *et al.* (2020) 'Evaluation of the efficacy of aquaculture feeds for the climbing perch *Oncorhynchus mykiss*: replacement of fishmeal by black soldier fly *Hermetia illucens* prepupae', *Fisheries Science*, 86(1), pp. 145–151. doi:10.1007/s12562-019-01381-5.

Wang, F. *et al.* (2014) 'Advanced silk material spun by a transgenic silkworm promotes cell proliferation for biomedical application', *Acta Biomaterialia*, 10(12), pp. 4947–4955. doi:10.1016/j.actbio.2014.06.031.

Wang, F. *et al.* (2018) 'Fabrication of the FGF1-functionalized sericin hydrogels with cell proliferation activity for biomedical application using genetically engineered *Bombyx mori* (B. mori) silk', *Acta Biomaterialia*, 79(August), pp. 239–252. doi:10.1016/j.actbio.2018.08.031.

Wang, H. *et al.* (2020) 'Physicochemical structure of chitin in the developing stages of black soldier fly', *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, pp. 901–907. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.01.293.

Wang, S.Y. *et al.* (2020) 'Reproductive potential and nutritional composition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) prepupae reared on different organic wastes', *Journal of Economic Entomology*, 113(1), pp. 527–537. doi:10.1093/jee/toz296.

Wang, Y.-S. and Shelomi, M. (2017) 'Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food', *Foods*, 6(10), p. 23. doi:10.3390/foods6100091.

Wang, Yinghui *et al.* (2023) 'Temperature dependent development of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) from Yangtze River Delta region of China', *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 26(4), p. 102163. doi:10.1016/j.aspen.2023.102163.

Wu, G. (2021) *Amino Acids in Nutrition and Health*, *Amino Acids*. Available at: http://www.springer.com/series/5584%0Ahttps://link.springer.com/10.1007/978-3-030-74180-8.

Xia, J., Ge, C. and Yao, H. (2021) 'Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming', *Animals*, 11(7). doi:10.3390/ani11071937.

Xiong, A. *et al.* (2023) 'Extraction of Chitin from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) and Its Puparium by Using Biological Treatment', *Life*, 13(7), pp. 1–12. doi:10.3390/life13071424.

Yahouédo, G.A. *et al.* (2014) 'Effect of three larval diets on larval development and male sexual performance of *Anopheles gambiae* s.s.', *Acta Tropica*, 132(1), pp. 96–101. doi:10.1016/j.actatropica.2013.11.014.

Yang, J. *et al.* (2014) *Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms*, *Environmental Science and Technology*. doi:10.1021/es504038a.

Yang, L.H. and Gratton, C. (2014) 'Insects as drivers of ecosystem processes', *Current Opinion in Insect Science*, 2, pp. 26–32. doi:10.1016/j.cois.2014.06.004.

Yeul, V.S. and Rayalu, S.S. (2013) 'Unprecedented Chitin and Chitosan: A Chemical Overview', *Journal of Polymers and the Environment*, 21(2), pp. 606–614. doi:10.1007/s10924-012-0458-x.

Yin, J. *et al.* (2014) 'Improving production of volatile fatty acids from food waste fermentation by hydrothermal pretreatment', *Bioresource Technology*, 171, pp. 323–329. doi:10.1016/j.biortech.2014.08.062.

Younes, I. and Rinaudo, M. (2015) 'Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications', *Marine Drugs*, 13(3), pp. 1133–1174. doi:10.3390/md13031133.

Yu, M. *et al.* (2020) 'Evaluation of full-fat *Hermetia illucens* larvae meal as a fishmeal replacement for weanling piglets: Effects on the growth performance, apparent nutrient digestibility, blood parameters and gut morphology', *Animal Feed Science and Technology*, 264(December 2019), p. 114431. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114431.

Yun, J.H. *et al.* (2014) 'Insect gut bacterial diversity determined by environmental habitat, diet, developmental stage, and phylogeny of host', *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), pp. 5254–5264. doi:10.1128/AEM.01226-14.

Zhang, J. *et al.* (2010) ' An Artificial Light Source Influences Mating and Oviposition of Black Soldier Flies, *Hermetia illucens* ', *Journal of Insect Science*, 10(202), pp. 1–7. doi:10.1673/031.010.20201.

Zhen, Y. *et al.* (2020) 'Impacts of killing process on the nutrient content, product stability and in vitro digestibility of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meals', *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(17). doi:10.3390/app10176099.

Zheng, X. *et al.* (2019) 'Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes', *Nature*, 572(7767), pp. 56–61. doi:10.1038/s41586-019-1407-9.

Zhou, F. *et al.* (2013) 'Developmental and waste reduction plasticity of three black soldier fly strains (Diptera: Stratiomyidae) raised on different livestock manures', *Journal of Medical Entomology*, 50(6), pp. 1224–1230. doi:10.1603/ME13021.

Zulkifli, N.F.N.M. *et al.* (2022) 'Nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processed by different methods', *PLoS ONE*, 17(2 February), pp. 1–14. doi:10.1371/journal.pone.0263924.