P r é T I M O U V

Pré étude sur le Traitement de MOUles par les Insectes et sur les voies de Valorisation

-PréTIMOUV-

TRINTIGNAC P.[1], PETIT M.[2], CASINI Z.[3], LAVILLE F.[3]

[1] : Syndicat Mixte Aquaculture Pêche Pays de la Loire

[2] : Comité Régional Conchylicole Pays de la Loire

[3] : Cycle Farms

AVRIL 2021

COLLABORATEUR TECHNIQUE

PARTENAIRE FINANCIER

Table des matières

Résumé 5
Remerciements 7
Introduction 9
I. Contexte et objectifs 10
I.A. Rappels contextuels 10
I.A.1. La mytiliculture dans les Pays de la Loire 10
I.A.2. Les insectes 11
I.B. Objectifs 13
I.C. Site expérimental 13
I.D. Acteurs ciblés 14
II. Volet expérimental 15
II.A. Analyses microbiologiques et nutritionnelles 15
II.A.1. Résultats des analyses microbiologiques 16
II.A.2. Résultats des analyses nutritionnelles 16
II.B. Première phase d'essais 17
II.B.1. Protocole expérimental 18
II.B.1.1. Modalités 18
II.B.1.2. Protocole broyage et précuisson 19
II.B.2. Résultats de la 1ère phase d'essais 19
II.B.2.1. Caractéristiques des lots de moules testés 19
II.B.2.2. Résultats 20
II.B.3. Conclusions partielles 25
II.C. Deuxième phase expérimentale 26
II.C.1. Protocole expérimental 26
II.C.2. Résultats de la deuxième phase 27
II.C.2.1. Caractéristiques des lots de moules testés 27
II.C.2.2. Résultats 27
II.C.2.3. Analyses microbiologiques des larves 32
II.D. Conclusions du volet technique 33
III. Volet faisabilité et valorisation des rebuts de moules 34
III.A. Rappels réglementaires 34
III.A.1. Valorisation des rebuts de moules 34
III.A.2. Valorisation des insectes 35

II.A.2.1. Statut réglementaire des larves 36
II.A.2.2. Utilisation possible des larves vivantes 36
II.A.2.3. Utilisations des insectes morts, séchés ou non 37
II.A.2. 4. Conclusion 41
III.B. Le scénario « insectes » 42
III.B.1. Eléments contextuels 42
III.B.2. Etude de cas d'une unité de retraitement de moules sans valorisation 43
II.B.2. 1. Hypothèses de base 43
II.B.2. 2. Besoin en juvénile hebdomadaire 43
II.B.2. 3. Rendement en larve et coquille 44
II.B.2. 4. Investissement système de production 44
II.B.2. 5. Coûts de fonctionnement 45
II.B.2. 6. Bilan pré-étude de cas 45
III.C. Les autres traitements actuels ou potentiels 46
III.C.1. Le traitement post fermentation 46
III.C.2. Le compost 47
III.C.3. Les autres pistes 48
Conclusion 50
Bibliographie 51
Sitographie 53
Glossaire 53
Figures 54
Tableaux 54
Annexe 55

Résumé

Dans les Pays de la Loire, environ 10 000 T. de moules sont produites chaque année mais une grande partie, soit 2 600 T. en moyenne annuelle, ne pourront pas être vendues du fait d'une taille commerciale non atteinte (moules sous-taille) ou d'imperfections physiques (cassées). Actuellement, il existe peu de traitement et de valorisation des rebuts de moules à l'échelle industrielle, principalement pour des raisons technico économiques. Le premier volet de cette pré étude PréTIMOUV consiste à vérifier si des larves de mouches soldat noirs produites localement sont capables de nettoyer de leurs chairs les coquilles de moules et en combien de temps. Les expérimentations se sont déroulées sur le site de Cycle Farms agréé par la Direction Départementale de Protection des Populations du Maine et Loire. Les rebuts de moules proviennent de la Baie de Bourgneuf et de la Plaine/mer. Une première recherche de la valeur nutritionnelle des produits testés est réalisée afin de définir ensuite les taux d'incorporation de moules dans les substrats nourriciers des larves. Ensuite, deux phases d'essais sont lancées avec des modalités différentes. Les tests ont montré qu'un traitement de ces rebuts par des larves de mouches soldats noirs est techniquement possible sur une période de 7 à 8 jours. Des étapes préalables de précuisson ou de broyage ne sont pas nécessaires. Afin d'optimiser la qualité du traitement, un pré triage des sous-produits collectés en amont est recommandé afin de limiter au maximum l'hétérogénéité des lots (avec d'autres espèces). De plus, les rendements des larve nourries uniquement avec des moules sont intéressants soit un peu plus de 8%.

Une première approche technico économique permet d'estimer des coûts de traitement « insectes » compris entre 268€ HT et 321€ HT par tonne de rebuts traités. Ces coûts élevés, mais comparables aux coûts d'autres types de traitement, pourraient cependant fortement diminuer avec le développement de ce type de démarche et avec la valorisation des deux co-produits issus du traitement, les coquilles et les larves de mouche. Pour les coquilles de moules, des pistes de valorisation existent ou font l'objet de recherche (céramique, adjuvant). Pour les larves de mouche, la réglementation actuelle permet une valorisation comme appâts de pêche ou pour le nourrissage d'animaux à fourrure, familiers ou de zoo. Concernant une valorisation pour l'alimentation aquacole, une évolution de la réglementation est nécessaire.

Remerciements

Un grand merci à tous les acteurs techniques ayant participé à cette étude, Sarah BIENASSIS et Hugo KOECHLIN du CRC Pays de la Loire, Guillaume BAUDOIN et Arnaud FOURIER de Cycle Farms.

Une mention particulière aux conchyliculteurs directement impliqués Joel CORCAUD et Antonio CHARPENTIER.

Nous remercions aussi vivement ceux qui ont apporté leur contribution par leur expertise lors des COPIL, Sandy ARRIGNON du CRC Bretagne sud, Jean Yves LE GOFF, Tanguy ROCHER respectivement Président et Vice-Président du CRC Pays de la Loire et Ségolène CALVEZ de l'Oniris.

Un remerciement appuyé pour le co-financeur, la Région des Pays de la Loire.

Introduction

La Région Pays de la Loire est considérée comme le berceau de la mytiliculture en France (Vidal, 2001). Jusqu'en 1860, cette culture empirique sur bouchots va se développer progressivement, s'étendant de La Tranche-sur-Mer en Vendée à la Rochelle en Charente-Maritime. Depuis, la production de moules dans le secteur des Pays de la Loire s'est fortement développée. L'apparition des filets de catinage, qui permettent d'éviter aux grappes de moules de se décrocher des pieux de bouchots, l'utilisation de navires ateliers et la mise au point de l'élevage de la moule en pleine mer sur filières ont permis d'optimiser l'élevage mytilicole. Environ 10 000 T. de moules sont produites chaque année mais une grande partie ne pourront pas être vendues du fait d'une taille commerciale non atteinte (moules sous-taille) ou d'imperfections physiques (cassées). Les volumes de ces catégories de produit peuvent varier de 2 000 à 4000 T. selon les années.

Aujourd'hui, il y a peu de traitement et de valorisation des rebuts de moules à l'échelle industrielle principalement pour des raisons technico économiques (CRC PDL, 2015 ; MARCHAND, 2015). L'ampleur des tonnages de moules sous-tailles représente une perte directe en termes de production pour les entreprises et une augmentation de la manutention. Les mytiliculteurs, n'ayant pas toujours la possibilité d'effectuer le tri à bord d'un navire, se trouvent confrontés à ces produits composés de coquilles et de matière organique, sans débouchées d'évacuation possible. Depuis plusieurs mois, la profession mytilicole via le Comité Régional de la Conchyliculture (CRC) Pays de la Loire, dans une approche de développement durable, cherche à valoriser ces rebuts. Les coquilles seules seraient valorisables à court terme par diverses voies (céramique, adjuvant…) mais pas la matière organique encore présente même si certaines réflexions sont en cours.

L'élevage des insectes ou entomoculture est autorisé en Europe depuis quatre ans pour seulement sept espèces (REGLEMENT UE 2017/893, 2017). Une d'entre elles, la mouche soldat noir, présente sur le continent européen depuis plus de cinquante ans, est considérée comme une des espèces de mouches les plus efficaces pour la digestion de matières organiques (Trintignac & Métivier, 2019).

Cette pré étude PréTIMOUV a pour objectif d'une part, de vérifier la faisabilité technique d'une consommation de la matière organique présente dans les rebuts de moules par les mouches soldats noirs et d'autre part, d'identifier les atouts et les contraintes de ce type de démarche si elle devait se développer, sans oublier les sources de valorisation.

I. Contexte et objectifs

Un rappel contextuel est nécessaire afin de mieux définir les objectifs.

I.A. Rappels contextuels

I.A.1. La mytiliculture dans les Pays de la Loire

La région des Pays de la Loire est considérée comme le berceau de la mytiliculture en France car les premiers essais et la mise au point de la méthode d'élevage des moules sur bouchot ont été faits dans le secteur de la Baie de l'Aiguillon. En effet, la légende raconte qu'en 1235, un marin irlandais, Patrick Walton, s'échoue dans la baie de l'Aiguillon suite à une tempête. Contraint de s'installer dans la baie, il installe sur l'estran des filets tendus entre des piquets afin de piéger des oiseaux pour se nourrir. Au fur et à mesure qu'il vient relever ses pièges, il se rend compte que des jeunes moules se fixent sur les pieux et les filets (Vidal, 2001).
Il améliore son dispositif en plantant des pieux de plus grandes tailles, qu'il relie avec des clayonnages de branches pour améliorer son captage. Ainsi naissent les premiers bouchots, dont le nom vient de la contraction de deux mots gaëliques : *bout* (clôture) et *chot* (bois).

Jusqu'en 1860, cette culture empirique sur bouchots va se développer progressivement, s'étendant de La Tranche-sur-Mer en Vendée à la Rochelle en Charente-Maritime. Les boucholeurs utilisaient des lignes de bouchots en forme de V, ce qui permettait à la fois d'élever des moules et de piéger des poissons à marée descendante.
Cependant, ce système accélère l'envasement des sites de production et un décret datant de 1859 précise que les bouchots doivent être uniquement employés à l'élevage des moules. Le ministère de la Marine définit également les modalités d'installation des pieux, qui doivent désormais être plantés en ligne (schéma des structures).

Depuis, la production de moules dans le secteur des Pays de la Loire s'est fortement développée. L'apparition des filets de catinage, qui permettent d'éviter aux grappes de moules de se décrocher des pieux de bouchots, l'utilisation de navires atelier et la mise au point de l'élevage de la moule en pleine mer sur filières ont permis d'optimiser l'élevage mytilicole (figure 1).

Aujourd'hui, la production mytilicole des Pays de la Loire est répartie sur trois bassins : l'estuaire de la Loire, la baie de Bourgneuf - Ile de Noirmoutier et la Baie de l'Aiguillon, sur lesquels est élevée une des deux espèces de moules produites en France (figure 4) : la moule bleue *Mytilus edulis*.

Figure 1 : pieux d'élevage et cordes de captage (CRC PDL)

:

Au total, cinquante-neuf entreprises de production de moules se partagent les 240 km de bouchots et 13.7 km de filières pour produire chaque année environ 10 000 T. (tonnes) de moules (mortalités comprises) et plusieurs kilomètres de cordes de captage (source : CRC PDL). En effet, l'activité économique de la mytiliculture vendéenne repose également sur la vente des cordes de captage.

Cependant, une grande partie des moules produites ne pourront pas être vendues du fait d'une taille commerciale non atteinte (moules sous-taille) ou d'imperfections physiques (cassées). En moyenne, ces catégories de produits représenteraient 30 % du volume produit chaque année (figure 2) soit 2 600 T. par an avec des différences selon les secteurs de production (tableau 7).

L'ampleur des tonnages de moules sous-tailles représente une perte directe en termes de production pour les entreprises et une augmentation de la manutention.

En effet, les producteurs sont dans l'obligation d'effectuer un tri pour séparer les moules commercialisables, des rebuts, soit à bord de leur navire, soit à leur établissement (en fonction de leurs moyens).

C'est pourquoi le CRC PDL cherche une solution qui permettrait de valoriser ces produits issus de la mytiliculture. Cela permettrait, dans un premier temps, d'optimiser les rendements des producteurs et, dans un second temps, de palier aux potentiels encadrements réglementaires relatifs au rejet en mer de ces moules sous-tailles.

Figure 2 : moules sous tailles (CRC PDL)

I.A.2. Les insectes

La demande en protéine animale explose avec l'accroissement de la population mondiale et le développement de certains élevages dont l'aquaculture (FAO, 2014). La diminution de la disponibilité en farines, en huiles de poisson devient inéluctable (surexploitation des stocks, l'augmentation des prix de ces ressources et les évolutions sociétales) et stimulent la recherche d'alternatives durables. Parmi les alternatives, les insectes apparaissent comme étant une des sources de protéines les plus intéressantes, en particulier pour les élevages d'animaux monogastriques (Vantomme, 2017). Des projets de création d'élevage d'insectes se développent en Europe et en France.

La règlementation européenne a évolué depuis quatre ans. Depuis le 1er juillet 2017, les PAT (Protéines d'Animaux Transformés) d'insectes sont autorisées dans l'alimentation des animaux d'aquaculture, les animaux familiers et les animaux à fourrure (Règlement (UE) 2017/893, 2017). Elles sont interdites pour les autres filières animales pour le moment. Pour le Food, depuis le 1er janvier 2018, un nouveau règlement européen définit que tous les produits à base d'insectes (pas seulement les parties d'insectes ou des extraits, mais aussi les insectes entiers et leurs préparations) sont considérés comme Novel Food, en raison de l'absence de preuve de consommation significative dans l'Union Européenne

avant le 15 mai 1997. Les PAT d'insectes ne peuvent être préparées qu'à partir d'espèces d'insectes d'élevage. Sept espèces sont autorisées à l'élevage en Europe pour le moment

Plusieurs études montrent que, malgré des résultats intéressants, certaines contraintes restent problématiques concernant les coûts de production, les volumes à produire et les process d'élevage assurant une standardisation, la qualité nutritionnelle de leurs farines d'insectes, seule garantie d'une production à grande échelle pour l'alimentation aquacole. Un des volets concerne les substrats nourriciers, la réglementation actuelle les limitant. L'étude conclue notamment sur la nécessité d'études complémentaires notamment sur les substrats (Trintignac & Métivier, 2019).

Parmi les sept espèces d'insectes autorisées à l'élevage en Europe, la mouche soldat noir (BSF) semble être la plus intéressante pour ce type d'approche (figure 3). Cette espèce fait partie actuellement des espèces les plus testées pour l'alimentation aquacole (Mezdour, 2017; Vallod & Le Reste, 2017). Même si cette espèce est originaire d'Amérique du nord, elle est présente sur le continent européen et en France depuis plus de cinquante ans. Elles se trouvent en abondance et naturellement autour des tas de fumier des volailles, porcs et bovins. Les larves sont également présentes dans des populations très denses de déchets organiques tels que la pulpe de café en grains, les légumes, les déchets de distillerie et les déchets de poisson (sous-produits de la transformation du poisson). La mouche soldat noir adulte n'est pas attirée par les habitats ou les aliments propres à l'homme et, pour cette raison, n'est pas considérée comme une nuisance. Ce sont les plus efficaces de toutes les espèces de mouches pour ce qui est de la digestion de matières organiques (Anankware *et al*., 2015). Une autre étude met en avant le rôle que pourrait avoir la mouche soldat noir pour le traitement d'une partie des effluents agricoles types lisiers ou fumiers (Newton *et al*., 2005). La mouche soldat noir est aujourd'hui l'espèce la plus élevée dans le monde avec au minimum une centaine d'entreprises ayant développé leur propre système de production à différentes échelles, chacune d'entre elle utilisant par ailleurs des sources de substrat d'élevage différentes (Stamer, 2015).

Embranchement : Arthropode
Sous-embranchement : Hexapode
Classe : Insecte
Ordre : Diptère
Famille : Stratiomyidae
Genre : *Hermetia*
Espèce : *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758)

Nom vernaculaire anglais : Black Soldier Fly ou BSF
Nom vernaculaire : Mouche soldat noir

Figure 3 : mouche soldat noir et sa larve (Trintignac *et al*., 2019)

I.B. Objectifs

Ce projet PréTIMOUV est une pré étude qui vise d'une part, à vérifier la faisabilité technique d'une consommation de la matière organique présente dans les rebuts de moules par les mouches soldats noirs et d'autre part, d'identifier les atouts et les contraintes de ce type de démarche si elle devait se développer, sans oublier les sources de valorisation.

Le premier volet constitue donc le préalable nécessaire pour la première approche technico réglementaire. Il faut vérifier si les larves de mouches soldat noirs sont capables de nettoyer de leurs chairs les coquilles de moules et en combien de temps. Il s'agit de valoriser les rebuts de moules en utilisant un traitement biologique naturel des chairs de moules qui ne nécessite pas l'usage de produits divers ni de transport car le principe est de stocker les moules sur une plateforme locale et d'apporter les larves de mouche *in situ*, larves provenant d'un producteur régional situé à moins de 200 km des côtes ligériennes. Il n'existe pas de bibliographie sur le sujet (Trintignac & Métivier, 2019). Plusieurs protocoles seront testés (cf. volet expérimental). Les enjeux sont importants car l'ampleur du tonnage des moules sous tailles représente une perte directe en termes de production pour les entreprises et une augmentation de la manutention. Plusieurs études semblent montrer l'intérêt de la mouche soldat noir pour le traitement de bio déchets notamment sur les émissions de gaz à effets de serre. Les insectes pourraient constituer une solution de stockage du carbone sous forme organique (tout en constituant une source de protéines et de lipides pour l'alimentation animale), qui serait autrement émis dans l'atmosphère par la décomposition microbienne sous forme de méthane ou de CO_2 (Salomone *et al*., 2016 ; Perednia *et al*., 2017).

Le deuxième objectif est de travailler sur les atouts et les contraintes d'un développement éventuel de ce type de process. Le volet réglementaire sera approfondi pour connaitre les limites de ce genre de développement en Europe. Les principales contraintes vont concerner la valorisation des insectes qui est une étape importante dans la faisabilité technico économique mais aussi environnementale de l'ensemble du concept pour déterminer les éventuelles pistes à poursuivre si jamais le premier volet s'avère concluant.

I.C. Site expérimental

Les essais se feront sur le site de Cycle Farms dans le Maine et Loire à Beaufort en Anjou, centre de recherche et développement de l'entreprise. Ce centre de recherche et développement regroupe non seulement les unités d'élevage nécessaires mais également des machines pilotes de process permettant les premières étapes de transformation des insectes (figure 4).

Figure 4 : photos du site expérimental (Cycle Farms)

Cet établissement est agréé par la DDPP (Direction Départementale de la Protection des Populations) du Maine et Loire pour mener des expérimentations (filière abattages et traitements sur place + espace quarantaine, incinération). Les précédentes études nutritionnelles réalisée par Cycle Farms ont par ailleurs déjà mis en évidence le gain significatif de l'ajout de matière à haute valeur protéique, comme peuvent l'être de manière générale les coproduits de la pêche, sur les performances de croissance des larves.

I.D. Acteurs ciblés

Les acteurs ciblés sont les mytiliculteurs (59 au total) répartis entre l'estuaire de la Loire et l'estuaire de la Sèvre Niortaise (figure 5). Les prélèvements se feront sur des zones de production mytilicoles de la Baie de Bourgneuf et de l'Estuaire de la Loire.

Figure 5 : carte des zones de production de moules sur la région Pays de la Loire (CRC PDL)

II. Volet expérimental

Ce premier volet constitue l'élément principal de la pré étude PréTIMOUV. Il consiste à vérifier la faisabilité d'un traitement des coquilles de moules par les larves de BSF, c'est-à-dire à déterminer techniquement si elles sont capables de nettoyer les coquilles de moules de leurs chairs. Deux types de produits sont testés, des moules crues et des moules cuites (cf. II.B) avec un nombre de répétition d'analyses permettant d'identifier la potentielle variabilité de ces produits. Le volet expérimental comporte trois étapes :

- Analyses microbiologiques et recherche de la valeur nutritionnelle (mai-juin) :

La recherche de la valeur nutritionnelle des produits testés est nécessaire afin de définir ensuite les taux d'incorporation de moules dans les substrats nourriciers des larves. Une analyse microbiologique est aussi réalisée sur les moules afin d'anticiper la valorisation des larves de mouches.

- 1ère phase d'essais (juin-juillet) :

Il s'agit de tester plusieurs scénarios ou modalités, par exemple faut-il précuire les moules ?

- 2ème phase d'essais (septembre) :

L'objectif de cette phase sera d'approfondir les meilleurs scénarios.

II.A. Analyses microbiologiques et nutritionnelles

Cette première étape doit permettre d'une part, de vérifier la valeur nutritionnelle des produits testés et d'autre part, d'avoir une première approche des risques sanitaires potentiellement liés aux retraitements des coproduits de mytiliculture par l'insecte.

Afin d'obtenir une meilleure représentativité des résultats, douze échantillons sont constitués à partie d'un lot de moules de 2kg hors tailles provenant de la baie de Bourgneuf fourni le 05 mai 2020 par le CRC des Pays de la Loire.

Ces douze échantillons sont divisés en deux lots de six échantillons selon deux modalités :

- Une modalité crue pour laquelle les moules ont été envoyées pour analyses microbiologiques et nutritionnelles sans traitement.
- Une modalité cuite pour laquelle les moules ont subi une étape de précuisson de 80°C pendant 10 minutes représentative d'un process industriel avant l'envoi pour analyses (Anonyme, 2016).

Les six échantillons de chaque modalité sont ensuite répartis en deux lots de trois échantillons et envoyés pour analyses microbiologiques et nutritionnelles en triplicats afin d'estimer la variabilité des résultats.

II.A.1. Résultats des analyses microbiologiques

Afin d'avoir une première approche des risques sanitaires potentiels considérant les pistes de valorisation des larves après l'étape de bioconversion des moules, ces analyses microbiologiques tiennent compte de la réglementation en nutrition animale et humaine en se focalisant sur les entérobactéries et les salmonelles. Elles sont réalisées sur les deux modalités de produits entrant ; moule cuite et moule crue (tableau 1).

Tableau 1 : résultats microbiologiques

	Moule crue 1	Moule crue 2	Moule crue 3	Moule cuite 1	Moule cuite 2	Moule cuite 3
Entérobactérie (37°c) /g	1600	960	360	>15 000	>15 000	<40
Salmonelle /25g	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté

Il est important de noter que pour maintenir une représentativité d'un processus industriel, les échantillons n'ont pas été conservés au frais avant ou durant leur envoie au laboratoire correspondant donc à un temps compris entre 24 et 72h de conservation à température ambiante (20°C).

Le premier constat concerne l'absence de salmonelles pour la totalité des échantillons. Sachant en plus que les larves d'*Hermetia* ont un effet « destructeur » sur cette catégorie de micro-organisme, on peut anticiper que les produits de la bioconversion (larves et amendement) seront également exempts de contamination par la salmonelle (Jina *et al*., 2018 ; Auza *et al*., 2020).

En revanche, des contaminations fortes à l'entérobactérie, en particulier sur les échantillons cuits sont constatées. En considérant que les échantillons crus sont contaminés bien qu'en faible proportion, on peut ici estimer que le process de précuisson n'est pas suffisant pour détruire les entérobactéries. Ainsi, les entérobactéries se développent de manière importante sur les échantillons une fois abattus et laissés à température ambiante. Les entérobactéries ne sont pas un risque pour l'élevage d'*Hermetia* mais l'action des larves est moins conséquente sur cette espèce. Il sera donc important d'analyser les produits de la bioconversion (larves et amendement) en fin d'élevage pour conclure sur cet aspect. À noter que les entérobactéries peuvent facilement être détruites par une action post process si nécessaire (action thermique notamment) (M'ballou, 2019).

Le résultat du troisième répliquât de moule cuite sur l'entérobactérie, très inférieur aux deux autres échantillons, traduit la variabilité de développement de cette espèce lors du stockage. Il peut être intéressant de retravailler le protocole de précuisson pour voir si ce dernier peut avoir un effet destructeur sur les entérobactéries.

II.A.2. Résultats des analyses nutritionnelles

Pour rappel, cette analyse doit nous permettre de définir les taux d'incorporation de moules dans les substrats nourriciers des larves, même si des données bibliographiques existent sur le sujet. En effet, l'impact de la coquille de moule sur la valeur nutritionnelle se devait d'être précisé avant de démarrer la partie expérimentale de cette étude. Il fallait aussi que la composition des moules de cet échantillon se rapproche le plus possible de celle retrouvée pendant la période estivale ciblée. Il fallait faire attention à la période de reproduction qui modifie la composition nutritionnelle des animaux. La période de reproduction de la moule bleue sur nos côtes s'étale, en fonction des conditions climatiques, du mois de janvier au mois de mai voire juin (Soletchnik & Robert, 2016).

Les fréquences de pontes sont variables d'une année à l'autre et peuvent être partielles ou totales.

Un prélèvement est réalisé le 05 mai 2020 après la période de pontes sur des moules de moins d'un an. Les résultats montent bien l'absence de signe de maturation (tableau 2).

Tableau 2 : composition nutritionnelle des lots de moules cuites et crues

	Moule Crue 1	Moule crue 2	Moule crue 3	Moule cuite 1	Moule cuite 2	Moule cuite 3
MS (%)	18,2	18,4	19,0	21,2	18,1	19,2
Protéine (%)	9,7	9,5	10,3	13,2	14,6	14,2
atière grasse (%)	3,0	2,8	3,3	3,4	2,4	2,2
Cendre (%)	3,2	4,7	3,0	3,6	2,0	1,9

Les résultats ci-dessus amènent les constats suivants :

- Le taux de MS (Matière Sèche) n'est pas significativement différent entre les moules crues et les moules cuites avec une moyenne de 19%. Cette valeur est tout à fait cohérente pour une consommation efficace par la larve d'*Hermetia illucens*.

- Le taux protéique semble un peu plus élevé sur les moules cuites que sur les moules crues avec respectivement des moyennes de 9,8% et 14%. L'impact de la précuisson sur cette valeur est assez incertain. Ces valeurs protéiques élevées sont potentiellement très intéressantes pour obtenir des performances zootechniques satisfaisantes lors de la phase expérimentale.

- La matière grasse n'est pas significativement différente entre les moules crues et les moules cuites avec une valeur moyenne de 2,8%. Cette valeur est cohérente avec une matière première d'une ration d'*Hermetia illucens.*

- La variabilité sur le taux de cendre est plus importante que sur les autres valeurs. Cela peut être lié à la quantité de « coquille » dans les échantillons. Ces valeurs ne semblent, en première estimation, pas problématiques pour l'élevage d'*Hermetia*.

En conclusion, les résultats d'analyses disponibles à partir du 04 juin 2020 confirment l'intérêt de la mise en place du premier essai dans le courant du mois de juin sans modification par rapport à celui précédemment défini. Les modalités cuites / crues / broyés et non broyés sont conservées pour identifier avec précision l'impact de la pré-cuisson sur la dynamique de croissance des larves. Les rebuts de moules qui seront intégrés à une ration standard le seront à hauteur de 20%

II.B. Première phase d'essais

L'objectif de cette première série est exploratoire et vise à multiplier les modalités testées en particulier sur l'aspect prétraitement des moules avant leur consommation par les larves. Aussi, le nombre de répétitions est faible avec comme objectif de ne retenir que deux modalités pour la seconde série expérimentale avec, cette fois-ci, des réplicats qui seront plus nombreux.

II.B.1. Protocole expérimental

II.B.1.1. Modalités

Les résultats de la valeur nutritionnelle permettent d'envisager six modalités avec les moules + le témoin (figure 6). Soit les moules sont testées directement en tant que substrat nourricier, soit elles sont intégrées à une ration standard. Le témoin est composé d'une ration de recherche et développement réalisée à partir de produits achetés dans le commerce pour éviter tout biais dû à l'approvisionnement en déchets. L'utilisation de ce témoin permet également de comparer les résultats de croissance à la base de données de performance de l'entreprise sur les deux dernières années afin de mettre en perspective les résultats obtenus.

Témoin : ration standard variable Cycle Farms.

- Modalité 1 : M1 – MEB Moules entières brutes (crues)

- Modalité 2 : M2 – MEC Moules entières cuites

- Modalité 3 : M3 – MBB Moules broyées brutes (crues)

- Modalité 4 : M4 – MBC Moules broyées cuites

- Modalité 5 : M5 – MBB+R Moules broyées brutes intégrées à une ration standard (20%)

- Modalité 6 : M6 – MBC+R Moules broyées cuites intégrées à une ration standard (20%)

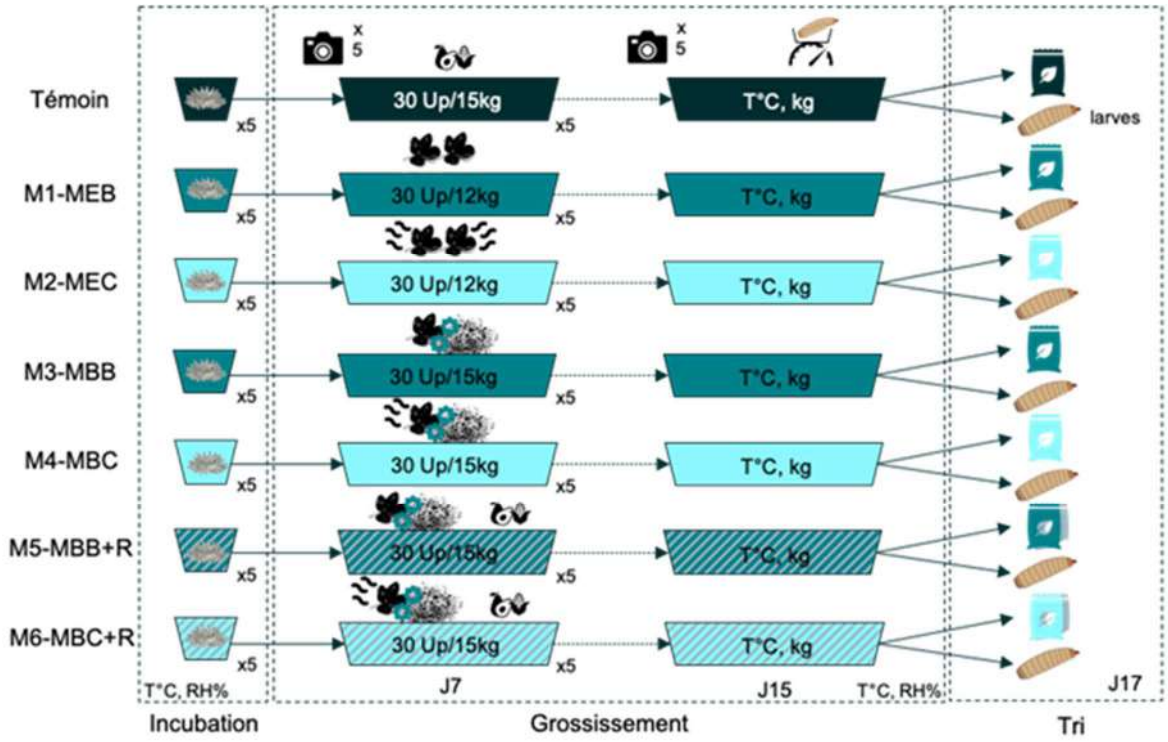

Figure 6 : représentation schématique des modalités testées lors de la première phase d'essais (Cycle Farms)

Chaque modalité est répétée cinq fois. Selon l'encombrement dans les bacs d'élevage, la quantité de matière mise en croissance à disposition des larves est adaptée. Ainsi, les modalités non broyées n'ont pu se réaliser qu'en bac de 12kg alors que toutes les autres modalités ont pu être lancées en bac de 15kg. Toutes les modalités ont démarré après une phase d'incubation de sept jours selon l'itinéraire technique standardisé de Cycle Farms (annexe 1). Toutes les modalités sont inoculées avec 30 unités de ponte (UP) représentant en moyenne 15 000 individus en sortie d'incubation.

II.B.1.2. Protocole broyage et précuisson

Les moules sont broyées à l'aide d'un robocoupe et cuites dans un bain-marie industriel. La procédure de précuisson consiste à maintenir les moules 10 min dans une eau à 80°C (Anonyme, 2016). Le thermomètre est placé à l'intérieur des sacs d'exécution d'environ 15 kg chacun, le chronomètre de 10 minutes démarrant lorsque la température observée revenait à 80°C (figure 7).

Figure 7 : dispositif de précuisson (Cycle Farms)

On assume ici une légère différence de temps de cuisson entre les moules au centre du sac d'exécution et les moules en périphérie de ce dernier. L'objectif est de s'assurer d'une ouverture complète des moules avant la mise en grossissement des larves.

II.B.2. Résultats de la 1ère phase d'essais

II.B.2.1. Caractéristiques des lots de moules testés

700 kg de moules provenant de la Baie de Bourgneuf (85) sont transportés le 23 mai 2020 vers le site d'expérimentation de Beaufort (figure 8) avec deux lots de moules différents. Dans le premier lot, les moules peuvent être considérées de qualité satisfaisante et représentatives des analyses réalisées en partie II.A. Dans le second lot en revanche, la proportion de moules présentant de la matière organique est assez faible, avec notamment une présence très majoritaire de coquilles (y compris de coquilles d'huitres) voire de sable. Ce second lot est issu d'un premier tri sur estran tandis que le premier lot vient d'un mélange de lots au niveau de l'atelier conchylicole. Lors du lancement expérimental, des difficultés importantes de broyage sont notamment constatées (figure 9).

Figure 8 : transfert des lots de moules le 23 juin (Smidap)

Figure 9: photo montrant les deux types de lots (Cycle Farms)

II.B.2.2. Résultats

Pour rappel, chaque modalité est lancée en 5 répétitions dans des bacs de 12 et 15 kg.

Figure 10 : bacs des modalités et de grossissement des larves (Smidap)

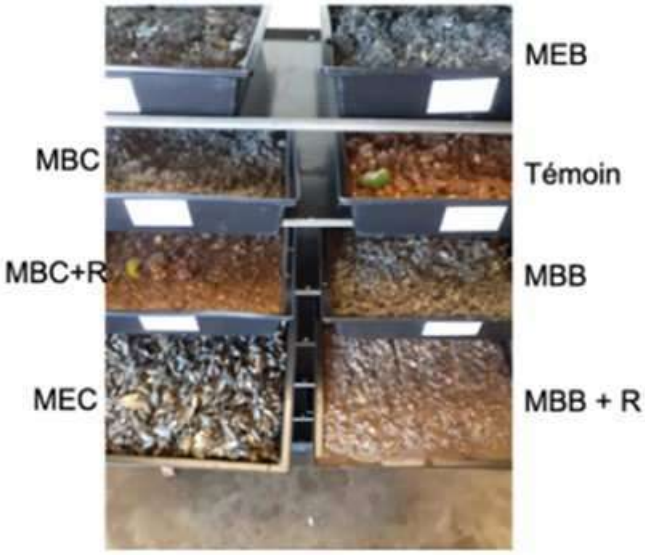

Figure 11: aspects par modalité avant mise en croissance (Cycle Farms)

L'expérimentation a duré un peu plus de dix-huit jours conformément au cycle des larves de mouches soldats noirs. Quelques variables environnementales comme la température sont mesurées.

❖ *Environnement*

Durant toute la durée de l'expérimentation, les variables environnementales sont monitorées pour éviter tout biais d'expérimentation.

Ainsi, la température est maintenue entre 27°c et 32°c dans l'espace de production durant toute la durée de l'expérimentation (figure 12). Ces valeurs correspondent aux températures cibles d'un élevage d'*Hermetia illucens* (Booth & Sheppard, 1984 ; Caruso *et al*., 2013).

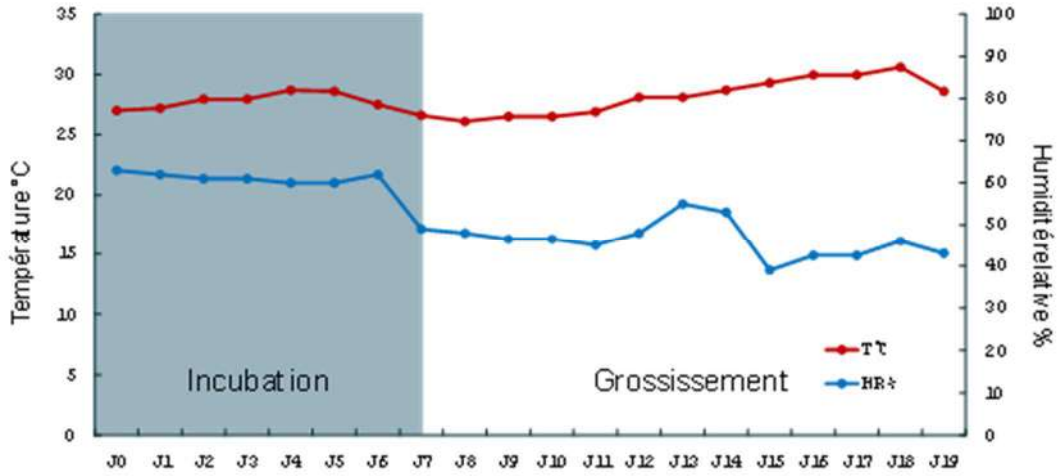

Figure 12 : température et hygrométrie dans l'espace de production durant l'expérimentation

De même, l'hygrométrie suit une courbe standard de l'itinéraire technique mis en place par Cycle Farms avec une humidité relative entre 50 et 60% durant la phase d'incubation puis comprise entre 40% et 55% durant la phase de grossissement. Les standards varient entre 30% et 90% d'après la littérature (Sheppard *et al*., 2002). Ces données permettent de ne pas considérer la variable environnementale comme une variable explicative des résultats de cette première série expérimentale.

❖ *Dynamique de dégradation des bacs*

La dynamique de séchage du bac est une variable explicative importante de la qualité de la bioconversion exercée par *Hermetia Illucens*. En effet, afin de séparer correctement les larves du résidu de leur ration par un dispositif de table vibrante en fin de croissance, le bac doit être suffisamment sec. Pour cela, la masse de chaque bac est contrôlée régulièrement durant la croissance et un pourcentage de perte en masse au cours du temps est ainsi calculé. En conditions standards (témoin), un bac est considéré comme triable lorsque ce pourcentage est compris entre 60% et 70% (Cycle Farms com. pers.). Le tableau 3 suivant décrit les résultats de cette donnée :

Tableau 3: coefficient de séchage à J18 (% perte masse initiale du bac)

Modalités	M1-MEB	M2-MEC	M3-MBB	M4-MBC	M5-MBB+R	M6-MBC+R	Témoin
% de perte en masse	23,1	27,5	23,4	26,3	59,3	57,7	69,9

La perte en masse du bac est faible pour les modalités où les moules sont fournies pures aux larves. En revanche, lorsque ces dernières sont mélangées à de la ration, la valeur de perte en masse se rapproche de la valeur du témoin. Ces données poussent à croire que les modalités contenant des moules pures, broyées ou entière, disposent d'une quantité de nourriture moins importante (présence importante de coquille) pour les larves que les modalités ou les moules sont mélangées à la ration. Cette conclusion partielle est confirmée par les graphiques de température à l'intérieur des bacs qui traduisent de l'activité larvaire au cours de la croissance (figure 13).

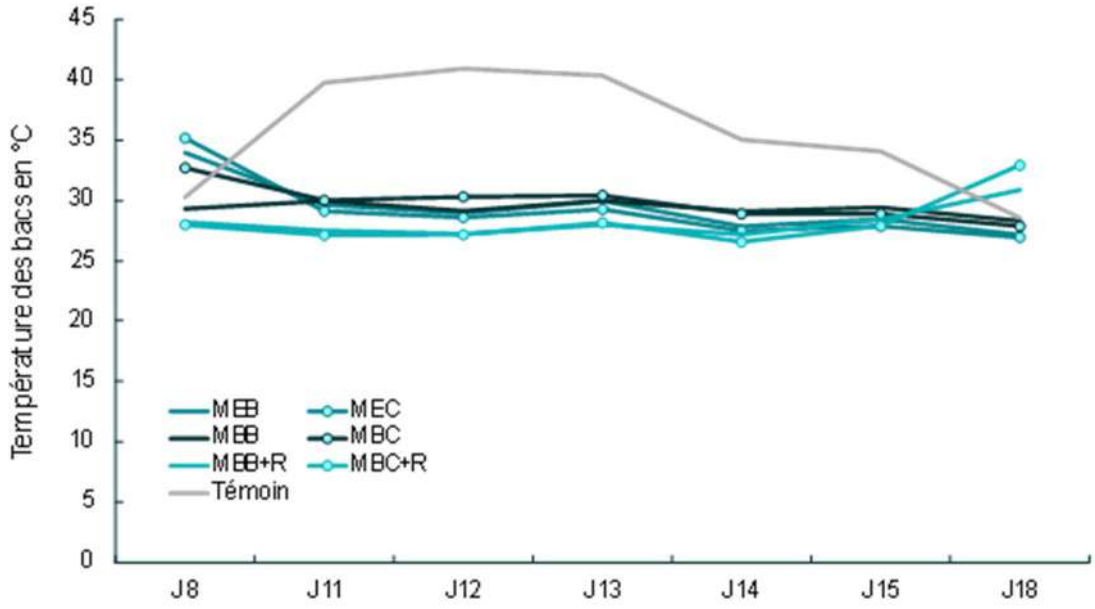

Figure 13: évolution de la température à l'intérieur des bacs de croissance au cours du temps

Sur ce graphique, la température dans les modalités contenant des moules est plus faible que la température dans les bacs témoins. Cela traduit d'une activité larvaire moins intense dans toutes les modalités comparées au témoin, activité qui peut être liée avec la disponibilité plus faible en quantité et/ou qualité en nourriture au sein de ces modalités. On constate par ailleurs que les modalités ou les moules sont mélangées à de la ration voient la température augmenter en fin de croissance juste avant le tri correspondant à un pic d'activité larvaire.

❖ *Croissance des larves*

Lors de cette première série expérimentale, les larves sont pesées au treizième jour (J13) correspondant au pic de croissance dans les conditions standard chez Cycle Farms (témoin). Cette valeur nous donne une idée de la croissance des individus au sein du bac. Le graphique suivant présente les résultats de pesées de 30 larves à J13 (figure 14).

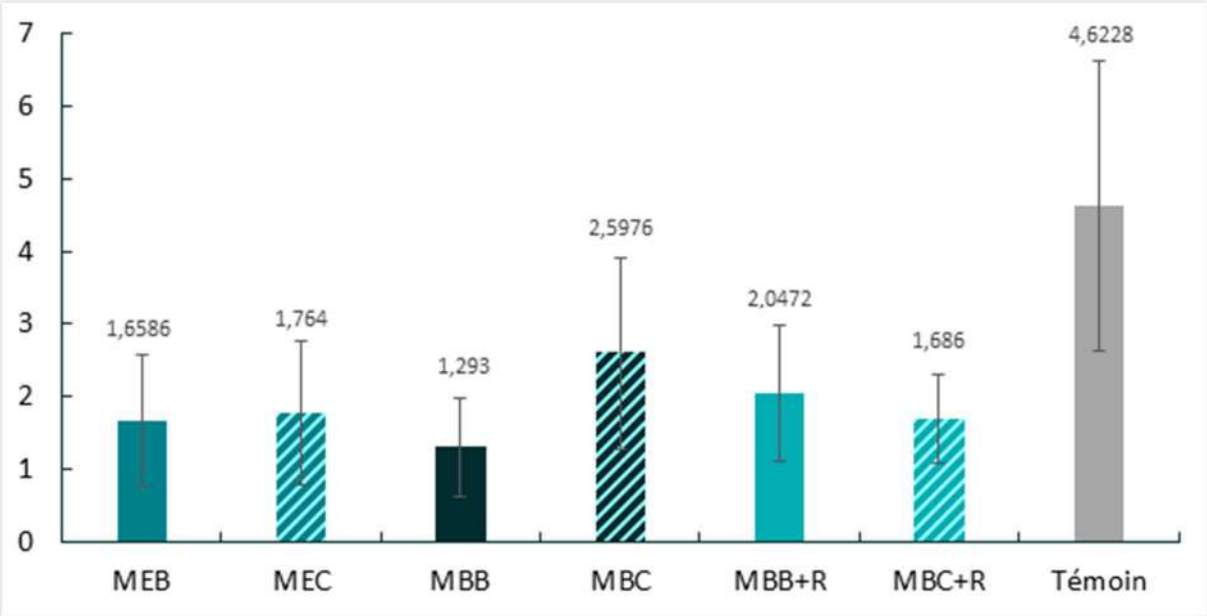

Figure 14 : masses moyennes de 30 larves (en g) à J13 (écarts-types)

Toutes les modalités sont inférieures en masse au témoin et les écarts types sont grands, correspondant à une variabilité importante des résultats. Ces derniers restent des tendances, le nombre de répétition (5) est trop faible pour permettre une analyse statistique pertinente.

D'autres constats peuvent être réalisés :

- Il n'existe pas de différence de masses entre les modalités MEB et MEC ne permettant pas d'identifier un impact de la précuisson sur la qualité de croissance larvaire.
- La modalité MBC semble présenter la meilleure croissance larvaire individuelle tout en restant très inférieure au témoin.
- Les modalités mélangées avec la ration ne montrent pas de croissances larvaires significativement supérieures aux autres modalités et restent très éloignées de la valeur du témoin.
- Sur les modalités broyées (MBB et MBC), une différence de croissance larvaire importante est constatée entre les modalités brutes (MBB) et cuites (MBC) à l'avantage de la modalité cuite. Cette donnée pourrait correspondre à une différence due à la procédure de précuisson mais également à un effet qualité de lot comme décrit dans le paragraphe *II.B.2.1*.

❖ *Tri et rendements*

Sur cette première phase expérimentale, les bacs sont laissés en croissance jusqu'à atteindre un taux de séchage cohérent avec un tri par table vibrante. Après dix-sept jours en croissance, il est apparu que l'humidité résiduelle dans toutes les modalités composées de moules crues était toujours trop importante pour envisager un triage et une séparation de qualité. Il a donc été impossible, sur cette première série expérimentale, d'obtenir des données précises de rendements de bioconversion. En revanche, une méthodologie visant à estimer l'efficacité de « nettoyage » des moules a été mise en place afin de répondre à la problématique initiale du projet. Cette méthodologie n'a pu être mise en place que sur les modalités où les moules ont été utilisées entières durant la croissance. Ainsi, sur ces modalités, un échantillon de 50 moules prises aléatoirement dans les bacs ont été caractérisées comme « propres » ou « intactes » selon les critères décrits dans la figure 15 ci-dessous :

Figure 15 : photos de moule "intacte" à gauche / moule "propre" à droite (Cycle Farms)

Figure 16 : modalité moules entières broyées en fin de croissance (MBB) à gauche et modalité moule entière crue en fin de croissance (MEC) à droite (Cycle Farms)

Il apparait aussi que les modalités où les moules étaient broyés pures (cuites ou crues) présentent un aspect de dégradation anormale avec une couche supérieure très dense et compact rendant tout tri inenvisageable à l'inverse des modalités où les moules étaient mise en croissance entière et où l'aspect compaction est plus faible (figure 16).

Sur cette première série expérimentale, aucune différence de qualité de nettoyage des moules n'a pu être identifiée avec un pourcentage de moules « propres » de 96% et 94% pour les modalités ayant subi respectivement une précuisson ou pas.

II.B.3. Conclusions partielles

Cette première série expérimentale a permis de mettre en évidence les points suivants :

- Le processus de broyage, étape supplémentaire potentielle dans le process de retraitement des moules, ne semble pas apporter réellement de plus-value. Dans certain cas même, cette étape semble entrainer une dégradation anormale de la matière avec l'apparition de blocs très denses rendant la séparation entre les larves et le résidu d'élevage très complexe.

- La dynamique de croissance de l'ensemble des modalités est inférieure à une dynamique de croissance standard (témoin), ce qui était attendu. Le paramétrage utilisé lors de cette première série (30 UP par bac / 15 kg) ne semble pas permettre une croissance optimale des individus étant donnée la quantité de matière réellement digestible dans chaque bac (rapport entre moule et coquille). Un nouveau paramétrage doit être envisagé lors de la seconde série expérimentale afin de permettre un tri en fin de croissance et une estimation de rendements et de taux de survie.

- Les modalités où les moules sont intégrées dans une ration ont montré des performances intéressantes, prouvant l'intérêt nutritionnel potentiel de cette matière. Cependant, la complexité de l'intégration dans les rations de ce type de matière pousse à écarter cette solution en raison de sa difficulté d'industrialisation (nécessité d'approvisionnement en d'autre matières premières avec problématique d'homogénéisation et investissements supplémentaires conséquents).

- Dans les modalités où les moules sont utilisées entières, crues ou cuites, le critère de nettoyage des coquilles semble atteint avec des taux de moules « propres » supérieurs à 90%. De plus, les moules non consommées par les larves sont situées sur la première couche dans les bacs. Leur non-consommation peut être liée à un séchage trop rapide en raison d'un air asséchant dans l'espace de production.

Face aux constats décrits ci-dessus, il semble pertinent de lancer une seconde série expérimentale avec un nombre de modalité réduit mais avec plus de répétitions. L'objectif est également de préciser le paramétrage pour obtenir en fin de croissance des données de rendements estimatives avec une analyse les larves. Aussi, les résultats sur les **moules entières**, cuites ou crues, correspondant au process de préparation le plus simple, nous poussent à nous orienter uniquement sur ces deux modalités. Le paramétrage doit être revu pour accélérer la perte de masse des bacs et permettre un triage après huit à dix jours passés en croissance maximum.

II.C. Deuxième phase expérimentale

II.C.1. Protocole expérimental

Le choix des modalités s'est donc porté sur l'utilisation des moules entières (cf. II.B.3). Afin de confirmer ou d'infirmer l'effet de la précuisson, il est décidé de conserver deux modalités différentes pour cette seconde série expérimentale à savoir :

- M1-MEB : Moules Entières Brutes
- M2-MEC : Moules Entières Cuites

Comme décrit précédemment, les paramétrages du test sont revus afin d'avoir la possibilité de séparer plus facilement les larves des résidus de moules à la fin de la période de croissance. Pour cela, la quantité de matière par bac a été réduite à 10Kg (vs 12Kg dans la première série) sans changement sur la quantité d'individus inoculée en croissance. Le témoin reste inchangé. Ainsi, dix répétitions de chaque modalité sont lancées afin d'identifier la variabilité intra-modalité lors de cette expérimentation. La figure 17 ci-dessous résume le second protocole expérimental.

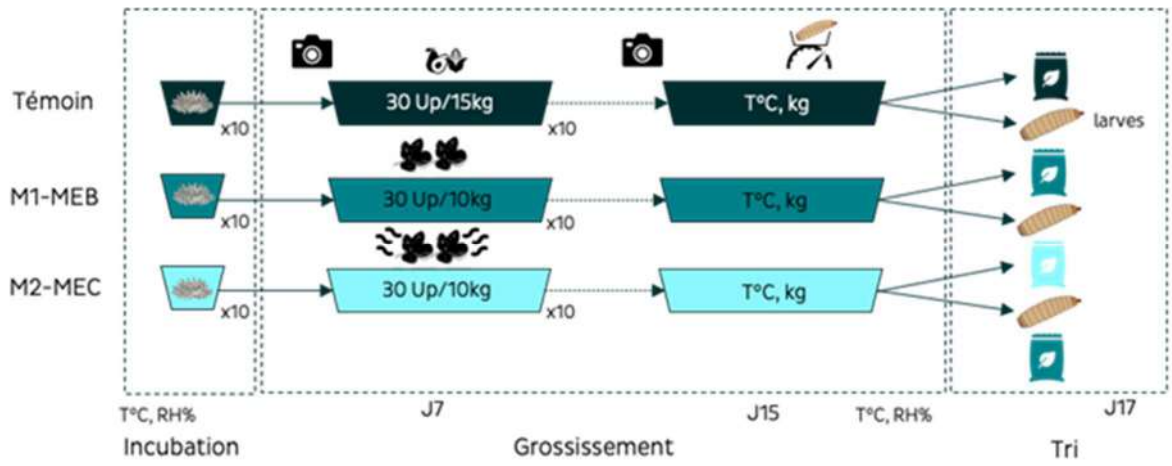

Figure 17 : représentation schématique des modalités testées lors de la deuxième phase d'essais (Cycle Farms)

Le protocole de « précuisson » appliqué à la modalité M2-MEC est identique à celui décrit en première expérimentation. Cependant, lors de cette expérimentation, il est décidé de préparer des lots de 10 kg de moules avant leur exécution afin de préciser l'effet de cette précuisson sur la masse des individus mis en croissance. Il apparait que, après le passage au bain marie à 80°C puis égouttage des résidus, cette masse de 10 kg est réduite à une moyenne de 8,5 kg de matière effectivement mise en croissance. Cette perte en masse correspond selon Cycle Farms à la perte en eau suite à l'ouverture des moules lors de la cuisson. Les données de rendements et perte en masse calculées plus bas sont donc faites sur cette base de 8,5kg de matière mise en croissance pour la modalité M2-MEC.

II.C.2. Résultats de la deuxième phase

II.C.2.1. Caractéristiques des lots de moules testés

250 kg de moules provenant de la Plaine sur Mer (44) sont transportés le 02 septembre vers le site d'expérimentation de Beaufort (figure 18). Le lot est issu d'élevage en mer ayant subi un premier tri sur le bateau. Il est plus homogène que ceux utilisés lors de la première phase expérimentale.

Figure 18 : photos du transfert de moules et du lot concerné (Smidap)

II.C.2.2. Résultats

- *Environnement*

Comme dans la première expérimentation, l'environnement est monitoré pour éviter tout biais d'interprétation. Le graphique de la figure 19 ci-après reprend les variables environnementales jusqu'au tri des bacs.

La température a pu être maintenue entre 27°c et 32°c dans l'espace de production durant toute la durée de l'expérimentation. De même, l'hygrométrie suit une courbe standard de l'itinéraire technique mis en place par Cycle Farms avec une humidité relative comprise entre 50 et 60% durant la phase d'incubation et entre 30% et 45% durant la phase de grossissement (légèrement inférieur à la première série). Ces données sont dans les valeurs ciblées par Cycle Farms et permettent de ne pas considérer la variable environnementale comme une variable explicative des résultats de cette seconde série expérimentale.

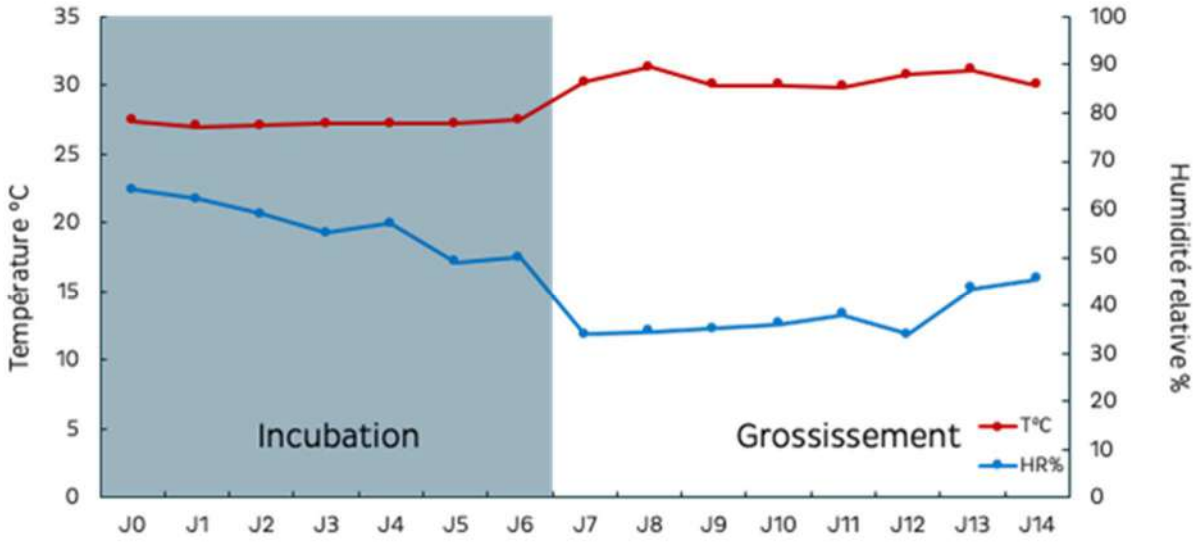

Figure 19: température et hygrométrie dans l'espace de production durant l'expérimentation

❖ *Dynamique de dégradation des bacs*

Lors de cette expérimentation, une différence de temps est observée pour arriver à une séparation satisfaisante de toutes les modalités. Le tableau 4 résume le temps passé en croissance pour chaque modalité avant leur tri ainsi que les pourcentages de perte en masse observées lors du tri.

Tableau 4: temps de croissance et perte en masse

Modalités	M1-MEB	M2-MEC	Témoins
Temps de croissance avant le tri (Jours)	11	7	8
% perte en masse	57,8	49,9	71,1

Les pourcentages de perte en masse sont plus élevés que lors de la première série expérimentale indiquant ainsi que le paramétrage de croissance semble plus adapté. La différence de temps entre les modalités M1 et M2 pourrait correspondre à la masse en eau supplémentaire pour les moules brutes (MEB) qui a été évacuée lors de la précuisson dans la modalité moules cuites (MEC). Dans tous les cas, **la valeur de perte en masse de 50% permet une séparation, bien que complexe, des larves et des résidus de moules**.

❖ *Croissance des larves*

Le graphique ci-dessous montre les masses de 30 larves à J13 correspondant au pic de croissance dans les conditions standards. Ces résultats restent des tendances, le nombre de répétition (10) est trop faible pour permettre une analyse statistique pertinente.

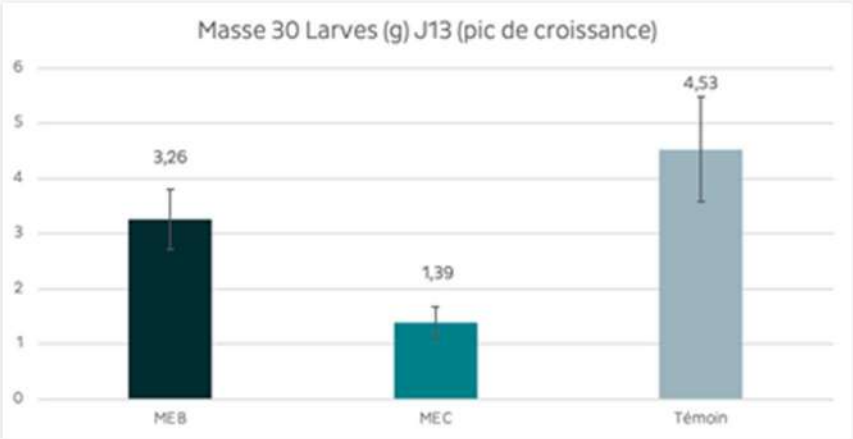

Figure 20 : masse de 30 larves (g) à J13 (écarts-types)

Plusieurs constats peuvent être formulés :

- Les valeurs de masses de 30 larves à J13 pour les témoins sont comparables entre les deux séries expérimentales (4,62g vs 4,53g).
- Pour la modalité MEB : la masse de 30 larves à J13 sur cette seconde série est bien supérieure à celle observée sur la première série (3,26g vs 1,65g).
- Pour la modalité MEC : d'une part, la valeur de masse à J13 est bien inférieure à la valeur de MEB (1,39g vs 3,26g). Par ailleurs, la valeur est également plus faible que dans la première série expérimentale (1,39g VS 1,64) même si les ordres de grandeurs sont comparables.
- La modalité MEB est le plus proche du témoin alors que la modalité MEC en est très éloignée.

En complément de ce premier graphique, les valeurs de masse de 30 larves lors du tri sont décrites dans la figure 21 ci-dessous. Pour rappel, la date de tri est différente pour chaque modalité :

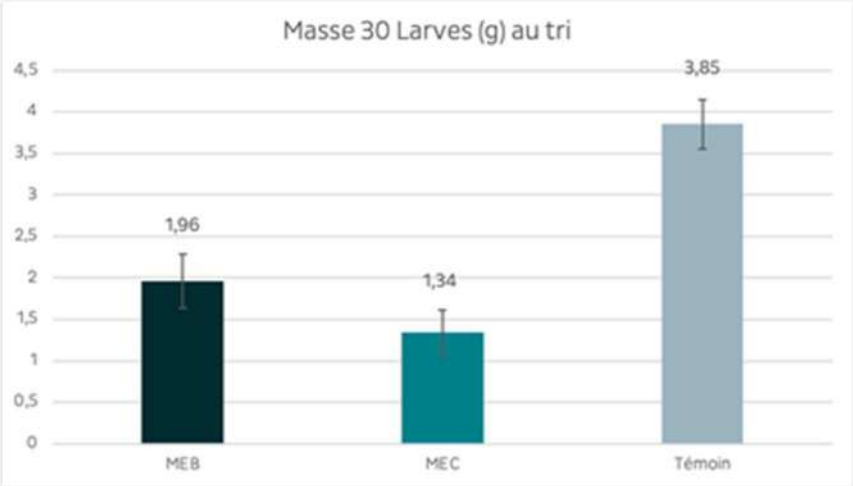

Figure 21 : masse de 30 larves (g) lors du tri (écarts-types)

- Pour la modalité MEB : la valeur a diminué de manière conséquente entre J13 et J18, jours du tri. Cela confirme d'une part que J13 correspond certainement à un pic de croissance et d'autre part que le bac aurait certainement dû être trié à J16 ou J17 (durant le weekend) afin d'optimiser encore plus le rendement décrit plus loin.
- Pour la modalité MEC : il n'existe pas de différence entre J13 et J14 jour du tri, ce qui est cohérent.
- Pour la modalité témoin : on observe une perte cohérente entre le pic et le tri du bac représentatif de nos conditions standards.

❖ *Tri et rendements*

Pour la séparation entre les résidus de moules et les larves des modalités MEB et MEC, Cycle Farms a utilisé une méthode passive. Cette méthode, consistant à laisser les larves quitter d'elle-même le bac de croissance une fois déposées sur une grille perforée, permet un comptage précis du nombre d'individus et un calcul de rendement. Suite aux essais, il semble qu'une grille de 2,5mm en mailles carrés soit la plus adaptée à la séparation sur ce paramétrage de croissance considérant la taille des larves en fin de cycle. Cette méthode peut tout à fait être transposée en une méthode « active » par utilisation d'un dispositif vibrant, représentatif d'un process de séparation industriel.

En regardant les rendements (Masses larves récoltées / Masse initiale de ration fournie en croissance) en larves observés lors du tri, les constats sont (figure 22) :

- Pour les modalités témoins : la valeur de 14,30% est tout à fait représentative de notre élevage et de ses conditions standards.
- Pour les modalités MEB et MEC : il n'existe pas de différence significative de rendement entre les deux modalités. Ces valeurs de rendements sont tout à fait satisfaisantes considérant la qualité de la matière première.

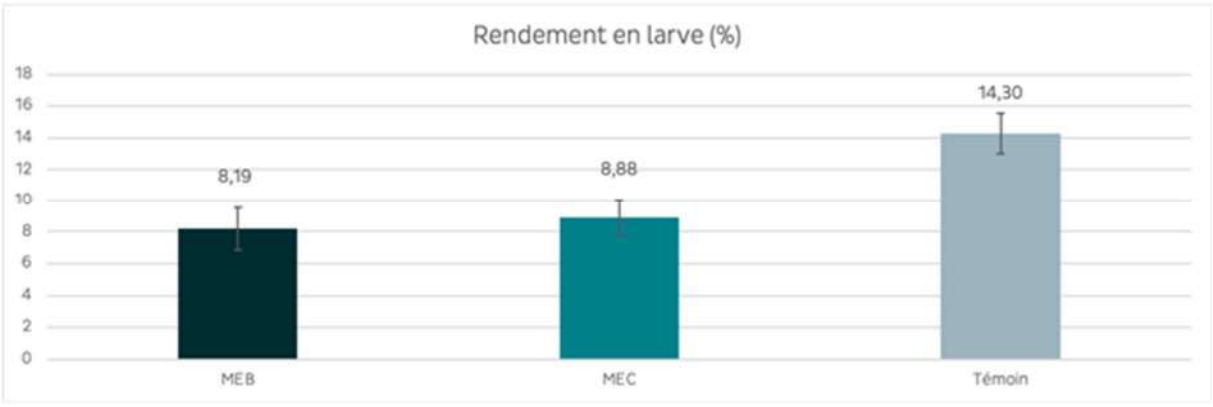

Figure 22: rendement en larves (% masse initiale de ration) (écarts-types)

A partir de ces données, un taux de survie peut être calculé permettant de compléter les informations précédemment fournies sur la bonne croissance des larves dans le substrat. La figure suivante présente les taux de survie en fonction des modalités (figure 23). Ce taux de survie est donc basé sur une quantité d'individus initiale correspondant aux 30 UP comme décrit dans le protocole expérimental.

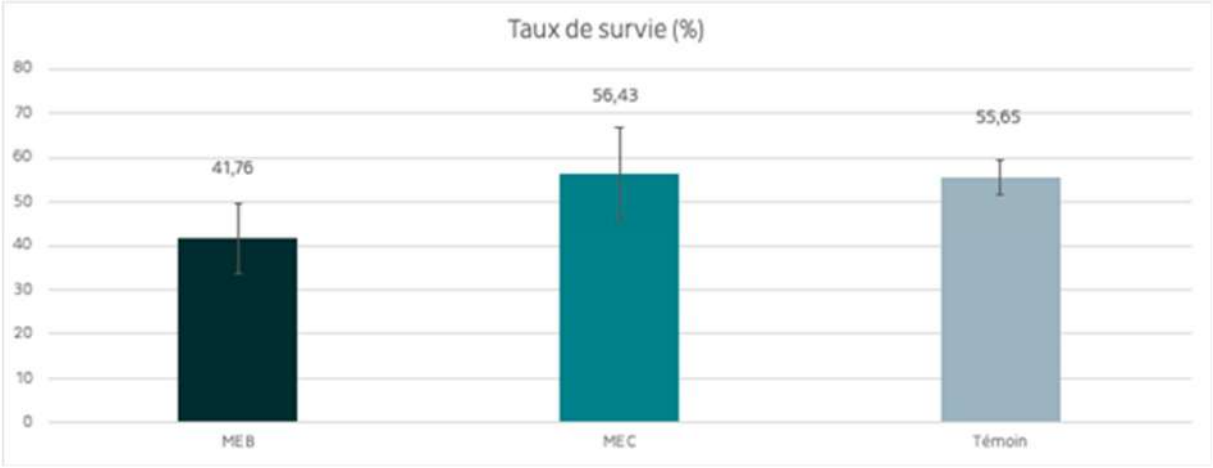

Figure 23: taux de survie en larve (% nombre d'individus inoculés) (écarts-types)

Les taux de survie des modalité MEC et témoins sont comparables et représentatifs des conditions standards chez Cycle Farms.

La modalité MEB présente un taux de survie plus faible que les deux autres modalités. Cela peut cependant s'expliquer par le tri trop tardif de la modalité MEB. Un taux de survie de 40% reste satisfaisant dans ces conditions expérimentales.

En complément, la figure 24 présente le rendement en résidu. Ce dernier est calculé par ratio entre la masse de résidu lors du tri et la masse initiale de ration distribuée aux larves.

Figure 24 : masse finale en résidu (% masse initiale de ration) (écarts-types)

- Le rendement en résidu (= fertilisant) pour la modalité témoin est tout à fait cohérente avec les standards de Cycle Farms.

- Le rendement en résidu pour les modalités MEB et MEC est bien supérieur à la modalité témoin. Cela traduit de la quantité de matière effectivement non consommable par les larves dans les moules hors tailles due à la présence des coquilles.

- Le pourcentage de résidus pour la modalité MEC est bien supérieur au pourcentage de résidu de la modalité MEB. Cela montre que la dégradation de la matière sur la modalité MEC est moins importante que dans la modalité MEB.

Comme dans l'expérimentation précédente, la qualité de « nettoyage des moules » a été évaluée par comptage des moules « intactes » et des moules « propres » (tableau 5).

Tableau 5: pourcentages de moules « propres »

Modalités	M1-MEB	M2-MEC
Pourcentage moules « Propres » (%)	98	69

Les modalités utilisant les moules brutes, sans précuisson, présentent de loin le meilleur taux de dégradation de la matière organique, confirmant les tendances observées dans les résultats précédents. Une des interprétations possibles réside dans le fait que les moules ouvertes suite à la précuisson sèchent plus rapidement sur les couches supérieures du bac rendant ainsi une partie non négligeable de la matière non accessible aux larves et justifiant des performances de croissance plus faibles pour cette modalité.

II.C.2.3. Analyses microbiologiques des larves

Comme décrit dans le projet, les larves sont analysées à la suite de leur récolte (tableau 6). Au démarrage du projet, il a été décidé de la liste suivante de micro-organismes étant donné les critères appliqués à l'alimentation animale et humaine à base d'insecte.

Tableau 6 : résultats des analyses microbiologiques par modalité

	Larves Moule crue 1 (MEB1)	Larves Moule crue 2 (MEB2)	Larves Moule crue 3 (MEB3)	Larves Moule cuite 1 (MEC1)	Larves Moule cuite 2 (MEC2)	Larves Moule cuite 3 (MEC3)	Larve Témoin
E coli positive /g	40	< 10	<40	> 15 000	8700	13 000	1 100
Entérobactérie (37°c) /g	> 15 000	> 15 000	> 15 000	> 15 000	> 15 000	> 15 000	<10
Salmonelle /25g	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté
Bacillus Céréus	Non interprétable	Non interprétable	Non interprétable	Non interprétable	Non interprétable	Non interprétable	< 100
Listéria monocytogenes /25g	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté
Listéria spp /25g	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté
Clostridium Perfringens /g	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté
Staphylocoques (37°c)/g	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ces résultats microbiologiques :

- Les larves issues des modalités MEC (moules crue) sont moins contaminées à *Escherichia coli*, à des niveaux même inférieurs au témoin, en comparaison aux larves nourries sur des moules cuites.

- Toutes les modalités élevées sur des moules sont contaminées aux entérobactéries qu'il faut peut-être reliées à la contamination initiale de la moule qui avait pu être identifiée lors des tests microbiologiques réalisés en début d'expérience. Si les entérobactéries ne sont pas un inhibiteur de la croissance des larves, elles sont en revanche à considérer dans les critères d'alimentation animale.

- Toutes les modalités élevées sur des moules sont contaminées à *Bacillus cereus* à un niveau qui rend les résultats non interprétables et donc significativement supérieurs au témoin.

- Pour les autres espèces, ces dernières ne sont pas détectées ou inférieures à la norme.

Les larves issues des modalités « moules crues » présentent une contamination plus faibles sur *E.coli* que les larves modalité « moules cuites », poussant de nouveau à favoriser cette modalité. Il est important de noter ici que les espèces contaminantes sont relativement classiques en élevage d'insecte mais également que les échantillons ont été envoyés sans aucun process préalable. La contamination peut donc venir également de résidus de moules présents sur la cuticule des insectes.

Concernant la contamination à *Bacillus Cereus* en particulier, certains variants sont pathogènes alors que d'autres peuvent être utilisés en alimentation animale comme réducteur de *Salmonella enterica* (Vilà *et al*., 2009). Cela rend impossible la conclusion sur la pathogénicité de cette contamination et il sera nécessaire dans un second temps d'aller jusqu'à l'identification de la souche spécifique pour statuer.

II.D. Conclusions du volet technique

La seconde série expérimentale confirme bien que l'utilisation de larves d'*Hermetia illucens* pour le retraitement des moules hors tailles est techniquement possible. Elle souligne aussi l'importance d'un tri en amont des rebuts afin de limiter l'hétérogénéité des lots. Cette seconde série expérimentale nous permet également de faire un choix sur l'itinéraire technique le plus adapté à l'utilisation des larves d'*Hermetia illucens* dans le cadre du retraitement des moules hors tailles. En effet, en considérant l'ensemble des résultats et en particulier les données de rendements et de « nettoyage » des moules, il semble finalement que le protocole de précuisson ne soit pas nécessaire pour obtenir des performances de dégradation satisfaisantes. De plus, ce protocole de précuisson, bien que relativement simple, reste une étape de process supplémentaire consommatrice de temps et nécessitant des investissements non négligeables. Les données d'analyses microbiologiques ne permettent pas de conclure strictement sur l'impact de la précuisson même si la tendance est favorable à la modalité sans précuisson en particulier sur *Escherichia coli*. Aussi, et toujours dans un souci de simplification du système potentiel, les analyses microbiologiques poussent de nouveau à favoriser le système de bioconversion le plus simple et direct.

Dans tous les cas, si des étapes de transformation sont mises en place dans la perspective de valorisation des larves, ces étapes devront être définies afin de réduire à des taux acceptables les charges microbiologiques décrites ici.

Par ailleurs, on constate grâce à l'ensemble de cette expérimentation, que les rendements en larve sur cette matière sont loin d'être négligeables. Cela amène à soulever la question de la valorisation de ces dernières afin de tenter de mettre un système de retraitement visant à l'équilibre financier au minimum. Les résultats d'analyses amèneront des arguments sur le process à appliquer aux larves en cohérence avec les différentes pistes de valorisation. De même, le process à appliquer aux coquilles de moules une fois nettoyées et leur valorisation doivent être étudiés comme une source de revenus potentiels d'une unité de retraitement.

À la suite de cette faisabilité technique, il est donc nécessaire d'avoir une première approche sur la faisabilité financière et économique d'un tel projet. L'itinéraire technique appliqué doit être précisé permettant d'une part, de définir les premiers éléments du cahier des charges de l'unité de retraitement, son chiffrage en investissement et en fonctionnement et d'autre part, de poser des hypothèses viables sur la valorisation des produits ainsi obtenus.

III. Volet faisabilité et valorisation des rebuts de moules

Cette thématique de gestion des sous-produits devient une vraie priorité pour les professionnels et les responsables des CRC. Même si les rebuts coquillers sont considérés comme sous-produits animaux ou coproduits animaux et donc les entreprises mytilicoles ne sont pas dans l'obligation de les valoriser, les contrôles en mer sur les épandages de moules sous tailles ont tendance à se développer depuis quelques temps (Thomas, 2021). Depuis cinq ans, de nombreuses études sont menées dans le but de trouver des solutions de valorisation pour les producteurs de moules. Cependant, la difficulté de gestion des sous-produits de moules se retrouve sur tous les bassins de production mytilicole français (MARCHAND, 2015). Pour le moment, aucun territoire n'a trouvé de solution satisfaisante en termes de traitement ou de valorisation à l'exception du secteur de l'étang de Thau dans le sud de la France (cf. III.C.1).

III.A. Rappels réglementaires

III.A.1. Valorisation des rebuts de moules

Le règlement européen (CE) n°1069/2009 classe les sous-produits animaux en trois catégories sur la base de leur risque potentiel pour la santé humaine et animale et l'environnement. Il définit la manière dont les matières de chaque catégorie doivent ou peuvent être éliminées ou valorisées pour certains usages dans le souci de maintenir un niveau élevé de protection de la santé publique et animale. Toutes les matières animales ou d'origine animale (terrestres ou aquatiques), dès lors qu'elles ne sont pas ou plus destinées à l'alimentation humaine, sont par définition concernées par cette réglementation. Les matières de la catégorie 1 présentent un risque important pour la santé publique et celles de catégorie 2 un risque moins important pour la santé publique. Les matières de catégorie 3 ne présentent que peu de risque et peuvent être valorisées en alimentation animale.

L'article 10-k-i indique que les carapaces de crustacés ou coquilles de mollusques présentant des corps mous ou de la chair ne présentant aucun signe de maladie transmissible par ces matières aux êtres humains ou aux animaux sont classifiés Sous-Produit ANimal SPAN catégorie 3. Ils peuvent être valorisés à destination de l'alimentation animale y compris pour les animaux d'élevage et sans préjudice d'autres réglementations après application d'un traitement approprié dans des installations de transformation agréées (Anonyme, 2017).

Le règlement européen ne s'applique pas aux carapaces et mollusques dont le corps mou et la chair ont été enlevés, ni aux déchets de cuisine et de table s'ils sont destinés à être transformés par une stérilisation sous pression ou à être transformés en biogaz ou à être compostés.

Les débouchés possibles pour ces sous-produits de catégorie 3 indiqués dans la réglementation européenne citée plus haut sont :

- ✓ Incinération ou co-incinération avec ou sans transformation préalable.
- ✓ Enfouissement en décharge autorisée, après transformation.
- ✓ Transformation, sauf dans le cas de matières de catégorie 3 altérées :
  - o Pour la fabrication d'aliments pour les animaux d'élevage.
  - o Pour la fabrication d'aliments pour animaux familiers mis sur le marché.
  - o Pour la fabrication d'engrais organiques ou d'amendements mis sur le marché.
- ✓ Production d'aliments crus pour animaux familiers mis sur le marché.
- ✓ Conversion en compost ou en biogaz.
- ✓ Utilisation comme combustibles, avec ou sans transformation préalable.

A partir de ces éléments réglementaires, la piste d'un traitement des rebuts par les larves de mouche est possible. Par contre, la valorisation des larves nourries avec des moules est moins évidente.

III.A.2. Valorisation des insectes

La première partie de PréTIMOUV montre qu'un traitement de ces rebuts par des larves de mouches soldats noirs est techniquement possible avec une contrainte principale, un pré triage des sous-produits collectés en amont. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les atouts et les contraintes d'un traitement de rebuts de moules par des insectes si cette démarche devait se développer, sans oublier les sources de valorisation. C'est une première approche technico-réglementaire avec plusieurs scénarios évoqués qu'il faudra mettre en perspective avec d'autres solutions actuelles ou potentielles.

Cette démarche nécessiterait la construction de sites de stockage et de traitement de ces moules avec un coût d'investissement important. La valorisation des coquilles des moules et des larves de mouches permettrait de d'amortir au moins partiellement ces coûts voire d'assurer un équilibre financier, le tout à mettre en perspective

avec les autres solutions potentielles de traitement. Avant d'établir des scénarios, il est nécessaire de faire un point réglementaire sur la valorisation des insectes.

Il s'agit de déterminer si la valorisation de larves de BSF nourries avec des moules est réglementairement possible.

II.A.2.1. Statut réglementaire des larves

Les **larves de BSF** abattues sont des sous-produits animaux de **catégorie 3** d'après le règlement 1069/2009 :

- Point I) « Les invertébrés aquatiques et terrestres autres que les espèces pathogènes pour l'être humain ou les animaux ».

Les larves de BSF vivantes n'entrent pas dans le périmètre de la réglementation sanitaire relative aux sous-produits animaux. On peut éventuellement interpréter les insectes vivants comme un « produit primaire » : Selon la définition du règlement 852/2004 : « produits primaires sont les produits issus de la production primaire, y compris les produits du sol, de l'élevage, de la chasse et de la pêche ».

Ils sont aussi cités au point 9.16.1 du catalogue des matières premières pour aliments des animaux (règlement (UE) n°68/2013) : « Invertébrés terrestres vivants, à tous les stades de leur vie, d'espèces autres que les espèces ayant des effets nocifs pour les végétaux, les animaux ou la santé humaine ».

II.A.2.2. Utilisation possible des larves vivantes

❖ *Alimentation animale*

Les insectes figurent au catalogue des matières premières des aliments pour animaux.

Selon le Règlement 68/2013, Annexe A, Point 2 : Les matières premières pour aliments des animaux qui consistent en sous-produits animaux ou qui contiennent de tels sous-produits doivent satisfaire aux exigences du règlement (CE) no 1069/2009 du Parlement européen et du Conseil et du règlement (UE) no 142/2011 de la Commission et leur utilisation peut faire l'objet de restrictions en vertu du règlement (CE) no 999/2001 du Parlement européen et du Conseil. Les exploitants du secteur de l'alimentation animale faisant usage d'une matière première pour aliments des animaux inscrite dans le catalogue veillent à la conformité de ladite matière à l'article 4 du règlement (CE) n° 767/2009.

Il semble donc que les insectes vivants doivent se plier aux mêmes contraintes réglementaires que les insectes morts.

[1] (Modifié par le règlement 2017/1017 ; Dispositions générales, point 2)

[1] Note de la DGAL 2019

❖ *Cas particulier des appâts de pêche*

L'usage comme appât vivant n'est pas couvert par le règlement : les vers, provenant d'élevage en verminières, sont vivants et maintenus vivants jusqu'à leur utilisation. **La fabrication d'appât de pêche est considérée, à date, comme une fabrication d'aliment pour animaux telle que définie au règlement (CE) n°183/2005**. Cette filière n'utilise pas que des matières issues d'invertébrés aquatiques mais aussi des matières aquatiques ou des PAT telles que prévues au règlement (UE) n°142/2011 (annexe X, chap. III). Dans ce cadre, des conditions nationales pourront être fixées au titre de l'alimentation animale. Elles ne le sont pas à ce jour.

Cependant, il est précisé (Règlement 1069/2009, article 18.h) que les insectes élevés pour servir d'appâts de pêche peuvent être nourris avec des matières de catégorie 3 et certaines matières de catégorie 2. **On peut donc en conclure que les restrictions du règlement 2017/893 ne s'appliquent pas à la production d'appâts de pêche (espèces, alimentation, destination) et que ces asticots pourraient être nourris avec des moules** (puisque ce sont des cat 3).

La production d'asticots pour appâts de pêche doit se faire avec une autorisation spécifique comme décrite dans l'arrêté du 8 décembre 2011 et du 28 février 2008 relatif aux modalités de délivrance de l'agrément sanitaire et de l'autorisation des établissements visés par le règlement (CE) n° 1774/2002 du Parlement européen et du Conseil du 3 octobre 2002 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine.

II.A.2.3. Utilisations des insectes morts, séchés ou non

Les larves mortes sont des sous-produits animaux de catégorie 3. Tout établissement manipulant des sous-produits animaux doit être enregistré, et parfois agréé.

Les sous-produits doivent être mis sur le marché en respectant le règlement 767/2009 et collectés / entreposés en respect du règlement 183/2005 annexe II (Règles régissant les installations et équipements, le personnel, la production, la qualité, l'entreposage, la tenue de registres…).

L'utilisation de larves mortes (et donc sous-produits animaux de catégorie 3) est possible avec ou sans transformation, et cela va modifier les utilisations permises :

❖ *Non transformés*

Il n'est pas autorisé d'utiliser des sous-produits animaux dans l'alimentation des animaux d'élevage sans transformation préalable en aquaculture.

La déshydratation des insectes n'est pas une transformation au sens du règlement (CE) n°1069/2009. Les larves séchées sont donc actuellement considérées comme des sous-produits non transformés.

Si elles ne sont pas transformées, alors les larves peuvent être :

- ❖ Converties en biogaz ou en compost (R1069/2009 ; article 14 point f), en respectant les exigences de l'annexe V du règlement 142/2011 (exigences relatives à l'usine, aux méthodes, aux matières, et aux résultats).
- ❖ Utilisées comme combustibles (R1069/2009 ; article 14 point i).

❖ Utilisées dans la fabrication de produits dérivés (sous réserves des règlementations correspondantes et citées dans le 1069/2009) tels que :

- Produits cosmétiques
- Dispositifs médicaux
- Médicaments vétérinaires
- Produits pour l'alimentation des animaux à fourrure

❖ Utilisées pour l'alimentation de **certains animaux** au titre de l'article 18 du règlement 1069/2009, sous réserve d'obtenir une autorisation au titre de l'arrêté du 8 décembre 2011 et du 28 février 2008 :

- Pour l'alimentation des :
  - ➢ Animaux de zoo
  - ➢ Animaux à fourrure
  - ➢ Chiens provenant d'élevage ou meutes reconnus
  - ➢ Chiens et chats des refuges
  - ➢ Asticots et vers destinés à servir d'appâts de pêche

Pour ces animaux, il faut respecter les exigences décrites dans le règlement 142/2011 Annexe VI Chapitre II Section 1, à savoir :

- Respecter les conditions de transport et collecte décrites dans l'annexe VIII ; chap 1 ; section 1 de ce règlement :
- Être transportés dans des emballages neufs ou des conteneurs ou véhicules étanches et couverts
- Les véhicules et conteneurs réutilisables en contact avec les sous-produits animaux doivent être gardés propres
- Les conteneurs réutilisables doivent, si possible, être affectés à un type de sous-produit pour éviter les contaminations croisées. Sinon ils doivent être suffisamment nettoyés et désinfectés
- Les emballages doivent être éliminés par incinération
- Traiter les sous-produits en les dénaturant (coloration indélébile), les stérilisant sous pression, ou avec un autre moyen autorisé
- Si elles sont destinées à un autre chose qu'un utilisateur final, le destinataire doit être enregistré

- Elles peuvent aussi être utilisées simplement avec l'autorisation susmentionnée, pour l'alimentation des :

    - Animaux de cirque
    - Reptiles et rapaces
    - Animaux sauvages (hors sous-produits catégorie 1)

✓ *Transformés*

La transformation des sous-produits animaux nécessite un agrément sanitaire d'après l'article 24 du règlement 1069/2009. La transformation doit être effectuée selon l'une des méthodes décrite dans le règlement 142/2011 (conditions de températures et de pression définies, ou méthode de validation précise).

Les usines de transformation doivent répondre à des règles strictes de séparation des matières, d'équipements, et de procédés (Règlement 142/2011, annexe IV).

Une fois transformées les larves deviennent des protéines animales transformées (PAT).

Les PAT peuvent alors être utilisées pour :

- La fabrication **d'aliments pour l'aquaculture**, depuis le 1er juillet 2017 et sous réserve que :

    - Les insectes sont issus d'une des 7 espèces autorisées (Règlement 2107/893) : (mouche soldat, mouche domestique, ténébrion meunier, petit ténébrion mat, grillon domestique, grillon domestique tropical, grillon des steppes).
    - Les insectes d'élevage ne peuvent être nourris qu'avec (Règlement 2107/893) : farines de poisson, produits sanguins de non ruminants, phosphates bi et tricalciques d'origine animale, protéines hydrolysées de non ruminants ou de cuirs et peaux de ruminants, gélatine et collagène dérivés de non-ruminants, lait et produits laitiers, œufs et ovoproduits, miel, graisses fondues.
    - Être produites dans des usines de transformation agréées au titre de l'article 24.1.a du règlement (CE) n°1069/2009 (donc respectant les prescriptions des annexes IV et X, chap II, section 1 du règlement (UE) n°142/2011) et uniquement réservées à ce type de PAT.
    - Les usines de fabrication d'aliments composés pour animaux utilisant ces protéines doivent être autorisées et être dédiées à la production d'aliments composés pour animaux d'aquaculture, sauf dérogation (La dérogation s'applique en cas de fabrication d'aliments composés pour animaux d'aquaculture et d'aliments composés pour autres animaux d'élevage. Elle nécessite une inspection préalable et des analyses régulières des aliments composés destinés aux animaux d'élevage autres que les animaux d'aquaculture).
    - Des mentions d'étiquetage particulières sont appliquées sur le document d'accompagnement ou l'étiquette des aliments composés.

- La fabrication d'aliments pour animaux à fourrure, sous réserve de :

  - S'assurer d'un approvisionnement sûr (matières ne comportant aucun risque pour la santé publique et animale, collectées et transportées sans risque sanitaire) => On peut supposer que des insectes respectant les conditions du règlement 2017-893 (alimentation et espèces) sont des approvisionnements « sûrs » (interprétation).

- La fabrication d'aliments pour animaux familiers, sous réserve

  - Qu'ils soient fabriqués dans un établissement agréé.

  - Qu'ils garantissent la maitrise des risques sanitaires par un traitement ou un approvisionnement sûr et qu'ils satisfassent aux exigences règlementaires. Ces exigences sont décrites dans le règlement 142/2011 ; Annexe XIII ; chapitre II.

  - Interprétation : L'agrément peut se demander en se basant sur une méthode de transformation décrite dans l'annexe XIII ; chapitre II, point 3 (mentionnant la dessication par exemple, ou une cuisson a cœur à 90°C) et le faisant valider au titre de la méthode 7 décrite dans l'annexe IV, chapitre III.

- La fabrication d'engrais organiques ou d'amendements, sous réserve de :

  - Fabriquer ces produits dans des conditions de stérilisation ou d'autres conditions pour prévenir les risques sanitaires. Cela renvoie indirectement aux méthodes décrites dans le règlement 142/2011.

  - D'exclure l'utilisation alimentaire par un conditionnement ou une composition spécifique, un mélange avec d'autres composants ou un marquage spécifique.

  - Fabriquer ces produits dans un établissement agréé ou enregistré.

  - Suivre les directives de transformation décrites dans le règlement 142/2011 à savoir respecter l'une des méthodes de transformation de 1 à 5 ou la 7 décrites dans ce règlement.

  - S'assurer que l'élimination des agents pathogènes est effectuée avant la mise sur le marché.

  - ✓ *Graisse d'insectes*

Aucune restriction n'est donc prévue à ce titre pour les graisses fondues issues d'insectes, qui peuvent être utilisées dans l'alimentation des animaux d'élevage et des animaux familiers. Les graisses fondues couramment dénommées « huiles d'insectes » doivent être produites conformément à l'annexe X du règlement (UE) n°142/2011 (chapitre II, section 3). Elles doivent provenir d'insectes de catégorie 3, ayant subi une transformation et respecter les critères « alimentation animale » en ce qui concerne les substances indésirables, contaminants (ex pesticides).

✓ *Cas particulier des snacks pour volailles*

La commercialisation d'insectes déshydratés à destination des volailles se développe. Or les volailles sont des animaux d'élevage. Les insectes morts, quelle que soit leur forme, ne sont pas autorisés dans l'alimentation des volailles. **Cette activité n'est donc pas autorisée.**

II.A.2. 4. Conclusion

Les larves d'insecte élevées sur les déchets de moules ne peuvent pas être utilisées en alimentation aquacole. Elles ne peuvent être fabriquées que dans des établissements agréés ou enregistrés, et à des fins de :

- Utiliser la graisse.
- Hydrolyser les protéines et les utiliser en alimentation animale (y compris aquacole dans ce cas).
- Être utilisées comme appâts de pêche.
- Être utilisées pour nourrir des animaux autres que des animaux d'élevage producteurs de denrées alimentaires (animaux familiers, animaux à fourrure, animaux de zoos, NACs, chiens de meutes, chiens et chats de refuges, verminières).
- Fabriquer des engrais ou du compost ou du biogaz.
- Être brulées.

Pour ce genre de valorisation, les pistes les plus prometteuses pour ce projet serait donc :

• Un producteur d'insecte autorisé qui fait des appâts de pêche, et qui a donc le droit de donner les moules à ses larves (autorisation de l'article 18 du règlement 1069/2009) => France insecte ou Michel SAS par exemple, des verminières. Des essais menés sur les larves mortes par des professionnels du secteurs n'ont pas donné de bon résultats (com. Pers. Verminières de l'Ouest). Cependant, la farine produite pourrait intéresser des fabricants d'aliments de pêche type « bouillettes ».

• Un producteur d'insecte agréé ou autorisé, qui ne destine pas ses larves à l'aquaculture, mais uniquement à d'autres animaux non producteurs de denrées alimentaires (animaux familiers, à fourrure, etc). Dans ce cas les restrictions du règlement 2017/893 ne s'appliquent pas.

• Un producteur d'insecte qui travaille en prestation pour le traitement et les larves sont abattues.

Il est néanmoins important de préciser que les moules ne sont pas réglementairement identifiés comme substrats nourriciers pour des larves de BSF destinées à l'alimentation aquacole, simplement en l'absence de demandes. Rien n'empêche une évolution de la réglementation sur le sujet en apportant certaines garanties.

III.B. Le scénario « insectes »

III.B.1. Eléments contextuels

Un traitement des rebuts de moules par les larves de BSF est techniquement possible. Plusieurs scénarios peuvent se mettre en place en fonction de la valorisation des larves de mouches et des coquilles. Dans cette étude, la première approche technico économique va se baser sur la piste la plus défavorable, c'est-à-dire sans valorisation des produits issus de cette bio-conversion (coquilles et larves). Il s'agit de d'estimer les coûts potentiels de cette orientation par rapport à d'autres pistes de traitement.

Il faut rappeler que la quantité annuelle de ces co-produits est de 2 600 T. dans les Pays de la Loire avec des variations selon les secteurs mytilicoles de 250 à 1200T (tableau 7).

Tableau 7 : moyennes de quantités de rebuts de moules par secteur ligérien (CRC PDL)

Résidus coquillés mytilicoles	
Unité	***T.***
La Plaine sur Mer	1 200
Baie de Bourgneuf (continent : Bouin – Beauvoir sur mer)	250
Ile de Noirmoutier	350
Sud Vendée (Aiguillon sur mer)	800
Territoire CRC	**2 600**

Une fois la coquille nettoyée et le byssus retiré, la chair (pied, bouche, manteau, muscles, système digestif et système respiratoire de la moule, etc.) représente environ 30% du poids de la moule, tandis que la coquille en forme 40%. L'eau contenue dans le coquillage représente autant de masse que la chair. Potentiellement, la filière conchylicole pourrait récupérer un peu plus de 1 000 T. par an de coquilles à valoriser. La coquille de moules est formée de couches de matières minérales et organiques (la conchioline), celles-ci servant de ciment entre les différentes couches minérales (SRCNormandie, 2009).

Le ramassage de ces sous-produits est saisonnier entre le mois d'avril et le mois d'octobre. Il faudrait créer trois plateformes de stockage et de traitement dans les secteurs de la Plaine/Mer, de Noirmoutier et de l'Aiguillon. Le dimensionnement va varier selon les sites de 10T. à 30T. En pleine saison de moules, les professionnels peuvent ramener des rebuts de moules tous les jours, environ 3 à 4 T. par jour, soit 10 à 28T par semaine selon les sites.

La réglementation* liée aux sous-produits animaux classés en catégorie 3 implique pour le projet de valorisation (tableau 8) :

- Que les conditions de stockage et de transport (réfrigération) permettent un maintien du produit à valoriser en catégorie 3.
- Que ces produits soient rapidement enlevés,
- Que l'installation de traitement de ces sous-produits ait reçu un agrément sanitaire délivré par le Préfet du département d'implantation.

Ces installations nécessiteraient un agrément auprès de la Préfecture.

*Arrêté du 8 décembre 2011 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés en application du règlement (CE) n° 1069/2009 et du règlement (UE) n° 142/2011

III.B.2. Etude de cas d'une unité de retraitement de moules sans valorisation

Une première approche technico économique peut être réalisée sur une des trois plateformes de retraitement de moules sous tailles. Ce premier travail doit nous permettre d'estimer les coûts d'investissement et de fonctionnement de ce type d'approche à partir d'un scénario défavorable c'est-à-dire sans valorisation des coquilles ni des larves.

II.B.2. 1. Hypothèses de base

Des hypothèses hautes sont retenues sur les volumes de rebuts ramenés à terre :

- ✓ Pourcentage de rebuts constant : 50% (hypothèse haute).
- ✓ Durée de la saison : 22 semaines soit 5 mois et demi (mi-avril à fin octobre)
- ✓ Quantité de rebuts par semaine : 28 T.
- ✓ Quantité par jour : 4 T.
- ✓ Lancement de cycle 1 fois par semaine (stockage temporaire).

Le protocole de traitement reprend dans les grandes lignes les caractéristiques des tests techniques (2ème test) réalisées :

- ✓ Poids par bac d'élevage : 10 kg de rebuts
- ✓ Nombre d'individus moyen en fin de retraitement : 15 000
- ✓ Poids moyen des individus en fin de retraitement : 65 mg
- ✓ Durée du retraitement : 7 jours
- ✓ Système de production = système de production Cycle Farms

II.B.2. 2. Besoin en juvénile hebdomadaire

- ✓ Nombre total d'unité de 10kg/semaine = 2 800
- ✓ Nombre total d'individus inoculés par bac = 15 000
- ✓ Nombre total de juvéniles nécessaire = 42 000 000
- ✓ Poids moyen des juvéniles inoculés = 5 mg
- ✓ Poids total juvéniles nécessaire = 210 kg/ semaine

Pour le calcul du coût d'approvisionnement en larves, un prix de vente élevé est retenu soit 16 €/kg. Cette valeur diminuerait pour atteindre 10 €/kg au bout de 18 mois. Elle pourrait encore évoluer à la baisse en fonction de l'évolution du projet. Le coût d'approvisionnement varie de 140 € à 87,5 € par tonne de rebuts en fonction des hypothèses ci-dessus (tableau 8).

Tableau 8 : coûts d'approvisionnement de larves de BSF

Prix juvénile /Kg (livraison incluse)	16€	14€	12€	10€
Coût approvisionnement hebdomadaire	3360€	2940€	2520€	2100€
Coût approvisionnement / Tonne de rebuts	140€	122,5€	105€	87,5€

II.B.2. 3. Rendement en larve et coquille

- ✓ Rendement en larves (résultat pré-étude) = 8,2%
- ✓ Rendement résidus élevage (= coquille) = 41 %

A partir de ces données

Tableau 9: masses des sous-produits après traitement

Masse totale de rebuts / semaine	28 000 Kg
Masse totale larve fin de retraitement	2 240 Kg
Masse totale résidus fin de retraitement	11 480 Kg

Sur ce site, le total des coquilles et des larves récupérées sur la saison serait respectivement de 252, 6T. et de 49,3 T. Potentiellement à l'échelle de la région et par an 1066 T. de coquilles et 208 T. de larves seraient produites. En appliquant un standard de 15% de rendement de process, 31,2 T. de farine d'insectes seraient fabriquées. Pour rappel, Les besoins annuels en farine d'insectes pour la pisciculture française pourraient aller jusqu'à 20 000 tonnes par an selon les taux d'incorporation dans l'aliment aquacole (Trintignac & Métivier, 2019).

II.B.2. 4. Investissement système de production

Cette première approche se fait sur la base du système de production de Cycle Farms.

- ✓ Surface utile isolée nécessaire = 400 m^2
- ✓ Gestion environnement : chauffage / déshumidification (taux renouvellement air = 20 fois volume total par heure) / traitement air sortie (odeur)
- ✓ Process pré-retraitement :
  - Aucun (moule entière non broyées non abattues)
- ✓ Process post retraitement :
  - Table vibrante séparation larve / coquille
  - Exécution larve (ébouillantage)
  - Broyage coquille

Tableau 10: première estimation des coûts du site de traitement de moules

Poste investissement	Coûts investissement	Durée Amortissement	Coûts investissement/an
Isolation espace de production	100 k€	10 ans	10 k€
Gestion environnement	100 k€	10 ans	10 k€
Machine process	75 k€	5 ans	15 k€
Total	275 k€		35 k€

Le coût d'amortissement serait de 56€ par tonne de rebuts. Ces investissements ne prennent pas en compte la possibilité de rajouter un espace de stockage voire une chambre froide.

II.B.2. 5. Coûts de fonctionnement

Ces coûts de fonctionnement sont estimés sur la base du système de production de Cycle Farms. Ils pourraient se monter à 125 €/T. (tableau 11) en partant sur des consommations notamment électriques hautes correspondant à une moyenne annuelle. Les larves de mouches ont besoin de températures élevées (27°C-32°C) mais la majeure partie des traitements se déroulement en période estivale. L'estimation des coûts sera volontairement surestimée dans cette approche.

Tableau 11 : premières estimations de coûts de fonctionnement de l'unité de traitement

	Quantité	Coût annuel (€)	Coûts / Tonne rebuts
RH	5 ETP ouvrier	48 000 (6 mois)	77 €
Consommations eau et électriques	5 000€ / mois	30 000 (6 mois)	48 €
Total			125 €

II.B.2. 6. Bilan pré-étude de cas

Les premières estimations nous amènent à des coûts de traitement « insecte » par tonne de rebuts variant de **268,5 € HT** à **321 € HT** (tableau 12). Ces données ne prennent pas compte une valorisation potentielle des coquilles et des larves de mouche.

Tableau 12: premières estimations de coûts de retraitement de rebuts de moules par des larves d'insectes

Prix juvénile HT / Kg (livraison incluse)	16 €	14 €	12 €	10 €
Coût approvisionnement / tonne de rebuts	140 €	122,5 €	105 €	87,5 €
Coût amortissement / tonne de rebuts	56 €	56 €	56 €	56 €
Coût fonctionnement / tonne de rebuts	125 €	125 €	125 €	125 €
Total coût retraitement / tonne de rebuts	**321 €**	**303,5 €**	**286 €**	**268,5 €**

Les coûts d'investissement et les durées d'amortissement devront être étudiés plus précisément considérant les actifs présents sur le site et les aides publiques potentielles. Les coûts de fonctionnement devront également précisées considérant les ressources humaines disponibles sur le site et les aides publiques potentielles. Il est à noter que le coût de traitement (équarrissage) des larves n'est pas chiffré tout comme leur valorisation potentielle.

III.C. Les autres traitements actuels ou potentiels

Si les mytiliculteurs devaient traiter leurs rebuts à terre, peu d'options seraient disponibles. A part l'équarrissage, seul un territoire dans le sud de la France autour de l'étang de Thau a mis en place une filière de traitement dite de post fermentation. D'autres options sont ou ont été testées.

III.C.1. Le traitement post fermentation

Dans le département de l'Hérault, une usine valorise les rebuts coquillers d'huitres et de moules du secteur de l'étang de Thau. La conchyliculture y représente 10% de la production nationale soit environ 18 000 T. de production (CRC Méditerranée). 8 000 T. de « déchets conchylicoles » sont traitées chaque année dont environ 5 000 T. de rebuts coquillers (https://www.smbt.fr/content/traitement-des-d%C3%A9chets-conchylicoles et COVED com. Pers.). En 2000, un centre de traitement des déchets sur le site du Mourre Blanc de la commune de Mèze est mis en service. A sa création en 2005, le Syndicat mixte du bassin de Thau, dans le cadre de ses compétences, reprend le service de collecte et de traitement des déchets conchylicoles. C'est la société COVED, spécialisée dans le traitement des déchets, qui gère pour le compte du Syndicat mixte la collecte et le traitement des déchets. Les déchets coquillés (60% huîtres et 40% moules) valorisables sont collectés en bacs de 600 litres appelés palox quatre fois par semaine.

Après un premier tri manuel puis une séparation mécanique, les coquilles sont isolées dans des box couverts pendant 3 à 6 semaines avec une aération renforcée ; le temps de la fermentation, nécessaire pour faire disparaître la matière organique présente dans les coquillages (figure 25). Cette étape est possible car le site de stockage est isolé car les odeurs générées par la décomposition en particulier des moules sont pestilentielles.

Figure 25 : box de stockage et de séchage (Tirman & Lambert, 2018)

A l'issue de cette période de « séchage » puis séparation granulométrique permettant de récupérer les coquilles qui sont broyées, leur valorisation peut commencer. La coquille d'huître possède des qualités très recherchées. Riche en calcaire et en oligo-éléments, elle est le plus souvent utilisée comme « complément alimentaire » pour les terres agricoles ou de nourriture pour les volailles. Plus surprenant encore, elle peut entrer dans la composition de peinture de signalisation, de ciment ou encore de pavés.

Les coquilles de moules, quant à elles, restent une très bonne solution pour remblayer des chemins, des terrains argileux ou encore des carrières.

A noter que l'usine est soumise à déclaration ICPE pour les rubriques liées aux éléments de process (pas d'agrément pour des produits de catégorie 3) (tableau 8).

Les coûts de collecte et de traitement avoisineraient les 240 € HT la tonne tout en sachant que la collectivité (Syndicat Mixte du bassin de Thau) aiderait à hauteur de 120 € HT la tonne pour la collecte.

III.C.2. Le compost

Le CRC Normandie en 2015 a mené l'étude VALMOCO qui consistait à évaluer la faisabilité de la valorisation des sous-produits de moules en compostage agricole et/ou industriel. Ce projet s'est réalisé avec plusieurs partenaires qui sont la Chambre d'Agriculture de la Manche, Suez Environnement, Normandie Fraicheur Mer, le Comité Régional des Pêches Maritimes et des Elevages Marins de Basse Normandie, le Société d'Investissement LEgumière et maraîchère de BAsse Normandie, le Conseil Départemental de la Manche, le Conseil Régional de Basse Normandie, l'Agence Régionale de la Santé de la Manche et la Direction Départementale de la Protection des Populations de la Manche (MARCHAND, 2015). Cette étude a montré la faisabilité technique et réglementaire de faire du compostage avec des sous-produits de moules, en particulier sur les exploitations agricoles. Cela sous-entend que les installations de compostage de ces dernières soient déclarées à la rubrique 2780-2 au titre des Installations classées (tableau 8). Pour ces sous-produits de catégorie 3, les établissements d'entreposage de ces sous-produits doivent bénéficier d'un agrément délivré par le préfet de leur département d'implantation.

Les solutions les plus pertinentes pour la mise en place d'une filière de compostage des sous-produits de moules sont récapitulées ci-dessous (Marchand, 2015) :

- Un broyage des sous-produits de moules chez les mytiliculteurs pour obtenir une plus forte densité des sous-produits et pour favoriser le procédé de compostage ;

- Un stockage n'excédant pas deux jours pour éviter les nuisances ;

- Une collecte dans des caisses-palettes propres à chaque entreprise et dont le nombre peut varier selon le volume de sous-produits à traiter ;

- Un transport mutualisé par zones conchylicoles, voir même sur plusieurs secteurs de production de moules pour réduire les coûts de transport ;

- Un compostage sur les sites les plus proches des zones de production de moules et pouvant traiter des sous-produits de moules.

La collecte, le transport et le traitement des sous-produits de moules en compostage, par Suez Environnement est estimé à 70 €/tonne en 2015 avec des sites de compostages situés à proximité des zones de production mytilicoles soit maximum 32 km (Marchand, 2015).

Finalement, cette étude n'a pas donné de suite pour le moment, pour des raisons de logistiques, de coûts et d'odeurs. Plus généralement, le marché du compost agricole semble saturé de demandes diverses. Et pour le compost industriel, des opérateurs comme Veolia ferment leurs sites actuellement.

III.C.3. Traitement par « cuisson vapeur » et valorisation santé - projet Mussella -

Un projet industriel de valorisation des moules sous-tailles est cours d'élaboration actuellement en Bretagne. Issu d'un développement avec l'appui notable du centre technique ID-Mer, son procédé consiste à décortiquer la chair de moule par autoclave avec un conditionnement après surgélation par enrobage à l'azote pour le marché agroalimentaire. Les jus de cuisson pourraient être même récupérés pour des applications dans la composition de compléments alimentaires (Tardiveau, 2020).

Afin de pouvoir valoriser les plus petits calibres un volet « Valorisation Santé » a été réalisé en partenariat avec le CRC Pays de la Loire et la Région Pays de la Loire.

III.C.4. Les autres pistes

III.C.3.1. La Méthanisation

La Méthanisation pourrait être une solution. La réglementation sanitaire (règlement CE n°1069/2009) précise que certaines matières peuvent être valorisées pour la production de biogaz (méthanisation). Elle fixe à des fins de sécurité sanitaire des règles spécifiques pour l'introduction dans une unité de méthanisation de sous-produits animaux ou de produits qui en sont dérivés. Cependant, les unités ne souhaitent pas méthaniser des moules pleines en raison de la perturbation causée par les coquilles dans le système méthaniseur et lors de l'épandage du digestat (risques de bouchage des systèmes d'épandage) (Anonyme, 2017).

III.C.3.2. L'équarrissage

En Mayenne, le coût de l'équarrissage pour des pisciculture est de 246 € HT la tonne + 73 € HT le déplacement soit 319 € HT tout compris. Dans l'Est de la France, ce coût pour les pisciculture serait de 260 € HT la tonne tout compris (Y. Jouan, Filière Aquacole du Grand Est com. pers.). Compte tenu de la biomasse de produits potentiellement collectables, les coûts pourraient baisser. Cependant, concernant la logistique, une collecte quasi journalière rendrait cette option très onéreuse (Anonyme, 2017).

III.C.3.3. L'enfouissement ou l'incinération

Le traitement par enfouissement reste prédominant dans certains territoires mais l'objectif des dernières réglementations est de diminuer la part d'enfouissement des déchets valorisables.

L'élimination des déchets comme l'incinération sans valorisation énergétique est le mode de traitement des déchets à éviter le plus possible ; il doit être réservé aux déchets « ultimes » pour lesquels aucune autre valorisation n'est possible.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte a fixé un objectif de réduction de l'élimination par stockage de moitié en 2025 avec une étape intermédiaire de -30 % en 2020, par rapport aux quantités admises en décharge en 2010. L'encadrement de cette réduction sera notamment réalisé à travers les plans régionaux de prévention et de gestion des déchets. Ce ne sont donc pas des solutions durables.

Seule, la solution du traitement « post fermentation » fonctionne actuellement dans une des régions françaises. Les coûts sont équivalents à d'autres pistes de traitement. Sa contrainte concerne le « process naturel » de post fermentation qui nécessite un site très isolé en raison de l'odeur généré.

.

Tableau 13: rubriques ICPE concernant le traitement des sous-produits animaux

Rubrique ICPE	Intitulé	Régime	Tonnage	Remarques	Types de traitement
2731	Dépôt oui transit de sous-produits animaux	**E**	>500kg et <30T dépôt dans des conteneurs étanches et couverts sans manipulation	Pour les mytiliculteurs/hors biodéchets des restaurateurs/NC si associé à rubrique 2170 et 2780	STOCKAGE/TRANSIT
		A	Autres installations A si > 500kg		
2730	Traitement des sous-produits d'origine animale	**A**	A partir de 500 kg/j		TOUT TRAITEMENT HORS RUBRIQUE CITEE SI APRES
2170	Fabrication des engrais, amendements, supports de culture (hors 2780 et 2781)	**D**	> 1T/j et <10T/j	Hors rubrique 2780 compostage et 2781 méthanisation	FABRICATION ENGRAIS
		A	> 10T/j		
2780-2	Compostage de fraction fermentescible de déchets triés à la source ou sur site, de boues de station d'épuration des eaux urbaines, de papeteries, d'industries agroalimentaires, seuls ou en mélange avec des déchets admis dans une installation relevant de la rubrique 2780-1	**D**	> 2T/j et <20T/j	2780-1: compostage de matières végétales ou de déchetsvégétaux, effluents d'élevage, de matières stercoraires	COMPOSTAGE
		A	> 20T/j		
2781-2	Méthanisation des déchets non dangereux oude matières végétales brutes	**A**	Sans limite basse		METHANISATION

D : procédure de déclaration

E : procédure d'enregistrement

A : procédure d'autorisation

Conclusion

La pré étude PréTIMOUV avait pour objectif de tester une nouvelle solution de retraitement des rebuts de moules et de leur matière organique par des larves d'insectes. Deux essais techniques réalisés sur plusieurs centaines de kilos de produits ont montré qu'un traitement de ces rebuts par des larves de mouches soldats noirs est techniquement possible sur une période de 7 à 8 jours. Des étapes préalables de précuisson ou de broyage ne sont pas nécessaires. Afin d'optimiser la qualité du traitement, un pré triage des sous-produits collectés en amont est recommandé afin de limiter au maximum l'hétérogénéité des lots (avec d'autres espèces). Les process restent à affiner. Deux à trois tests supplémentaires seraient nécessaires pour standardiser un protocole fiable. Par ailleurs, on constate grâce à l'ensemble de cette expérimentation, que les rendements en larve sur cette matière sont loin d'être négligeables. Cela amène à soulever la question de la valorisation de ces dernières afin de tenter de mettre un système de retraitement visant à l'équilibre financier au minimum.

Une première approche technico économique nous amène à des coûts de traitement compris entre 268 € et 321 € HT par tonne de rebuts traités. Ces chiffres sont comparables à d'autres coûts de traitement type post fermentation ou équarrissage. Ces coûts élevés pourraient cependant fortement diminuer avec le développement de ce type de démarche et avec la valorisation des deux coproduits issus du traitement, les coquilles et les larves de mouche.

Pour les coquilles de moules, des pistes de valorisation existent ou font l'objet de recherche (céramique, adjuvant). Pour les larves d'insectes, la règlementation européenne limite leur utilisation actuellement. Seules, la fabrication d'appâts de pêche ou l'alimentation des animaux familiers, de zoo ou à fourrures seraient possibles. L'utilisation de farines de larves de mouches nourries avec des moules pour l'alimentation aquacole n'est pas possible aujourd'hui car non prévue dans les textes. L'évolution des textes réglementaires reste possible. Il reste à déterminer le cahier des charges et les coûts nécessaires à cette évolution. Cependant, la quantité potentielle de fabrication de farine d'insectes à partir des rebuts de moules dans les Pays de la Loire s'élèverait à une trentaine de tonnes, ce qui est trop faible pour des marchés de l'alimentation aquacole français. Cependant, ces volumes pourraient rester compatibles pour des marchés plus confidentiels misant davantage sur la qualité comme l'alimentation des géniteurs et des alevins. Mais tout dépendra de la qualité de ces farines.

Un travail complémentaire auprès des administrations françaises et européenne reste à faire afin de vérifier si la réglementation actuelle sur la valorisation des larves de mouche peut évoluer rapidement ou pas. En fonction de ces résultats, une étude technico économique pourrait être lancée afin d'une part de standardiser les process et d'autre part, de mesurer la faisabilité économique d'une mise en place d'un outil de traitement « industriel ».

Bibliographie

2017/893, R. (UE). (2017). REGLEMENT (UE) 2017/893 de la Commission du 24 mai 2017 modifiant les annexes I et IV du règlement (CE) n° 999/2001 du Parlement européen et du Conseil et les annexes X, XIV et XV du règlement (UE) n° 142/2011 de la Commission concernant les dispositions . *Journal Officiel de La CE*.

Anankware, P., Fening, K., Osekre, E., & Obeng-Ofori, D. (2015). Insects as food and feed: A review. *International Journal of Agricultural Research and Review*, *3*, 143–151.

Anonyme. (2016). *Pathogencook : projet de recherche sur l'inactivation par la chaleur des germes pathogènes lors de la cuisson de viande fraîche.*

Anonyme. (2017). *Etude de faisabilité technico économique pour la mise en place d'une filière de gestion des sous produits coquilliers : de la collecte à la valorisation en baie de Somme-Picardie Maritime*.

Auza, F., Purwanti, S., Syamsu, S., & Natsir, A. (2020). Antibacterial activities of black soldier flies (Hermetia illucens. l) extract towards the growth of Salmonella typhimurium, E.coli and Pseudomonas aeruginosa. *Earth and Environmental Science*, *492*.

Booth, D., & Sheppard, D. (1984). Oviposition of the black soldier fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae): eggs, masses, timing, and site characteristics. *Environmental Entomology*, *13*, 421–423.

Caruso, D., Devic, E., Subamia, W., Talamond, P., & E, B. (2013). *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens, Stratiomyidae* (P. P. I. Press & K. I. T. K. Bogor (eds.); IRD Editio).

CRC, P. (2015). *Etude en vue d'améliorer la gestion des déchets conchylicoles en Pays de la Loire.*

FAO. (2014). *The State of the World - Fisheries and Aquaculture*.

Jina, L., Yun-Mi, M., Young-Kyu, P., Young-Cheol, Y., Bock-Gie, J., & Bong-Joo, L. (2018). Black soldier fly (Hermetia illucens) larvae enhances immune activities and increases survivability of broiler chicks against experimental infection of Salmonella Gallinarum. *Randomized Controlled Trial*, *18*, 736–740.

M'ballou, C. (2019). *Comparaison de différentes techniques de prétraitement et de séchage sur la charge microbienne, les caractéristiques physicochimiques et nutritionnelles des larves de mouches soldats noires (Hermetia illucens) comme aliment alternatif pour l'alimentation* .

Marchand, M. (2015). *Etude de faisabilité de la valorisation des sous-produits de moules en compostage agricole et/ou industriel*.

MARCHAND, M. (2015). *Etude de faisabilité de la valorisation des sous-produits de moules en compostage agricole et/ou industriel*.

Mezdour, S. (2017). *Transformation processes of insect larvae for ingredients preparation*.

Newton, G., Sheppard, D., Watson, D., Burtle, G., Dove, C., Tomberlin, J., & Thelen, E. (2005). *The black soldier fly, Hermetia illucens as a manure management/resource recovery tool*.

Perednia, D., Anderson, J., & Rice, A. (2017). A Comparison of the Greenhouse Gas Production of Black Soldier Fly Larvae versus Aerobic Microbial Decomposition of an Organic Feed Material. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, *5*, 10–16.

Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., & Giannetto, A. (2016). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using Hermetia illucens. *Journal of Cleaner Production*.

Sheppard, D., Tomberlin, J., Joyce, J., Kiser, B., & Sumner, S. (2002). Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Medical Entomology*, *39*, 695–698.

Soletchnik, P., & Robert, S. (2016). *Eléments de connaissance sur la mortalité et la reproduction de la moule bleue (Mytilus edulis) sur la façade atlantique.*

SRCNormandie. (2009). *Gestion des déchets et des coproduits de la conchyliculture : Etat des lieux et perspectives.*

Stamer, A. (2015). Insect proteins—a new source for animal feed. *EMBO Rep.*, *16*, 676–680.

Tardiveau, B. (2020). Une nouvelle usine pour les moules sous-taille de Mussella. *Produits de La Mer*, *https://pd*.

Thomas, H. (2021). Crispations en Bretagne nord. *Cultures Marines*, *343*, 4–5.

Tirman, C., & Lambert, V. (2018). *Usine de traitement conchylicole de Méze-Rapport annuel d'exploitation 2017*.

Trintignac, P., & Métivier, R. (2019). *Pré étude régionale sur l'utilisation d'insectes dans l'alimentation des poissons d'élevage.*

Vallod, D., & Le Reste, G. (2017). *Insectes et aliment pour l'aquaculture*.

Vantomme, P. (2017). *Opportunities and Constraints of Farming Insects for food : a global overview*.

Vidal, C. (2001). *La Passion des Huîtres et des Moules* (P. Editions Sang de la terre (ed.); p. 78).

Vilà, B., Fontgibell, A., Badiola, I., Esteve-Garcia, E., Jiménez, G., Castillo, M., & Brufau, J. (2009). Reduction of Salmonella enterica var. Enteritidis colonization and invasion by Bacillus cereus var. toyoi inclusion in poultry feeds. *Poultry Science*, *88*, 975–979.

Sitographie

CIPA, 2018Les chiffres clés ; http://www.poisson-aquaculture.fr/les-chiffres-cles/

Inalve : https://inalve.com/

Insectinov2 : https://www.adebiotech.org/ins2/index.php?target=downloads

Glossaire

AFOM : Atouts-Faiblesses-Opportunités-Menaces

AGPI : Acide Gras Polyinsaturés

AGHI : Acide Gras Hautement Insaturés

CIPA : Comité InterProfessionnel de l'Aquaculture

DHA : DocosaHexaénoïque Acid

EPA : EïcosaPentaénoïque Acid

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le DEveloppement Rural

PAT : Protéines d'Animaux Terrestres

TAC : Truite Arc en Ciel

TSFP : Taux de Supplément de Farine de Poisson

Figures

Figure 1 : pieux d'élevage et cordes de captage (CRC PDL) 10
Figure 2 : moules sous tailles (CRC PDL) 11
Figure 3 : mouche soldat noir et sa larve (Trintignac *et al*., 2019) 12
Figure 4 : photos du site expérimental (Cycle Farms) 13
Figure 5 : carte des zones de production de moules sur la région Pays de la Loire (CRC PDL) 14
Figure 6 : représentation schématique des modalités testés lors de la première phase d'essais (CycleFarms) ..18
Figure 7 : dispositif de précuisson 19
Figure 8 : transfert des lots de moules le 23 juin Figure 9: photo montrant les deux types de lots 20
Figure 10 : bacs des modalités et de grossissement des larves 20
Figure 11: aspects par modalité avant mise en croissance 20
Figure 12 : température et hygrométrie dans l'espace de production durant l'expérimentation 21
Figure 13: évolution de la température à l'intérieur des bacs de croissance au cours du temps 22
Figure 14 : masse de 30 larves (en g) à J13 23
Figure 15 : photos de moule "intacte" à gauche / moule "propre" à droite 24
Figure 16 : modalité moules entières broyées en fin de croissance (MBB) à gauche et modalité moule entière crue en fin de croissance (MEC) à droite 24
Figure 17 : représentation schématique des modalités testés lors de la deuxième phase d'essais (CycleFarms)26
Figure 18 : photos du transfert de moules et du lot concerné (smidap) 27
Figure 19: température et hygrométrie dans l'espace de production durant l'expérimentation 28
Figure 20 : masse de 30 larves (g) à J13 (CycleFarms) 29
Figure 21 : masse de 30 larves (g) lors du tri 29
Figure 22: rendement en larves (% masse initiale de ration) 30
Figure 23: taux de survie en larve (% nombre d'individus inoculés) 31
Figure 24 : masse finale en résidu (% masse initiale de ration) 31
Figure 25 : box de stockage et de séchage (Tirman & Lambert, 2018) 46

Tableaux

Tableau 1 : résultats microbiologiques 16
Tableau 2 : composition nutritionnelle des lots de moules cuites et crues 17
Tableau 3: coefficient de séchage à J18 (% perte masse initiale du bac) 22
Tableau 4: temps de croissance et perte en masse 28
Tableau 5: pourcentages de moules « propres » 32
Tableau 6 : résultats des analyses microbiologiques par modalité 32
Tableau 7 : moyennes de quantités de rebuts de moules par secteur ligérien (CRC PDL) 42
Tableau 8 : coûts d'approvisionnement de larves de BSF 43
Tableau 9: masses des sous-produits après traitement 44
Tableau 10: première estimation des coûts du site de traitement de moules 44
Tableau 11 : premières estimations de coûts de fonctionnement de l'unité de traitement 45
Tableau 12: premières estimations de coûts de retraitement de rebuts de moules par des larves d'insectes 45
Tableau 13: rubriques ICPE concernant le traitement des sous-produits animaux 49

Annexe

Annexe 1 : itinéraire technique standard de Cycle Farms

Calendrier prévisionnel des tâches à réaliser :

- **J0**
  - Mise en incubation
  - Mesure de la densité
  - Mesure de la matière sèche
  - Mesure de la température
  - Mesure de l'humidité relative
  - Masse de chaque barquette
- **J1 à J7**
  - Mesure de la température
  - Mesure de l'humidité relative
  - Masse de chaque barquette
- **J7**
  - Masse des barquettes
  - Masse de 30 larves (mises dans l'alcool pour analyses µbiote)
  - Mise en grossissement
  - Masse initiale des bacs (+ photo)
  - Mesure du pH initial grossissement (2g pour 10mL d'eau)
  - 5g de substrat (mis dans l'alcool pour analyses µbiote)
- **J8 à J17**
  - Photographie de 5 bacs par modalité (intérieur/extérieur)
  - Mesure de la température ambiante
  - Mesure de l'humidité relative
  - Relevé de température dans les bacs
  - Masse des bacs
  - Masse de 30 larves J13 et J15 (mises dans l'alcool pour analyses µbiote)
- **J17**
  - Mesure du pH (2g pour 10mL d'eau)
  - Masse des bacs avant tri
  - Masse des larves récoltées (+ photo)
  - Masse de fertilisant récoltée (500g de chaque pour analyses + photo)
  - Masse de 30 larves (mises dans l'alcool pour analyses µbiote)