

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Facultés des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Analyse de cycle de vie du projet ValueBugs :
Le traitement des déchets organiques
décentralisé par les larves de mouche soldat
noire en Région de Bruxelles-Capitale**

Mémoire de fin d'études présenté par

VAN de VELDE Emilie

En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique : 2019-2020

Promoteur : Prof. Wouter ACHTEN

Co-promoteur : Prof. Etienne TOFFIN

Abstract

L'élevage d'insectes, et plus particulièrement de larves de mouche soldat noire, représente une opportunité de connecter le traitement de déchets organiques à la production de protéines dans des régions dépendantes d'importations massives comme le représente la Région de Bruxelles-Capitale. L'étude proposée est une évaluation du cycle de vie d'un dispositif de traitement des déchets décentralisé proposé par le projet ValueBugs utilisant la larve de mouche soldat noire dans la Région de Bruxelles-Capitale. La production de larves matures est ici destinée à nourrir des poules ou des chiens, et donc de substituer la production des aliments conventionnels qui leur sont destinés. Soit deux scénarios étudiés : le scénario « Poule » et le scénario « Chien ». Une analyse de cycle de vie a été réalisée via le logiciel SimaPro dans sa version 8.5.2.0. Il s'agit ACV de type conséquentielle permettant l'application de substitution d'alimentations animales conventionnelles. L'unité fonctionnelle considérée est la bioconversion des déchets de cuisine en protéines par 1kg de larves de mouche soldat noire (flux de référence) selon le prototype du Bucket in a Bucket élaboré par ValueBugs. L'ACV est analysée selon la méthode IMPACT 2002+. Deux analyses de sensibilité ont été effectuées afin de vérifier la robustesse de l'étude.

Les résultats montrent que la production décentralisée de protéines par les larves de mouches est environnementalement plus intéressante et constitue une alternative compétitive face aux aliments destinés aux poules et aux chiens. La production décentralisée se distingue également de ses applications industrielles car aucune énergie électrique ou thermique n'est impliquée dans le processus de production et donc ses impacts environnementaux s'en voient grandement réduits.

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie grandement Monsieur Etienne Toffin, mon co-promoteur, pour m'avoir dirigée tout au long de la rédaction de ce travail et dont les conseils ont su guider ma réflexion. Sa bienveillance et son optimisme m'ont entraînée dans cette grande aventure qu'est le traitement des déchets décentralisé par la larve de mouche soldat noire. Je remercie également Mademoiselle Marie Gorza, collaboratrice de Monsieur Toffin dans le cadre du projet ValueBugs pour m'avoir donnée des retours positifs quant à l'écriture de ce mémoire. Je remercie toutes l'équipe de ValueBugs et ces citoyens-chercheurs pour m'avoir fournie les données nécessaires à la création de l'analyse de cycle de vie et surtout de son inventaire.

Je remercie également Monsieur Wouter Achten pour avoir repris mon mémoire en cours de route et pour m'avoir aiguillée concernant la phase méthodologique malgré le peu d'entretiens que nous avons eus.

Je remercie Madame Vanessa Zeller pour m'avoir appris les bases du logiciel SimaPro, ainsi que Monsieur Hélié Moreau pour m'avoir permise d'effectuer les analyses à distance, à la vue de la situation exceptionnelle de cette année d'étude.

Enfin, je remercie ma famille, Martine, Thierry, Estelle, Elaine, Kevin, et mes amies, Marine, Rosalie, Julie, pour m'avoir soutenue et motivée durant cette longue période et pour avoir su porter un regard critique sur mon travail.

Table des matières

1.	Introduction.....	8
2.	Etat de l’art du traitement des déchets par la MSN	10
3.	Etat des lieux des traitements des ordures ménagères à Bruxelles	15
3.1.	La hiérarchie des déchets	15
3.2.	La Belgique en quelques chiffres.....	16
3.3.	Focus Bruxellois.....	17
3.3.1.	Plans, Programmes et Projets à Bruxelles.....	19
3.3.2.	La collecte.....	20
3.3.3.	Le traitement	21
3.3.4.	Les biodéchets en région Bruxelles-Capitale.....	23
4.	La mouche soldat noire (<i>Hermetia illucens</i>)	26
4.1.	Conditions optimales d’élevage de <i>Hermetia illucens</i>	28
5.	Les différentes implications.....	29
5.1.	Implications environnementales.....	29
5.2.	Implications économiques	32
5.3.	Implications juridiques.....	35
5.4.	Implications sociétales.....	37
5.5.	Implications urbanistiques.....	39
6.	Méthodologie	39
6.1.	Analyse de cycle de vie	39
6.2.	Définition des objectifs et du système	40
6.2.1.	Définition des objectifs	40
6.2.2.	Champ d’étude (scope)	40
6.2.3.	Modélisation.....	41
6.3.	Inventaire du cycle de vie	42
6.3.1.	Les règles d’allocation.....	42
6.4.	Evaluation des impacts environnementaux.....	43
6.4.1.	Classification et caractérisation.....	43
6.4.2.	Normalisation, pondération, rangement et méthode de caractérisation	45
6.5.	Interprétation.....	46
7.	Analyse de cycle de vie ; le traitement des déchets par la larve de mouche soldat noire.....	47
7.1.	Description du Bucket in a Bucket (BiB)	47
7.1.1.	Synthèse de l’assemblage du BiB :.....	48
7.2.	Définition des objectifs et du champ de l’étude	49

7.2.1.	Objectifs de l'étude.....	49
7.2.2.	Fonctions	49
7.2.3.	Unité fonctionnelle	50
7.2.4.	Modélisation.....	50
7.2.5.	Méthode analyse des impacts.....	50
7.2.6.	Données	53
7.3.	Définition des systèmes.....	53
7.3.1.	Scénario « Poule » (référence)	54
7.3.2.	Scénario « Chien »	55
7.3.3.	Limites et frontières du système et allocation	56
7.4.	Inventaire du cycle de vie	58
7.4.1.	Phase de production du Bucket in a Bucket.....	58
7.4.2.	Phase de transport.....	58
7.4.3.	Phase d'utilisation.....	59
7.4.4.	Substitution	62
7.4.5.	Le cas du substrat traité	65
8.	Evaluation des impacts et interprétation des résultats	66
8.1.	Comparaison des scénarios.....	66
8.2.	Contribution des étapes du cycle de vie.....	67
8.2.1.	Indicateurs Midpoint :.....	67
8.2.2.	Indicateurs endpoint :.....	69
8.3.	Analyse de sensibilité	71
8.3.1.	Première analyse de sensibilité	71
8.3.2.	Deuxième analyse de sensibilité.....	72
9.	Conclusion	74
10.	Bibliographie.....	76
10.1.	Textes de loi	76
10.2.	Bibliographie	76
10.3.	Sitographie	81
11.	Annexes	0
11.1.	Annexe 1	0
11.2.	Annexe 2	2
11.3.	Annexe 3	4

Table des illustrations

Figure 1 : Echelle de Lansink.....	15
Figure 2 : Echelle de Moermann.....	15
Figure 3: Production de déchets du secteur des ménages par type, en t, Belgique, 2016.....	16
Figure 4: Production de déchets en kt, Belgique, 2016.....	16
Figure 5 : Prise en charge des déchets municipaux en kt, Belgique, 2018.....	17
Figure 6 : Part des déchets ménagers et assimilés en t, Région Bruxelles-Capitale, 2018.....	17
Figure 7: Composition de la poubelle bruxelloise.....	18
Figure 8 : Gisements totaux et collectables (estimations basse et haute) (en t/an) (Bortolotti et al., 2018).....	25
Figure 9 : Résumé de la réglementation de l'Union Européenne sur l'utilisation des insectes dans l'alimentation animale (IPIFF, 2017).....	36
Figure 10 : Etapes de l'ACV, (International Organisation for Standardisation, 2006a).....	40
Figure 11 : Exemple d'un ensemble de processus unitaire dans un système (d'après ISO 14 041) (Jolliet et al., 2017).....	41
Figure 12 : Cadre d'analyse de l'impact de l'Initiative pour le cycle de vie du PNUE et de la SETAC (Verones et al., 2017).....	45
Figure 13 : Constitutants du Bucket in a Bucket.....	47
Figure 14 : Assemblage du Bucket in a Bucket.....	48
Figure 15 : Etape de production des larves. A gauche des larves immatures dans leur substrat, à droite les larves matures ayant migré dans le sable.....	48
Figure 16: Schéma général du cadre d'IMPACT 2002+ reliant les résultats de l'inventaire du cycle de vie aux catégories de dommages (Jolliet et al., 2017, p144).....	51
Figure 17 : Arbre des procédés.....	54
Figure 18 : Scénario "Poule".....	55
Figure 19 : Scénario "Chien".....	56
Figure 20 : Frontières du système.....	57
Figure 21 : Caractérisation du système « Poule » selon la méthode IMPACT 2002+.....	69
Figure 22 : Caractérisation du système « Chien » selon la méthode IMPACT 2002+.....	69
Figure 23 : Schéma des résultats des catégories de dommages endpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+).....	70
Figure 24 : Comparaison des systèmes « Poule », « Poule 10 », « Chien » et « Chien 10 » selon les catégories de dommages (méthode IMPACT 2002+).....	72
Tableau 1: Récapitulatif des taux de réduction des déchets (%) et des taux de conversion en protéines (%) et en lipides (%).....	11
Tableau 2 : Résumé des traitements des déchets municipaux à Bruxelles.....	22
Tableau 3 : Gisements totaux et collectables (estimations basse et haute) (en t/an) (Bortolotti et al., 2018).....	24
Tableau 4 : Composition de la larve de mouche soldat noire en acides aminés, acides gras et minéraux.....	27
Tableau 5 : Synthèse des matériaux d'assemblage du Bucket in a Bucket.....	48

Tableau 6 : Catégorie intermédiaires, substances de référence, facteur intermédiaire de dommage, catégories de dommages et unités de dommages utilisées dans IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2017, p145, 147 et 150).....	52
Tableau 7 : Catégories de dommages utilisés dans ReCiPe (H) endpoint (Jolliet et al., 2017, p155)	52
Tableau 8 : Inventaire de la phase de production du BiB (Bucket in a Bucket).....	58
Tableau 9 : Inventaire de la phase de transport du BiB	59
Tableau 10 : Composition analytique et minérale des larves mûres et du substrat utilisé (déchets de restaurant) pour élever les larves de MSN par Spranghers et al., 2016	60
Tableau 11 : Composition analytique et minérale du substrat traité par la larve de MSN.....	61
Tableau 12 : Inventaire primaire de la phase d'utilisation du BiB	61
Tableau 13 : Inventaire de la production larves immatures, de Circular Organics à ValueBugs.....	62
Tableau 14 : Composition analytique et alimentaire de l'alimentation pour poules et pour chiens	63
Tableau 15 : Inventaire pour 1kg de mix de grains pour poules	64
Tableau 16 : Inventaire pour 1kg de croquettes pour chiens	64
Tableau 17 : Substitution des protéines	65
Tableau 18 : Résultats pour le scénario « Poule » et le scénario « Chien », pour les catégories d'impacts midpoint considérées (méthode IMPACT 2002+).....	66
Tableau 19 : Résultats pour le scénario « Poule » et le scénario « Chien », pour les catégories d'impacts endpoint considérées (méthode IMPACT 2002+).....	66
Tableau 20 : Résultats des catégories d'impacts midpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+)	67
Tableau 21 : Résultats des catégories de dommages endpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+)	69
Tableau 22 : Résultats pour les scénarios « Poule » et « Poule 10 » et le scénario « Chien » et « Chien 10 », pour les catégories d'impacts midpoint considérées (méthode IMPACT 2002+).....	71
Tableau 23 : Résultats pour les scénarios « Poule » et « Poule 10 » et le scénario « Chien » et « Chien 10 », pour les catégories d'impacts endpoint considérées (méthode IMPACT 2002+).....	72
Tableau 24 : Comparaison des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe (H) pour les catégories d'impacts endpoint considérées	72

1. Introduction

La Région de Bruxelles-Capitale fait face à un dilemme. Celle-ci est très dépendante alimentaires du système d'import hors RBC à l'exception de la production en agriculture urbaine qui ne représente qu'une fraction minime de ce système. Pourtant, la majorité des produits alimentaires importés et consommés dans la région est grande consommatrice en énergies fossiles (carburants), engrais et pesticides, donc productrice d'impacts environnementaux. Cela constitue là un obstacle quant à la possible sécurité alimentaire de Bruxelles. De plus, la production en agriculture urbaine y est très limitée : il s'agit principalement de maraîchage. L'élevage intra-urbain (poules pondeuses, poulets, aquaponie, aquaculture) nécessite un apport en protéines important et importé car la production de protéines en RBC ne concerne principalement que l'élevage de poules pondeuses.

Pour cela, le projet ValueBugs propose un système de production de larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*) low-tech, low-cost, décentralisé et à l'échelle citoyenne dans l'optique de stimuler l'élevage intraurbain à Bruxelles. A l'aide de citoyens-chercheurs, ValueBugs tente d'introduire au sein de la région cette méthode de traitement des déchets organiques à domicile, voire en collectivité en proposant à chacun de découvrir cette technique de valorisation de matière organique et de production locale d'un aliment hyperprotéiné : la larve de mouche soldat noire. Le collectif propose de nombreux ateliers découverte et offre également un accès aux plans de construction du matériel et des conditions d'élevage. Pour résumer, ValueBugs, c'est un projet de recherche citoyenne participative, où chaque citoyen-chercheur peut y apposer sa pierre à l'édifice, quelle que soit son échelle.

La mouche soldat noire est utilisée car l'espèce possède de nombreux avantages : son état larvaire est propice à l'élevage, c'est une espèce qui détient une forte propension à réduire les déchets organiques et qui effectue une bioconversion de cette matière organique en protéines et lipides. Une fois la larve bien développée, celle-ci consiste en une source alimentaire idéale pour les élevages urbains et intra-urbains. Les larves composeraient donc un nouveau système de traitement des déchets organiques permettant non seulement une réduction des déchets mais également leur valorisation, ce qui devient un enjeu majeur dans une société où l'accumulation des déchets organiques est un éventuel problème de pollution.

Ce mémoire a pour objectif de déterminer le potentiel de traitement des déchets et de production de protéines alimentaires des larves de la mouche soldat noire ainsi que ses impacts environnementaux à l'aide d'une analyse de cycle de vie (ACV). Ainsi, l'analyse traitera du système développé par ValueBugs, le Bucket in a Bucket et de sa capacité de substitution aux produits alimentaires destinés aux poules et aux chiens.

Pour ce faire, une première étape prospective sera d'effectuer un état de l'art du traitement des déchets par la larve de mouche soldat noire. La littérature parcourue permettra une meilleure compréhension du système et des bénéfices que la méthode a à offrir, mais aussi de mettre en évidence les différentes incertitudes liées au système. Ensuite, un état des lieux des traitements des ordures ménagères à Bruxelles sera réalisé et nous permettra d'identifier dans quel contexte le système tente de s'insérer. Un focus sur la mouche soldat noire est indispensable afin de mieux comprendre l'espèce et pourquoi elle est utilisée. Plusieurs implications seront discutées quant à la mise en place de ce genre de système de traitement de déchets, d'abord de manière globale, puis spécifique à l'échelle décentralisée. Enfin, la méthode d'analyse de cycle de vie sera expliquée, puis réalisée, évaluée et interprétée.

Ce mémoire tente donc de répondre à la question « *Quels sont les impacts environnementaux du système de traitement des déchets décentralisé proposé par le projet ValueBugs par la larve de mouche soldat noire ?* ».

2. Etat de l'art du traitement des déchets par la MSN

Le contexte mondial dans lequel s'installe l'entomoculture se confronte à deux problématiques humaines auxquelles elle tente de répondre : la gestion des déchets et la capacité de réponse aux besoins alimentaires de tous les habitants d'ici 2050.

En effet, l'élevage de larves de mouche soldat noire (MSN) comme traitement des déchets organiques est une stratégie prometteuse qui se différencie des traitements conventionnels tels que la digestion anaérobie, l'incinération ou encore le compostage, par la création d'une source de protéines pour les élevages d'animaux comme ceux des poules ou encore des poissons (Salomone et al., 2017 ; Gold et al., 2018). Outre la valorisation des déchets sous forme de protéines alimentaires, la larve est aussi riche en graisse et en chitine extractibles, ce qui lui confère un intérêt supplémentaire pour d'autres utilisations. Au cours des dernières décennies, cette méthode émergente a reçu de plus en plus d'attention (Salomone et al., 2016 ; Gold et al., 2018 ; Cickova et al., 2014 ; Spranghers et al., 2017 ; Meneguz et al., 2018 ; Mertenat et al., 2019 ; Smetana et al., 2019 ; Sarpong et al., 2019).

Un système industriel se décompose en plusieurs étapes (Dortmans et al., 2017 ; Zurbrügg et al., 2018) :

- **Un traitement des déchets préalable** : réduction de la taille de la matière organique, déshydratation, extraction des matières inorganiques.
- **Le traitement des déchets par la larve de MSN** : les larves (4 à 9 jours, 1 à 2 mg) et la matière à dégrader (fumier, fruits et légumes, alimentation pour volaille, etc) trouvent place dans un récipient. Selon un ratio établi par Diener et al. (2009), les larves sont nourries à raison de 100 à 125 mg par jour par larve. Celui-ci est élargi par Parra Paz et al. (2015) à des rations comprises entre les déchets organiques peuvent être procurés en une ou plusieurs fois (Dortmans et al., 2017).
- **La récolte des larves de MSN** (Gold et al., 2018 ; Nguyen et al., 2013) : les larves sont récoltées après 15 à 52 jours (selon les conditions du système de température, d'humidité, de régime alimentaire et de densité), lorsqu'elles ont atteint le stade de prépupe (55 à 299 mg selon la source pour 6 à 20 mm). Elles migrent seules de la source de nourriture vers un site plus sec. Pour cela, une rampe incluse dans le système permet une collecte naturelle, sans nécessité d'action humaine. Si le dispositif ne contient pas de rampe, le substrat peut être tamisé afin de récupérer les larves.
- **Le produit final à valeur économique selon la demande** (Zurbrügg et al. 2018) : les prépuces peuvent être vendues vivantes ou transformées. Dans le cadre d'une transformation, les différents processus utilisés peuvent impliquer de les tuer, les laver et les stériliser par ébullition, les sécher et enfin les fractionner en séparant les protéines des lipides et de la chitine. Enfin, le résidu des larves est valorisable par (vermi-)compostage ou digestion anaérobie.

La littérature sur la MSN n'a commencé à réellement s'étendre qu'à partir de 2017, lorsque l'Union Européenne a autorisé l'intégration des insectes comme source alimentaire pour les poissons par la réglementation (EU) 893/2017, approuvant l'utilisation de protéine de sept espèces d'insectes, dont *Hermetia illucens* (Bosch et al., 2019, (EU) 893/2017).

Une première partie de la littérature s'est intéressée à la capacité de conversion des déchets organiques par la larve de MSN en protéine. Le premier système de traitement des déchets par *Hermetia illucens* (HI) est recensé par Sheppard et al. en 1994. Le système traite du fumier de poules. Le taux de réduction de 50 % est engageant et entraîne une conversion du fumier en protéine de 42 % et en graisse de 35 %. Diener et al. (2010) pratique la même expérience en se focalisant sur différentes rations alimentaires (de 12,5 à 200 mg / jour / larve). Les résultats montrent les meilleurs résultats pour la ration de 100 mg, qui sera une référence pour de nombreux rapports. Le taux de réduction des déchets atteint les 43,3 % pour un taux de conversion en protéines de 38,1 %. La ration de 200 g obtient le moins bon taux de réduction des déchets avec seulement 26,2 %. En 2011, il réitère l'expérience avec différentes sources de déchets. Les boues fécales (167 mg/larve/jour) atteignent un taux de réduction de 54,7 % tandis que les déchets organiques municipaux (507 mg/larve/jour) avoisinent les 68 %. En 2005, Newton et al. estiment la réduction du fumier porcin de 50 % et une conversion en protéine d'environ 40 % et en lipide d'environ 30 %. Kalova et al. (2012) montrent une réduction de 66,53 % de la masse initiale de tissu végétal, de 46,04 % de reste de nourriture et seulement de 8,47 % de déchets de jardin. Plus récemment, Nguyen et al. (2015) analysent à petite échelle des taux de réduction de 67,9 % pour les déchets de cuisine, 74,2 % pour la farine de poisson et 98,9 % pour les fruits et légumes. L'étude relève des conversions en protéine plus basses qu'auparavant, qu'elle explique par le fait que les larves n'étaient nourries que lorsqu'elles avaient consommé les déchets auparavant donnés. En 2019, Bosch et al. fait l'inventaire des études analysant la conversion des ressources organiques par HI. Il constate un plus haut taux de conversion chez les déchets contenant plus de protéines.

Etude	Régime alimentaire	Ration (mg/l/j)	Taux de réduction des déchets (%)	Taux de conversion en protéines (%)	Taux de conversion en lipides (%)
Diener et al. 2010	Nourriture pour poules	100	43.3	38.1	N.A
		200	26.2	39.1	N.A
Sheppard et al., 1994	Fumier de poule	N.A	50	42	35
Diener et al., 2011	Boues fécales	167	54.7	N.A	N.A
	Déchets organiques	507	68	N.A	N.A
Newton et al. 2005	Fumier porcin	N.A	50	40	30
Kalova et al., 2012	Tissus végétaux	10kg pour 240 larves pendant 35 jours	66.53	N.A	N.A
	Reste de nourriture		46.04	N.A	N.A
	Déchets de jardin		8.47	N.A	N.A
Nguyen et al., 2015	Déchets de cuisine	600	67.2	21.2	N.A
	Farine de poisson		74.2	19.4	11.6
	Fruits et légumes		98.9	12.9	2.22
Ermaloev et al., 2019	Reste de nourriture	N.A	49	24	N.A

Tableau 1: Récapitulatif des taux de réduction des déchets (%) et des taux de conversion en protéines (%) et en lipides (%)

La composition de la MSN est donc un intérêt pour de nombreux chercheurs qui y voient là une source avantageuse de protéines face aux alimentations d'élevage conventionnelles (soja, farine de poisson) ou de lipide pour la production de biodiesel et un fort potentiel de

substitution. La protéine traditionnelle et les graisses communément utilisées dans la formulation de nourriture peuvent être remplacées par les insectes sans crainte d'effets indésirables sur les performances du produit (Spranghers et al., 2017). Des études réalisées sur différentes espèces de poisson (la truite arc-en-ciel et le loup de mer) démontrent qu'une alimentation à 25 % composée de MSN ne diminue ni la qualité de l'animal, ni le rendement de l'élevage et rencontre des performances de croissances similaires à l'alimentation conventionnelle (Bruni et al., 2018 ; Magalhaes et al., 2017). De même pour les poulets, que ce soit le remplacement de l'huile de soja par de la graisse de larve de MSN (Schiaivone et al., 2018) ou celui de la nourriture pour volailles (Pieterse et al., 2018), l'inclusion de la MSN dans l'alimentation des poulets ne montre pas de changement par rapport à leur croissance ou la qualité de la viande. En ce qui concerne le biodiesel, une première étude réussit à en produire 15,8 g avec 1.200 larves de MSN (Canakci et al., 2003). Zheng et al. (2011) améliore la technique et arrive à une quantité de 23,6 g pour 1.000 larves. Il prouve également que le biodiesel fourni est conforme à la norme EN 14214 notamment en termes de densité et viscosité.

Un autre élément clé d'un bon système, outre la composition de la larve, est la composition des déchets traités. Le choix de la ressource est, selon Bosch et al. (2019), décisif en termes économique, environnemental et sanitaire. La qualité du déchet et sa quantité de protéines joue sur le développement des larves et leur qualité. Plusieurs recherches montrent que les larves élevées sur des déchets organiques riches en protéines ont une masse larvaire plus élevée, une teneur en protéines plus riche mais aussi un temps de développement plus court et une plus faible teneur en lipides (Nguyen et al., 201 ; Ooninx et al., 2015 ; Bosch et al., 2019). Toutefois, Barrangàn Fonseca et al. (2018) démontrent qu'une alimentation riche en protéines peut amener des teneurs en lipides élevées et donc réduire celles en protéines. Si les protéines agissent sur le développement larvaire, ce n'est pas le cas des lipides (Ooninx et al., 2015), même si leur influence sur la composition en acide gras de la larve est prouvée (Carvalho et al., 2012). Par ailleurs, les protéines et acides aminés contenus dans la source alimentaire ont une moindre emprise sur la composition en acides aminés de la MSN (Gold et al., 2019).

Une utilisation moins connue et encore peu étudiée de la mouche soldat noire est l'entomoremédiation, soit la décontamination de déchets organiques pollués (métaux lourds, métalloïdes, radioisotopes, médicaments, pesticides, mycotoxines) par la larve. Sarpong et al. (2019) analysent la composition du compost traité pour différents métaux lourds et signale une réduction moyenne d'environ 50 % pour le fer et des valeurs supérieures à 90 % pour le cadmium, le plomb et l'arsenic. Certains éléments sont supposés être déchargé par défécation, capacité déjà remarquée chez la guêpe sociale (*Polistes dominulus*) et chez le ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*) (Zubrügge et al., 2015). Le cadmium est majoritairement capturé dans le puparium de la larve qui s'en détache en devenant adulte (Bulak et al., 2018). Alors que Sarpong et al. émettent une réserve quant à l'utilisation de la chair de MSN comme nourriture animale pour cause d'accumulation des métaux lourds, Bulak et al. n'ont pas

constaté d'effet significatif sur la qualité de la masse sèche. Il reste préférable de prévenir la contamination des déchets organiques par les métaux lourds afin d'éviter leur accumulation (Gold et al., 2018). Pour les médicaments, pesticides et mycotoxines, la décomposition se fait grâce à des microbes présents dans les déchets organiques et les enzymes de l'intestin de la larve. Toutefois, plusieurs facteurs influencent leur décomposition (température, pH, flore microbienne, composition et disponibilité en nutriments) et nécessitent d'autres recherches (Gold et al., 2018).

Ainsi, depuis 2017, le traitement des déchets par *Hermetia illucens* (HI) a le vent en poupe, engendrant une augmentation des analyses de cycle de vie sur le sujet (Oonincx & De Boer, 2012 ; De Boer, 2014 ; van Zanten et al., 2015 ; Riera, 2017 ; Salomone et al., 2017 ; Bosch et al., 2019 ; Smetana et al., 2019). L'utilisation énergétique se manifeste comme étant le principal contributeur à l'impact environnemental direct. Selon la recherche, cela est imputable au processus de séchage (Salomone et al., 2017 ; De Boer, 2014), au maintien de la température ambiante (van Zanten et al., 2015 ; Oonincx & De Boer, 2012) et au transport (Salomone et al., 2017 ; Riera, 2017). Cette consommation énergétique importante pour le chauffage confirme l'idée que les installations situées dans des climats plus froids ont un impact plus important (Roffeis, 2015, Mertenat et al., 2019). En comparant le traitement des déchets par MSN à d'autres moyens, le système MSN s'avère plus avantageux que le compost mais moins que la digestion anaérobie (Komakech et al., 2015 ; Riera, 2017). En étendant le système à la production de protéines, les résultats diffèrent selon plusieurs paramètres. Si la source de protéines de MSN est considérée pour la consommation humaine, *Hermetia illucens* est plus intéressante environnementalement que les autres élevages terrestres (deux fois plus que la viande de volaille) (Oonincx & De Boer, 2012 ; Smetana et al., 2019). Si la production est envisagée pour l'alimentation d'élevage, l'impact environnemental du système est plus élevé que la farine de poisson et le soja (Riera, 2017 ; Bosch et al., 2019 ; van Zanten et al., 2015). Lorsque les productions évitées sont prises en considération, l'impact est moindre que les sources conventionnelles, notamment grâce à l'évitement de la production des fertilisants azotés (Salomone et al., 2017). De Boer (2014) estime qu'il y a peu de chance que cela remplace les produits à base de soja, et ce à cause de l'énergie nécessaire pour le chauffage. L'impact environnemental dépend du régime alimentaire de la larve de MSN. Les élevages dans des catégories alimentaires encore non-autorisées par la loi présentent des impacts plus faibles (Bosch et al., 2019 ; Smetana et al., 2019). Globalement, les recherches s'accordent sur le fait que le plus gros bénéfice repose sur la faible utilisation du sol (Salomone et al., 2017 ; Riera, 2017 ; van Zanten et al., 2017 ; Smetana et al., 2019).

La littérature concernant les émissions de gaz à effet de serre est très pauvre. De nombreuses analyses de cycle de vie se basent sur les émissions d'autres espèces d'insectes provenant de la recherche de Oonincx et al. en 2010. En 2019, deux études sur les émissions relatives au traitement des déchets par la mouche soldat noire permettent de compléter l'inventaire de données (Mertenat et al., 2019 ; Ermolaev et al., 2019). Les résultats montrent des émissions très basses de CH₄ et de N₂O : 0,38 kg CO₂-équivalent (Ermolaev et al., 2019) et 2,51 kg CO₂-

équivalent (Mertenat et al., 2019) par tonne de déchets traités. En termes de carbone biogénique, 96 kg CO₂ sont rejetés selon Ermolaev et al. (2019). Les émissions de CH₄ sont faibles par le mouvement constant des larves dans le substrat, évitant un environnement anaérobie qui active les microbes méthanogènes (respectivement 0,01 kg CO₂-équivalent et 0,09 kg CO₂-équivalent). Les émissions de N₂O sont plus variables. Elles proviennent de la nitrification et dénitrification de la matière organique dégradée en présence d'air. De ce fait, elles fluctuent selon les propriétés du substrat et l'activité microbienne (Ermolaev et al., 2015). Les substrats n'étant pas les mêmes pour les deux études, cela explique la forte différence d'émission de N₂O : 2,5 kg CO₂-équivalent et 0,29 kg CO₂-équivalent. Aucune émission de NH₃ n'a été détectée (Ermolaev et al., 2019). Le potentiel de réchauffement climatique du système est moindre que celui des traitements de déchets conventionnels et est augmenté (voire doublé) par le compost sur lequel sont élevées les larves, ainsi que par l'électricité requise par les équipements (Mertenat et al., 2019 ; Ermolaev et al., 2019 ; Salomone et al., 2017).

Le processus de traitement des déchets par la larve de mouche soldat noire reste encore une nouvelle technologie aux avantages confirmés en termes d'utilisation des sols, de production de protéines et de production évitées. Toutefois, certains inconvénients lui portent préjudice. Le plus récurrent se rapporte à l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du système (chauffage, séchage), ce qui génère un impact environnemental plus élevé dans les pays froids (Newton et al., 2005 ; Mertenat et al., 2019). Parmi les autres difficultés enregistrées dans la littérature, on notera la complexité à maintenir une production d'œufs et de larves constante et maximisée (Newton et al., 2005 ; Gold et al., 2018), le manque de technique pour un procédé à grande échelle, le manque de procédure de contrôle de qualité et les problèmes de réglementation (Alvarez et al., 2012).

Si le processus fait encore face à de nombreux challenges, cela n'empêche pas son développement. Entre 2014 et 2015, 61 compagnies de production et/ou de vente ont été recensées (Dossey et al., 2016). L'un des pionniers de l'élevage de BSF n'est autre qu'AgriProtein, une compagnie anglaise créée en 2008 en Afrique du Sud. Depuis, de plus en plus d'industries se construisent autour de la MSN, notamment en France, comptant presque une dizaine de projets industriels d'entomoculture avec *Hermetia illucens*, dont Mutatec, nextProtein et, plus récemment, BioMiMetic et Protfly. L'élevage s'est également étendu jusqu'au Pays-Bas avec les entreprises Ento Farm et Protix. En Belgique, Millibeter représente la plus grande ferme à MSN. Créée en 2012 puis rachetée en 2018 par AgriProtein, en prenant le nom de Circular Organics, l'entreprise fonde en 2017 le Kempen Insect Cluster, une plateforme de cocréation pour tout type d'entreprise ayant pour but la création de nouveaux produits et services autour de la bioconversion par les insectes.

3. Etat des lieux des traitements des ordures ménagères à Bruxelles

3.1. La hiérarchie des déchets

La politique européenne des déchets est régie par le principe de gestion hiérarchisée décrit dans l'article 4 de la Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, soit :

1. La prévention ;
2. La préparation au réemploi ;
3. Le recyclage ;
4. La valorisation (ie. énergétique) ;
5. L'élimination.

Cette politique s'inspire de l'échelle de Lansink (d'origine néerlandaise), et part du principe que le meilleur déchet est celui qui n'existe pas. Pour ce faire, la hiérarchie va tout d'abord préconiser la prévention, qui se veut d'éviter la production d'un déchet notamment par l'écoconception. Elle est quantitative si elle limite sa production, ou qualitative si elle réduit son impact sur l'environnement et la santé humaine. La préparation au réemploi se distingue du réemploi simple, considéré comme de la prévention. Le produit est ici récupéré, contrôlé, nettoyé voire réparé mais sans modification de forme et d'utilisation pour lequel il a été conçu. Vient ensuite le recyclage. Les matériaux du déchet sont retraités pour leur fonction initiale ou d'autres fins. La valorisation est majoritairement représentée par l'incinération du déchet qui libère de l'énergie. Cette énergie est transformée en électricité. Enfin, l'élimination consiste en l'incinération sans récupération d'énergie ou la mise en décharge de déchets. Il s'agit de la solution ultime pour des déchets sans possibilité d'exploitation (Directive 2008/98/CE ; Bruxelles Environnement, 2017).

Figure 1 : Echelle de Lansink

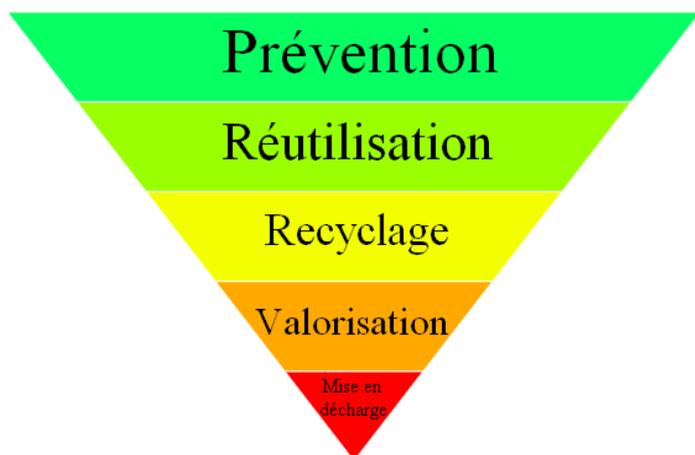
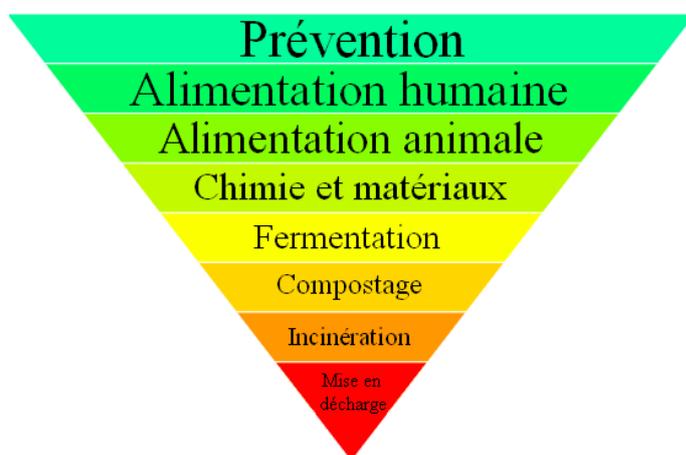


Figure 2 : Echelle de Moermann



Si l'échelle de Lansink s'applique surtout au non-organique, l'échelle de Moerman (également d'origine néerlandaise) l'étend aux matières organiques et s'adapte à la problématique du gaspillage alimentaire. La prévention est toujours la première solution proposée, afin de limiter les pertes alimentaires. Par la suite, le produit est redistribué d'abord pour l'alimentation humaine (par le biais des banques alimentaires), puis pour l'alimentation animale car estimé comme impropre à la consommation humaine. Avant d'être considéré comme un déchet, le produit peut être mis à la disposition du secteur de la chimie et des matériaux afin d'être utilisé comme matière première de substitution des énergies fossiles. Vient par après le recyclage par fermentation (production d'énergie et d'engrais) et par compostage (production d'engrais). Finalement, l'incinération, avec valorisation ou non, et la mise en décharge sont les derniers recours (Nederland Voedsel Land, 2018).

Si la Belgique a transposé cette hiérarchie dans sa législation nationale via la Directive 2008/98/CE, elle emploie aussi l'échelle de Moerman dans sa gestion des déchets, notamment dans le Plan REGAL adopté par le gouvernement wallon de 2015-2025 (SPW).

3.2. La Belgique en quelques chiffres

La Belgique a émis 114 Mt de CO₂équivalent pour l'année 2017. Le secteur des déchets représente 1,3 % des émissions produites, soit environ 1,5 Mt de CO₂ équivalent (EEA, 2017).

En 2016, la Belgique comptabilise une production totale de déchets de 63.152,337 kt tout secteur confondu. C'est le 11^{ème} pays européen producteur de déchets. 5.403,172 kt (8,5 %) sont attribués au secteur des ménages. Parmi ces 8,5 %, 1.846,6 kt (34,17 %) sont des déchets ménagers et assimilés (Statbel).

En 2018, elle a émis 4.698,489 kt de déchets municipaux¹. Cela représente une moyenne de 413 kilogrammes/habitant. Sur ces 4.698,489 kt de déchets, 43 % sont incinérés (dont 98 %

Figure 4: Production de déchets en kt, Belgique, 2016

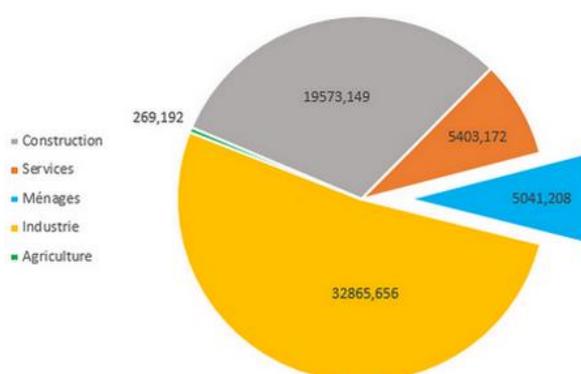
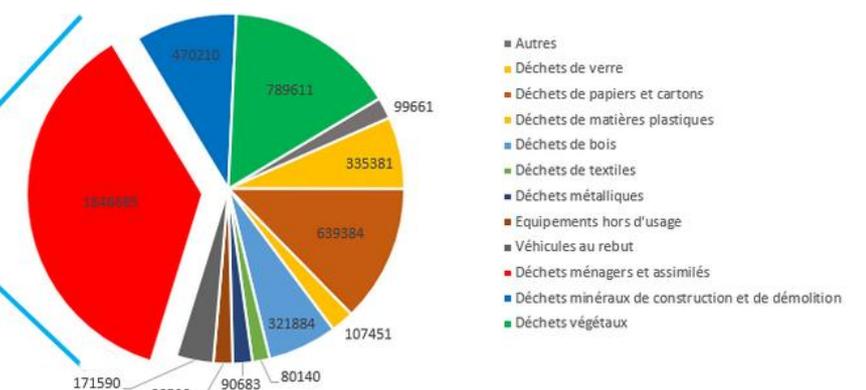
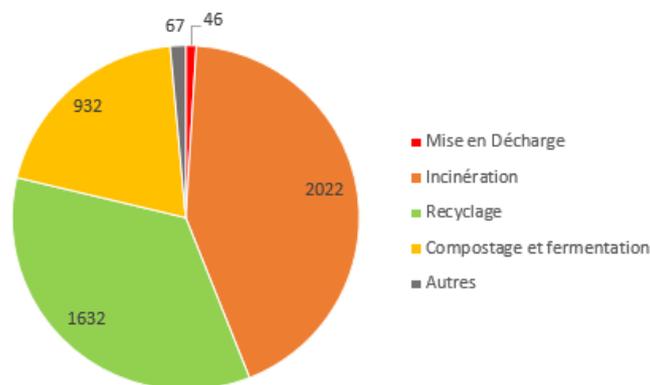


Figure 3: Production de déchets du secteur des ménages par type, en t, Belgique, 2016



avec récupération d'énergie), 34,7 % sont recyclés, 19,8 % sont compostés ou fermentés et 1 % sont mis en décharge (Statbel).

Figure 5 : Prise en charge des déchets municipaux en kt, Belgique, 2018



Pour 780.000 tonnes d'emballages ménagers manufacturés en 2018, elle en a recyclé près de 724.000 tonnes, soit un taux de 92,8 %. La Belgique fait donc partie des pays européens avec le plus haut taux de recyclage malgré une lacune dans le secteur plastique (Fostplus, 2020).

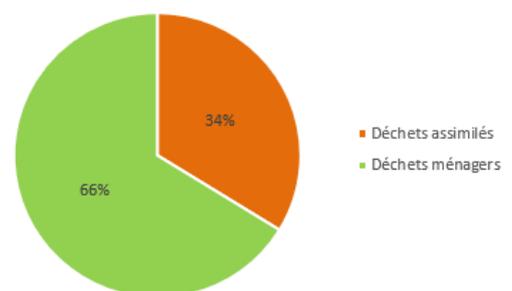
3.3. Focus Bruxellois

La Région Bruxelles-Capitale (RBC) dispose de spécificités qui influencent la politique et la stratégie de gestion des déchets (IBSA, 2017):

- Une forte densité de population : la région comptabilise 1.223 millions d'habitants pour une superficie de 161,38 km², soit une densité de 7.582 habitants/km² ;
- Un territoire fortement urbanisé : 7.602 ha sont des parcelles bâties, 5.235 ha des parcelles non-bâties et 3.301 ha sont non-cadastrées ;
- Une domination du secteur tertiaire qui constitue 92,4 % des emplois en RBC ;

À cela s'ajoute une production d'environ 1,5 à 2 millions² de tonnes de déchets pour la région majoritairement imputable au secteur de la construction/démolition, industriel et des services marchands et non-marchands (IBSA, 2014). 481.556 tonnes se rapportent aux déchets ménagers et assimilés en 2018, soit 393,75 kg/habitant. 36,5 % de ces déchets sont destinés à des filières de recyclage ou de réemploi tandis que 64,5 % sont valorisés énergétiquement (IBSA, 2019).

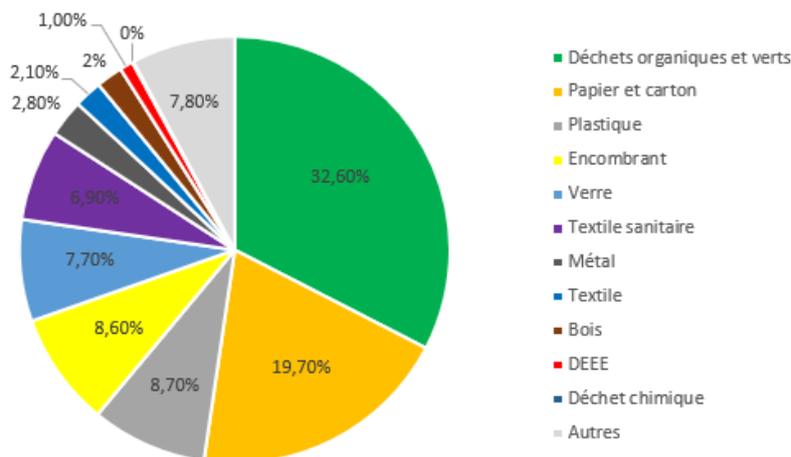
Figure 6 : Part des déchets ménagers et assimilés en t, Région Bruxelles-Capitale, 2018



² Approximation déduite sur base que le non-ménager est 3 à 4 fois plus important que la collecte en porte-à-porte (IBGE, 2017).

La composition de la poubelle des ménages bruxellois est à l'étude depuis 1995 selon la méthode MODECOM (Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères). Celle-ci analyse les données suivant le type d'habitat et la densité de population afin de mettre en place des collectes sélectives pertinentes (Environnement Wallonie). L'administration Urban Brussels (2014) a ainsi collecté les données de la Région de Bruxelles-Capitale :

Figure 7: Composition de la poubelle bruxelloise



La principale législation qui prévaut est l'ordonnance du 14 juin 2012 relative aux déchets (Moniteur Belge) qui reprend le cadre hiérarchique des déchets mis en place par la Directive 2008/98/CE du Parlement Européen. L'ordonnance planifie la prévention et la gestion des déchets en instaurant un objectif de préparation de 50 % des déchets municipaux en vue du réemploi et du recyclage d'ici 2020, et de 65 % pour 2030. Afin d'atteindre cet objectif, le tri des déchets à la source est indispensable ainsi que le renforcement du système des collectes sélectives et de leurs infrastructures de traitements, pour les ménages comme les activités professionnelles. L'obligation de tri des déchets ménagers a été instaurée en 2010 pour les ménages, puis en 2013 pour tous producteurs de déchets non-dangereux (IBGE, 2020). Actuellement, le papier et carton, les PMC, le verre, les déchets organiques, les bouchons de lièges, les instruments d'écriture, les piles et batteries, les cartouches et toners, les DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques), le bois, les déchets métalliques, la frigolite et les films plastiques souples font l'objet d'un tri en Région Bruxelles-Capitale.

Les compétences relatives aux déchets sont partagées entre les organes régionaux que sont Bruxelles-Environnement (IBGE – Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, sous la tutelle du ministre de l'environnement) et l'Agence Bruxelles-Propreté (ABP, sous la tutelle du secrétaire d'Etat à la propreté publique). L'IBGE représente l'administration chargée de la gestion de l'environnement et de l'énergie de la région de Bruxelles-Capitale. Depuis 1989, Bruxelles-Environnement planifie la gestion des déchets, sensibilise sur la prévention, le compostage ou encore la réutilisation, légifère les projets de réglementation tout en délivrant les autorisations administratives nécessaires aux entreprises et en contrôlant leur bon respect (IBGE, 2019). L'ABP est l'organisme para-régional créé en 1990 qui se charge de la collecte et

du traitement des déchets ménagers, via notamment des collectes en porte-à-porte, ainsi que des voiries et des espaces publics (ABP, 2020).

3.3.1. Plans, Programmes et Projets à Bruxelles

Le **Plan de Gestion des Ressources et des Déchets**, anciennement Plan Déchets, a pour mission « *de déterminer les grands axes de la politique de gestion et de prévention des déchets en Région de Bruxelles-Capitale* » (IBGE, 2018). Cinq plans se sont suivis pour réduire la production et augmenter le réemploi et le recyclage en s'attaquant à la source, la consommation et la gestion, permettant donc de rejoindre une gestion plus économiquement circulaire et un point de vue cradle-to-cradle. C'est actuellement le plan de 2018-2023 qui est en cours d'application. Ce dernier concerne les déchets solides des ménages et activités économiques en appliquant la politique régionale des déchets et en maintenant au maximum la valeur des ressources dans le système économique de la région. Il comporte trois grands objectifs :

- « *Ancrer une transformation des pratiques de consommation plus durables et plus circulaires ;*
- *Maximiser la préservation et la valorisation de la matière, si possible localement ;*
- *Entraîner le secteur économique de l'offre dans la pratique circulaire. »* (IBGE, 2018)

Ces objectifs seraient accessibles par un accompagnement et encadrement des ménages et des activités professionnelles dans leurs pratiques de consommation, dans une optique de zéro déchet, via notamment des formations, des subsides ou encore le label « entreprise écodynamique ». Ils s'expriment également par une grande sensibilisation de chacun, particulier comme professionnel. Leur vision mène à développer une nouvelle économie de la gestion durable des ressources par une large promotion du réemploi et du recyclage et ce grâce à une gouvernance efficace.

Adopté le 10 mars 2016, le **Programme Régional en Économie Circulaire** (PREC) se soucie du développement des alternatives d'économie sociale et circulaire bénéfiques aux Bruxellois ainsi qu'aux entreprises. Le programme dispose de trois objectifs majeurs :

- « *Transformer les objectifs environnementaux en opportunités économiques ;*
- *Ancrer l'économie à Bruxelles afin de produire localement quand c'est possible, réduire les déplacements, optimiser l'utilisation du territoire et créer de la valeur ajoutée pour les Bruxellois ;*
- *Contribuer à créer de l'emploi. »* (be circular, 2016)

C'est à travers le PREC que la région de Bruxelles Capitale a lancé les appels à projet « be circular », afin de soutenir tout indépendant ou entreprise désirant se développer économiquement à Bruxelles au service de l'environnement dans des secteurs tels que la construction, les ressources et déchets, la logistique et les commerces (be circular, 2016 et 2020).

Parmi les autres projets de Bruxelles se distinguent :

- **Le projet Ecopôle** : il s'agit de la plateforme de valorisation Recy-K, gérée et fournie par l'ABP, qui tend à la création d'emplois par le recyclage et le réemploi des déchets encombrants (EC, 2016) ;
- **Le projet Biométhanisation** qui vise l'installation d'une usine de biométhanisation dans un but de production d'électricité et de chaleur ainsi que de se défaire du traitement externe à la région des biodéchets, actuellement envoyés en traitement à Ypres ou encore Herstal.

3.3.2. La collecte

La Région de Bruxelles-Capitale, plus spécifiquement l'ABP, coordonne la collecte des déchets ménagers dans le cadre du service minimum. Celle-ci s'organise principalement en porte-à-porte mais est sujette au tri sélectif préalable de plus en plus conséquent effectué par les ménages. C'est-à-dire que les déchets sont regroupés par types et placés dans le sac de la couleur correspondant au type (CIRIEC, 2010 ; IBGE, 2017 et 2020) :

- Encombrants, sur inscription et payant (1991) ;
- Papier et cartons non souillés – Sac jaune (1996) ;
- PMC (contenant en plastique – métal – carton) – Sac bleu (1996) ;
- Déchets verts, de jardin – Sac vert (2002) ;
- Verre creux (1991) mais dépôt exclusivement en bulle à verre depuis 2009 ;
- Déchets organiques – Sac orange (2017) ;
- Ordures ménagères brutes ou résiduelles – Sac blanc.

À cela s'ajoute divers points de collecte et apports volontaires auprès desquels le citoyen peut y déposer gratuitement certains types de déchets. À noter que tout collecteur doit être agréé par l'IBGE (CIREC, 2010). La région dispose de sept parcs à conteneurs communaux et deux régionaux qui accueillent notamment les déchets verts, les métaux, le verre, le bois, les PMC, les huiles et graisses usagées, les déchets spéciaux et inertes. Qui plus est, l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 18 juillet 2002 instaure une obligation de reprise pour certains déchets. Cela s'applique pour les piles et batteries (Bebat), les DEEE (Recupel), les pneus (Recytyre), les huiles (Valorlub et Valofrit), les véhicules hors d'usage (Febelauto) ainsi que les médicaments périmés (Association Générale de l'Industrie du Médicament) (Moniteur Belge). Enfin, il existe des acteurs de l'économie sociale qui récoltent les DEEE, textiles ou encore le mobilier dans une optique de réemploi ainsi que des composts de quartier (+ de 200) pour les déchets organiques (IBGE, 2020).

L'IBGE considère que les collectes sélectives des papiers et cartons, du verre et des déchets de jardins sont « arrivées à maturité », car les quantités prélevées sont stables depuis

quelques années et ces derniers se retrouvent très peu dans les déchets résiduels (IBGE, 2020).

3.3.3. Le traitement

La Région de Bruxelles-Capitale applique donc l'échelle de Lansink relative au traitement des déchets. Le Plan de Gestion des Ressources et des Déchets expliqué ci-dessus s'occupe majoritairement de la prévention des déchets. La région travaille sur des campagnes de prévention qui amène citoyens et entreprises à produire et consommer moins de déchets et lutte contre les dépôts clandestins. Elle les dirige vers des outils de réduction de déchets organiques comme le compostage à domicile ou encore l'élevage de poules (CIREC, 2010).

Le réemploi et le recyclage sont tous deux promus par le Plan de Gestion des Ressources et des Déchets et par le PREC. Le réemploi s'ancre dans une organisation par les acteurs de l'économie sociale et circulaire. S'y retrouvent : les flux de vêtements, de meubles/encombrants et de DEE, voire les vélos. La Fédération des Entreprises d'Économie Sociale Actives dans la réutilisation et la valorisation des ressources selon une dynamique d'économie circulaire RESSOURCES regroupe douze entreprises membres en RBC dont Oxfam-Solidarité et les Petits Riens. Ces dernières ont, en 2017, atteint un taux de réemploi de 54 % tous flux confondus. Le restant est soit réinjecté dans les filières de recyclage (32 %), soit envoyé vers la valorisation énergétique (14 %) (RESSOURCES, 2018). À cela s'additionne le travail fourni par la plateforme Recy-K. Selon l'APB, le taux de réemploi et de recyclage est ici de 40 % à Bruxelles.

Le recyclage concerne majoritairement les déchets d'emballage. Cela requiert un tri préalable des déchets selon leur filière. Le traitement des PMC est géré par Recyclis à hauteur de 20 kt par an. Les contenants acheminés sont une nouvelle fois triés selon leur matériau de base (plastique, métal, carton), leur composition (PET, PEHD, acier, aluminium) et leur couleur (incolore, bleu, vert). Ainsi séparés, ils sont lavés et hachés en pétales prêts au recyclage. Par la suite peuvent être formés : de nouveaux emballages, des fibres textiles, etc. De même, le papier et les cartons, parmi lesquels sont injectés le carton des emballages ci-dessus, sont recyclés par Recyclis avec une capacité de 80 kt par an. Ils sont triés suivant leur qualité (car la fibre n'est réutilisable que cinq à sept fois), puis mélangés à de l'eau afin d'obtenir de la pulpe, de laquelle sont éliminés tous résidus, qui est parfois blanchie. Une fois cette dernière pressée et séchée, le nouveau papier ou carton peut être formé (IBGE, 2020 ; Fostplus, 2020 ; APB, 2020). Le verre récolté par les bulles à verre est envoyé chez un verrier où il sera fondu, purifié et recevra sa nouvelle forme (Fostplus, 2020). Les bois, métaux, plastiques durs et autres récupérés et triés dans les Recyparks sont redirigés vers leur filière d'origine.

La valorisation des déchets se divise entre déchets organiques et ordures ménagères brutes. Les déchets verts sont gérés par la filiale de l'ABP, Bruxelles-Compost, et Invader. Après un

processus long de cinq à six mois (extraction du plastique, broyage, aération, maturation, retournements et tamisage), les déchets verts se transforment en compost. Bruxelles-Compost possède une capacité de production de 9.000 à 10.000 tonnes par an qui seront revendus (Bruxelles-Compost). Les déchets organiques collectés dans les sacs orange sont envoyés dans les centres de biométhanisation de Ypres ou Herstal (IBGE, 2020). La matière organique y subit un processus de fermentation organique qui résulte en la production de biogaz et de digestat. Le premier pourra être utilisé comme combustible pour la production d'électricité et/ou de chaleur, tandis que le second sera valorisé comme fertilisant agricole (SPW).

Enfin, les déchets municipaux restants ne pouvant être ni réutilisés ni recyclés, soit les ordures ménagères brutes, sont envoyés à l'incinérateur tenu par Bruxelles-Energie. Elles servent alors de combustible pour la production d'électricité ou de chaleur. En 2019, Bruxelles-Energie a ainsi traité plus de 317.000 tonnes de déchets ménagers bruxellois. La combustion des déchets permet, par la génération de vapeur d'eau, d'activer des turbines qui produiront de l'électricité. De plus, la chaleur fournie par la combustion est récupérée et envoyée dans un réseau de chaleur mis en place en 2016. L'incinération résulte donc en la formation de divers produits finaux. Certains sont directement utilisés par l'entreprise comme l'électricité ou la chaleur, d'autres sont envoyés en dehors de la région pour revalorisation (mâchefer, cendres volantes, ferrailles, sel de lavage) et une infime partie est dirigée vers une décharge après stabilisation (Bruxelles-Energie, 2020 ; ABP, 2017).

S'il a longtemps été le mode principal de traitement des déchets, il n'existe pas de centre d'enfouissement en RBC, par manque d'espace mais aussi pour cause d'une population réticente (IBGE, 2015). De plus, une partie des déchets ménagers est traitée en dehors de Bruxelles pour des raisons environnementales, urbanistiques et économiques (ABP, 2017).

Tableau 2 : Résumé des traitements des déchets municipaux à Bruxelles

	Entrée(s)	Infrastructure de traitement	Sortie(s)
Réemploi			
	DEE	Recy-K, Entreprises membres de RESSOURCES	Reconditionnement et revente
	Vêtement		
	Meuble/Encombrant		
	Vélo		
Recyclage			
	PMC	Recyclis (20.000 T/an)	Contenants, fibres textiles, réinjection dans le secteur sidérurgique et alimentaire
	Papier et carton	Recyclis (80.000 T/an)	Papier, carton, mouchoir, essuie-tout, papier toilette
	Verre	Verrerie	Verre

	Matière récupérable (bois, métal, plastique dur, liège, etc.)	Recypark	Envoyé dans la filière adéquate
Valorisation énergétique			
	Déchet vert	Bruxelles Compost (+- 18.000 T/an)	Revente de compost
	Déchet organique	Centre de biométhanisation de Ypres et Herstal (8.000 T/an)	Biogaz (électricité et chaleur)
			Digestat (fertilisant)
	Ordures ménagères brutes	Bruxelles Energie (317.000 T en 2019)	Vapeur
			Electricité
			Ferraille (Sidérurgie)
			Mâchefer (Pays-Bas)
			Cendre volante (Allemagne)
			Sel de lavage des fumées (France)
			Boue de traitement
Il n'y a pas de centre d'enfouissement en Région Bruxelles-Capitale.			

3.3.4. Les biodéchets en région Bruxelles-Capitale

Si la collecte séparée des déchets organiques alimentaires et verts s'étend depuis quelques années dans la région, il est nécessaire de rappeler que ce type de déchet compose une large partie des déchets municipaux envoyé à l'incinération. En 2018, une étude (Bortolotti *et al.*, 2018) commanditée par le département déchet de Bruxelles Environnement porte sur les quantités de déchets organiques produits et collectables. Les estimations des gisements totaux sont effectuées pour les déchets alimentaires, séparés en biodéchets contenant des protéines animales (BCPA) et biodéchets végétaux non préparés (BVNP), ainsi que pour les déchets verts, également divisés en déchets verts des espaces boisés (EB) et déchets verts des espaces de pelouses. L'analyse relève un gisement total des biodéchets équivalent à 190.800 t/an, dont une estimation de collecte de 67.900 t/an.

Tableau 3 : Gisements totaux et collectables (estimations basse et haute) (en t/an) (Bortolotti et al., 2018)

	Gisements totaux	Gisements collectables	
		Est. basse	Est. haute
Ecoles et univ. (BCPA)	8.300	1.600	3.300
Bureaux et entreprises non alimentaires (BCPA)	2.200	400	900
Activité de soins de santé (BCPA)	3.000	600	1.200
Marchés (BVNP)	9.400	1.900	3.700
HoReCa (BCPA)	12.500	2.500	5.000
Ménages (BCPA)	82.400	16.300	32.700
Ménages (BVNP)	8.500	1.700	3.400
TOTAL BCPA	108.400	21.500	43.000
TOTAL BVNP	17.900	3.500	7.100
TOTAL déchets alimentaires	126.300	25.000	50.000
Ecoles et université	2.000	900	
Bureaux et entreprises non alimentaires	3.600	1.700	
Activité de soins de santé	900	400	
Marchés	-	-	
Espaces verts (Communes)	14.500	3.500	
Espace verts (Région)	19.000	0	
HoReCa	100	100	
Ménages	24.400	11.300	
TOTAL déchets verts	64.500	17.900	
TOTAL biodéchets	190.800	67.900	

Dans son rapport scientifique de 2019, l'Opération Phosphore reprend les données fournies par l'analyse et les transpose dans le système de collecte et de traitement des déchets organiques à Bruxelles.

Parmi le gisement de 126 kt de déchets alimentaires :

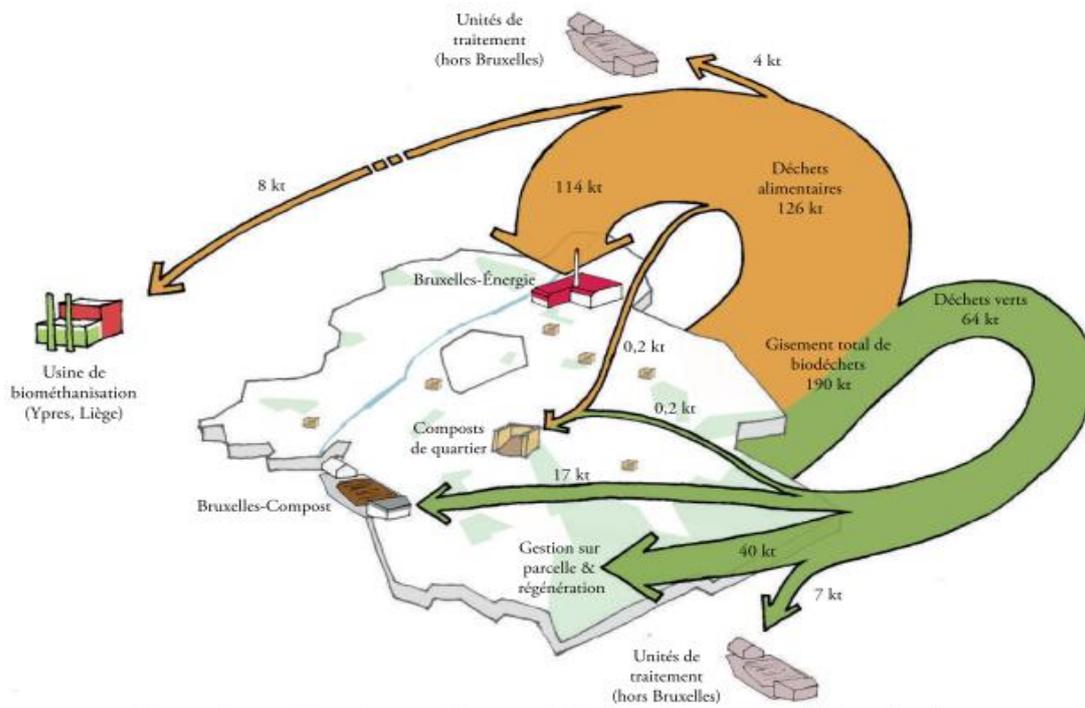
- 114 kt sont incinérés par Bruxelles-Energie ;
- 8 kt sont biométhanisés dans les usines de Ypres ou Herstal ;
- 4 kt sont envoyés dans des unités de traitement hors Bruxelles ;
- 0,2 kt sont compostés dans des composts de quartier.

Parmi le gisement de 64 kt de déchets verts ;

- 40 kt servent à la gestion de parcelles et la régénération des sols ;
- 17 kt sont compostés par Bruxelles-Compost ;
- 7 kt sont envoyés dans des unités de traitement hors Bruxelles ;
- 0,2 kt sont compostés dans des composts de quartier.

Le rapport souligne ainsi « un système globalement industriel, linéaire et polluant ».

Figure 8 : Gisements totaux et collectables (estimations basse et haute) (en t/an) (Bortolotti et al., 2018)



Pourtant, et dans une optique de stratégie de la transition, l'Opération Phosphore insiste sur la disponibilité de nombreuses techniques de traitement et de valorisation de matières organiques dans la région de Bruxelles-Capitale. Ceux-ci ont été identifiés par Bortolotti et al. (2016), qui différencie neuf techniques : le compostage, le vermicompostage, les toilettes sèches, la valorisation animale, la biométhanisation, la déshydratation, l'éco-digestion, les micro-organismes efficaces (EM) et le paillage. C'est dans ce sens que s'inscrit également Valuebugs et son traitement des déchets organiques par les larves de mouche soldat noire, une valorisation animale à l'échelle décentralisée.

4. La mouche soldat noire (*Hermetia illucens*)

La mouche soldat noire (MSN), de son nom binominal *Hermetia illucens* introduit par Carl von Linné en 1758, est un insecte de l'ordre des Diptères et de la famille des Stratiomyidae. Originaire des Amériques, entre les latitudes 40° Nord et 40° Sud (McCallan, 1974), l'espèce s'est actuellement étendue dans les régions à climat chaud, tropical ou subtropical du monde (Dortmans et al., 2017). Sa présence est également recensée en France, notamment dans les régions du Sud, par l'INPN (système d'information de référence pour les données sur la Nature). Pour autant, la MSN n'est pas considérée comme indésirable car elle n'est pas attirée par les habitations humaines ou la nourriture (Newton et al., 2005), ni comme un vecteur de maladie (Furman et al. 1959 ; van Huis et al., 2013). Elle se rencontre naturellement dans des installations confinées où la nourriture s'accumule, comme les élevages animaliers (Nguyen et al., 2013). La larve de MSN est un concurrent direct aux larves de mouche domestique (*Musca domestica*), par régulation de l'oviposition des adultes (Sheppard et al., 1994).

Le cycle de vie de MSN est divisé en cinq phases, d'une durée d'environ 40 jours, toujours selon les conditions du système de température, d'humidité, de régime alimentaire et de densité (Alvarez, 2012 ; Tomberlin et al., 2002) :

- L'œuf : 102 à 105 heures sont nécessaires à l'éclosion des larves après oviposition (Booth & Sheppard, 1984).
- La larve : cette phase est elle-même composée de six périodes de mue de leur exosquelette, appelées « instars » (Rozkošný, 1997). Cette période d'une quinzaine de jours se voit essentiellement occupée par l'engraissement des larves pendant laquelle elles obtiendront une taille pouvant atteindre 2,5 cm et un poids variant de 200 à 500 mg (Nguyen et al., 2013 ; Salomone et al., 2017).
- La prépupe, ou migration : lorsque les larve se sont assez développées, elles quittent le site de nourriture afin de migrer vers une zone propice à leur pupation, plus sec et sombre (Sheppard et. al. 1994). C'est aussi à ce stade-ci qu'elles changent de couleur, devenant très foncées. Il est supposé qu'elles laissent un marqueur chimique lors de leur migration, permettant aux suivantes d'accéder au même site de pupation et ainsi éviter une perte trop importante de leur réserve de gras. Elles ne mangent plus à partir de ce déplacement.
- La nymphe, ou pupation : c'est la période de transformation des larves diptères en nymphe. Cela dure de 2 à 3 semaines (Newton et al., 2005).
- L'adulte : la mouche, enfin libérée de sa nymphe, est formée. Elle ne se focalisera que sur son accouplement, qui commencera deux jours après sa pupation. Il faudra encore deux jours pour que la femelle pondre ses œufs (600 en moyenne), dans un lieu proche d'une source de nourriture (Sheppard et al., 2002). Lorsque la réserve de graisse est épuisée (environ 12 jours), l'adulte meurt, celui-ci ne se nourrissant pas à cause d'un appareil buccal atrophié (Myers et. al. 2008).

Hermetia illucens présente des caractéristiques avantageuses quant à son utilisation pour traiter les déchets. Son alimentation est très large : fumiers d'origine animale (porcs, poules, bovins), fruits et légumes, déjections humaines, déchets organiques de cuisine et de restaurant, boues d'épurations, charognes, tissus végétaux comme la cellulose ou encore de la moisissure, même si cette dernière peut entraîner une léthargie (Kalová, 2012, Nguyen, 2010 ; Rozkošny, 1983 ; Sheppard et. al., 2002 ; Tomberlin et. al 2002). La larve de MSN est très vorace, ce qui lui permet de traiter les déchets organiques rapidement et de les réduire jusqu'à 50 % de leur masse initiale (Diener et al., 2010 ; Salomone, 2017), mais aussi de les convertir d'une part en biomasse larvaire et d'une autre en compost immature (Zurbrügg et al., 2018).

Vient ensuite sa composition³ : la larve est riche en protéines (37,6 %), ce qui en fait une source de protéines non-négligeable pour l'alimentation animale, ainsi qu'en lipides (32,3 %), favorable à une valorisation en biodiesel (Li et al., 2011). Elle présente de très bons taux en acides aminés essentiels, acides gras et micronutriments (Spranghers, 2016). Certains chercheurs avancent que la larve contient des antibiotiques naturels qui, en modifiant la microflore du substrat, inhiberaient *Escherichia coli* et *Salmonella enterica* (Erickson et al. 2004 ; Newton et al., 2008).

Tableau 4 : Composition de la larve de mouche soldat noire en acides aminés, acides gras et minéraux

Contenu de la larve de MSN en acides aminés essentiels en g/kg		Contenu de la larve de MSN en acides gras en g/kg		Contenu de la larve de MSN en minéraux en g/kg	
Lysine	21.7	Acide laurique	151	Calcium	29.7
Thréonine	14.5	Acide myristique	22.5	Phosphore	6.8
Méthionine	6.8	Acide palmitique	39.6	Magnésium	3
Tryptophane	5.4	Acide palmitoléique	15.2	Potassium	6.7
Isoleucine	15.8	Acide stéarique	7.6	Sodium	0.87
Valine	22.5	Acide oléique	39.1	Soufre	1.6
Leucine	26.3	Acide linoléique	22.1	Manganèse	0.196
Phénylalanine	15.2	Acide linoléique	3.2	Zinc	0.096
				Cuivre	0.012
				Fer	0.238

Sa capacité de décomposition des macronutriments et d'absorption des nutriments par la digestion s'opère principalement dans l'intestin moyen de la larve. Il contient des enzymes qui hydrolysent les macronutriments en plus petites molécules. Celles-ci ainsi réduites pourront être absorbées par les cellules de l'intestin (Chapman, 2013). Les carbohydrates deviennent de simples sucres, les protéines des acides aminés et les lipides des glycérides et acides gras (Carvalho et al., 2012). Le déchet ingéré est stabilisé à la fin du cycle de digestion, ce qui limite le développement de bactéries et de microbes (par les lysozymes, chitinases et glucanases)

³ Sur base des tables INRA-CIRAD-AFZ : <https://www.feedtables.com/fr/content/larves-de-mouche-soldat-matieres-grasses-20-deshydratees-0>

(Lemaitre & Miguel-Aliaga, 2013), de champignons ou de mauvaises odeurs (Diener et al., 2010 ; Salomone, 2017). Les mycotoxines et insecticides ingurgités sont eux-aussi traités par les enzymes Cytochrome P450 et glutathion S-transferase (Fusetto et al., 2017). Les fibres comme la cellulose, l'hémicellulose et la lignine ne sont pas décomposées par la larve, mais par certains microbes anaérobiques présents dans les biodéchets, et ce grâce à leurs enzymes cellulases (Terra & Ferreira, 2012).

À la fin de son développement larvaire, la larve de MSN migre d'un site de nourriture vers un site de pupation, aux conditions différentes. Cela rend la récolte des élevages plus simple. Lors de sa migration, elle vide son tube digestif, réduisant le risque de porter des microorganismes pathogènes (Spranghers et al., 2016).

*4.1. Conditions optimales d'élevage de *Hermetia illucens**

Lors des études faites sur les traitements des déchets organiques par la MSN, certaines conditions de température, d'humidité et d'autres facteurs, suivant son stade de développement, ont été relevées par les chercheurs afin de favoriser l'efficacité des systèmes d'élevage. Selon que ces conditions soient respectées ou non, le développement d'une larve peut prendre de deux semaines à quatre mois (Cickova et al., 2014)

Le stade de l'œuf est très peu décrit dans la littérature. Alvarez (2012) indique qu'un site de ponte favorable possède une température de 27°C pour une humidité de 60 %.

La phase larvaire est celle posant le plus d'exigences. Barry (2004) préconise des températures entre 29 et 31°C, une humidité entre 50 et 70 % et une bonne oxygénation du système. Sheppard et al. (2002) augmenteront cet éventail de température de 27 à 33°C. Kalová et al. (2012) iront jusqu'à 37°C. Les trois articles sont toutefois accordés que des températures plus basses sont viables jusqu'à 21°C en prenant en considération la production de chaleur par le mouvement de la larve. Concernant l'humidité, Diener et al. (2009) annoncent un taux préférable de 60 %. Ils évoqueront en 2011 que l'installation d'un système de drainage améliore la réduction des déchets d'environ 10 %. En cas d'humidité trop importante, le développement des larves est affecté car ces dernières partiront de la source d'alimentation. Cela s'est surtout constaté lors du traitement des sorties de traitements de biogaz, des déchets des égouts, des boues de traitements et des eaux usées (Fatchurochim et al., 1989 ; Kalová et al., 2012). La profondeur de la source de nourriture possède son importance, soit 15 à 20 cm maximum, sinon les larves errent dans la masse organique et perdent leur masse grasseuse (Alvarez, 2012). L'étude de Parra Paz et al. (2015) relève une densité optimale de 1,2 larves par cm². Une fréquence de nourrissage de 100 mg par jour par larve est relayée Diener et al. (2009) et est reprise dans plusieurs articles comme étant le plus bénéfique car présentant le meilleur taux de réduction des déchets et de production de pré-pupes riches en nutriments. Trop de nourriture amenée en une seule fois augmente d'ailleurs le taux de mortalité chez les jeunes larves (Cickova et al., 2014 ; Parra Paz et al., 2015). Un environnement favorable à leur développement comprendra donc un site humide comme

source de nourriture et un site plus sec approprié à la pupation, tous deux reliés par un chemin permettant la migration des larves (Alvarez, 2012). Les conditions de températures évoquées montrent donc une problématique à prendre en considération quant au développement d'élevages dans les régions froides du globe (Cickova et al., 2014).

L'adulte, très territorial, a besoin d'espace pour pouvoir se reproduire ainsi que d'un site de ponte sec présentant des crevasses. Naturellement, les mouches pondent près d'une source de nourriture. En élevage, ces deux sites ne communiquent pas entre eux, nécessitant une intervention humaine (Cickova et al., 2014). L'oviposition survient à partir de 27°C et l'accouplement est favorisé par la lumière naturelle ou une luminosité de 200 micromoles/m²/s pouvant être apportée par une lampe artificielle (Sheppard et al., 2002 ; Cickova et al., 2014). Aucune source ne rapporte le nombre d'adultes par volume.

5. Les différentes implications

5.1. Implications environnementales

La gestion des déchets par la MSN s'inscrit donc dans la résolution de deux problèmes globaux : d'une part la gestion des déchets et l'augmentation du gaspillage alimentaire, d'autre part la demande alimentaire croissante en concurrence avec la production d'énergie pour l'utilisation des sols (Salomone et al., 2017 ; Riera, 2017). La FAO (2012) quantifie le gaspillage alimentaire à 1,6 milliards de tonnes par an dans le monde. Selon l'Eurobaromètre (2017), 88 millions de tonnes de nourriture sont perdues par an en Europe, soit 173 kg/personne et 20 % de la production de l'Union européenne. Ce chiffre s'élèverait à 345 kg en Belgique, ce qui en fait le deuxième pays gaspillant le plus après les Pays-Bas. La quantité rejetée augmente d'année en année et la projection européenne pour 2020 est de 126 millions de tonnes. À cela s'ajoute un système alimentaire mondial produisant de 19 à 29 % des émissions de gaz à effet de serre (Vermeulen et al., 2012). Cela en fait le troisième plus grand contributeur de gaz à effet de serre. Selon le niveau d'industrialisation du pays, ce gaspillage n'apparaît pas au même stade du système. Dans les pays riches, cela se manifeste principalement au moment de la distribution et de la consommation des ménages, tandis que dans les pays en développement, les pertes surviennent surtout en amont de la chaîne d'approvisionnement (FAO 2012).

Elever des MSN dans un substrat à base de déchets organiques utilise une approche d'économie circulaire en ce sens qu'il réduit la quantité de déchets organiques par sa fonction de traitement, tout en produisant une source alimentaire (larves entières, protéines ou graisses) ou énergétique (graisse pour la production de biodiesel).

La méthode possède un excellent potentiel de réduction pour les déchets de restaurant, étant donné la quantité jetée, mais également les déchets municipaux solides. Ces derniers inquiètent beaucoup les gouvernements des pays en voie de développement en raison de

leurs effets sur la santé humaine et environnementale car les infrastructures et techniques de traitement et d'assainissement dont ils disposent sont inadéquates et de piètre qualité, ne permettant pas de tout collecter, et entraînant une pollution atmosphérique, des dangers pour la santé (respiratoires, intestinales, etc.), ou encore des inondations (Sarpong et al., 2019 ; Barry, 2004 ; Diener et al., 2011).

Les insectes détiennent des conditions d'élevage plus intéressantes que les élevages de bovidés. Étant poïkilothermes, leur métabolisme ne doit pas constamment réguler la température. Cela a pour résultat une meilleure conversion des matières premières en masse animale que le bétail. De plus, l'entièreté de l'insecte est comestible (van Huis et al., 2013).

Ils sont globalement considérés comme étant une source de protéines ayant un moindre impact environnemental par rapport à la production de viande animale. L'élevage, c'est 14,5 % des émissions de GES d'origine anthropique, soit 7,1 gigatonnes d'éq CO₂ par an. La chaîne d'approvisionnement de viande bovine représente à elle seule 35 % de ces émissions (FAO, 2016). Le pâturage occupe 26 % des terres émergées mondiales qui contribuent à la déforestation (FAO, 2006). L'élevage, c'est aussi une consommation en eau bleue⁴ de 550 l/kg de viande de bœuf, 459 l/kg de viande de porc et 313 l/kg de viande de volaille (Mekonnen et Hoekstra, 2012). La MSN, elle, ne produit que peu de méthane par le mouvement constant des larves dans le substrat et parce qu'elle ne possède pas de bactérie méthanogène dans son système digestif (Hackstein et Stumm, 1994 ; Cickova et al., 2014). Ses installations nécessitent également peu d'espace et d'eau (van Huis et al., 2013). Selon Oonincx et al. (2010), la MSN ne produit moins de gaz à effet de serre et d'ammoniac que les porcs et le bétail à poids équivalent. Mais suivant la matière première donnée et le système de production, les impacts peuvent considérablement augmenter et être similaires à ceux des volailles et des porcs (Oonincx, 2017 ; Smetana et al., 2016).

Les sources principales de protéines dans l'alimentation animales sont le tourteau de soja et la farine de poisson. Avec ses 363 millions de tonnes en 2018-2019 et des cultures s'appropriant plus d'1 million de km², le soja est en pleine expansion, et ce depuis des dizaines d'années. Le tourteau de soja présente un grand intérêt nutritionnel et protéinique, si bien que 98 % de sa production soit destiné à l'alimentation animale (WWF, 2014). En moyenne, un éleveur utilisera 173 g de soja pour produire 1 kg de bœuf, 263 g pour 1 kg de porc, 307 g pour 1 kg d'œuf et 575 g pour 1 kg de volaille (Hoste and Bolhuis, 2010). Cependant, le soja fait l'objet de nombreuses controverses concernant ses impacts sur l'environnement. Pour ne citer qu'eux : destruction des écosystèmes et de la biodiversité, dégradation des sols, demande importante en énergie et en eau, utilisation de produits phytosanitaires en masse, OGM, sans oublier certaines conséquences sur les populations locales, etc (WWF, 2014).

La farine de poisson est fabriquée à base de petits poissons pélagiques de faible valeur économique. En 2018, 5,6 millions de tonnes de farine ont été obtenus, nécessitant environ

⁴ L'eau bleue ne considère que les eaux douces de surfaces et souterraines captées pour l'agriculture qui ne peuvent revenir au système dont elles sont issues. (Sab Miller et WWF, 2009)

20 millions de tonnes de matières premières (75 % de poissons entiers et 25 % co-produits de transformation de poisson sauvage et d'élevage). 70 % de la production de la pêche minotière est directement consommée par le secteur de l'aquaculture. Le reste se partage principalement entre les élevages de porcs et de volailles (EUMOFA, 2019). La pêche minotière, industrielle et intensive, contribue à la surpêche des ressources halieutiques. Elle perturbe dès lors les stocks de poissons, ce qui engendre d'un côté une perte de diversité génétique, et de l'autre un déséquilibre dans les réseaux trophiques. La farine de poisson est sujette à des risques sanitaires comme la bioaccumulation de métaux lourds, le développement de parasites et de microorganismes, etc. (CIWF, 2019).

Ainsi comparé aux sources de protéines conventionnelles (le soja et la farine de poisson), produire de la protéine via la MSN semble avantageux : peu d'utilisation du sol et d'eau, donc pas de pression sur les écosystèmes. Pourtant, les résultats environnementaux de la MSN sont mitigés. Certaines études montrent des impacts plus élevés notamment à cause des émissions du substrat et les besoins en électricité du système (Bosch et al., 2019 ; Mertenat et al., 2019 ; Smetana et al., 2016 ; Roffeis, 2019). D'autres soulignent la capacité du système à substituer ces sources alimentaires grâce au potentiel de réduction des déchets de l'agriculture, des déchets municipaux ou même du lisier d'animaux d'élevage (Diener et al., 2011 ; Rehman et al., 2017). En améliorant l'efficacité de la conversion et du système d'élevage, principalement de la consommation d'énergie, la biomasse de MSN devient très compétitive face aux sources de protéines conventionnelles (Bosch et al., 2019 ; Salomone et al., 2016). Elle serait alors une très bonne alternative au soja, ce qui permettrait, à grande échelle, de réduire la pression exercée sur l'utilisation des écosystèmes par les cultures (Spranghers et al., 2016).

Une autre substitution possible concerne le biodiesel. Celui-ci est principalement obtenu par des huiles comestibles, ce qui exerce des pressions sur l'utilisation des sols. Il entraîne un phénomène de changement d'affectation des sols indirects (CASI), c'est-à-dire l'installation d'une culture énergétique au détriment d'une culture alimentaire, qui se voit déplacée et qui provoque une pression supplémentaire sur les sols, par la création de nouvelles surfaces agricoles et une augmentation des prix de l'alimentaire (Fritsche et al., 2011). De plus, les procédés utilisés produisent des résidus solides dont l'effet sur l'environnement est encore peu connu. L'élevage de MSN pourrait servir ici de traitement à ces résidus en plus de produire lui-même du biodiesel (Zheng et al., 2011).

Enfin, la question du transfert et de l'accumulation de contaminant au sein du système vers la chaîne alimentaire préoccupe encore cette nouvelle industrie (van der Fels-Klerx et al., 2018). Plusieurs études ont déjà démontré que le traitement des déchets par la MSN peut réduire la quantité de microbes présents et que certains pesticides, produits pharmaceutiques et mycotoxines n'étaient pas accumulés (Bosch et al., 2017 ; Lalander et al., 2017). Il en va de même pour les dioxines, les composés organochlorés et les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) (Charlton et al., 2015 ; Purschke et al., 2017). Par contre, des recherches ont remarqué une accumulation de métaux (cadmium, mercure, zinc, plomb et arsenic) dans les

résidus et une concentration pouvant dépasser les niveaux maximaux autorisés par la réglementation relative aux aliments pour animaux (Diener et al., 2015 ; van der Fels-Klerx et al., 2018 ; Sarpong et al., 2019). Ce manque de précision et de compréhension ne permet pas d'assurer un usage sans risque pour la sécurité alimentaire et limite l'utilisation de son substrat comme amendement pour le sol.

À l'échelle industrielle, la MSN s'avère donc être une méthode à exploiter afin de réduire les pressions environnementales induites par le gaspillage alimentaire, la production des sources de protéines et de biodiesel conventionnels, mais qui demande encore des recherches approfondies pour obtenir de meilleures connaissances sur les possibles risques alimentaires de la bioaccumulation et environnementaux du substrat, ainsi que pour améliorer le procédé de traitement gourmand en énergie. Si appliqué à l'emploi par des particuliers, les implications environnementales n'ont pas encore été démontrées. Les hypothèses suggèrent un système moins dépendant en besoins énergétiques car faisant fonction de la température ambiante et non d'une consommation spécifique au sein du ménage. Les larves entières peuvent être consommées par les animaux de compagnie, substituant dans une certaine mesure à l'achat de nourriture et évitant les impacts de cette production. En revanche, la question de l'utilisation du substrat et de la bioaccumulation reste les mêmes qu'au niveau industriel.

5.2. Implications économiques

Il est dénombré dans la littérature au moins cinq produits de la MSN ayant une valeur économique exploitable : les protéines, les graisses, la chitine, le digestat et le Cadmium.

La composition riche en protéines (37,7 %) et en graisses (32,3 %) de la larve de mouche soldat noire permet à celle-ci d'être une ressource nutritive alternative aux alimentations conventionnelles proposées actuellement dans les élevages animaux (Nguyen et al., 2015), notamment ceux des poules, des porcs, et des poissons (Newton et al., 1977 ; Makkar et al., 2014), mais aussi des animaux de compagnies (Bosch et al., 2014). Le coût de l'alimentation de ces élevages représente 60-70 % du coût total de production (van Huis et al., 2013) et est majoritairement composé de tourteaux de soja et de farine de poisson, contenant respectivement 44 % et 64-65 % de protéines et coûtant 309 et 1.286 € la tonne (selon IndexMundi, juillet 2020). Gold et al. (2018) considèrent que les revenus d'un système de traitement des déchets par MSN pourraient être bien plus élevés que d'autres traitements, de par la production d'un substrat valorisable mais surtout de protéines de bonne qualité exploitable en élevage, estimées à 300 € par Newton et al. (2005). D'autres pensent que ce chiffre est encore plus élevé grâce aux acides aminés contenus dans la larve, mais aussi à d'autres éléments tels que l'acide laurique, les peptides antimicrobiens et la chitine qui rendent la qualité d'une alimentation à base de MSN meilleure (Sánchez Muros et al., 2014 ; Gasco et al., 2018). Pourtant, Roffeis (2019) démontre par ses analyses de coûts du cycle de vie que les performances économiques d'un système d'élevage de MSN est très dépendant

de l'efficacité de la conversion, de l'organisation du processus de production et du contexte géographique. Il souligne que plus la demande en main d'œuvre et en infrastructure est importante, moins le système est économiquement avantageux. À ce jour, les modèles développés d'aliments à base d'insectes présentent des inconvénients économiques face aux sources de protéines conventionnelles comme le tourteau de soja.

Le digestat produit par les larves a une réduction de l'azote et du phosphore équivalente à 80,5 % et 75,7 % par rapport au substrat de base. Celui-ci est donc favorable à une réutilisation dans l'agriculture (Diener, 2010). Myers et al. (2008) en ont fait l'expérience. Cependant, les résultats obtenus sur du basilic et de l'herbe du Soudan n'étaient pas satisfaisant. Salomone et al. (2017) soulignent un besoin de plus de recherches dans l'utilisation du digestat de MSN comme fertilisant.

Les graisses de *Hermetia illucens* attirent l'attention des producteurs de biodiesel, actuellement produit par des huiles comestibles (colza, palme, soja, tournesol). Cette utilisation de ces huiles pose plusieurs problèmes économiques. Le biodiesel (B99/100) est à 3,51 \$ par gallon tandis que le diesel est à 3,09 \$ par gallon, soit un coût 13 % plus cher (US Department of Energy, 2019) et crée de la concurrence avec la demande alimentaire. Li et al. (2011) ont déjà prouvé que la conversion de déchets par la MSN en biodiesel était possible en transformant 1.200 larves en 15,8 g de biodiesel, ce qui ouvrirait éventuellement une autre perspective pour le marché, notamment en réduisant la concurrence sur les terres avec la production de denrées alimentaires.

Sa chitine possède un taux élevé en azote (6,9 %) et est exploitable, notamment dans l'industrie pharmaceutique, biologique et biotechnologique (Kumar, 2000). Le prix de vente varie fortement selon la qualité de celle-ci, entre 20 et 364 \$ le kilo selon ChemicalBook.

Le cadmiun accumulé dans le puparium (enveloppe que l'adulte quitte en fin de pupation), est présent en grande quantité. Cela laisserait, d'après plusieurs articles, une possibilité d'application dans le processus de récupération du métal. Cette solution avait déjà été proposée pour d'autres espèces de fourmis, de scarabées ou encore de termites (Sarpong et al., 2019 ; Erwin et al., 2013). Le cours du Cadmium est estimé à 1.080 \$/lb, soit 2,18 €/kg.

La production de prépupes varie par rapport aux conditions d'élevage. En 1994, Sheppard et al. produisaient 52,8 tonnes de prépupes pour un poulailler de 100.000 individus en huit mois⁵. En 2005, Newton et al. faisaient la même expérience et obtiennent 48 tonnes en cinq mois⁶. Mais ces installations des systèmes de traitement des déchets par la MSN ont un coût. Cela peut aller jusqu'à 25.000 \$ par an par poulailler suivant leur taille. Selon qu'il faille amener

⁵ Le système est situé dans l'état de Géorgie (USA) et se construit comme suit : 460 cages de poules modifiées par un fond de récupération du fumier en béton incliné, qui rejoint un bassin de fumier où se trouvent 15 litres de larves. Ce bassin possède un dispositif d'auto-collecte des larves.

⁶ Le système est situé dans l'état de Caroline du Nord (USA) et se construit comme suit : la maison des porcs est équipée d'un tapis roulant qui sépare l'excédent liquide du fumier. Le fumier est ensuite dirigé vers le bassin d'élevage des larves de MSN, qui inclus une rampe permettant leur auto-collecte.

le fumier aux larves et les pré-pupes aux animaux (Sheppard et al., 1994), mais aussi du climat (demande énergétique pour les pays au climat froid ou modéré), le coût peut varier. Est-il que nombreux sont les chercheurs considérant le traitement des déchets par la MSN comme étant un système de gestion des déchets viable et l'alimentation à base d'insectes plus durable que l'alimentation conventionnelle (Gold et al., 2018 ; Spranghers et al., 2016 ; Smetana et al., 2019 ; Salomone et al., 2017). Ce système a d'ailleurs renforcé la résilience économique des agriculteurs face aux fluctuations de marché dans les pays à PIB moyen et surtout en Afrique du fait de la création de chaîne de valeur sur le marché (Zheng et al., 2011 ; Cickova et al., 2014). Dans des pays à faible et moyen PIB, l'implantation de traitements des déchets par la MSN permet d'apporter des revenus indispensables à leur développement (Guerrero et al., 2013). Toutefois, Cickova et al. (2014) notaient des résultats économiques mitigés étant donné le manque de système opérationnel.

Il s'agit d'un marché en expansion, dont la demande en aquaculture industrielle augmente (+6,1 % dans le monde entre 2002 et 2004) (Zheng et al. 2011) et dont le développement à grande échelle au Sud de l'Europe est envisageable (Menenguz et al., 2018). Un marché qui pourrait répondre à des problèmes globaux tel que l'augmentation de la demande alimentaire ou la compétition entre l'utilisation des terres pour produire de l'énergie ou de la nourriture (Salomone et al., 2017). Mais un marché où il n'existe pas encore de point de repère et qui a du mal à s'installer au niveau industriel (Gold et al., 2018), surtout quand les données montrent que, pour être stable financièrement, il faudrait pouvoir transformer plusieurs centaines de tonnes de déchets organiques par jour et avoir un accès permanent à des biodéchets (Diener et al., 2015).

Parmi les 170.000 tonnes de déchets organiques récoltés en Région de Bruxelles-Capitale, 79 % partent pour l'incinérateur, 10 % dans les composts de jardins, 10 % chez Bruxelles-Compost, 1 % au centre de biométhanisation et moins de 1 % dans des composts de quartier (BeCircular, 2017). 1 tonne de déchets organiques traitée par l'incinérateur revient à environ 80 € selon l'ADEME, soit une estimation de 11.000.000 € pour l'année 2016. Le centre de biométhanisation à Ypres a transformé 258 tonnes entre 2013 et 2015 pour environ 100 € la tonne. Si l'incinérateur de Bruxelles et le centre de biométhanisation de Ypres les valorisent par la production d'électricité, leur traitement par la MSN peut aussi les transformer en co-produits économiquement viables. Dans le cadre d'une utilisation décentralisée comme introduite à Bruxelles par ValueBugs, il est probable que peu de concurrence ne se fasse ressentir pour des procédés de grande échelle comme l'incinérateur de Bruxelles, à l'instar de des alternatives de compostage et de vermicompostage. De plus, certains co-produits peuvent être difficilement récupérables. Si l'apport en protéines et lipides, et le digestat permettent aux particuliers de consommer moins de nourriture pour leurs animaux de compagnie ou de compost industriel, la récupération de chitine ou de Cadmium serait difficile à mettre en place. Cela nécessiterait l'instauration d'un trajet de collecte optimisé ou un site de récupération des larves par l'industriel intéressé. L'environnement d'engraissement peut varier et apporter des rendements différents selon les utilisateurs, notamment dans un pays comme la Belgique où

le climat, très sous optimal pour l'espèce, n'est pas favorable à son développement et où le chauffage du système ne sera pas forcément constant (sauf s'il y a investissement dans une lampe ou d'une plaque chauffante). En outre, les rendements dépendent aussi de la quantité de déchets organiques produits par le ménage, ce qui peut augmenter la durée du processus de traitement. Actuellement, le prototype mis en place revient à environ 8,7 €.

5.3. Implications juridiques

L'implantation de système de traitement des déchets organiques par élevage de la MSN en Europe est, malgré ses avantages, perturbée par une réglementation européenne complexe qui manque de clarification mais qui ne cesse d'évoluer avec le temps. Les informations suivantes sont extraites de textes juridiques spécifiques qui ont été réunies par la Plateforme Internationale des Insectes pour l'Alimentation Humaine et Animale (IPIFF, 2017), l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA, 2015) et l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire pour la spécificité belge (AFSCA, 2019).

Les insectes possèdent le statut « d'animaux d'élevage » selon le Règlement (CE) No 1069/2009. La MSN est éligible à l'élevage en Europe et n'est pas restreinte par le Règlement (EU) No 1143/2014 relatif à la prévention et la gestion de l'introduction et de la propagation des espèces exotiques invasives.

Tout d'abord, les entreprises d'élevage, de transformation en matières premières et de fabrication d'aliments composés sont priées d'enregistrer leurs activités auprès de l'autorité nationale compétente comme exploitants du secteur de l'alimentation animale et/ou du secteur alimentaire. En Belgique, il s'agit de l'AFSCA (Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire) pour les éleveurs et les fabricants. Les transformateurs doivent se référer à l'Agence Publique des Déchets de la Région Flamande (OVAM), l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE) ou la Direction Générale Opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (D GARNE). Ainsi, elles sont soumises aux Règlements relatifs à la sécurité des denrées alimentaires à destination humaine et animale (No 178/2002 ; No 852/2004 ; No 183/2005) qui décident des standards nécessaires pour chaque étape de production.

S'ils ont également une obligation de veiller à la bonne santé des animaux élevés pour éviter la possible propagation de maladie dans la production (Règlement (EU) No 2016/429), la Directive 98/58/CE sur la protection des animaux dans les élevages ne s'applique pas dans leur cas. En effet, les invertébrés sont exclus du champ d'application concernant la garantie du bien-être animal.

La réglementation de l'Union Européenne a établi des restrictions à propos des matières premières pouvant être données aux animaux d'élevage (Règlement (CE) No 767/2009). En effet, les élevages d'insectes doivent répondre aux mêmes critères d'exigences alimentaires que le bétail. Leur alimentation est restreinte aux matières d'origine végétale, aux produits

laitiers et aux œufs. De ce fait, tous produits type : fumier, viande et poisson, dont les déchets de restauration, les produits d'abattoir et les produits défectueux de magasins.

L'insecte utilisé mort, ainsi que ses produits dérivés (protéines et graisses), sont considérés comme des « sous-produits d'origine animale » selon les Règlements (CE) No 1069/2009 et (UE) No 142/2011 qui les légifèrent. Cela ne s'applique pas pour les insectes vivants. Les producteurs de viande d'insecte doivent suivre les procédés qui y sont décrits. Si l'établissement produit de la graisse d'insecte, des insectes entiers ou de la farine d'insecte, les méthodes ne sont pas imposées.

Les protéines animales transformées (PAT) sont restreintes par le Règlement (CE) No 999/2001 fixant les règles pour la prévention, le contrôle et l'éradication de certaines encéphalopathies spongiformes transmissibles (TSE) dans l'alimentation animale. Elles sont autorisées pour les animaux de compagnies (chiens, chats, oiseaux et reptiles), les animaux élevés pour leur fourrure et les poissons d'élevage depuis 2017. Elles sont interdites pour les élevages de bovidés et d'animaux monogastriques (poules et porcs). Toutefois, ce règlement ne se rapporte pas aux insectes entiers et à leur co-produits gras.

Règlementation EU pour l'utilisation d'insectes dans l'alimentation animale

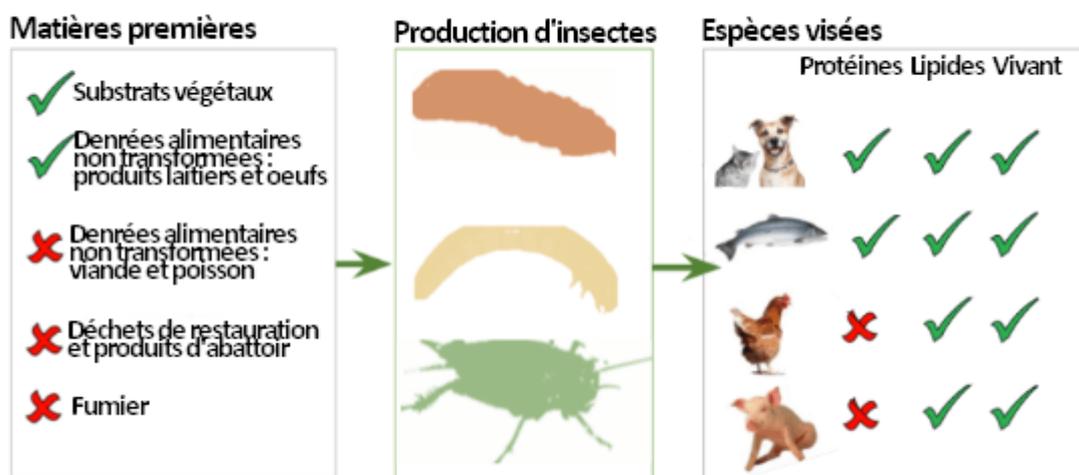


Figure 9 : Résumé de la réglementation de l'Union Européenne sur l'utilisation des insectes dans l'alimentation animale (IPIFF, 2017)

En 2017 a donc été acceptée le Règlement (UE) No 2017/893. Ce dernier ouvre la voie à l'élargissement de l'utilisation de la protéine d'insecte de sept espèces dont la MSN, à d'autres élevages, comme la poule et le porc. Une avancée qui a été permise par le rapport scientifique de l'EFSA (European Food Safety Authorities), notifiant que le danger microbiologique des protéines d'insectes est comparable à celui d'autres protéines animales non-transformées.

En Belgique, le substrat produit par les insectes fait l'objet d'une note commune des autorités compétente (AFSCA, 2019a). Celui-ci est composé des excréments d'insectes, des restes d'aliments pour animaux (végétal ou animal) et des restes d'insectes, œufs et larves. Le

mélange des trois possède le statut de sous-produit animal de Catégorie 2 (Section 3, Article 9 du Règlement (CE) No 1069/2009), soit un déchet. De ce fait, le mélange, qu'il soit avec des restes d'aliments uniquement végétaux ou animaux, est destiné au compostage, la biométhanisation ou l'incinération. Lorsque les éléments de ce mélange peuvent être séparés, ils sont traités différemment :

- Les excréments (donc lisier) : compostage, biométhanisation, séchage, épandage ;
- Restes végétaux : compostage, biométhanisation ;
- Restes animaux, insectes, œufs et larves : compostage, biométhanisation avec pasteurisation.

Concernant la consommation humaine, le Règlement (EU) 2015/2283, d'application depuis 2018, « 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 » (AFSCA, 2019b). Le statut « Novel Food » détermine que tous nouveaux aliments ou ingrédients doivent recevoir une autorisation européenne après évaluation pour pouvoir être mis sur le marché. Sans cela, elle est interdite. La Belgique avait mis en place une politique de tolérance avant le 1^{er} janvier 2018 permettant la mise sur le marché de dix espèces d'insectes dans une optique de consommation humaine.

La demande pour inclure la farine MSN, comme ingrédient pour les produits de boulangerie et snacks à base de pommes de terre, de céréales ou de farine d'amidon, au statut de « Novel Food » a été introduite en janvier 2019 par la firme danoise Enorm Biofactory A/S (EUROPA, 2019).

Globalement, la législation qui entoure l'élevage de MSN reste complexe, surtout pour la production de protéines d'insectes. Pour l'approche décentralisée, c'est-à-dire pour un particulier, elle est encore plus incertaine car la capacité de vérification par les autorités compétentes est nulle. Dès lors, il en va de la volonté de chacun de respecter les recommandations d'usage que ce soit au niveau de la matière première utilisée, des conditions d'élevage et de la destination de la production finale. Est-il qu'il y a eu beaucoup d'avancées au cours des cinq dernières années et encore à faire qui laisse présager un futur florissant pour l'élevage de la MSN.

5.4. Implications sociétales

L'acceptation sociétale ou non des insectes fait partie intégrante de la culture historique d'un pays. Ainsi, en Afrique, Asie et Amérique latine, les insectes ne sont pas mal considérés et peuvent faire partie de l'alimentation. Dans les pays occidentaux, l'idée d'intégrer les insectes dans la nourriture d'élevage de poissons et de poules est plus difficile à aborder (Riera, 2017). Cette réticence vient d'une mauvaise compréhension de leur utilité. Alors qu'ils possèdent un

grand rôle environnemental, les insectes sont vus comme vecteurs de maladies comme le typhus par les poux, la peste par les puces de rat, la maladie de Chagas par la punaise, la malaria par le moustique, etc. (Barry et al., 2004), mais aussi problématiques pour l'agriculture car pouvant consommer jusqu'à 33 % de la production alimentaire agricole selon la région (Kennedy, 2001). Ils sont considérés comme sales. Pour cause, leur habitat à base de charognes et d'endroits sombres et humides. Qui plus est, avec l'évolution de la propreté ménagère, des produits répulsifs, antibactériens, etc., leur image ne s'est pas améliorée. Cette exacerbation du « sale » vient de l'adulte, plus réticent face aux insectes alors que les enfants y sont plus curieux avant d'être conditionné par leurs parents. Un stéréotype courant en occident est celui que seuls les petits garçons sales jouent avec les insectes et doivent se laver les mains (Barry et al., 2004).

Un sondage réalisé en 2010 par Ipsos souligne le dégoût de trois français sur quatre face aux insectes. Celui-ci est plus marqué chez les femmes (79 %) mais tend à augmenter chez les hommes (64 %). Un autre sondage de 1991 montre que la population urbaine tolère moins les insectes à l'intérieur de leur logement qu'à l'extérieur (respectivement 69,2 % et 85,9 %) (Hann & Ascerno, 1991). Plus récemment, et ce dû à l'intervention des médias relayant l'information « des insectes bientôt dans votre assiettes », un sondage réalisé par Verbeke et al. (2015) en Flandres relaye l'acceptation de citoyens, de fermiers et d'acteurs du secteur agricole vis-à-vis de l'utilisation d'insectes comme alimentation d'élevage. De manière générale, l'idée était bien reçue (deux personnes sur trois), notamment pour l'élevage de poules et de poissons. Les éléments favorables sont la perception d'une alimentation plus durable, d'une meilleure valeur nutritive, d'une baisse de la dépendance d'importations de protéines, d'une valorisation des déchets et l'emportent sur les éléments négatifs relevés (sécurité microbiologique, baisse de la qualité du goût, présence d'allergènes).

Mais qu'en est-il du bien-être des élevages d'insectes ? Pour rappel, les invertébrés sont exclus du champ d'application sur la garantie du bien-être animal de la Directive 98/58/CE mais les éleveurs ont une obligation de veiller à leur bonne santé (Régulation (EU) No 2016/429). Les insectes sont grégaires et vivent en grande densité. Pourtant, il existe bien des densités optimales (Hard et al., 1989). Parra Paz et al. (2015) l'évaluent entre 1,2 à 2 larves par cm² avant de remarquer une baisse de rendement, de vitesse de développement et de survie. Concernant la douleur, il n'y a pas de résultats probants quant à la perception de la douleur chez les insectes, mais des méthodes d'abattage permettant de la minimiser comme la congélation ou le déchiquetage sont favorisées (van Huis et al., 2013).

Si les insectes peuvent dégoûter, ce n'est pas le cas pour les citoyens-chercheurs du projet ValueBugs. Les testeurs de la phase d'engraissement des larves apprécient en prendre soin et soulignent la nécessité d'une implication sociale dans la durée. Ils notent cependant quelques désagréments comme de mauvaises odeurs en fin de cycle et d'éventuelles évasions de larves et de mouches. S'occuper de son système nécessite quelques minutes chaque jour. Le processus est supervisé par le consortium du projet qui soutient cette démarche de co-recherche et n'hésite pas à répondre aux questions des citoyens-chercheurs, que ce soit via le

forum attiré ou des ateliers. Cela crée un lien entre eux et une impression de faire partie d'une petite communauté.

5.5. Implications urbanistiques

Les installations de fermes de MSN ont un avantage significatif sur l'environnement car elles requièrent peu d'espace et d'eau (Rumpold & Schuler, 2013 ; van Huis et al, 2013). Il est possible d'utiliser encore moins d'espace par des élevages verticaux. Afin d'éviter une stratification de la température et de favoriser de bonnes conditions d'élevage, celles-ci doivent permettre une bonne circulation de l'air (Meneguz et al., 2018).

Cet avantage se confirme lorsqu'il est comparé aux autres sources auxquelles la MSN peut se substituer, comme le soja qui, pour être cultivé, met énormément de pression sur les terres (Sprangers et al., 2016, Salomone et al., 2016)

À l'échelle décentralisée, la pression sur les sols est très faible. Le prototype enregistré par ValueBugs n'est pas plus large qu'un sceau de 9,8 kg. Autrement dit, il est facilement transportable et rangeable.

6. Méthodologie

6.1. Analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale d'un produit, d'un service ou d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie, comprenant ainsi les étapes d'extraction des ressources, de production, de distribution, d'utilisation et de fin de vie. L'ACV quantifie l'ensemble des flux de matière et d'énergie, entrants comme sortants, mais surtout les impacts résultants sur l'environnement et la santé des individus. Elle permet, par extension, de relier les impacts à la fonction du système et d'identifier les étapes améliorables de ce dernier.

L'ACV est encadrée par la norme ISO 14040 qui délimite les principes et le cadre d'application. Selon cette norme, l'ACV se déroule en quatre étapes spécifiques :

- La définition des objectifs et du système ;
- L'inventaire du cycle de vie (LCI) ;
- L'analyse des impacts environnementaux (LCIA) ;
- L'interprétation des résultats.

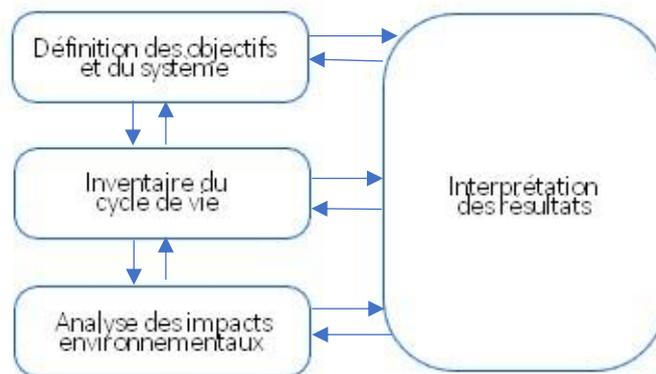


Figure 10 : Etapes de l'ACV, (International Organisation for Standardisation, 2006a)

Elle est également soumise à la norme ISO 14044 qui spécifie les exigences et les lignes directrices de l'ACV.

6.2. Définition des objectifs et du système

6.2.1. Définition des objectifs

La définition des objectifs permet de poser le problème. Celle-ci se doit d'être claire et sans ambiguïté concernant l'application, les motifs de l'étude, l'usage des résultats et son public cible. Cette étape conditionne les résultats de l'étude.

6.2.2. Champ d'étude (scope)

Le champ d'étude décrit de manière plus détaillée les éléments essentiels du système étudié, soit sa fonction, son unité fonctionnelle (UF) et ses limites (ou frontières). Il contribue à la bonne réalisation de l'inventaire.

La fonction du système sert de base pour définir l'UF et les limites. Un même produit peut avoir plusieurs fonctions qui seront distinguées entre fonctions principales et secondaires. Dans le cas où l'ACV comprend plusieurs scénarios, il est impératif que la fonction soit commune aux scénarios pour permettre une comparaison pertinente.

L'unité fonctionnelle est définie comme une grandeur qui quantifie la fonction du système fournit. C'est sur cette base que sont comparés les scénarios. Elle doit être mesurable et additive. Pour chaque scénario de l'ACV est considéré un flux de référence, c'est-à-dire « *les quantités de produits nécessaires et achetées pour remplir cette fonction* » (Jolliet et al., 2017, p29).

Les frontières définissent quels sont les processus inclus et ceux qui sont négligés dans la modélisation du système étudié. Idéalement, tous les procédés nécessaires à la réalisation de

la fonction doivent être pris en compte dans l'ACV. Toutefois, certains procédés peuvent être exclus. Dans ce cas, il est nécessaire de respecter trois règles : (Jolliet et al., 2017, p44-46) :

- « Les limites du système doivent recouvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios.
- Sont retenus dans le système les procédés qui contribuent à plus de x % de la masse des intrants, à plus de x % de la consommation énergétique ou à plus de x % des émissions d'un polluant. Le ou les pourcentages seuil(s) est (sont) préalablement fixés et précisent ainsi la sensibilité liée aux différents procédés.
- Les étapes identiques dans les différents scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de référence affectés par ces processus soient strictement égaux. »

6.2.3. Modélisation

Modéliser le système permet de l'appréhender dans sa totalité. Il est ici défini comme « *un ensemble d'éléments (des procédés) en interaction dynamique* » (Jolliet et al., 2017, p38). Le système est subdivisé en processus unitaires qui accomplissent une activité. Ils sont reliés entre eux par des flux de produits intermédiaires ou de déchets à traiter. Le système échange également des flux élémentaires (de matières et d'énergie) avec l'environnement et des flux de produits avec l'économie. Les flux élémentaires entrants correspondent à l'utilisation des sols, l'extraction des matières et de l'énergie tandis que les flux élémentaires sortants regroupent les émissions, polluantes ou non, rejetées dans l'eau, l'air et le sol. Un arbre de procédés résulte de la mise en commun de tous les procédés unitaires, permettant une visualisation rapide des différentes alternatives et scénarios étudiés.

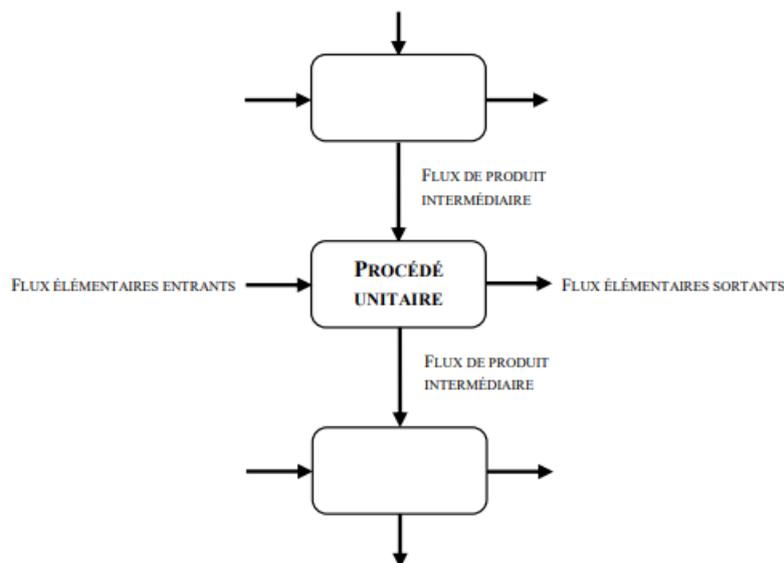


Figure 11 : Exemple d'un ensemble de processus unitaire dans un système (d'après ISO 14 041) (Jolliet et al., 2017)

Il existe deux types de modélisation qui seront favorisées selon le contexte de décision lié à l'étude, la méthode attributionnelle et la méthode conséquentielle.

L'ACV attributionnelle (décision à petite échelle) « est définie par sa priorité à décrire les flux physiques environnementalement pertinents, en entrée et en sortie d'un cycle de vie et de ses sous-systèmes » (Finnveden et al., 2009). Elle est statique et très linéaire car ne se focalise que sur un produit en détail et le traite de manière isolée, sans prendre en considération ses impacts sur d'autres produits.

L'ACV conséquentielle (décision à grande échelle) « est définie par son intention de décrire comment les flux environnementalement pertinents vont changer en réponse à différentes décisions potentielles » (Finnveden et al., 2009). Celle-ci prend en compte comment le système affecte d'autres processus, d'autres ACV et leurs changements possibles. Le système peut être modifié selon la demande ou l'offre pour l'unité fonctionnelle. Elle implique une certaine incertitude et instabilité.

6.3. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire constitue la deuxième étape de l'ACV. Il s'agit de « la description quantitative des flux de matières, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système. Il regroupe donc les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites (minerais, vecteurs énergétiques, surface de sol) au cours du cycle de vie du produit ou du service analysé » (Jolliet et al., 2017, p54). C'est un processus itératif, c'est-à-dire que lors de la collecte de données, de nouvelles exigences ou/et limites peuvent se manifester et nécessitent une adaptation de l'ACV.

Elaborer un inventaire de cycle de vie, c'est regrouper jusqu'à plusieurs centaines de substances au sein du système. Ces données peuvent être catégorisées en (selon ISO 2006a) :

- « Apports d'énergie, de matières premières, de produits auxiliaires et autres entrées physiques du système ;
- Produits, co-produits et déchets ;
- Émissions dans l'air, l'eau et le sol ;
- Autres aspects environnementaux. »

La tâche est donc complexe. De plus, les données relatives au système étudié ne sont pas forcément disponibles et il est nécessaire de se référer aux bases de données spécialisées dans lesquelles il faudra identifier les données génériques à utiliser. Ecoinvent représente la base de données la plus complète d'Europe. Elle répertorie plus de 400 substances et ressources pour les 7000 processus qu'elle comprend.

6.3.1. Les règles d'allocation

Les procédés agricoles, industriels et de traitements des déchets sont des processus multifonctionnels. En effet, il n'est pas rare de voir que ces procédés génèrent plusieurs produits ou recyclent des produits intermédiaires. Alors que dans l'ACV, un seul produit est

considéré, il faut ici répartir les impacts environnementaux comme l'utilisation des matières premières entre les différents produits. C'est l'allocation des impacts.

Sont distingués sur base de leur valeur économique trois types de produits :

- Le coproduit, soit un produit secondaire à valeur marchande, mais ne correspondant pas à la fonction étudiée.
- Le déchet qui n'a pas de valeur sinon une valeur négative. Il nécessite un traitement (une élimination) inclus dans les limites du système.
- Le déchet recyclé, qui prend une valeur économiquement positive après traitement (une valorisation). Cette revalorisation est soit effectuée en boucle fermée, donc le déchet recyclé est réinjecté au sein du système, soit en boucle ouverte lorsque ce dernier sort du système.

Le principe d'allocation inclut des méthodes d'allocations mais aussi des méthodes pour l'éviter. Il est soumis à une hiérarchie établie par la norme ISO 14044 :

- L'allocation doit être évitée dans la mesure du possible, en scindant le processus élémentaire en plusieurs sous-processus ou en étendant les limites du système afin d'y insérer les fonctions des coproduits.
- Lorsqu'elle n'est pas évitable, les intrants et sortants du système sont répartis entre les différents produits. Cette distribution se doit de refléter les relations physiques entre les produits.
- Si les deux méthodes précédentes ne sont pas applicables, l'allocation se fera sur base d'une autre relation mutuelle, comme une relation financière ou fonctionnelle.

6.4. Evaluation des impacts environnementaux

La troisième étape de l'ACV qu'est l'analyse des impacts, rapporte les intrants et sortants de l'inventaire à leurs indicateurs d'impacts. Ces derniers sont liés à la santé humaine, l'environnement naturel et l'épuisement des ressources. Les méthodes utilisées lors de l'analyse agrègent et comparent les émissions en fonction de leurs potentiels d'impacts.

En d'autres termes, l'évaluation est un processus quantitatif dans lequel les effets des interventions qui ont été identifiés dans la phase inventaire sont classifiés, caractérisés et quantifiés. La normalisation, l'agrégation et la pondération sont quant à eux optionnels.

6.4.1. Classification et caractérisation

La première étape de l'évaluation des impacts environnementaux est la classification. Elle consiste à regrouper les résultats de l'inventaire aux effets identiques ou similaires au sein de catégories intermédiaires d'impacts. Les émissions et extractions sont donc classées dans les catégories déterminées. Chaque catégorie est définie par un indicateur intermédiaire. Celui-ci permet d'assurer la bonne comparaison et caractérisation des éléments de l'inventaire. A

noter qu'un élément peut se retrouver dans plusieurs catégories d'impacts. La classification permet d'avoir une vue d'ensemble des catégories d'impacts les plus pertinentes de l'étude.

Vient ensuite la caractérisation intermédiaire (midpoint). Ici, chaque émission et extraction est pondérée dans les catégories intermédiaires auxquelles elles contribuent. Des facteurs de caractérisation intermédiaires sont utilisés pour exprimer le poids relatif d'une substance dans le cadre d'une catégorie d'impact spécifique. Ces facteurs sont modélisés et quantifiés.

Un score d'impact intermédiaire (exprimé en kg équivalent la substance de référence) est déterminé par la somme de l'ensemble des masses émises ou extraites multipliées par les facteurs de caractérisation intermédiaires. Soit :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s$$

Avec SI_i : score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i ;

$FI_{s,i}$: facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie i ;

M_s : masse extraite ou émise de la substance s .

Les catégories midpoint recommandées sont (Verones et al., 2017) : Changement climatique, Destruction de l'ozone stratosphérique, Toxicité humaine, Formation de particules fines, Radiation ionisante, Formation d'ozone photochimique (au niveau du sol), Acidification (terre et eau), Eutrophisation (terre et eau), Ecotoxicité, Utilisation des terres, Utilisation des eaux, Utilisation des ressources, Utilisations des sols océaniques, etc.

Enfin s'applique l'étape de caractérisation des dommages (endpoint). Elle « permet d'évaluer la contribution des catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages sur un sujet à protéger » (Jolliet et al., 2017, p.120). Pour chaque catégorie de dommages est attribué un facteur intermédiaire de dommages exprimant son importance relative. Le score d'impact des dommages est calculé par l'ensemble des facteurs intermédiaires de dommages multiplié par les scores d'impacts intermédiaires.

$$SD_d = \sum_i FID_{i,d} \cdot SI_i$$

Avec SD_d : score de caractérisation de dommage pour la catégorie d ;

$FID_{i,d}$: facteur de caractérisation de dommage entre la catégorie intermédiaire i et la catégorie de dommage d ;

SI_i : score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i .

Il est également possible de calculer les scores de dommages au départ de l'inventaire. Soit :

$$SD_d = \sum_s FD_{s,d} \cdot M_s$$

Avec SD_d : score de caractérisation de dommage pour la catégorie d ;

$FD_{s,d}$: facteur de caractérisation de dommage de la substance s dans la catégorie d ;

M_s : masse extraite ou émise de la substance s .

Les catégories endpoint recommandées sont (Verones et al., 2017) : Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Ressources naturelles.

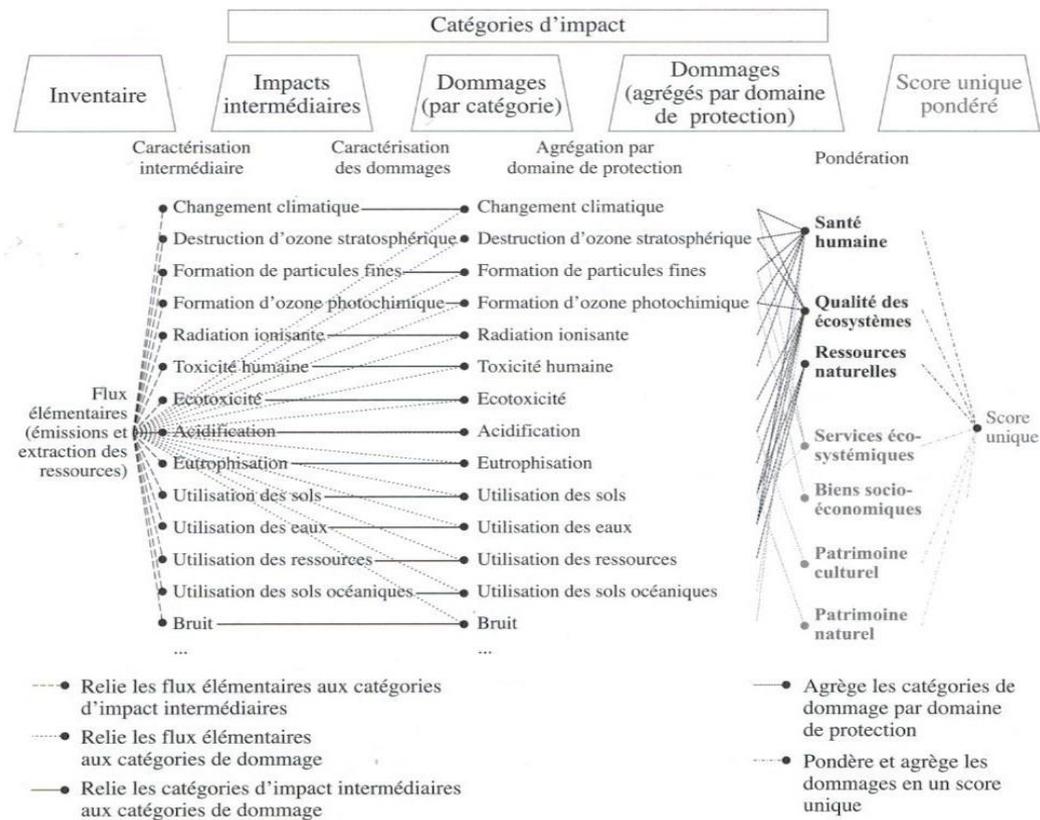


Figure 12 : Cadre d'analyse de l'impact de l'Initiative pour le cycle de vie du PNUE et de la SETAC (Verones et al., 2017)

6.4.2. Normalisation, pondération, rangement et méthode de caractérisation

Les étapes de normalisation, pondération et de rangement sont facultatives à l'évaluation des impacts environnementaux :

- La normalisation rapporte les résultats de la caractérisation d'impact à des valeurs de références ;
- La pondération accorde un poids relatif aux catégories d'impact dans le score de caractérisation qui pourra ensuite être agrégé en un seul indicateur ;
- Le rangement est un processus (semi-)qualitatif impliquant un tri et/ou une attribution de rangs.

Il existe de nombreuses méthodes de caractérisation. Elles diffèrent selon le niveau d'évaluation des impacts, l'utilisation de la normalisation et/ou la pondération, les catégories intermédiaires et/ou de dommages couvertes.

6.5. Interprétation

Cette dernière étape analyse et tire les conclusions sur les résultats de l'évaluation d'impacts. Elle identifie les enjeux importants de l'étude ainsi que les contributions des différentes étapes du cycle de vie (extraction de matières premières, transport, fabrication, utilisation, traitement en fin de vie) sur lesquelles il est intéressant d'intervenir pour réduire les impacts. Interpréter une ACV comparative fera ressortir les différences entre les alternatives.

Elle se fait systématiquement et sur chaque phase de l'ACV, de la définition des objectifs à l'analyse des impacts. L'interprétation comprend une évaluation de la qualité, l'exactitude et la robustesse des résultats de l'ACV par des contrôles de qualité, des analyses de sensibilité ou d'incertitudes. De cette façon, elle permet de souligner les limites et faiblesses de l'étude et d'en tirer des conclusions et recommandations.

Interpréter c'est, par essence, fournir des informations pertinentes pour la prise de décision en matière d'environnement.

7. Analyse de cycle de vie ; le traitement des déchets par la larve de mouche soldat noire

7.1. Description du Bucket in a Bucket (BiB)

Le Bucket in a Bucket (BiB) est le système de traitement des déchets élaboré par ValueBugs. Celui-ci est composé comme tel :

- Un grand seau de 10 litres de 27,5 cm de diamètre et 23 cm de hauteur et son couvercle ;
- Un petit seau de 5 litres de 21,5 cm de diamètre et 19,5 cm de hauteur sans couvercle ;
- Deux rectangles de 13*16,5 cm de micro-maille ;
- De la colle thermofusible ;
- Du sable fin.

Afin de produire son propre modèle, il faut :

- Un cutter ;
- Des ciseaux ;
- Un fer à souder ;
- Un pistolet à colle.



Figure 13 : Constitutants du Bucket in a Bucket

À l'aide d'un cutter, une ouverture de 12*14 cm est créée sur la partie latérale du grand seau. Une autre de même taille est formée sur son couvercle. Ces deux cavités sont comblées par les deux rectangles de maille, d'abord soudés avec un fer à souder et ensuite collés aux parois afin d'ajouter une seconde sécurité. Une fois la modification du grand seau terminée, environ 300 grammes de sable sont ajoutés au fond de ce dernier, ainsi que le petit seau. Ne reste alors qu'à ajouter les jeunes larves de mouche soldat noire et les déchets organiques. Pour la moyenne collectée sur 33 citoyens-chercheurs, 71,5 grammes de larves sont placés dans le petit seau, soit environ 4.000 individus, pour 3.590,5 kilogrammes de déchets de cuisine, ajoutés tout au long du processus. Lorsque le couvercle est fermé, le dispositif est complet.

Dès les premiers déchets organiques introduits, les larves commencent leur traitement. Lorsque celles-ci arrivent à maturité, elles migrent du petit seau rempli de substrat au fond du grand seau ensablé. Elles sont alors prêtes à être collectées. Les mailles ajoutées au seau permettent une meilleure aération du système, évitant une saturation de l'humidité lors du processus et une migration prématurée des larves vers le sable sec.



Figure 14 : Assemblage du Bucket in a Bucket



Larves immatures et substrat

Larves matures ayant migré

Figure 15 : Etape de production des larves. A gauche des larves immatures dans leur substrat, à droite les larves matures ayant migré dans le sable

7.1.1. Synthèse de l'assemblage du BiB :

Tableau 5 : Synthèse des matériaux d'assemblage du Bucket in a Bucket

Description	Matériau	Unité	Quantité	Dimension
2 Seaux (10 L et 5 L)	Polypropylène	g	345	10 l = 27,5 cm D*23 cm H 5 l = 21,5 cm D*19,5 cm H
Maille	Inox	g	59	13 cm*16 cm
Sable	Sable	g	600	/

Colle	Ethylène-acétate de vinyle	g	5	/
-------	----------------------------	---	---	---

7.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude

7.2.1. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de l'analyse est d'évaluer les performances environnementales des scénarios « Poule » et « Chien » sur base de la moyenne des résultats donnés par les 33 citoyens-chercheurs de ValueBugs. Cette évaluation permettra de montrer la répartition des impacts sur l'ensemble de leur cycle. Ensuite, les deux scénarios seront comparés en fonction de leurs impacts environnementaux.

Deux analyses de sensibilité viendront compléter l'étude. La première se basera sur la moyenne des dix meilleurs résultats provenant des citoyens-chercheurs pour les deux scénarios. La seconde se fera selon une autre méthode d'analyse disponible.

La finalité de l'analyse est donc d'obtenir une meilleure connaissance et compréhension du système de traitement des déchets et de production de protéines apporté par ValueBugs.

Ainsi, l'application de l'étude permettra l'apport d'un support scientifique du dispositif au niveau environnemental tout en identifiant les possibilités d'amélioration de ce dernier. ValueBugs est donc le destinataire principal de cette étude ainsi que ses citoyens-chercheurs.

Par la suite, la recherche pourra tenter de s'inscrire dans « *l'analyse théorique de la littérature décrivant les outils techniques de valorisation décentralisée de biodéchets des professionnels,* » commanditée par Bruxelles Environnement.

7.2.2. Fonctions

Les fonctions du dispositif identifiées sont :

- Le traitement des déchets de cuisine ;
- La production de protéines.

Dans cette analyse, la production de substrat ne sera pas considérée tel qu'expliqué dans la section 7.3.3.

7.2.3. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle considérée est la bioconversion des déchets de cuisine en protéines par 1kg de larves de mouche soldat noire (flux de référence) selon le prototype du Bucket in a Bucket élaboré par ValueBugs.

7.2.4. Modélisation

L'étude a pour optique d'entrer dans les modes de valorisation des déchets au même titre que le compostage ou le vermicompostage, déjà mis en place à Bruxelles, tout en assurant une production en protéines et donc un remplacement de nourriture animale mise sur le marché. Pour cela, la modélisation conséquentielle a été choisie.

7.2.5. Méthode analyse des impacts

La méthode d'analyse des impacts utilisée sera IMPACT 2002+ dans sa version 2.14. Il s'agit d'une combinaison de quatre méthodes : IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML (Center of Environmental Studies, University of Leiden) for et IPCC 2001 500a (Intergovernmental Panel on Climate Change). IMPACT 2002 se focalise sur la toxicité humaine et l'écotoxicité. La méthode Eco-indicator 99 se focalise sur les impacts au niveau des dommages (endpoint) tandis que la CLM 2002 sur les impacts au niveau intermédiaire (midpoint). La méthode IPCC 2001 500a considère quant à elle le facteur changement climatique sur un laps de temps de 500 ans. IMPACT 2002+ permet donc une évaluation midpoint et endpoint des impacts environnementaux. La méthode se base sur des données européennes. Les indicateurs midpoint ont été sélectionnés selon l'inventaire, réduisant ainsi l'incertitudes des résultats.

La méthode IMPACT 2002+ comptabilise 14 catégories d'impacts intermédiaires regroupées en 4 catégories de dommages. Une flèche pleine symbolise une voie d'impact reconnue ou supposée exister entre deux éléments. Une flèche en pointillé indique une incertitude de la voie d'impact (Jolliet et al., 2017, p144).

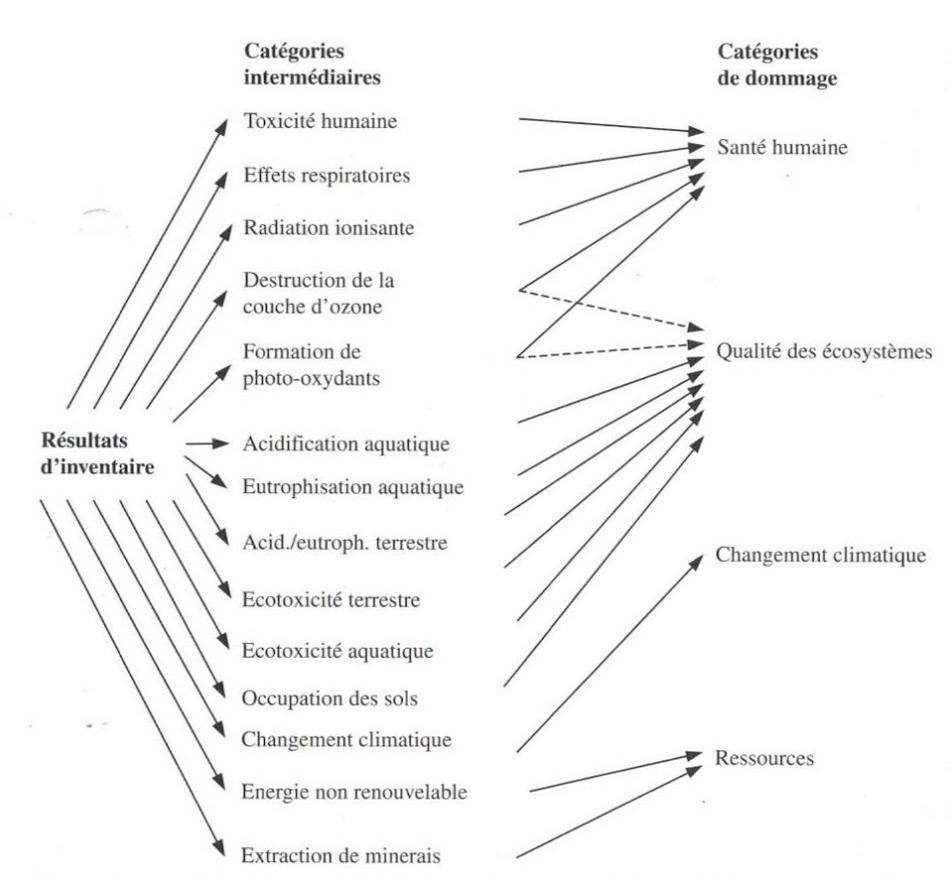


Figure 16: Schéma général du cadre d'IMPACT 2002+ reliant les résultats de l'inventaire du cycle de vie aux catégories de dommages (Jolliet et al., 2017, p144)

La catégorie de dommage « Santé humaine » comprend cinq catégories intermédiaires. « Les facteurs intermédiaires de dommages permettent de passer des kg de substance équivalente aux années équivalentes de vie perdue (DALY, disability adjusted life years) » (Jolliet et al., 2017, p148-149). Le score de santé humaine est exprimé en DALY.

La catégorie de dommage « Qualité des écosystèmes » contient six catégories intermédiaires connues et deux incertaines. Elle est exprimée en PDF.m².an, soit la fraction d'espèce disparue sur un m² par an.

La catégorie de dommage « Changement climatique » reprend uniquement les données de la catégorie intermédiaire du même nom car les différents modèles connectant le changement climatique aux dommages des deux précédentes catégories de dommages ne sont actuellement pas assez précis. Son unité est le kg de CO₂-équivalent.

Enfin, la catégorie de dommage « Ressources » inclut deux catégories intermédiaires, exprimées en MJ par unité extraite ou d'énergie non-renouvelable.

Tableau 6 : Catégorie intermédiaires, substances de référence, facteur intermédiaire de dommage, catégories de dommages et unités de dommages utilisées dans IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2017, p145, 147 et 150)

Catégorie intermédiaire	Substance de référence intermédiaire	Facteur intermédiaire de dommage	Catégorie de dommage	Unité de dommage
Toxicité humaine (cancérigène)	Kg chlorure de vinyle éq. dans l'air	1,45.10 ⁻⁶	Santé humaine	DALY
Toxicité humaine (non-cancérigène)	Kg chlorure de vinyle éq. dans l'air	1,45. 10 ⁻⁶		
Effets respiratoires	Kg PM _{2,5} éq. dans l'air	7,00.10 ⁻⁴		
Destruction de la couche d'ozone	Kg CFC-11 éq. dans l'air	1,05.10 ⁻³		
Radiations ionisantes	Bq Carbone-14 éq. dans l'air	2,10.10 ⁻¹⁰		
Formation de photo-oxydants	Kg éthylène éq. dans l'air	2,13.10 ⁻⁶		
Ecotoxicité aquatique	Kg triéthylène glycol éq. dans l'eau	5,02.10 ⁻⁵	Qualité de l'écosystème	PDF.m ² .an
Ecotoxicité terrestre	Kg triéthylène glycol éq. dans l'eau	7,91.10 ⁻³		
Acidification/Eutrophisation terrestre	Kg SO ₂ éq. dans l'air	1,04		
Acidification aquatique	Kg SO ₂ éq. dans l'air	1,00		
Eutrophisation aquatique	Kg PO ₄ ³⁻ éq. dans l'eau	1,00		
Occupation des sols	M ² terre éq.	1,09		
Changement climatique	Kg CO ₂ éq. dans l'air	1,00	Changement climatique	KgCO ₂ éq
Extraction des minerais	MJ d'énergie supplémentaire ou kg FE éq. (minerai)	5,10.10 ⁻²	Ressources	MJ
Energie non-renouvelables	MJ totaux d'énergie non renouvelable ou kg pétrole brut éq.	45,6		

Afin d'évaluer l'impact du choix de la méthode d'analyse sur les résultats, la méthode ReCiPe dans sa perspective hiérarchiste (ReCiPe H) endpoint sera utilisée comme analyse de sensibilité. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats endpoint de la méthode IMPACT 2002+. Les catégories de dommages considérées dans cette méthode sont présentées ci-dessous.

Tableau 7 : Catégories de dommages utilisés dans ReCiPe (H) endpoint (Jolliet et al., 2017, p155)

Catégorie de dommages	Unité
Santé humaine	DALY
Diversité des écosystèmes	species.yr
Disponibilité des ressources	USD 2013

Il est à noter que les deux méthodes utilisées utilisent des unités de mesure différentes :

- Pour la santé humaine, tous deux utilisent l'unité DALY (*Disability-Adjusted Life Year*), soit un indicateur de santé de la population qui soustrait à l'espérance de vie son nombre d'années en bonne santé perdues.
- La méthode IMPACT 2002+ utilise l'unité PDF.m².an pour caractériser la qualité des écosystèmes, c'est-à-dire le potentiel de disparition d'espèces. Il s'agit d'un rapport entre le nombre d'espèces dans les conditions spécifiées sur le nombre d'espèces de référence, par unité de temps et d'espace. ReCiPe utilise le nombre d'espèces perdues dans les différents écosystèmes (terrestres, marins et eau douce) par unité de temps.
- La disponibilité des ressources est calculée par l'énergie en MJ de l'extraction des ressources dans IMPACT 2002+. Dans ReCiPe, cette mesure est réalisée en dollars (\$), soit les coûts supplémentaires potentiellement nécessaires à l'extraction future de ressources.
- La méthode ReCiPe ne calcule pas la catégorie de dommage relative au changement climatique. Dans IMPACT 2002+, elle mesure la quantité en Kg de CO₂-équivalent rejeté dans l'air.

7.2.6. Données

La modélisation des données est effectuée en partie sur base de données fournies par ValueBugs. Toutefois, cela ne concerne que peu de données spécifiques au processus. De ce fait, certaines se reposent sur les données issues de la littérature. Les sources seront précisées dans l'inventaire (section 7.4.). Les procédés utilisés proviennent de la base de données EcoInvent 3.4, dans son set Conseq. Les données belges et européennes des procédés et produits (BE et RER) ont été privilégiés dans la mesure du possible. Lorsque celles-ci n'étaient pas disponibles, les données moyennes mondiales ont été employées (GLO).

7.3. *Définition des systèmes*

Deux scénarios d'étude sont étudiés dans ce travail. Tous deux concernent un système de production de protéines de larves de mouche soldat noire par le traitement des déchets de cuisine chez un particulier. Le premier mettra en évidence la production évitée d'un mix de grains pour poules tandis que le second celle de croquettes pour chiens. Ceux-ci seront nommés « Scénario Poule » et « Scénario Chien » par la suite.

Les deux scénarios comprennent les processus suivants :

- La production et l'assemblage du Bucket in a Bucket ;
- La phase de transport des BiB des locaux de ValueBugs chez le citoyen-chercheur ;
- Le processus de traitement des déchets et de production des larves matures dans lequel se retrouve également :

- La production des larves immatures ainsi que leur transport de Circular Organics aux locaux de ValueBugs.
- Enfin, la production évitée de nourriture pour poule ou chien.

À l'exception du processus de substitution, les deux scénarios possèdent la même structure de modélisation.

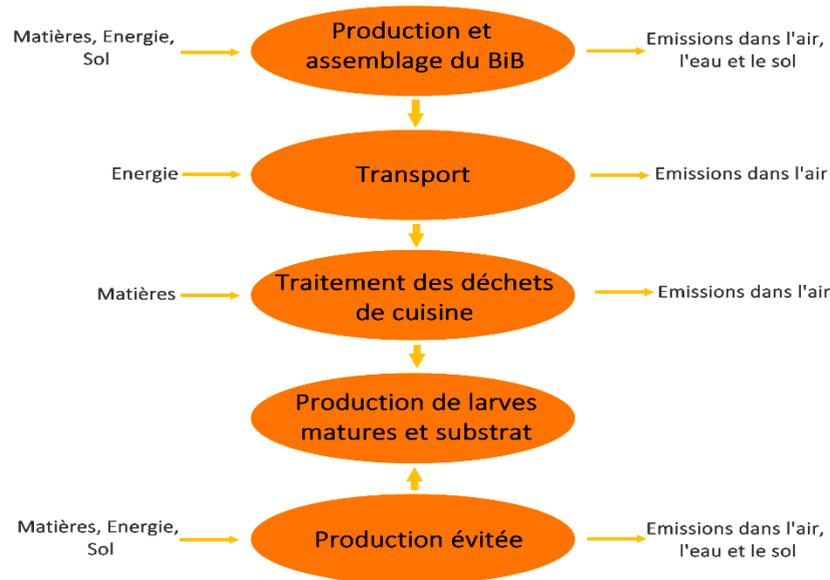


Figure 17 : Arbre des procédés

7.3.1. Scénario « Poule » (référence)

Le système de référence sera attribué au scénario « Poule ». Ce choix a été déterminé pour plusieurs raisons :

- ValueBugs a effectué un grand recensement des poules pondeuses dans la Région de Bruxelles-Capitale ;
- Par extension, la production de larves fraîches est, au sein des citoyens-chercheurs, majoritairement donnée comme alimentation pour les poules.

Le scénario reprend donc tous les procédés unitaires spécifiés au point précédent. Le procédé de substitution représente un mix de grains pour poules établi selon la comparaison de sept marques d'alimentation (mix de grains) pour poules en vente en Belgique, qui sera détaillé dans le point 7.4.4. (voir annexe 2).

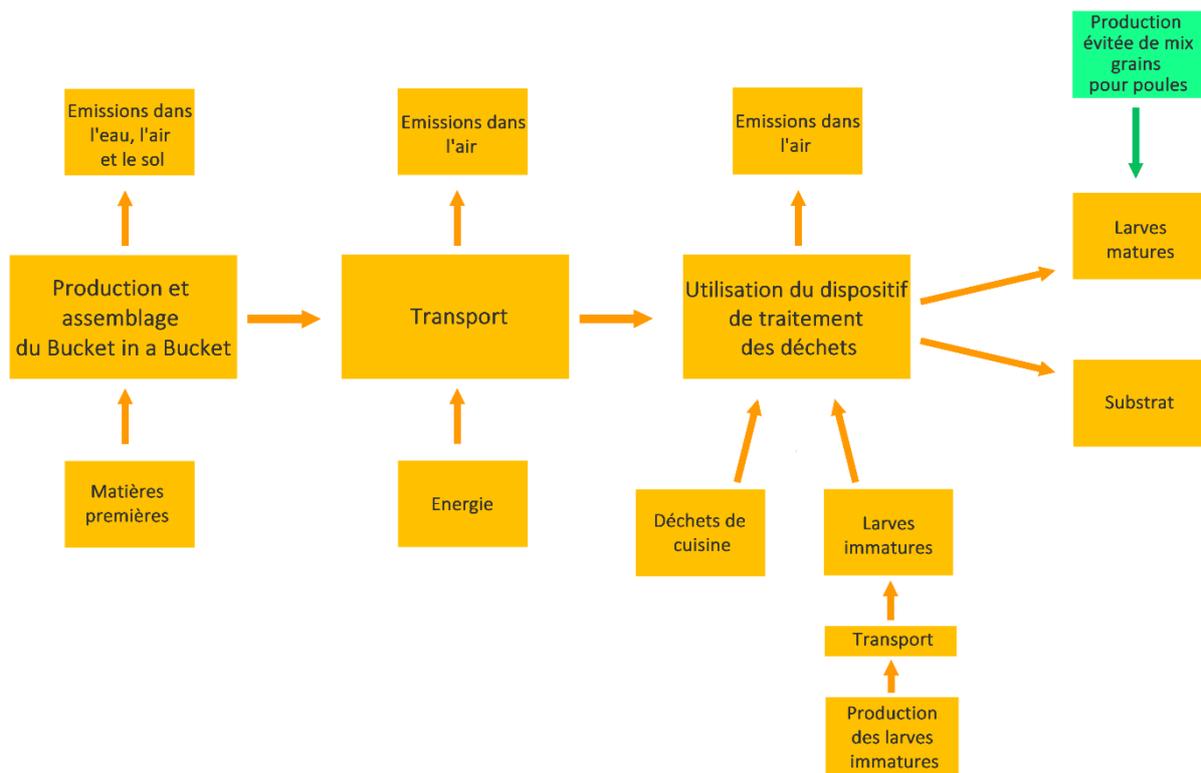


Figure 18 : Scénario "Poule"

7.3.2. Scénario « Chien »

Le scénario « Chien » reprend les mêmes spécificités que le scénario « Poule ». La substitution a été identifiée selon la comparaison de six marques d'alimentation sèche (type croquettes) pour chiens en vente en Belgique (voir annexe 1). Celui-ci sera également précisé dans l'inventaire au point 7.4.4.

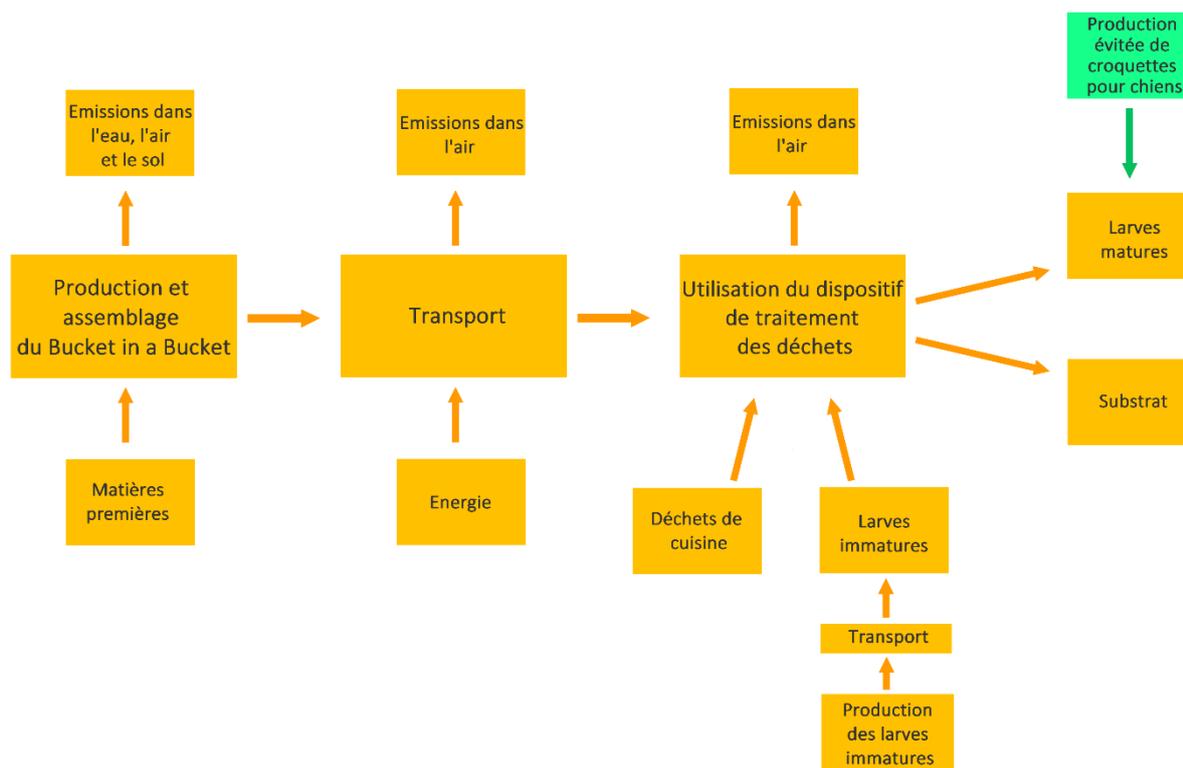


Figure 19 : Scénario "Chien"

7.3.3. Limites et frontières du système et allocation

L'unité fonctionnelle décrite comme « bioconversion des déchets de cuisine en protéines par 1 kg de larves de mouche soldat noire », est utilisée pour présenter une évaluation générale du système de production. Grâce aux limites du système utilisées, cette unité fonctionnelle permet de ne pas utiliser l'allocation et d'inclure les productions évitées de nourritures pour poules et pour chiens.

Les scénarios étudiés ne forment pas une ACV complète de type *Cradle-to-Grave* mais *Gate-to-Gate* car ceux-ci ne démarrent qu'à l'étape de production du système de traitement des déchets BiB et ne considèrent pas son application en fin de vie.

L'approche utilisée et qui semblait être la plus appropriée est l'approche « *avoided burden* » de part la substitution procurée par l'*output* final que représente la production de protéines de larves de mouche soldat noire.

Enfin, des frontières ont été appliquées aux procédés unitaires concernant des intrants et/ou sortant qui semblaient négligeables. Ainsi :

- L'apport en énergie pour l'assemblage du BiB relative à l'utilisation du fer à souder et du pistolet à colle est négligé en raison de sa non-pertinence vis-à-vis de la durée de vie potentielle du dispositif ;

- Les déchets potentiels émis lors de la création du BiB, soit le plastique restant des ouvertures du grand seau et les restes de maille fines inutilisables ne sont pas considérés ;
- L'énergie et l'eau pour la phase d'utilisation sont écartées. D'une part car, techniquement, aucune énergie, électrique comme thermique, n'est exclusivement utilisée que pour l'utilisation du dispositif dans un usage de particulier, comme par exemple le maintien de la température ambiante à l'intérieur du BiB. En effet, ce dernier fait fonction de l'habitude de chauffage de la maison du citoyen. De l'autre, l'eau n'est nécessaire qu'en cas d'humidité trop faible. Or, l'un des problèmes souvent rencontrés par les citoyens-chercheurs étaient un taux d'humidité trop élevé ;
- La chaleur émise par le processus de traitement des déchets n'est pas considérée car inutilisable ;
- La substitution possible de fertilisant par la production du substrat (co-produit du système) ne sera pas pris en compte et sera discuté plus amplement dans le point 7.4.5.

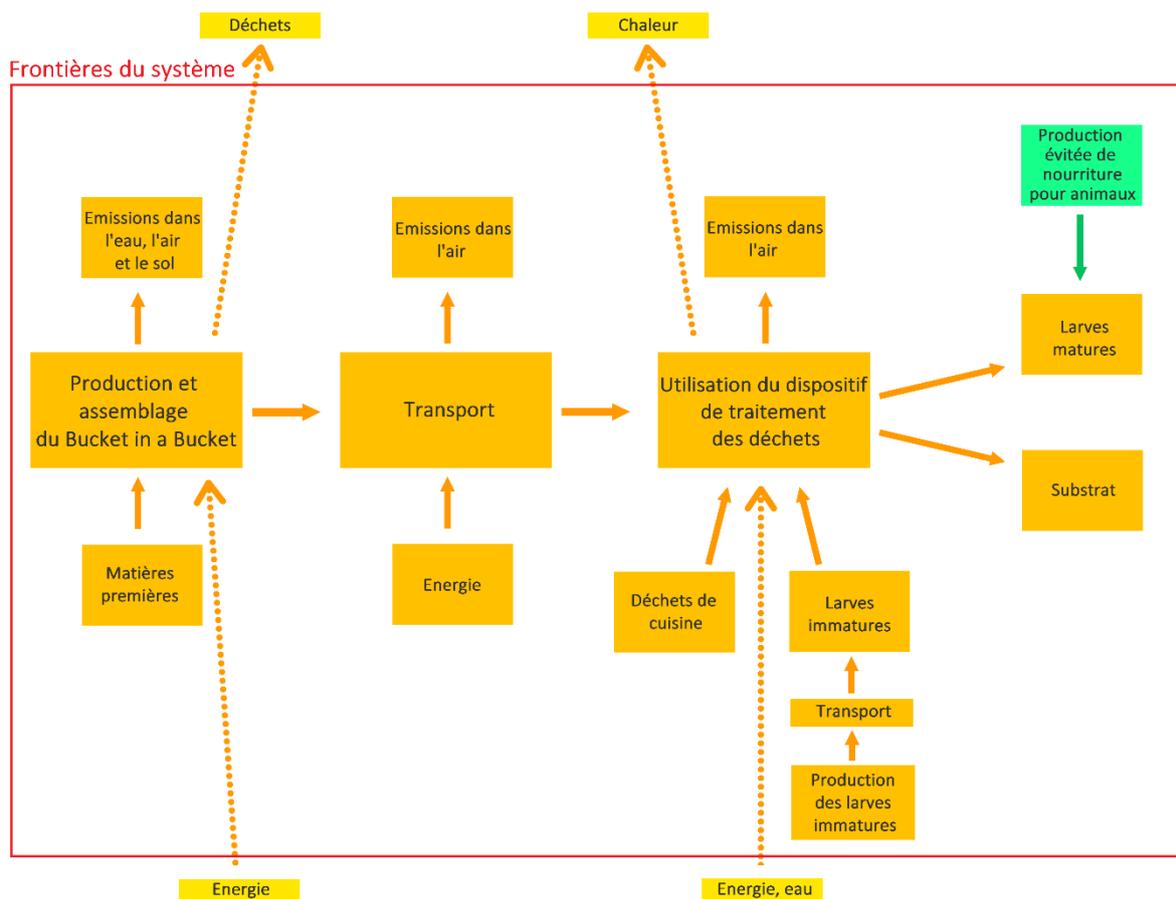


Figure 20 : Frontières du système

7.4. Inventaire du cycle de vie

Le processus de traitement des déchets par la larve de MSN sera divisé selon les phases suivantes :

- La phase de production du BiB ;
- Le transport du BiB des locaux de ValueBugs chez le particulier ;
- La phase d'utilisation du BiB qui comprend en son sein la phase de production des œufs par Circular Organics ;
- La production évitée de nourriture pour poules et chiens.

7.4.1. Phase de production du Bucket in a Bucket

La production du BiB est effectuée par ValueBugs et a été expliquée au point 7.1. Les données relatives aux matériaux et aux quantités ont été déterminées par leurs soins comme suit :

Tableau 8 : Inventaire de la phase de production du BiB (Bucket in a Bucket)

Inventaire de la phase de production du BiB (Bucket in a Bucket)					
Description	Matériau	Unité	Quantité	Source	EcoInvent 3, Conséquentiel
2 Seaux (10L et 5L)	Polypropylène	g	345	ValueBugs	Polypropylene, granulate {RER} production
Maille	Inox	g	59	ValueBugs	Steel, chromium steel 18/8 {RER} steel production, electric, chromium steel 18/8
Sable	Sable	g	600	ValueBugs	Sand {GLO} market for
Colle	Ethylène-acétate de vinyle	g	5	ValueBugs	Ethylene vinyl acetate copolymer {RER} production
Utilisation du sol	Surface carrée	cm ²	600.25	ValueBugs	

Le seau de 10 L provient actuellement de récupération. Il sera pourtant considéré comme neuf dans le processus d'ACV. L'utilisation du sol se base non pas sur le diamètre unique du grand seau mais sur la surface carrée inutilisable tout autour de celui-ci.

7.4.2. Phase de transport

Le BiB, après sa création, est transporté des locaux de ValueBugs se situant à Ixelles chez le citoyen-chercheur. Le projet étant bruxellois, un périmètre de dix kilomètres autour de leurs locaux situés à Ixelles été considéré. Le moyen de transport considéré est le bus

Tableau 9 : Inventaire de la phase de transport du BiB

Inventaire de la phase de transport du BiB					
Description	Moyen de transport	Unité	Quantité	Source	Ecoinvent 3 Conséquentiel
Transport du BiB de ValueBugs au particulier	Bus	kgkm	10,8	ValueBugs	Transport, regular bus {RoW} processing

7.4.3. Phase d'utilisation

La phase d'utilisation comprend l'objet principal de l'unité fonctionnelle, à savoir l'intrant de larves de mouche soldat noire. Celui-ci est d'un kilo.

Les données concernant les intrants de déchets de cuisine et les sortants de larves de MSN ont été calculées par ValueBugs sur base de la moyenne des résultats 33 citoyens-chercheurs. Lors de la participation comme citoyens-chercheurs, ceux-ci sont invités à remplir une table de mesure pour : la quantité de résidus organiques introduits, le type de résidus organiques et la quantité de larves mûres récoltées.

Pour 1 kg de larves entrantes, ValueBugs enregistre une moyenne de 50,21 kg de déchets de cuisine introduits.

Selon une analyse rétrospective de ces tables de mesures, la composition moyenne des déchets de cuisines introduits est :

- Des fruits et légumes sous forme d'épluchures ou encore d'aliments périmés : pomme de terre, chicons, poivrons, tomates, courgettes, choux, carottes, poireaux, haricots, pommes, poires, oranges, clémentines, mandarines, bananes, ananas, mangues, avocats, etc ;
- Du pain rassis et des céréales comme des restes de pâtes ou de riz ;
- D'autres aliments mais en moindre quantité sont également recensés : le marc de café, le thé, des oléagineux.

La composition analytique et minérale des déchets de cuisine et des larves n'a pas pu être déterminée par ValueBugs. De ce fait, elle a été récupérée de la littérature. La composition la plus pertinente est celle étudiée par Spranghers et al. (2016) concernant le substrat de déchets de restaurant comprenant des déchets de patates, riz, pâtes et légumes. Cette étude traite également du substrat de déchets végétaux, écarté car moins pertinent.

Tableau 10 : Composition analytique et minérale des larves mûres et du substrat utilisé (déchets de restaurant) pour élever les larves de MSN par Spranghers et al., 2016

Composition analytique et minérale des larves mûres et du substrat utilisé (déchets de restaurant) pour élever les larves de MSN par Spranghers et al., 2016				
	Larves sortantes		Déchets organiques	
	Valeur en g.kg de larve sèche (%)	Valeur brute en g.kg de larve fraîche	Valeur en g.kg de larve sèche (%)	Valeur brute en g.kg de larve fraîche
Composition analytique				
Humidité	0	61,9	0	73,8
Protéine brute	43,1	16,4	15,7	4,08
Chitin	6,7	2,5	NA	
Extrait d'éther	38,6	14,7	13,9	3,61
Fibre soluble	NA		0	0
Fibre insoluble	NA		4,1	1,06
Cendre brutes	2,7	1,02	4,5	1,17
Glucides sans fibres	NA		61,8	16,07
Composition minérale				
Ca	1,23	0,46863	1,14	0,29748
Cu	0,01	0,00381	0,00	0,00
Fe	0,11	0,04191	0,42	0,11256
K	5,98	2,27838	8,04	2,15472
Mg	2,11	0,80391	0,53	0,14204
Mn	0,02	0,00762	0,01	0,00268
Na	0,68	0,25908	8,12	2,17616
P	4,08	1,55448	2,37	0,63516
S	0,11	0,04191	0,51	0,13668
Zn	0,07	0,02667	0,02	0,00536

La quantité sortante moyenne de larves mûres est établie à 2,622 kg pour 1 kg de larves immatures.

La mesure de la quantité de substrat traités n'a pas non plus pu être déterminé par ValueBugs par manque de données. De ce fait, les quantités se basent selon le taux de réduction des déchets (%) établi par Ermaloev et al., 2019 de 49 % de bioconversion, lors de son étude sur des restes de nourriture. La quantité de substrat final est dès lors établie à 25,61 kg.

Sa composition a cependant pu être analysée par ValueBugs :

Tableau 11 : Composition analytique et minérale du substrat traité par la larve de MSN

Composition analytique et minérale du substrat traité par la larve de MSN				
Composition	Forme	Unité	Moyenne MSN	Ecart type
Matière sèche		%	27,34	1,98
Cendre totales		%	1,07	0,10
Cendres insolubles		%	0,04	0,06
Chlorure	Cl ⁻	%	0,09	0,01
Matière organique totale		kg/T	258,40	25,29
Azote ammoniacal	N-NH ₄ ⁺	%	0,13	0,04
Azote total	N	kg/T	8,30	1,11
Phosphore	P ₂ O ₅	kg/T	1,59	0,23
Potassium	K ₂ O	kg/T	2,78	0,30
N-P-K en proportion par rapport au limitant	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	proportion	5-1-2	
Calcium	CaO	kg/T	0,78	0,13
Magnésium	MgO	kg/T	0,81	0,12
Sodium	Na ₂ O	kg/T	1,10	0,28
Fer	Fe	mg/kg	28,60	6,38
Manganèse	Mn	mg/kg	9,80	6,76
Cuivre	Cu	mg/kg	6,00	0,71
Zinc	Zn	mg/kg	8,00	0,84
pH			4,96	0,35
C/N			18,84	1,16

Enfin, très peu de littérature était disponible quant aux émissions de gaz à effet de serre émis par le traitement des déchets par la larve de MSN. Les deux études trouvées sont celles de Mertenat et al. (2019) et Ermaloev et al., (2019). Etant donné que le taux de bioconversion a déjà été pris de cette dernière source, les émissions de gaz à effet de serre le seront également. De plus, cette étude est la plus pertinente quant au substrat utilisé. L'étude a mesuré les émissions de gaz à effet de serre pour 1.000 larves produites. Dans le cadre du système étudié, 1 kg représente environ 60.000 larves. La conversion a été effectuée en annexe 3.

Toutes ces données ont également été évaluées pour la moyenne des 10 meilleures productions de larves sortantes par les citoyens chercheurs.

Tableau 12 : Inventaire primaire de la phase d'utilisation du BiB

Inventaire primaire de la phase d'utilisation du BiB						
Description	Unité	Quantité 33 éleveurs	Ecart-type 33 éleveurs	Quantité 10 éleveurs	Ecart-type 10 éleveurs	Source
INTRANTS						
Larves de MSN	kg	1	/	1	/	ValueBugs
Déchets de cuisine	kg	50,21	± 37,43	75,93	± 23,9	ValueBugs
SORTANTS						

Larves de MSN	kg	2,622	± 2,45	5,97	± 1,22	ValueBugs
Substrat ⁷	kg	25,61	± 19,08	38,51	± 12,189	Ermaloev et al, 2019
Emissions de GES						
CO ₂	kg	10,149	± 1,079	10,149	± 1,079	Ermaloev et al, 2019
CH ₄	mg	429,6	± 249,71	429,6	± 249,71	Ermaloev et al, 2019
N ₂ O	mg	114,13	± 66,33	114,13	± 66,33	Ermaloev et al, 2019

Valuebugs ne dispose pas d'un système d'élevage renouvelable de larves. De ce fait, ils doivent se fournir auprès d'une ferme d'élevage, celle de Circular Organics se situant à Turnhout. L'énergie et l'eau nécessaires à la production des œufs ont été considérées en se basant sur les résultats de Riera (2017). L'énergie comprend le chauffage des locaux, la maintenance d'une humidité de 60 % et l'éclairage. Ses résultats impliquent la production pour 37.730.000 nouvelles larves et a été ramenée à environ 60.000 larves. Le transport de la ferme d'élevage (Turnhout) aux locaux de Valubugs (Ixelles) a été considéré, soit 93 km.

Tableau 13 : Inventaire de la production larves immatures, de Circular Organics à ValueBugs

Inventaire de la production larves immatures, de Circular Organics à ValueBugs					
Description	Ressource	Unité	Quantité	Source	EcoInvent 3, Conséquentiel
Production des 55.922 oeufs	Electricité	kWh	4,56	Riera, 2017	Electricity, low voltage {BE} market for
	Eau potable	L	5.19		Tap water Europe {without Switzerland} Water collection, treatment and supply
Transport	Diesel	tkm	0.093	ValueBugs	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4

7.4.4. Substitution

Les scénarios étudiés se basent majoritairement sur la production évitée d'alimentation pour poules et chiens.

L'inventaire a été effectué en deux étapes pour chaque production. Tout d'abord une phase de prospection de la composition alimentaire et analytique pour sept marques d'alimentation pour poules de type mix de grains en vente en Belgique et de six marques d'alimentation sèche pour chien de type croquette (voir annexes 1 et 2).

Les moyennes obtenues sont reprises ci-dessous :

⁷ Selon le taux de réduction des déchets (%) établi par Ermaloev et al, 2019 de 49% de bioconversion

Tableau 14 : Composition analytique et alimentaire de l'alimentation pour poules et pour chiens

Alimentation pour Poules		Alimentation pour Chiens
Composition analytique		
Protéines brutes (%)	13.1	22.2
Graisse brutes (%)	4.1	14.8
Fibres brutes (%)	4.9	2.55
Cendre Brutes (%)	7.4	6.6
Calcium (%)	1.82	1.16
Phosphore (%)	0.45	0.86
Sodium (%)	0.1	0.33
Omégas 3 (%)		0.46
Omégas 6 (%)	N.A.	2.07
Humidité estimée (%)		11.5
Glucides estimés (%)		42.26
Lysine (%)	0.55	N.A.
Méthionine (%)	0.28	
Composition alimentaire⁸		
Produits et sous-produits animal	/	Viande de volaille Huile de poisson Protéines de volailles déshydratées Graisses animales
Céréales	Maïs Orge Soja Blé Sorgo	Maïs Riz Blé
Produits et sous-produits végétaux	Huiles végétales Luzerne Féveroles	Carottes Féveroles Protéines végétales Huiles végétales Protéines végétales

Toutefois, aucun pourcentage n'a pu être déterminé concernant les compositions alimentaires. C'est pourquoi, la deuxième phase de cet inventaire a été de trouver dans la littérature des systèmes de références. Pour le scénario « Poule », l'étude utilisée est celle de Boggia et al. (2010), en reprenant la composition pour un système alimentaire organique pour des poules adultes car celui-ci se rapprochait le plus de la composition alimentaire moyenne ainsi que du taux de protéines brutes établis précédemment.

Pour le scénario « Chien », c'est l'étude du FEDIAF (The European Pet Food Industry Federation) et al., 2018, qui a été employée, concernant les données des procédés les plus pertinents pour l'alimentation sèche pour chien mais également pour l'énergie de production. Enfin, l'étude de FEDIAF a permis de constituer un inventaire relatif au packaging des deux types d'alimentation.

⁸ Composition prise selon le % d'apparition dans les annexes 1 et 2

Le transport a été supposé de 5 kilomètres entre la maison du particulier et du lieu d'achat.

Tableau 15 : Inventaire pour 1kg de mix de grains pour poules

Inventaire pour 1kg de mix de grains pour poules				
Description	Unité	Quantité	Source	EcoInvent 3, Conséquentiel
Grains de blé	g	135	Boggia et al., 2010	Wheat grain, feed, organic {GLO} market for
Grains de maïs	g	420		Maize grain, feed, organic {GLO} market for Conseq, S
Grains d'orge	g	135		Barley grain, feed, organic {GLO} market for Conseq, S
Gluten de maïs	g	70		Maize starch {GLO} market for
Soja	g	180		Soybean, feed {GLO} market for
Luzerne	g	50		Alfalfa-grass silage {GLO} market for
Carbonate de calcium	g	10		Calcium carbonate, precipitated {GLO} market for calcium carbonate, precipitated
Sel	g	2		
Packaging	m ²	0.0907	FEDIAF et al, 2018	Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for
Transport	kgkm	5		Transport, regular bus {RoW} processing

Tableau 16 : Inventaire pour 1kg de croquettes pour chiens

Inventaire pour 1kg de croquettes pour chiens				
Description	Unité	Quantité	Source	EcoInvent 3, Conséquentiel
Viande de volaille	g	330	FEDIAF et al, 2018	Chicken for slaughtering, live weight {GLO} market for
Maïs	g	100		Maize grain, feed {GLO} market for
Blé	g	150		Wheat grain {GLO} market for
Gluten de maïs	g	50		Maize starch {GLO} market for
Riz	g	80		Rice {GLO} market for
Protéines végétales	g	150		Protein feed, 100% crude {GLO} soybean meal to generic market for protein feed
Huile de palme	g			Palm oil, crude {GLO} market for
Carotte	g	50		Carrot {GLO} market for
Féveroles	g	50		Fava bean, organic {GLO} market for
Packaging	m ²	0.0907		Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for
Transport	kgkm	5		Transport, regular bus {RoW} processing
Energie électrique	kWh	0.0344		Electricity, low voltage {BE} market for
Energie thermique	MJ	0,268183		Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for

La substitution ne prend effet que sur un seul indicateur, à savoir l'apport en protéine contenu dans chaque aliment.

2,622kg de larves sortantes correspondent à 403g de protéines. Cette même quantité de protéines représente 3,07kg de mix de grains pour poules et 1,81kg de croquettes pour chiens.

Si rapportée aux 10 meilleurs résultats des citoyens-chercheurs, 5,97kg de larves mûres sont obtenues, soit 920g de protéines. Cela équivaut à 7,023kg de mix de grains pour poules et 4,144kg de croquettes pour chiens. Le tableau ci-dessous reprend ces valeurs de substitution :

Tableau 17 : Substitution des protéines

Substitution protéines					
Larves	Protéines	Mix Poules	Protéines	Croquettes Chien	Protéines
1kg	0,154kg	1kg	0,131kg	1kg	0,222kg
2,622kg	0,403kg	3,07kg	0,403kg	1,81kg	0,403kg
5,97kg	0,92005kg	7,023kg	0,92005kg	4,144kg	0,92005kg

7.4.5. Le cas du substrat traité

Le substrat traité n'a pas été considéré dans cette étude. Plusieurs raisons ont déterminé ce choix. La première est que ValueBugs n'a pas pu mesurer les quantités sortantes de leur dispositif par manque de données procurées par les citoyens-chercheurs. Ensuite, le taux de bioconversion obtenu par Ermaloev et al, 2019, est basé sur des conditions spécifiques et optimisées de traitement des déchets organiques qui ne sont pas reproduites voire reproductibles chez le particulier. Enfin, les recherches sur les substrats remarquent une accumulation de métaux pouvant dépasser les niveaux maximaux autorisés dans la réglementation actuelle (Diener et al., 2015 ; van der Fels-Klerx et al., 2018 ; Sarpong et al., 2019), indiquant ainsi un manque de précision et de compréhension qui ne permet pas d'assurer un usage sans risque pour la sécurité alimentaire et qui limite l'utilisation du substrat comme amendement pour le sol.

8. Evaluation des impacts et interprétation des résultats

Cette partie représente les résultats obtenus pour les évaluations environnementales effectuées. Pour rappel, la modélisation a été effectuée grâce au logiciel SimaPro dans sa version 8.5.2.0. La méthode de modélisation utilisée est la méthode IMPACT 2002+ et concerne les indicateurs midpoint et endpoint.

8.1. Comparaison des scénarios

Ici sont représentés les analyses des résultats globaux pour les systèmes selon les catégories d'impact midpoint et les catégories de dommages endpoint.

Tableau 18 : Résultats pour le scénario « Poule » et le scénario « Chien », pour les catégories d'impacts midpoint considérées (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie d'impact	Unité	Système Poule	Système Chien
Toxicité humaine (cancérogène)	kg C2H3Cl eq	-0,00307565	0,05919586
Toxicité humaine (non-cancérogène)	kg C2H3Cl eq	-0,68247968	-0,15286927
Effets respiratoires	kg PM2.5 eq	-0,00130475	-0,00194064
Destruction de la couche d'ozone	Bq C-14 eq	-15,987702	-10,050607
Radiations ionisantes	kg CFC-11 eq	-3,02E-08	1,32E-07
Formation de photo-oxydants	kg C2H4 eq	-0,00142632	-0,00108131
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	-1271,7601	-200,67994
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	-1596,3971	-282,37262
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	-0,2337531	-0,22883177
Acidification aquatique	m2org.arable	-5,4403267	-4,8654365
Eutrophisation aquatique	kg SO2 eq	-0,02827755	-0,02744032
Occupation des sols	kg PO4 P-lim	-0,00069493	-0,00070218
Changement climatique	kg CO2 eq	-1,5065989	-1,204517
Extraction des minerais	MJ primary	8,7158436	24,066789
Energie non-renouvelables	MJ surplus	0,34187705	0,38906785

Tableau 19 : Résultats pour le scénario « Poule » et le scénario « Chien », pour les catégories d'impacts endpoint considérées (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie de dommages	Unité	Système Poule	Système Chien
Santé humaine	DALY	-2,84E-06	-1,63E-06
Qualité des écosystèmes	PDF*m2*yr	-18,864403	-7,7849524
Changement climatique	kg CO2 eq	-1,5065989	-1,204517
Ressources	MJ primary	9,0577206	24,455857

Pour la grande majorité, les résultats sont négatifs. Un résultat négatif signifie un bénéfice à l'environnement. On peut donc conclure que les bénéfices liés à la substitution des deux

systèmes « Poule » et « Chien » sont plus important que les impacts liés au système de production du BiB, de son transport et de son utilisation.

Toutefois, les catégories d'impacts pour l'extraction des minerais et l'énergie non-renouvelables constituent des résultats positifs dans les deux scénarios, donc des impacts environnementaux nets.

De plus, le scénario « Chien » se voit attribué des résultats positifs vis-à-vis de la toxicité humaine et des radiations ionisantes

Concernant les catégories de dommages, la santé humaine, la qualité des écosystèmes et le changement climatique ont dans les deux cas des résultats négatifs. Seule la catégorie des ressources possède des résultats positifs.

Selon ces résultats, on observe une tendance indiquant que le scénario « Poule » est plus avantageux que le scénario « Chien ».

8.2. Contribution des étapes du cycle de vie

Chacun des procédés unitaires peut être séparé afin de voir leurs résultats globaux. On retrouve ainsi :

- La production du BiB ;
- La phase de transport ;
- La phase d'utilisation ;
- La substitution liée au mix de grains pour poules ;
- La substitution liée aux croquettes pour chiens.

8.2.1. Indicateurs Midpoint :

Tableau 20 : Résultats des catégories d'impacts midpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie d'impact	Unité	Production du BiB	Utilisation	Transport	Mix Grains pour poules	Croquettes pour chiens
Toxicité humaine (cancérogène)	kg C2H3Cl eq	0,14255709	0,01355179	0,00481167	-0,1639962	-0,10172469
Toxicité humaine (non-cancérogène)	kg C2H3Cl eq	0,01766007	0,01348634	0,01302407	-0,72665016	-0,19703976
Effets respiratoires	kg PM2.5 eq	0,00166424	0,0004911	0,00268729	-0,00614737	-0,00678327
Destruction de la couche d'ozone	Bq C-14 eq	-1,1529654	1,5421698	6,2631582	-22,640064	-16,702969
Radiations ionisantes	kg CFC-11 eq	1,72E-08	1,91E-07	2,10E-07	-4,49E-07	-2,86E-07
Formation de photo-oxydants	kg C2H4 eq	0,000914	0,00028839	0,00082518	-0,0034539	-0,00310889
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	49,550651	69,406042	80,944579	-1471,6613	-400,58122
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	39,193134	27,999367	42,714216	-1706,3038	-392,27934
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	0,0123145	0,00898842	0,06326581	-0,31832182	-0,3134005
Acidification aquatique	m2org.arable	0,65132487	0,00623798	0,04861411	-6,1465037	-5,5716134

Eutrophisation aquatique	kg SO2 eq	0,00335947	0,00223211	0,00987432	-0,04374346	-0,04290623
Occupation des sols	kg PO4 P-lim	0,00016119	0,00025388	0,00020051	-0,0013105	-0,00131775
Changement climatique	kg CO2 eq	0,94814002	1,2779093	1,209329	-4,9419772	-4,6398953
Extraction des minerais	MJ primary	29,60065	22,217551	19,11219	-62,214548	-46,863602
Energie non-renouvelables	MJ surplus	0,32926801	0,12405047	0,02159993	-0,13304136	-0,08585056

La phase d'utilisation du dispositif présente les valeurs globales les plus faibles. C'est l'étape, entre les trois premières considérées, qui possède les impacts les moins négatifs sur l'environnement à l'exception de la catégorie de la destruction de la couche d'ozone et de l'eutrophisation aquatique. Elle possède le score unique positif le plus bas. Ses impacts de l'utilisation proviennent surtout de l'électricité nécessaire à la production des œufs et de leur transport.

L'étape de production du BiB se voit attribuer le score le plus élevé notamment à cause des ressources demandées à son assemblage. Le polypropylène et l'acier inoxydable sont les principaux responsables de ce résultat. A noter qu'une partie du polypropylène provient du réemploi dans les conditions actuelles de production de ValueBugs mais a été considéré dans son entièreté. De plus, l'énergie nécessaire à sa création a été négligée.

Les catégories d'impacts les plus touchées selon les ces trois étapes sont respectivement : la destruction de la couche d'ozone, majoritairement imputable à la phase de transport, l'écotoxicité aquatique et terrestre, le changement climatique et l'extraction des minerais.

La substitution du mix de grains de poules contrebalance l'ensemble des catégories d'impact à l'exception de l'extraction des minerais et des énergies non-renouvelable. Cela est possible par la production évitée des grains du mix (principalement les grains de maïs) mais également du transport.

La même tendance est observée pour la substitution des croquettes pour chien, majoritairement par la production évitée de viande de volaille et de transport, à l'exception de la toxicité cancérigène et de la destruction de la couche d'ozone qui ne sont pas entièrement neutralisées.

Cette différence entre les deux scénarios provient des processus de transport et de packaging. Le scénario « Poule » évite 59% de transport et 58% de production du packaging en plus que le scénario « Chien ».

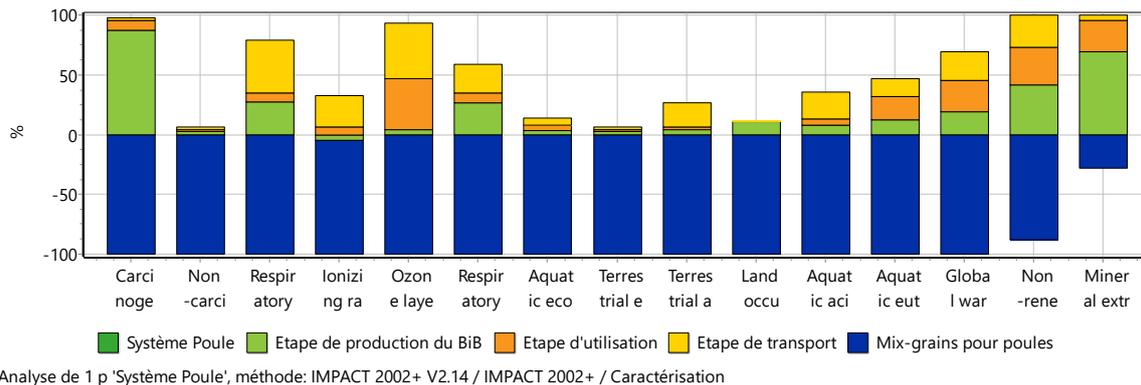


Figure 21 : Caractérisation du système « Poule » selon la méthode IMPACT 2002+

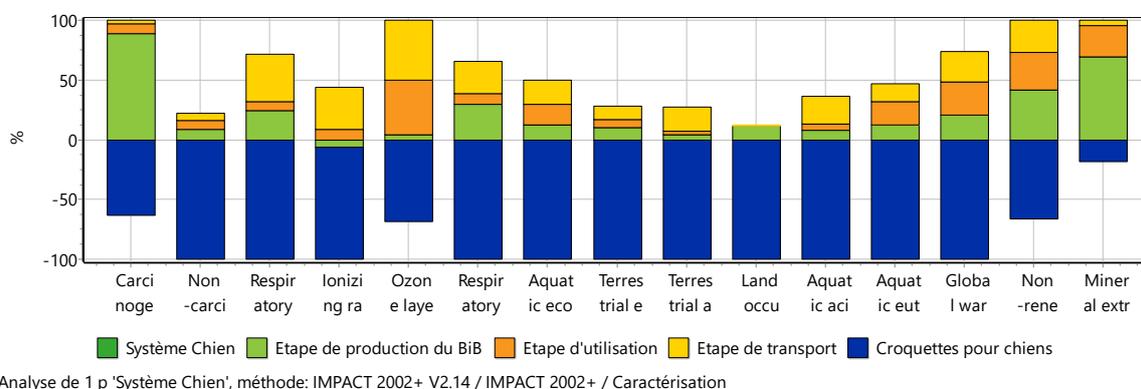


Figure 22 : Caractérisation du système « Chien » selon la méthode IMPACT 2002+

8.2.2. Indicateurs endpoint :

Tableau 21 : Résultats des catégories de dommages endpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie de dommages	Unité	Production du BiB	Utilisation	Transport	Mix Grains pour poules	Croquettes pour chiens
Santé humaine	DALY	1,62E-06	4,21E-07	1,93E-06	-6,81E-06	-5,60E-06
Qualité des écosystèmes	PDF*m2*yr	1,0352563	0,24110653	0,46071869	-20,601484	-9,5220339
Changement climatique	kg CO2 eq	0,94814002	1,2779093	1,209329	-4,9419772	-4,6398953
Ressources	MJ primary	29,929918	22,341602	19,13379	-62,347589	-46,949453

La santé humaine est la catégorie de dommage la plus impactée par les phases de production, d'utilisation et de transport. Ses principaux contributeurs sont une nouvelles fois le transport en bus, le polypropylène et l'acier inoxydable des mailles. La qualité des écosystèmes est la catégorie la moins impactée. Le changement climatique est affecté par les processus de transport, le polypropylène et les émissions de GES relatives à la phase d'utilisation. Enfin, la contribution sur les ressources est attribuée au polypropylène des seaux, l'énergie et les transports.

L'orientation observée dans les catégories d'impact se confirme dans les catégories de dommages. Le scénario « Poule » tend à avoir un impact moindre dans toutes les catégories de dommages par rapport au scénario « Chien ».

Les tables ci-dessous soulignent donc un bénéfice du scénario « Poule » de :

- 42,8 % pour la santé humaine ;
- 59,7 % pour la qualité des écosystèmes ;
- 20,9 % pour le changement climatique ;
- 37,5 % pour les ressources ;

comparativement au scénario « Chien ».

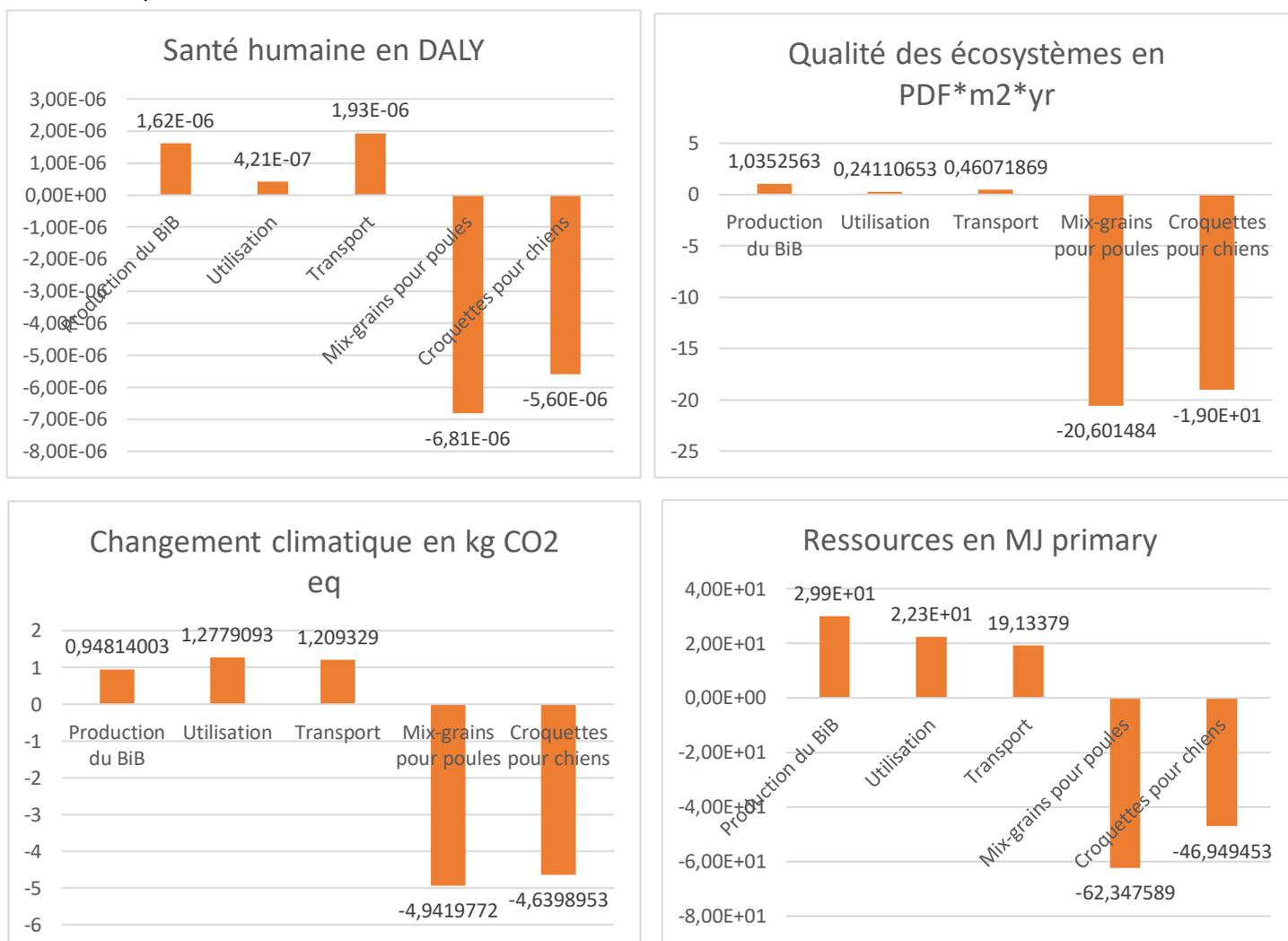


Figure 23 : Schéma des résultats des catégories de dommages endpoint pour chaque processus (méthode IMPACT 2002+)

8.3. Analyse de sensibilité

Deux analyses de sensibilités ont été effectuées dans cette étude.

La première consiste en la modification de la quantité moyenne de larves sortantes des 33 citoyens-chercheurs par la quantité moyenne des 10 meilleurs citoyens-chercheurs. Ces scénarios alternatifs seront appelés scénario « Poule 10 » et scénario « Chien 10 ». L'hypothèse est que plus la quantité de larves sortantes est importante, plus la substitution également. Cette analyse permettra d'indiquer les différences entre les capacités d'élevage et de mettre en exergue les bénéfices liés à un élevage optimisé. Elle permettra également l'ouverture d'un dialogue parmi les citoyens-chercheurs afin d'améliorer le rendement global moyen de chacun.

La deuxième analyse de sensibilité utilisera la méthode d'analyse ReCiPe dans sa perspective hiérarchiste (ReCiPe H) endpoint (catégories de dommage) afin d'évaluer l'impact du choix de la méthode et la robustesse de l'analyse.

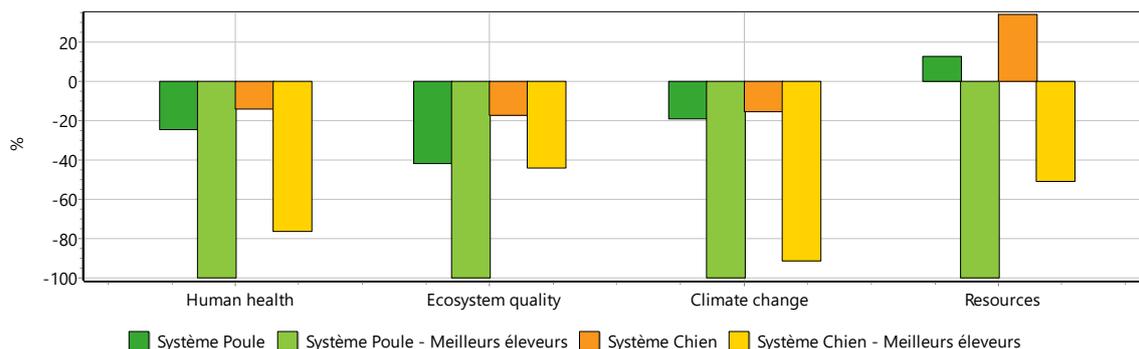
8.3.1. Première analyse de sensibilité

Tableau 22 : Résultats pour les scénarios « Poule » et « Poule 10 » et le scénario « Chien » et « Chien 10 », pour les catégories d'impacts midpoint considérées (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie d'impact	Unité	Système Poule	Système Poule 10	Système Chien	Système Chien 10
Toxicité humaine (cancérogène)	kg C2H3Cl eq	-0,00307565	-0,21424078	0,05919586	-0,07197841
Toxicité humaine (non-cancérogène)	kg C2H3Cl eq	-0,68247968	-1,6181305	-0,15286927	-0,40695258
Effets respiratoires	kg PM2.5 eq	-0,00130475	-0,00922024	-0,00194064	-0,01068768
Destruction de la couche d'ozone	Bq C-14 eq	-15,987702	-45,13955	-10,050607	-31,589131
Radiations ionisantes	kg CFC-11 eq	-3,02E-08	-6,08E-07	1,32E-07	-2,37E-07
Formation de photo-oxydants	kg C2H4 eq	-0,00142632	-0,00587363	-0,00108131	-0,00509024
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	-1271,7601	-3166,7038	-200,67994	-717,23053
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	-1596,3971	-3793,4717	-282,37262	-788,21792
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	-0,2337531	-0,64363133	-0,22883177	-0,63296258
Acidification aquatique	m2org.arable	-5,4403267	-13,354701	-4,8654365	-12,050047
Eutrophisation aquatique	kg SO2 eq	-0,02827755	-0,0846026	-0,02744032	-0,08276802
Occupation des sols	kg PO4 P-lim	-0,00069493	-0,00238236	-0,00070218	-0,00240142
Changement climatique	kg CO2 eq	-1,5065989	-7,8699982	-1,204517	-7,1876748
Extraction des minerais	MJ primary	8,7158436	-71,392986	24,066789	-36,363956
Energie non-renouvelables	MJ surplus	0,34187705	0,17057005	0,38906785	0,27836332

Tableau 23 : Résultats pour les scénarios « Poule » et « Poule 10 » et le scénario « Chien » et « Chien 10 », pour les catégories d'impacts endpoint considérées (méthode IMPACT 2002+)

Catégorie de dommages	Unité	Système Poule	Système Poule 10	Système Chien	Système Chien 10
Santé humaine	DALY	-2,84E-06	-1,16E-05	-1,63E-06	-8,84E-06
Qualité des écosystèmes	PDF*m2*yr	-18,864403	-45,39133	-7,7849524	-20,063641
Changement climatique	kg CO2 eq	-1,5065989	-7,8699982	-1,204517	-7,1876748
Ressources	MJ primary	9,0577206	-71,222416	24,455857	-36,085593



Comparaison de 1 p 'Système Poule', 1 p 'Système Poule - Meilleurs éleveurs', 1 p 'Système Chien' et 1 p 'Système Chien - Meilleurs éleveurs', méthode: IMPACT

Figure 24 : Comparaison des systèmes « Poule », « Poule 10 », « Chien » et « Chien 10 » selon les catégories de dommages (méthode IMPACT 2002+)

L'hypothèse de l'analyse de sensibilité s'avère se confirmer. Plus la quantité de larves sortantes est importante, plus les bénéfices liés à la substitution le sont également. On notera que les scénarios concernant les meilleurs éleveurs compensent la catégorie de dommages liés aux ressources.

8.3.2. Deuxième analyse de sensibilité

Tableau 24 : Comparaison des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe (H) pour les catégories d'impacts endpoint considérées

Dommage	IMPACT 2002 +				ReCiPe (H)			
	Système Poule	Système Poule 10	Système Chien	Système Chien 10	Système Poule	Système Poule 10	Système Chien	Système Chien 10
Santé humaine	-24,5	-100	-14	-76,2	-20,8	-100	-18,1	-94,1
Qualité des écosystèmes	-41,6	-100	-17,2	-44,2	-38,1	-99,2	-38,5	-100
Ressources	12,7	-100	34,4	-50,7	5,93	-100	30,7	-43,5
Changement climatique	-19,1	-100	-15,3	-91,3				

Les valeurs pour la catégorie de dommage des ressources coïncident dans les deux méthodes. Il en va de même concernant l'ensemble des scénarios « Poule » et « Poule 10 ». On peut donc

considérer que le choix de la méthode n'impacte pas les résultats dans ces cas-là, ainsi que pour la catégorie de santé humaine pour le système « Chien ».

La catégorie de dommage de santé humaine pour le scénario « Chien 10 » et la qualité des écosystèmes pour le scénario « Chien » présentent un écart supérieur à 15% mais respectent une tendance similaire.

Enfin, la catégorie de dommage sur la qualité des écosystèmes pour le scénario « Chien 10 » contient le plus d'incertitudes avec une différence de 56,8%. Il s'agit du seul concerné.

9. Conclusion

Selon l'analyse de cycle de vie effectuée, le dispositif de traitement des déchets organiques élaboré par ValueBugs ne possède que peu d'impacts environnementaux, grâce notamment à la substitution procurée d'alimentation conventionnelle pour animaux, mais surtout au fait que très peu d'énergie et d'eau soient impliquées tout au long du processus. De ce fait, la méthode décentralisée se distingue de son application industrielle et semi-industrielle très énergivore. Toutefois, quelques pistes d'amélioration ont été identifiées.

Lors de la phase de production du Bucket in a Bucket, les matériaux constitutifs des seaux et de la maille, à savoir le polypropylène et l'acier inoxydable, constituent les principaux contributeurs d'impacts de cette étape.

Dans l'étape d'utilisation, l'intrant de larves immatures nécessite une production préalable effectuée par une ferme d'élevage, dans ce cas, il s'agit de Circular Organics. L'énergie nécessaire à sa production ainsi que le transport de la ferme aux locaux de ValueBugs pourrait être évitée dans plusieurs cas :

- Soit ValueBugs devient indépendant vis-à-vis de la ferme d'élevage en réalisant lui-même son cycle d'élevage (œufs – larves – mouches – œufs) ;
- Soit un dispositif est conceptualisé, permettant aux citoyens-chercheurs d'effectuer eux-mêmes ce cycle d'élevage.

Cependant, il faudra là prendre en considération l'énergie relative à la main d'œuvre nécessaire pour un élevage décentralisé, une quantité de matériaux nécessaire à la production du système plus élevée, ainsi qu'une maintenance cette fois-ci non négligeable comme un besoin en eau pour le nettoyage.

Les scénarios étudiés montrent une meilleure substitution par le mix de grains de poules que par les croquettes pour chien. Cela pourrait s'expliquer par le seul facteur d'équivalence (le taux de protéines) pris en considération entre les larves et les aliments de substitution. De plus, il est à souligner que la larve de MSN ne constitue pas un changement radical de régime alimentaire mais est à considérer comme un complément aux aliments conventionnels.

Enfin, plusieurs limites ont été constatées au cours de l'analyse de cycle de vie :

- 1 kg de larves immatures, c'est presque 60.000 larves. Or, un BiB ne contient que 4.000 larves afin de respecter une densité optimisée. Si le citoyen chercheur doit se déplacer à chaque fois pour obtenir de nouvelles larves, il est à souligner que les transports ont fortement été sous-estimés dans l'analyse ;
- La durée et la qualité d'un cycle de production entier, c'est-à-dire de production de l'entièreté des larves entrantes, est très dépendante des conditions d'élevage appliquées par le citoyen-chercheur. Une mauvaise compréhension de sa part pourrait amener à des émissions de gaz à effet de serre supplémentaires ;

- Les quantités d'émissions de gaz à effet de serre ne sont encore que très peu connues, et les quelques articles disponibles ne permettent pas de tendre vers un consensus. Leur contribution est donc incertaine.
- Beaucoup d'incertitudes encerclent encore l'utilisation du substrat traité par les larves comme amendement au sol notamment par rapport à la bioaccumulation des métaux lourds et de la sécurité de la chaîne alimentaire. Trop peu de littérature a été effectuée à ce sujet, mais dans quel cas celui-ci est utilisable, cela constituerait une nouvelle substitution à introduire dans l'analyse du cycle de vie du système.

Le traitement des déchets par la larve de MSN possède tout de même un avenir prometteur offrant un avantage non négligeable qu'est la production de protéines dans un environnement intraurbain où l'importation de cette matière est importante, et pourra très bien s'insérer dans la Région de Bruxelles-Capitale auprès des alternatives décentralisées déjà installées comme que le compostage ou le vermicompostage

10. Bibliographie

10.1. Textes de loi

Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 18 juillet 2002 instaurant une obligation de reprise de certains déchets en vue de leur valorisation ou de leur élimination, retiré de : http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&cn=2002071864&table_name=loi

Commission de Régulation (EU) 2017/893 du 24 mai 2017 modifiant la Commission de Régulation (EU) No 142/2011 concernant les dispositions relatives aux protéines animales transformées. Récupéré de : <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/893/oj>

Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, retiré de : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=FR>

Ordonnance du 14 juin 2012 relative aux déchets, récupéré de : http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&cn=2012061402&table_name=loi

10.2. Bibliographie

Alvarez, L. (2012), « The Role of Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) in Sustainable Waste Management in Northern Climates », *Electronic Theses and Dissertations*, 402

Barragàn Fonseca, K.B., et al., (2018), « Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed: a review. », *Journal of Insects Food and Feed*, 3, 105-120

Barry, T., (2004), « Evaluation of the Economic, Social, and Biological Feasibility of Bioconverting Food Wastes with the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) », Ph.D. dissertation, University of Texas, p176

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

Bortolotti, A., De Muynck, S., et Kampelmann, S., (2016), « Analyse théorique de la littérature décrivant les outils techniques de valorisation décentralisée de biodéchets des professionnels – annexe : fiches synthétiques », Rapport pour le compte de Bruxelles Environnement.

Bortolotti, A., Aragone, A., Athanassiadis, A., De Muynck, S., et Kampelmann, S., (2018), « Potentiel des biodéchets collectables en Région de Bruxelles-Capitale », rapport pour le compte de Bruxelles Environnement.

Boggia, A., et al., (2010), « Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment », *World's Poultry Science Journal*, 66, 1, 95-114

Bosch, G., et al., (2017), « Aflatoxin B1 tolerance and accumulation in Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) and yellow mealworms (*Tenebrio molitor*). », *Toxins (Basel)*, 9, 185

Bosch., G, et al., (2019), « Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: Legislation, efficiency and environmental impact », *Journal of Cleaner Production*, 222, 355-363

Bruni, L., et al., (2018), « Characterisation of the intestinal microbial communities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with *Hermetia illucens* (black soldier fly) partially defatted larva meal as partial dietary protein source », *Aquaculture*, 487, 56-63

Bulak, P., et al., (2018), « *Hermetia illucens* as a new and promising species for use in entomoremediation », *Science of the Total Environment*, 633, 912-919

Canacki, M., et al., (2003), « A Pilot Plant to Produce Biodiesel from High Free Fatty Acid Feedstocks », *Transactions of the ASAE*, 46(4), 945-954

Carvalho, M., et al., (2012), « Effects of diet and development on the *Drosophila* lipidome. », *Molecular Systems Biology*, 8, 1-17

- Chapman, R.F., (2013), « The insects: structure and function » *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- Charlton, A.J.J., et al., (2015), «Exploring the chemical safety of fly larvae as a source of protein for animal feed», *Journal of Insects Food Feed*, 1, 7-16
- Čičková, H., et al., (2015). « The use of fly larvae for organic waste treatment. », *Waste Management*, 35, 68–80
- de Boer, H.C., et al., (2014), « Replacement of soybean meal in compound feed by European protein sources. », *Livestock research Report*, 819, 47
- De Muynck, S., Kampelmann, S., Davila, F., Opération Phosphore (2019), « Rapport scientifique #2, la stratégie de changement de système », Innoviris Co-Create, Bruxelles.
- Diener, S. et al., (2009), « Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates », *Waste Management and Research*, 27, 603-610
- Diener, S., et al., (2011), « Black soldier fly larvae for organic waste treatment—prospects and constraints. » *Paper presented at the WasteSafe 2011, 2nd International Conference on Solid Waste Management in Developing Countries*, Khulna, Bangladesh, 13–15
- Diener, S., et al., (2011), « Biological Treatment of Municipal Organic Waste using Black Soldier Fly Larvae. », *Waste Biomass Valor*, 2, 357-363
- Diener, S., et al., (2015), « Opportunities and constraints for medium- scale organic waste treatment with fly larvae », in *15th International Waste Management Landfill Symposium*, Cagliari, Sardinia.
- Dortmans, B., et al., (2017), « Black soldier fly biowaste processing: a Step-by-Step Guide », *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)*, Dübendorf, Switzerland.
- Dossey, A., et al., (2016), « Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications », *Academic Press*, 402p
- Erickson, M.C., et al., (2004), « Reduction of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly », *Journal of Food Protection*, 37, 685-690
- Ermolaev, E. et al., (2019), « Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens* », *Waste Management*, 96, 65-74
- Fatchurochim et al., (1989), « Filth fly (Diptera) oviposition and larval development in poultry manure of various moisture levels », *Journal of Entomological Science*, 24(2), 224-231
- Finnveden, G, et al., (2009), « Recent developments in Life Cycle Assessment », *Journal of Environmental Management*, 91, 1, 1-21
- Fritsche, U., et al., (2011), « Indirect land use change and biofuels », étude commandée par le Parlement européen, retiré de : [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/JOIN/2011/451495/IPOL-JOIN_ET\(2011\)451495_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/JOIN/2011/451495/IPOL-JOIN_ET(2011)451495_EN.pdf)
- Furman et al., (1959), « *Hermetia illucens* (Linnaeus) as a factor in the natural control of *Musca domestica* Linnaeus », *Journal of Economic Entomology*, 52, 917-921
- Fusetto, R., et al., (2017), « Partitioning the roles of CYP6G1 and gut microbes in the metabolism of the insecticide imidacloprid in *Drosophila melanogaster* », *Scientific Report*, 7, 1–12
- Gasco, L., et al., (2018), « Can diets containing insects promote animal health ? », *Journal of Insectes for Food and Feed*, 4, 1-4
- Gold, M., et al., (2018), « Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review », *Waste Management*, 82, 302-3018
- Hackstein, J.H., et Stumm, C.K., (1994), « Methane production in terrestrial arthropods », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 12, 5441-5445

- Hann, J.D., et Ascerno, M.E., (1991), « Public Attitudes Toward Urban Arthropods in Minnesota. », *American Entomologist*, 37, 3, 179-184
- Hard, J.J., et al., (1989), « Resource- and density-dependent development in tree-hole mosquitoes », *Oikos*, 54, 137–144
- Hoste, R. et Bolhuis, J., (2010), « Sojaverbruik in Nederland », LEI-rapport 2010-059, LEI, Wageningen, Pays-Bas.
- ISO 14040, (2006), « Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. »
- ISO 14044, (2006), « Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. »
- Jolliet, O., et al., (2017), « Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan », *Presse Polytechniques et universitaires romandes*, 3^{ème} édition revue et augmentée, Italie, 340p
- Kennedy, J., (2001), « Lecture Notes », *Insect Biology*, University of North Texas, Denton, Texas.
- Kalova, M., et al. (2013), « Voracious larvae *Hermetia illucens* and treatment of selected types of biodegradable waste », *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LXI, 1, 77–83
- Komakech, A. J. et al., (2015), « Life cycle assessment of biodegradable waste treatment systems for sub-Saharan African cities », *Resources, Conservation and Recycling*, 99, 100-110
- Lalander, C., et al., (2017), « A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces - assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion. », *Global Change Biology Bioenergy*, 10, 84-91
- Lemaitre, B., Miguel-Aliaga, I., (2013), « The digestive tract of *Drosophila melanogaster* », *Annual Review of Genetics*, 47, 377–404
- Li, Q., et al., (2011), « From organic waste to biodiesel: black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible », *Fuel*, 90, 1545– 1548
- Magalhães, R., et al., (2017), « Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) », *Aquaculture*, 476, 79–85
- Makkar, H. P. S., et al., (2014), « State-of-the-art on use of insects as animal feed. », *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33
- McCallan, E., (1974), « *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), a cosmopolitan American species long established in Australia and New Zealand », *Entomologists' Monthly Magazine* », 109, 232-234
- Meneguz, M., et al., (2018), « Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae », *Journal in Scientific Food Agriculture*, 98, 5776-5784
- Mertenat, A., et al., (2019), « Black Soldier Fly biowaste treatment e Assessment of global warming potential », *Waste Management*, 84, 173-181
- Mekonnen, M., et Hoekstra, A., (2012), « A global assessment of the water footprint of farm animal products », *Ecosystems*, 15, 401-415
- Myers, H.M. et al., (2008), « Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure », *Environmental Entomology*, 37(1), 11-15
- Newton, G. L., et al., (1977), « Dried *Hermetia Illucens* Larvae Meal as a Supplement for Swine. », *Journal of Animal Science*, 44(3), 395-400
- Newton, G.L., et al., (2005), « The black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a manure management/resource recovery tool », *Symposium State Science Animal, Manure Waste Manage*, 5–7, San Antonio, Texas, USA, p5
- Newton, G.L., et al., (2005), « Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. », *Report for Mike Williams, Director of the Animal and Poultry Waste Management Center, North Carolina State University*

- Newton, G.L., et al., (2008), « Black soldier fly prepupae: a compelling alternative to fish meal and fish oil », *Public Comment on Alternative Feeds for Aquaculture*
- Nguyen T. T. X., (2010), « Influence and Diet on Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) (Diptera: Stratiomyidae) Life History Traits », *Masters Thesis*, University of Windsor, ON, Canada
- Nguyen, T. T. X., et al., (2013), « Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development. », *Journal of Medical Entomology*, 50, 898–906
- Nguyen, T. T. X., et al., (2015), « Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. », *Environmental Entomology*, 44, 406-410
- Oonincx, D.G.A.B., et al., (2010), « An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption », *PLoS One* 5
- Oonincx, D.G.A.B., de Boer, I.J.M., (2012). « Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans - a life cycle assessment. » *PLoS One*, 7, 1-5
- Oonincx, D.G.A.B., et al., (2015). « Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. »
- Oonincx, D.G.A.B., et al., (2015a), « Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure », *Journal of Insect for Food and Feed*, 1, 131-139
- Oonincx, D. G. A., B., et al., (2017), « Environmental impact of insect production. », In : van Huis, A., Tomberlin, J. K., (Eds.), « Insects as food and feed: From production to consumption », *Wageningen Academic Publishers*.
- Parra Paz, A. S., et al., (2015), « Effects of Larval Density and Feeding Rates on the Bioconversion of Vegetable Waste Using Black Soldier Fly Larvae *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) », *Waste and Biomass Valorization*, 6, 1059-1065
- Pieterse, E., et al., (2018), « Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a dietary protein source for broiler production ensures a tasty chicken with standard meat quality for every pot », *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99, 2, 898-903
- Purschke, B., et al., (2017), « Impact of substrate contamination with mycotoxins, heavy metals and pesticides on growth performance and composition of Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for use in the feed and food value chain. », *Food Additives and Contaminants*
- Riera, A., (2017), « The carbon impact of treating food waste with Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) in Scotland : A life cycle assessment », *Dissertation for the degree of MSc in Environmental Sustainability*, University of Edingburgh, 68p
- Roffeis, M., (2015), « Pig manure treatment with housefly (*Musca domestica*) rearing – an environmental life cycle assessment. », *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(3), 195-214
- Roffeis, M., (2019), « Implementing insect production in agricultural value chains : An ex-ante life cycle evaluation », *ULB Institutional Repository*, 2013/285521, ULB
- Rozkošný, R., (1997), « Family Stratiomyidae. In: Papp, L., Darvas, B. (Eds.) », *Contributions to a Manual of Palearctic Diptera, Nematocera and lower Brachycera*, vol. II. Science Herald, Budapest, Hungary, 387–411
- Rumpold, B. A., & Schuler, O. K., (2013), « Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. », *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 1-11
- Sab Miller et WWF, (2009), « Water Footprinting : Identifying & addressing water risks in the value chain », retiré de : https://waterfootprint.org/media/downloads/SABMiller-WWF-2009-waterfootprintingreport_1.pdf
- Salomone, R. (2017), « Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens* », *Journal of Cleaner Production*, 170, 890-905
- Sanchez Muros, R., et al., (2014), « Insect meal as renewable source of food for animal feeding: A review. » *Journal of Cleaner Production*, 65, 16–27

- Sarpong, D., et al., (2019), « Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae », *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 45-54
- Schiavone et al., (2018), « Black soldier fly larva fat inclusion in finisher broiler chicken diet as an alternative fat source. », *Animal*
- Sheppard, D.C. et. al., (1994), « A value added manure management system using the black soldier fly. », *Biosource Technology*, 50, 275-279
- Sheppard et. al., (2002), « Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in a colony », *Journal of medical Entomology*, 39, 695-69
- Smetana, S., et al., (2016), « Sustainability of insect use for feed and food : Life Cycle Assessment perspective. », *Journal of Cleaner Production*, 137, 741-751
- Smetana, S., et al., (2019), « Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. », *Resources, Conservation & Recycling*, 144, 285-296
- Spranghers, T, et al. (2016), « Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrate », *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2594-2600
- Terra, W.R., Ferreira, C., (2012), « Biochemistry and Molecular Biology of Digestion », *Insect Molecular Biology and Biochemistry*, pp. 365–418
- Tomberlin, J.K. et. al., (2002), « Selected life-history traits of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets », *Annals of the Entomological Society of America*, 95, 379-386.
- ur Rehman, K., et al., (2017), « Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*Hermetia illucens* L.). », *Journal of Environmental Management*, 196, 458-465
- van der Fels-Klerx, H.J., et al., (2016), « Uptake of cadmium, lead and arsenic by *tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from contaminated substrates », *PLoS One* 11(11): e0166186.
- van Huis, A., (2013) « Potential of insects as food and feed in assuring food security », *Annual Review of Entomology*, 58, 563
- van Zanten, H.H.E., et al. (2015). « From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed », *Journal of Cleaner Production*, 102, 362-369
- Verbeke, W., et al., (2015), « Insects in animal feed : Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. », *Animal Feed Science and Technology*, 204, 72-87
- Vermeulen, S. J., et al., (2012), « Climate Change and Food Systems. », *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 195–222.
- Verones et al., (2017), « LCIA framework and cross-cutting issues guidance within the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative », *Journal of Cleaner Production*, 161, 957-967
- Zheng, L., et al., (2012), « Double the biodiesel yield: rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production », *Renewable Energy*, 41, 75–79.
- Zurbrügg, C., (2015), « Bioaccumulation of heavy metals in the black soldier fly, *Hermetia illucens* and effects on its life cycle », *Journal of Insects Food and Feed*, 1(4), 261–270
- Zurbrügg, C., et al., (2018), « From pilot to full scale operation of a waste-to-protein treatment facility », *Detritus*, 1, 18-22

10.3. Sitographie

ADEME, (2018), « Le traitement des déchets », retiré de : www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parler/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets

ABP (Agence Bruxelles-Propreté) :

- (2017), « Rapport annuel 2017 », retiré de : https://www.arp-gan.be/images/upload/files/Rapport_Annuel_2017_FR.pdf
- (2020), « Qui sommes-nous ? », retiré de : <https://www.arp-gan.be/fr/qui-sommes-nous.html>

AFSCA (Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire) :

- (2019), « Insectes dans les aliments pour animaux », retiré de : <http://www.afsca.be/productionanimale/alimentation/insectes/>
- (2019a), « Note sur le substrat résiduel d'insectes utilisés comme animaux d'élevage dans le cadre de la production de Food, Feed ou d'applications techniques », retiré de : http://www.afsca.be/productionanimale/alimentation/insectes/_documents/substratresiduelinsectes_avril2019_FR.pdf
- (2019b), « Mise sur le marché d'insectes et de denrées à base d'insectes pour la consommation humaine », retiré de : <http://www.afsca.be/denreesalimentaires/insectes/>

Be circular :

- (2016), « Programme Régional en Economie Circulaire 2016-2020. Mobiliser les ressources et minimiser les richesses perdues : Pour une économie régionale innovante », retiré de : https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/PROG_160308_PREC_DEF_FR
- (2020), « Appels à projets be Circular », retiré de : <https://www.circulareconomy.brussels/appels-a-projets-be-circular-entreprises/>

Bruxelles-Propreté (2020), « Tri », retiré de : <https://www.arp-gan.be/fr/tri.html>

Bruxelles Compost, « Notre processus de compostage », retiré de : <https://www.bru-compost.be/processus-de-compostage.html>

Bruxelles-Energie, (2020), « 2019 en chiffre », retiré de : <https://www.bru-energie.be/index.html>

Bruxelles environnement (2017), « Des déchets aux ressources », retiré de : <https://environnement.brussels/thematiques/dechets-ressources/des-dechets-aux-ressources>

Chemical Book, « Chitin », retiré de : <https://www.chemicalbook.com/Price/Chitin.htm>

CIRIEC (Centre international de recherches et d'information sur l'économie publique, sociale et coopérative), (2010), « Les déchets en Belgique », retiré de : <http://www.ciriec.ulg.ac.be/wp-content/uploads/2015/11/WP10-09.pdf>

CIWF (Compassion in world farming), (2019), « Wasteful and unsustainable: the use of wild fish to feed farmed fish is causing huge environmental and social damage », retiré de : <https://www.ciwf.org.uk/media/7436180/until-the-seas-run-dry-press-release.pdf>

Commission Européenne (EC), (2016), « Bruxelles-Ecopôle offre une seconde vie aux déchets encombrants », retiré de : https://ec.europa.eu/regional_policy/fr/projects/belgium/bruxelles-ecopole-brussels-ecopole-gives-bulky-waste-a-new-lease-of-life

EEA (European Environment Agency), (2017), « Trends and projections in Belgium 2017 Tracking progress towards Europe's climate and energy targets », Country fact sheet, retiré de : <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/trends-and-projections-in-europe/trends-and-projections-in-europe-2017/country-profiles-greenhouse-gases-and-energy/belgium-ghg-and-energy-country-profile.pdf/view>

EFSA (European Food Safety Authority), (2015), « Consommer des insectes : quels sont les risques ? », retiré de : <https://www.efsa.europa.eu/fr/press/news/151008a>

EUMOFA (Observatoire européen des marchés des produits de la pêche et de l'aquaculture), (2019), « Monthly Highlights », 4, 44p, retiré de : https://www.eumofa.eu/documents/20178/148316/MH+4+2019+EN_final.pdf/

Eurobaromètre, (2017), « Infographie : les chiffres du gaspillage alimentaire dans l'Union Européenne », retiré de : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20170505STO73528/infographie-les-chiffres-du-gaspillage-alimentaire-dans-l-union-europeenne>

EUROPA, (2019), « Summary of the application : Hermetia meal », retire de : https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/novel-food_sum_ongoing-app_2018-0765.pdf

FAO (Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

- (2006), « Les impacts de l'élevage sur l'environnement », retiré de : <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0612sp1.htm>
- (2012), « Pertes et gaspillages alimentaires : quelques chiffres », retiré de : <http://www.fao.org/news/story/fr/item/196443/icode/>
- (2016), « Elevage et changements climatiques », retiré de : <http://www.fao.org/3/a-i6345f.pdf>

Fost Plus :

- (2020), « Chiffres et graphiques », retiré de : <https://www.fostplus.be/fr/a-propos-de-fost-plus/chiffres-et-graphiques>
- Fost Plus, (2020), « Tout sur le recyclage », retiré de : <https://www.fostplus.be/fr/trier-recycler/tout-sur-le-recyclage>

IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement) :

- (2015), « Valorisation énergétique et élimination », retiré de : <https://environnement.brussels/thematiques/dechets-ressources/gestion-des-dechets/les-bons-gestes-chaque-etape/valorisation>
- (2017), « Déchets ménagers et assimilés », retiré de : <https://environnement.brussels/etat-de-lenvironnement/archives/rapport-2007-2010/dechets/dechets-menagers-et-assimiles>
- (2018), « Plan de gestion des ressources et des déchets », retiré de : https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pgrd_181122_fr.pdf
- (2018), « Déclaration environnementale 2018 », retiré de : https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/RAP_DeclarationEnv_Milieuverklaring_FR
- (2019), « Qui sommes-nous ? », retiré de : <https://environnement.brussels/bruxelles-environnement/qui-sommes-nous>
- (2020), « Part et gestion des déchets préparés en vue du réemploi et du recyclage », retiré de : <https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/en-detail/dechets/part-et-gestion-des-dechets-prepares-en-vue-du>

IBSA (Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse) :

- (2014), « Les Bruxellois, Champions de Belgique des déchets ? », retiré de : http://statistics.brussels/files/publications/focus-de-libs/focus_05_juin_2014
- (2017), « La Région Bruxelles-Capitale en chiffres », retiré de : http://ibsa.brussels/fichiers/publications/minibru/mini-bru_2017_fr
- (2019), « Environnement et énergie : environnement et société », retiré de : <http://ibsa.brussels/themes/environnement-et-energie/environnement-et-energie-1#.XrM886gzblU>

Index Mundi :

- (2020), « Farine de poisson Prix Mensuel – Euro par Tonne Métrique », retiré de : <https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/?marchandise=farine-de-poisson&monnaie=eur>
- (2020), « Tourteau de soja Prix Mensuel – Euro par Tonne Métrique », retiré de : <https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/?marchandise=tourteau-de-soja&monnaie=eur>

IPIFF (2017), « EU Legislation », retiré de : <https://ipiff.org/insects-eu-legislation/>

Nederland Voedsel Land (2018), “Voedselverspilling door de verwerkende industrie”, retire de : <https://www.nederlandvoedselland.nl/artikel/voedselverspilling-door-de-verwerkende-industrie>

OCDE, (2020), « Déchets municipaux (indicateur) », retiré de : <https://data.oecd.org/fr/waste/dechets-municipaux.htm>

Parlement européen, (2015), « Infographie : les chiffre du gaspillage alimentaire dans l’Union européenne », retiré de : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20170505STO73528/infographie-les-chiffres-du-gaspillage-alimentaire-dans-l-union-europeenne>

RESSOURCES, (2018), « Observatoire de la réutilisation Wallonie/Bruxelles – Edition 2018 », retiré de : https://www.res-sources.be/wp-content/uploads/2019/11/Observatoire_2018.pdf

SPW (Service Public de Wallonie) :

- « La Biométhanisation en Région Wallonne », retiré de : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/la-biomethanisation-en-region-wallonne.PDF?IDR=6534>
- « Gaspillage alimentaire – Le Plan REGAL », retiré de : <http://developpementdurable.wallonie.be/gaspillage-alimentaire-le-plan-regal>

Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base de données administratives, retiré de : <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/dechets-et-pollution/dechets-municipaux#panel-12> et <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/dechets-et-pollution/production-de-dechets#news>

Urban. Brussels, (2014), « Rapport sur les Incidences Environnementales : Chapitre 10 – Déchets », PPAS « Belliard-Etterbeek », 60-41, 30p, retiré de : http://urbanisme-bruxelles.hsp.be/sites/urbanisme-bruxelles.hsp.be/files/EI%20-%20Chap10_Dechets.pdf

US Department of Energy :

- (2019), « Renewable & Alternative Fuels », retiré de : <https://www.eia.gov/renewable/>
- (2019), « Petroleum & Other Liquids », retiré de : <https://www.eia.gov/petroleum/>

WWF (Fonds mondial pour la nature), (2014), « Le boum du soja : l’essor du soja, impacts et solutions », retiré de : <https://wwf.be/assets/RAPPORT-POLICY/MARKETS/FR/le-boum-du-soja-version-longue-bd-1.pdf>

11. Annexes

11.1. Annexe 1

Comparaison de six marques d'alimentation sèche (type croquettes) pour chiens en vente en Belgique, selon les composants analytiques, les additifs nutritionnels et la composition :

	Edgard & Cooper Poulet frais élevé en plein air, tomate et myrtille	Frolic Complete volaille	Pedigree Adult Volaille	Purina one Médium maxi adulte Poulet	Hill's, Adult 1-6, Medium 11-25	Tom & Co Adulte Medium 12.5kg Poulet frais	Moyenne
Composants analytiques							
Protéines brutes (%)	25	17	21	25	21.1	24	22.2
Graisse brutes (%)	18	16.5	13	15	14.8	12	14.8
Fibres brutes (%)	4.5	2	1.8	2.5	1.6	3	2.55
Cendre Brutes (%)	6.9	7	7.5	7	4.7	6.5	6.6
Calcium (%)	1.1	1.1	1.4	N.C.	0.7	1.5	1.16
Phosphore (%)	0.8	0.9	1	N.C.	0.63	1	0.86
Sodium (%)	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	0.27	0.4	0.33
Omégas 3 (%)	0.8	N.C.	0.3	0.3	N.C.	N.C.	0.46
Omégas 6 (%)	2.2	N.C.	0.6	2.1	3.4	N.C.	2.07
Humidité estimée (%)	10	19	10	10	10	10	11.5
Glucides estimés (%)	35.6	38.5	46.7	40.5	47.8	44.5	42.26
Protéines masse sèches (%)	27.8	21	23.3	27.8	N.C.	N.C.	24.97
Composition							
Poulet (en %)	41	4	10	17	14	12	16.3
Légumes	Pommes de terre, pois, carottes (0.04%), tomates (0.04%)	Carottes (4%)	Carottes (4%) Haricots (4%)	/	/	Pois (5%), Carottes (0.5%) Tomates (0.5%) Brocoli (0.5%)	Carottes 4x Pois 2x Tomates 2x PdT, Haricot et Brocoli 1x
Fruits	Mangue (0.4%), myrtille (0.04%),	/	/	/	/	/	5/6 n'en contiennent

	pommes (0.04%), fraises 0.04%)						pas
Céréales	/	Riz (4%)	Maïs (10%), riz (4%)	Blé (15.5%), maïs, riz (4%)	Maïs, froment	Maïs (4%)	Maïs 4x Riz 3x Froment et Blé 1x
Sous-produit d'origine animale	Protéines de poulet, huile de poisson	Oui Huile de poisson (0.25%), poisson et sous-produits de poisson	Oui Huile de poisson (0.25%)	Protéines de volaille déshydratée, graisse animales, œufs déshydratés, huile de poisson	Protéines déshydratées de poulet et de dinde, graisse animale, hydrolysat de protéines animale	Oui Non précisé Huile et graisse	Huile et graisse, protéines de volaille, poisson, œuf
Sous-produit d'origine végétale	Graisse de pois, fleurs de calendula, orties, feuilles de mûrier, fenouil, carvi, camomille, mélisse officinale	Huile de tournesol (1%), extraites de protéines végétales	Huile de tournesol (0.4%), pulpe de betterave sucrière (2.5%) Extraits de protéines végétales	Gluten de blé, gruau de maïs, pulpe de betterave, farine de malt	Farine de gluten de maïs, huile végétale, pulpe de betterave séchée	Oui Non précisé Huile et graisse	Huile et graisse, pulpe de betterave, extraits de protéines végétales, farine
Graine	Graine de lin	/	/	/	/	/	5/6 n'en contiennent pas
Substances minérales	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui, mais non p-)récisées
Sucre	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

Valeur la plus haute	
Valeur la plus basse	

N.C.	= Non communiqué
UI	= Unité internationale

11.2. Annexe 2

Comparaison de sept marques d'alimentation pour poules (mix de graines) en vente en Belgique, selon les composants analytiques et la composition :

	Tom & Co, Mélange poules concassé BIO	Versele Laga Gold 4 Mix (Poules Pondeuses)	C'son Bio, mélange de céréales bio, poules pondeuses	Bio-Ron Pluimvee Mix	Versele Laga Gra-Mix Mix Volailles	AVEVE Optima + Chicken Wellness mix	AlIBio Aliment complet BIO, poules pondeuse	Moyenne
Composants analytiques								
Protéines brutes (%)	10.2	13	14.5	N.C.	9	13.8	18	13.1
Graisse brutes (%)	2.9	4	5.2		2.5	4.5	5.5	4.1
Fibres brutes (%)	2.9	4	10.1		2.5	3.7	6.6	4.9
Cendre Brutes (%)	1.6	8	3.9		5.5	13.4	12	7.4
Calcium (%)	0.0	2.2	0.56		1.65	3.03	3.5	1.82
Phosphore (%)	0.3	0.5	0.56		0.29	0.45	0.6	0.45
Sodium (%)	0.0	0.15	0.17		0	0.15	0.16	0.1
Lysine (%)	0.32	0.64	0.65		0.28	0.64	0.81	0.55
Méthionine (%)	0.2	0.34	0.29		0.19	0.35	0.3	0.28
Composition								
Maïs						N.C.		6
Gluten feed de maïs								1
Froment								1
Orge								5
Pois								3
Sorgo								3
Dari								2
Blé								4
Farine basse de blé								1
Son de blé								1
Remoulage de blé								1
Triticale								2
Sarrasin								1
Epeautre								1

Avoine								1
Aliment de tournesol								4
Graine de tournesol								1
Huile de tournesol								1
Aliment de soja								2
Graine de lin								2
Graine de lupin								1
Féverole								2
Luzerne								2
Huile de palme								1
Huile de colza								1
Coquille marine calcaires								1
Carbonate de calcium								2
Phosphate mono/bicalcique								1
Extrait de calendula								1
Sépiolite								1

Aliment contenu dans l'alimentation

11.3. Annexe 3

Conversion des émissions de gaz à effet de serre de Ermaloev et al., 2019 pour 1000 larves produites vers le système étudié, soit 2.622kg de larves produites, correspondant à 55.992 larves.

	Ermaloev et al., 2019	Système étudié
Nombre de larves	1000	55992
Poids (kg)	0,04687	2,622 ou
CO2 biogénique (g)	178,7 ± 19	10.149,04 ± 1.079,08
CH4 + N2O CO2 eq (mg)	788 ± 458	44.753,49 ± 26.011,54

Taux de contribution du CH4 et du N2O CO2 eq (mg)		
Gaz	CH4	N2O
Taux de participation	24%	76%
CO2 eq (mg)	10.740,83 ± 6.242,77	34.012,65 ± 19.768,77
PRG sur 100 ans	25	298
Quantité (mg)	429,6 ± 249,71	114,13 ± 66,33

