



McGill
UNIVERSITY

BREE 495: Design III

Rapport Final

Vermicomposteur automatisé

Projet présenté à:

C. Madramootoo

Par:

Rosalie Boutin [REDACTED]

Charlotte Coutin-Beaulieu [REDACTED]

Véronique Beaudin [REDACTED]

Ariane Otis-Laperrière [REDACTED]

10 avril 2018

Contents

Résumé	5
I. Introduction	6
II. Définition du projet et de la problématique.....	6
L'équipe de conception.....	7
Vision.....	8
III. Études préliminaires	8
1. Vermicomposteurs à circulation directe.....	8
2. Fonctions automatisées	11
a. Convoyeur	11
b. Broyeur.....	12
c. Pulvérisateurs	14
3. Processus biologiques.....	14
a. Vers	14
b. Substrat.....	16
c. Thé de ver et bacs de récupération	17
4. Matériaux.....	19
IV. Procédure de conception.....	20
1. Hypothèses de conception.....	20
2. Processus de sélection du design.....	20
3. Projet Proposé	21
a. Moteur du convoyeur	22
b. Moteur du Broyeur	25
c. Pulvérisateur	25
4. Considérations pour la conception d'un design durable	26
a. Santé et sécurité	26
b. Aspects sociaux	29
c. Aspects environnementaux	30
d. Aspects économiques	32
5. Considérations des standards d'ingénierie	33
6. Construction du prototype	36
V. Matériel et méthode.....	37
1. Expériences biologiques.....	37

2.	Tests	38
a.	Rapport massique carbone sur azote	38
b.	Teneur en humidité	39
c.	Température	39
d.	Densité absolue.....	39
VI.	Résultats et Analyse	40
1.	27/02/2018 - jour 12 de l'expérience 1	40
2.	09/03/2018 - jour 22 de l'expérience 1	40
3.	15/03/2018 - jour 28 de l'expérience 1	41
4.	26/03/2018	42
5.	05/04/2018 - jour 7 de l'expérience 2	43
6.	06/04/2018	44
VII.	Recommandations	45
VIII.	Conclusion.....	47
	Remerciements	47
	Bibliographie	49
	Appendice A – Projet proposé : allure générale	54
	Appendice B – Projet proposé : dimensions	55
	55
	Appendice C – Diagramme de flux du processus.....	56
	Appendice D – Calculs moteur du convoyeur.....	57
	Appendice E – Calcul de pression requise pour le pulvérisateur.....	62
	Appendice F – Estimation des masses et volumes entrants et sortants du système et estimation du nombre de vermicomposteurs requis	66
	Appendice G – Analyse économique	68
	Appendice H – Coût des matériaux du prototype et d’un design complet	69
	Appendice I – Prototype : allure générale	70
	Appendice J – Prototype : dimensions.....	71
	Appendice K – Recettes de substrat pour la deuxième phase de tests.....	72

Figure 1: Vermicomposteur vertical étagé vu de face (1), avec 12 sous-dispositifs (4, 3, 2, 6) superposés sur des étagères industrielles (5) et chacun muni de goulottes de décharge intégrées (7) (Hughes, 2011).	9
Figure 2: Vue de face de deux dispositifs ayant un simple espace interne (10) et reliés entre eux par un conduit perforé (4). Chacun d'entre eux est enrobé de minces films de polypropylène tissés, opaques, souples et respirants (1), et comporte un plancher intégré (2) muni d'une goulotte de décharge (6), elle-même pourvue d'attaches refermables (7). Chaque dispositif est également muni d'un couvercle (3), auquel sont reliées des attaches refermables (8), et de 4 poignées (9) qui permettent de soulever et transporter le compartiment (Hughes, 2011).	9
Figure 3: Vue de face d'un dispositif avec les mêmes spécificités présentées plus haut, soient l'espace interne unique (10), le film extérieur (1), le couvercle (3), les attaches (8), les poignées (9) et le plancher intégré (2), avec en plus la grille de séparation (7), les attaches refermables du plancher (6), la couche de matière première comportant les vers et des composés organiques et inorganiques (4) et la couche de vermicompost fini (5) (Hughes, 2011).	10
Figure 4: Système de réacteur de vermicompostage à flux continu entièrement automatisé (Edwards et al., 2011)	11
Figure 5: Appareil de vermiculture à haut rendement (Windle, 2001)	12
Figure 6: Broyeur vertical à cylindres. Légende: Le substrat (feed), 1ère paire de rouleaux (1st pair of rolls), 2ème paire de rouleaux (2nd pair of rolls) (Kelsall and Lyons, 2003).	13
Figure 7: Vue en coupe d'un système de pulvérisation d'eau d'un vermicomposteur (2) breveté, comportant une pompe à eau (9C) installée sur la ligne de plomberie centrale permet d'extirper de l'eau à partir de la source (10A) et de la mener jusqu'à chaque pulvérisateur (9D et 9E) (Toet, 2012).	14
Figure 8: Can-O-Worms (Abundant Earth, 2018).	18
Figure 9: Taux d'émission de NH ₃ (kg/ha/hr) provenant du fumier de vaches laitières appliquée en surface à 65 300 L / ha (17 000 gal / ac) à Williston, VT en fonction du temps (h) après l'épandage. (W.E. Jokela et J.J. Meisinger, 2004).	41
Figure 10: Température par rapport au temps.	45

Résumé

Myco-Rise, une petite start-up qui se dédie à la production de champignons, désire donner une seconde vie à ses déchets de substrat. De plus, la compagnie vise à revendre les déchets organiques transformés afin d'augmenter ses profits. L'équipe de design propose donc une solution viable et efficace en conceptualisant un vermicomposteur automatisé, adapté au volume de production de l'entreprise et qui permet la production de vermicompost et de thé de ver. Avant tout l'appareil offre un environnement aux conditions idéales pour le développement et le bien-être des vers. Il s'agit également d'un appareil ergonomique et sécuritaire basé sur le principe du processus en flux continu, minimalisant ainsi l'intervention requise de l'utilisateur et l'entretien nécessaire à son bon fonctionnement tout en permettant d'assurer une production constante de vermicompost et de thé de ver. Ce vermicomposteur est également un design respectueux de l'environnement par les matériaux qui le composent et par le fait que les risques de contaminations qui y sont liés sont optimalement mitigés. C'est aussi un design qui s'auto-régule et ne nécessite par conséquent qu'un faible apport d'énergie. En outre, Myco-Rise a attribué un budget de 1000 \$ à l'équipe de conception afin de bâtir un prototype dans le but d'effectuer plusieurs tests de procédé, qui ont été menés et analysés. Le projet proposé par l'équipe, quant à lui, a un coût estimé à 14 287,22\$, remboursé sur une période de 5 ans au cours de laquelle le vermicompost et le thé de ver génèrent des profits annuels estimés à 1611,11\$.

I. Introduction

La génération de déchets ainsi que sa gestion amènent leurs lots d'enjeux environnementaux, sociaux et économiques. La surconsommation, l'augmentation continue de la population et l'industrialisation sont les majeures causes de l'abondance de ces déchets. La majorité se retrouve dans les sites d'enfouissements, causant une génération importante de méthane et augmentant les chances de lixiviats de pénétrer les ressources d'eau potable. Le compostage ainsi que le vermicompostage sont deux actions rentables financièrement pour réduire les déchets municipaux et d'entreprises. En effet, un Canadien produit environ une tonne de déchets par année, alors que le tiers est organique et décomposable par l'une des techniques mentionnées précédemment (Greenmap, n.d.). Le vermicompostage se caractérise par son utilisation de vers pour obtenir un composte riche en nutriments et libre de pathogènes. Pour se faire, les vers requièrent un environnement propice à leur habileté de décomposition, misant sur l'humidité, la qualité des aliments, l'aération et la température. Le produit final, suite à la décomposition du substrat, peut être utilisé comme fertilisant agricole pour soutenir la croissance des cultures, tout en empêchant la dégradation de la terre et en réduisant l'utilisation de fertilisants inorganiques (Singh et al., 2011).

Depuis leur apparition dans les années 80, les modèles de vermicompostage à circulation directe sont d'intérêt pour les petites entreprises qui ont l'environnement à cœur. En employant ce type de système, les opérateurs minimisent non seulement le temps consacré à maintenir le vermicompostage; ils ferment notamment la boucle sur leur utilisation accrue de certaines ressources.

L'objectif de ce rapport est de valider la performance d'un prototype de vermicompostage suite à l'analyse de plusieurs facteurs dont sa durabilité. Suite aux réussites et aux échecs, un modèle optimisé sera présenté pour subvenir aux besoins d'entreprises telles que Myco-Rise.

II. Définition du projet et de la problématique

Fondée en 2016 par Mark Brettshneider et Louis-Philippe Dessureault, Myco-Rise est une entreprise Québécoise en démarrage qui transforme les sources de déchets organiques post-consommation et agricoles en champignons gourmands ayant une excellente valeur nutritionnelle.

Louis-Philippe est étudiant en agro-environnement à l'Université McGill et se spécialise dans l'étude des sols et la gestion des ressources hydriques. Passionné de champignons et de nature

depuis son plus jeune âge, Louis-Philippe a toujours voulu développer sa propre production et valoriser les déchets organiques. Il y a dix ans, il a commencé le vermicompostage à la maison et, depuis ce temps, son projet a grandi. Il a rencontré Mark, un étudiant en affaires et en nutrition à Concordia, et a découvert que leurs profils distinctifs ainsi que leur ambition commune de créer une entreprise durable allaient de pair.

Ils ont tout d'abord commencé leur production de pleurotes à la maison avec peu de moyens, mais se sont rapidement aperçus que la demande était croissante, les incitant donc à penser plus grand pour le futur de leur entreprise. Après avoir été les gagnants de la première place du «Small & Medium Enterprise» de la Coupe Dobson McGill avec un prix de 10 000 \$ ainsi que du «Food and Agribusiness Convergent Innovation Prize Winner» de 5000 \$, ils ont pu acheter un lieu de travail plus grand pour pouvoir augmenter leur production de champignons. Maintenant établis dans un grand espace industriel, ils sont en mesure d'assurer les différentes étapes de production de champignons. Produisant de la pleurote rose, grise et orme ainsi que de l'hydne hérisson, ils sont en mesure de satisfaire une plus grande partie du marché en association avec leurs partenaires d'affaires: Little Bear, Belle Vache et Bryson's Farms.

Leur objectif actuel est d'obtenir une production plus régulière et une plus grande variété d'options pour leurs clients du marché de la restauration. À long terme, ils aimeraient rejoindre une grande partie du marché de la restauration à Montréal et dans d'autres pays industrialisés. Ils aimeraient aussi, dans une perspective sociale durable, créer une ligne de production prête à être installée dans les jardins communautaires de Montréal et peut-être un jour, dans les pays à faible revenu.

La compagnie Myco-Rise désire avoir un outil pour composter la biomasse (substrat) sur laquelle les champignons poussent. Par conséquent, Myco-Rise désire avoir un vermicomposteur personnalisé et automatisé. La conception doit être à flux continu, c'est-à-dire alimenté par le haut et récolté par le bas. Le client souhaite que le système soit presque entièrement automatisé, notamment pour l'alimentation, le mélange et la récolte. En outre, Myco-Rise a décidé de faire du vermicompost plutôt que du compost puisqu'ils veulent récolter le thé de ver. Le lixiviat issu du compost de vers est utilisé comme engrais organique en agriculture.

L'équipe de conception

La réalisation du vermicomposteur est le fruit du travail de quatre étudiantes en Génie des Bioressources de la faculté des sciences de l'agriculture et de l'environnement de l'Université McGill. Rosalie Boutin est la coordonnatrice de projet, accompagnée de Véronique Beaudin, Ariane Otis-Laperrière et Charlotte Coutin-Beaulieu, toutes quatre en troisième année de baccalauréat. Spécialisé en génie de l'écologie, le Dr. Grant Clark a agi à titre de mentor.

Vision

En tant qu'étudiantes en Ingénierie des Bioressources, nous visons à améliorer la qualité de notre environnement en minimisant la quantité de déchets qui se retrouvent aux sites d'enfouissement. Pour que les petites et moyennes compagnies telles que Myco-Rise puissent redistribuer la matière organique de leurs déchets dans la terre, la création d'un vermicomposteur automatisé est primordiale. Notre but est d'arriver avec une solution abordable, viable et facile à utiliser pour que nous puissions assister à un accroissement de l'engagement des petites entreprises envers la durabilité et l'économie circulaire.

III. Études préliminaires

1. Vermicomposteurs à circulation directe

Il existe différents types de vermicomposteurs répartis selon la technologie qui les compose. Les vermicomposteurs dits à circulation directe sont des modèles où le substrat est posé sur le dessus de l'engin et le produit est récolté ailleurs, souvent en-dessous. Ceci est considéré comme du vermicompostage de haute technologie, puisqu'un mécanisme est majoritairement utilisé pour ajouter le substrat, récolter le vermicompost ou les deux. Dans tous les cas, les vers sont amenés à circuler vers la matière fraîche pour que le moins de vers possible ne se retrouve dans le produit final. Cette section sert à présenter plusieurs vermicomposteurs à circulation directe, leur composition, leurs avantages ainsi que leurs fonctionnalités.

D'abord, M. Kenneth D. Hughes (2011) propose un modèle de vermicomposteur vertical étagé qui utilise la gravité pour faire circuler le substrat digéré tout au long du processus. Le design comporte plusieurs dispositifs ou compartiments de dimensions 35 pouces de long par 35 pouces de large par 28 pouces de haut, combinés et superposés sur des étagères industrielles tel qu'illustré par la figure 1, et dont la structure est renforcée par des tuyaux rigides et creux en polychlorure de vinyle (PVC). Ces dispositifs sont positionnés à proximité les uns des autres et, tel que présenté par la figure 2, sont connectés par des conduits perforés afin de faciliter le transfert de chaleur et d'air, et donc d'assurer un meilleur transfert de chaleur et une meilleure aération. De plus, chaque compartiment évacue le substrat digéré par un goulotte de décharge intégrée à son plancher. Chaque compartiment comporte également une grille entre le substrat et le plancher, afin de séparer le produit fini du substrat en traitement, tel qu'illustré par la figure 3, et qui ajoute également au renforcement de la structure du compartiment. Les compartiments situés à l'étage le plus bas ne comportent pas de goulotte, contrairement à ceux situés aux étages supérieurs, tel qu'illustré par la figure 1, et sont plutôt munis d'un plancher refermable d'où le produit fini peut être extirpé, comme présenté par la figure 3. Cet étage inférieur est également surélevé par rapport au sol afin de permettre la collecte du produit. Aussi, le couvercle de chaque compartiment aide à contrôler la quantité de lumière, l'humidité et le flux d'air dans le

compartiment. En ce qui concerne les vers, il est assumé que ces derniers effectuent perpétuellement un mouvement vers le haut, c'est-à-dire vers la matière première fraîche ajoutée au-dessus de la couche supérieure de substrat, et qu'ainsi les pertes animales sont très limitées. Une hypothèse similaire sera établie pour la conceptualisation du projet et pour les tests qui seront effectués.

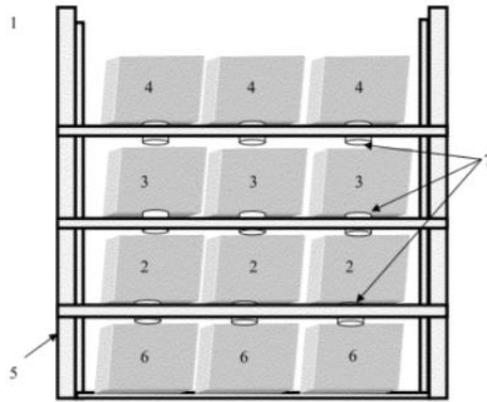


Figure 1: Vermicomposteur vertical étagé vu de face (1), avec 12 sous-dispositifs (4, 3, 2, 6) superposés sur des étagères industrielles (5) et chacun muni de goulottes de décharge intégrées (7) (Hughes, 2011).

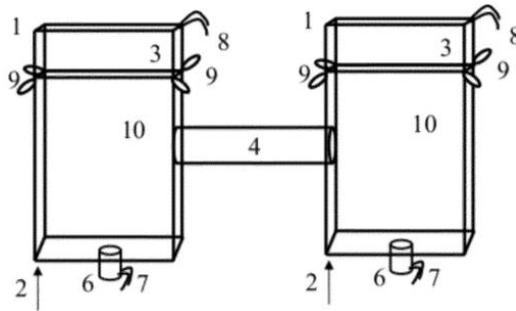


Figure 2: Vue de face de deux dispositifs ayant un simple espace interne (10) et reliés entre eux par un conduit perforé (4). Chacun d'entre eux est enrobé de minces films de polypropylène tissés, opaques, souples et respirants (1), et comporte un plancher intégré (2) muni d'une goulotte de décharge (6), elle-même pourvue d'attaches refermables (7). Chaque dispositif est également muni d'un couvercle (3), auquel sont reliées des attaches refermables (8), et de 4 poignées (9) qui permettent de soulever et transporter le compartiment (Hughes, 2011).

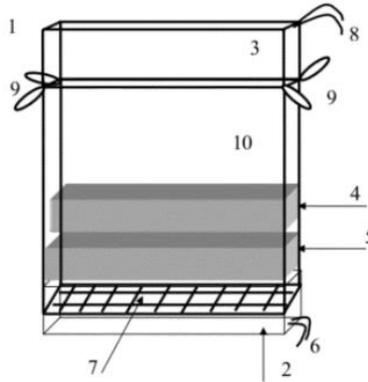


Figure 3: Vue de face d'un dispositif avec les mêmes spécificités présentées plus haut, soient l'espace interne unique (10), le film extérieur (1), le couvercle (3), les attaches (8), les poignées (9) et le plancher intégré (2), avec en plus la grille de séparation (7), les attaches refermables du plancher (6), la couche de matière première comportant les vers et des composés organiques et inorganiques (4) et la couche de vermicompost fini (5) (Hughes, 2011).

M. Kenneth D. Hughes (2011) soutient que son design présente plusieurs avantages. Premièrement, les compartiments sont qualifiés de légers, en revanche aucun poids n'est indiqué, le procédé est jugé comme étant efficace et facilement transportable. En effet, plusieurs expériences ont été menées en utilisant le système et ont été fructueuses en ce qui concerne la production de vermicompost et dans l'établissement d'un environnement propice à l'activité et à la reproduction des vers. Deuxièmement, les compartiments ont aussi l'avantage de pouvoir servir d'outil de fabrication de thé de ver en plus de leur rôle primaire de fabrication de vermicompost fini. Effectivement, de l'eau peut être ajoutée dans le compartiment par le dessus, qui percole au travers du substrat en passant par la couche de produit fini et par la grille, à partir de laquelle l'eau devient un thé de ver enrichi de nutriments ayant une valeur marchande et qui est récupérée via la goulotte ou le plancher refermable.

En revanche, M. Kenneth D. Hughes (2011) admet que son système comporte certaines failles. La plus importante est le fait que le principe des compartiments multiples augmente l'entretien requis, ce qui a également pour effet d'augmenter les coûts qui y sont associés et le niveau d'intervention humaine requise. De plus, la compartimentation augmente aussi les coûts de production du design, puisque davantage de pièces doivent être conçues. Il serait en outre possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle le principe de compartimentation augmenterait donc la quantité de matériaux requis pour le design, et donc que ce dernier ne ferait potentiellement pas usage de manière optimale des ressources globales et contribuerait à la pollution liée à la production de ces matériaux de manière plus importante que d'autres types de systèmes pour lesquels la compartimentation n'est pas de mise.

Clive Edwards et ses collègues (2011) ont créé un vermicomposteur à circulation directe et continue, utilisé dans plusieurs pays tels que les États-Unis et l'Australie. Avec une population de vers d'environ 9 kg au mètre carré, 1 mètre d'épaisseur de matériel peut être décomposé entre

30 et 45 jours (Edwards et al., 2011). Le réacteur peut être fait de bois ou de plastique, tandis que l'encadrement est fait de métal. L'ajout de substrat en petites couches se fait par l'entremise d'un portique de chargement mobile sur rails comme il peut être observé dans la figure 4. L'ajout se fait aux quelques jours pour que les vers aient le temps de décomposer le plus possible avant de se diriger vers la matière fraîche. Cette technique amène les couches les plus profondes à se faire décomposer par les microbes par la suite. Ensuite, une barre à treuil est manipulée de gauche à droite pour que les couches décomposées passent entre les mailles du plancher. Pour finir, un système de grattoir est utilisé pour récolter le produit final. Les avantages du système sont qu'il ne requiert pas beaucoup d'espace et que peu de nutriments et de vers sont perdus au cours du processus. L'automatisation du système amène aussi une charge de travail moindre. En revanche, la température et l'humidité doivent toujours bénéficier d'une attention particulière et l'utilisation des technologies mentionnées ci-haut augmente le coût du vermicomposteur (Edwards et al., n.d.).

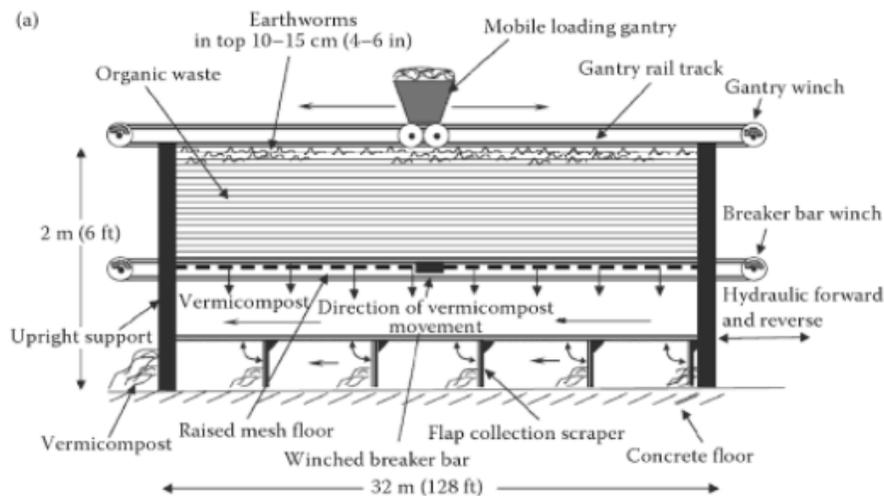


Figure 4: Système de réacteur de vermicompostage à flux continu entièrement automatisé (Edwards et al., 2011)

2. Fonctions automatisées

a. Convoyeur

Un convoyeur peut être utilisé dans un vermicomposteur à circulation directe pour plusieurs raisons. Selon Harry N. Windle (2001), l'utilisation d'un convoyeur amènerait un taux de vermicompostage plus grand et plus uniforme, tout en diminuant le temps de maintenance dévoué au processus. En vermicompostant une mince couche de biomasse à la fois (de 2 à 8 pouces selon le matériel à décomposer (5,08 cm à 20,32 cm)), ceci faciliterait la fécondité des vers. De plus, le mouvement continu du substrat sur le convoyeur empêcherait la stratification

de certaines régions compactées à devenir anaérobies. Lors d'une expérimentation avec son brevet que l'on retrouve à la figure 5, l'inventeur a testé l'efficacité de son design en vermicompostant du fumier de vache sur le tissu en plastique tissé du convoyeur. En utilisant une livre de vers au pied carré sur l'appareil de 9 pieds par 6 pieds (2,74 m par 1,83 m), le taux de décomposition a été évalué de 10 à 14 pieds cube par jour (0,28 m³ à 0,4 m³) (Windle, 2001). L'épaisseur de substrat utilisée était de 4 pouces, alors que la vitesse du convoyeur était de 1 à 1.5 pied par jour (0,3 à 0,46 m) (Windle, 2001).

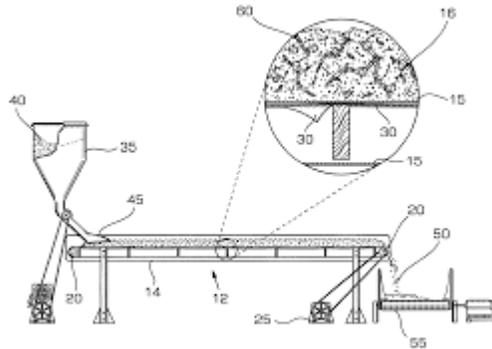


Figure 5: Appareil de vermiculture à haut rendement (Windle, 2001)

b. Broyeur

Un appareil mélangeur est utile dans les systèmes de vermicompostage afin de déchiqeter les plus grosses particules en de plus petites. Ainsi, un mélange homogène de substrat est créé et les vers peuvent décomposer plus aisément la matière organique (Kumar et al., 2017).

Le pré-traitement du substrat d'alimentation d'un vermicompost demande beaucoup de travail manuel afin de mélanger et broyer les intrants. Ainsi, Kumar et al. (2017) ont développé un broyeur mécanique qui permet de réduire le temps de décomposition, le coût et d'améliorer la qualité du produit final. Ce produit est composé d'un moteur, une boîte de vitesse, un axe, une lame réglable, un roulement, un tambour et interrupteur et d'un réglage de l'arbre de la lame. Cette machine effectue le broyage de tous types d'intrants, secs et humides. Lorsque le broyeur est en marche, l'arbre de transmission tourne à 210 tours par minute, ayant une capacité variante entre 250 et 300 kg et ce, en effectuant un mélange complet en 6 minutes.

D'autres machines peuvent être utilisées pour faciliter la décomposition des intrants. Les deux outils suivants ont un processus de transformation similaire que le broyeur mécanique et permettent d'obtenir un produit final approprié.

Broyeur vertical à cylindres

Un broyeur à cylindres comme celui démontré à la figure 6 est un système qui broie, écrase ou coupe des particules en morceaux plus petits en utilisant des rouleaux cylindriques. Le principe

de ce système est le suivant: deux rouleaux parallèles tournent l'un vers l'autre. Le système est alimenté par le haut et la gravité fait tomber le substrat entre les rouleaux parallèles. Lorsque ce dernier traverse les rouleaux, il subit à la fois des forces d'écrasement et de cisaillement qui broient les particules en morceaux plus petits (Will, 2010). Les broyeurs à rouleaux peuvent être constitués de plusieurs sections de broyage empilées verticalement les unes sur les autres. Dans ce système, les rouleaux viennent toujours par paires. Le nombre de sections (niveaux) est déterminé par les propriétés du matériau et la quantité de réduction requise pour atteindre la taille de mouture désirée. Les ondulations du rouleau, le rapport de vitesse entre les deux rouleaux et l'espace entre les cylindres de broyage sont tous conçus avec précision pour chaque produit (Will, 2010). Ce système a de nombreux avantages. Tout d'abord, la fracturation du matériau est réalisée uniquement par l'action contrainte de cisaillement induite des rouleaux. Comme la vitesse de rotation est faible, la génération de poussière et l'augmentation de la température sont réduites, ainsi que la génération de chaleur. Enfin, c'est un système exigeant peu d'énergie.

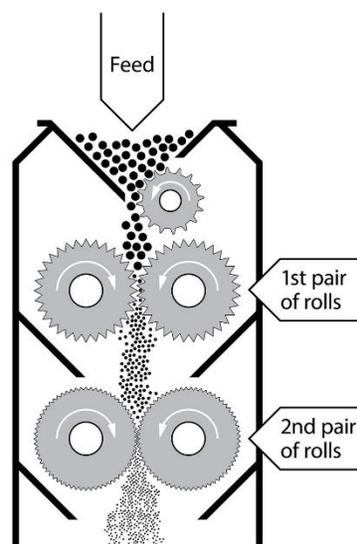


Figure 6: Broyeur vertical à cylindres. Légende: Le substrat (feed), 1ère paire de rouleaux (1st pair of rolls), 2ème paire de rouleaux (2nd pair of rolls) (Kelsall and Lyons, 2003)

Broyeur à double arbre

Le broyeur à double arbre présenté à la figure 7 est polyvalent. Il est composé de deux arbres de coupe rotative avec des couteaux résistants. Ce type de système est capable de déchiqueter presque tous les matériaux tels que le plastique, le papier, le caoutchouc, les métaux légers et le bois. Les deux rotors de coupe saisissent le substrat d'alimentation pour en réduire la taille. Les rotors sont alimentés par un moteur. Les qualités de ce système sont qu'il puisse traiter un grand volume de substrat et qu'il existe des couteaux très résistants (Prosino, n.d.).

c. Pulvérisateurs

Des pulvérisateurs sont fréquemment utilisés au sein des vermicomposteurs afin d'assurer un apport d'humidité adéquat à l'intérieur de l'appareil. Effectivement, les vers sont des organismes dont la croissance dépend du niveau d'humidité selon une corrélation positive (Wani et al., 2013). Par exemple, les vermicomposteurs ayant servis pour l'expérience menée par Yadav et Garg (2010) comportaient des pulvérisateurs d'eau mis en opération périodiquement afin d'assurer le maintien du niveau d'humidité à 60-80% à l'intérieur de ceux-ci. Aussi, Desai et al. (2016) ont effectué une expérience pour laquelle les vers étaient installés dans un vermicomposteur dont l'humidité était maintenue à 50% à l'aide de pulvérisateurs d'eau durant leur période d'adaptation au substrat utilisé. De plus, Toet (2012) propose un vermicomposteur breveté muni d'un système de pulvérisation d'eau, présenté à la figure 7 ci-dessous. Ce dernier prend source dans une réserve installée en dessous du vermicomposteur et humidifie son environnement interne à l'aide de pulvérisateurs situés aux extrémités du réseau et orienté en sens opposé l'un par rapport à l'autre, de manière à couvrir toute l'aire de l'habitat des vers.

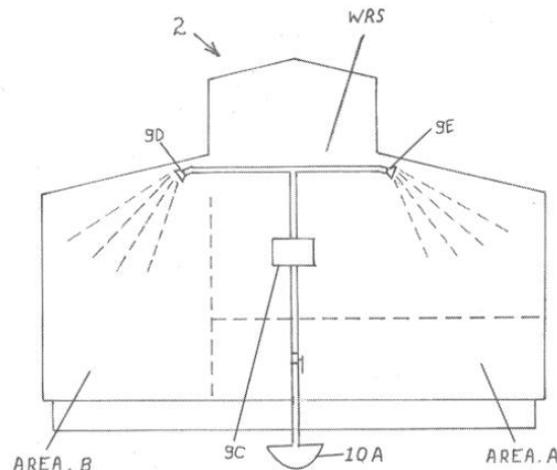


Figure 7: Vue en coupe d'un système de pulvérisation d'eau d'un vermicomposteur (2) breveté, comportant une pompe à eau (9C) installée sur la ligne de plomberie centrale permet d'extirper de l'eau à partir de la source (10A) et de la mener jusqu'à chaque pulvérisateur (9D et 9E) (Toet, 2012).

3. Processus biologiques

a. Vers

Afin de convertir la biomasse en un produit utile tel que le vermicompost, des vers de terre sont utilisés. Le vermicompostage ou lombricompostage est une méthode d'utilisation des vers en vue de transformer des matières organiques (généralement des déchets) en une matière très semblable à l'humus ou au terreau connu sous le nom de lombricompost ou vermicompost. L'objectif est le traitement le plus rapide et le plus efficace possible des matériaux (Munroe, n.d). Des micro-organismes sont également utilisés pour stabiliser la matière organique pour freiner la minéralisation. La minéralisation de la matière organique en CO₂ et en pertes d'eau par

évaporation provoque la diminution de la masse du compost. Alors que les micro-organismes sont responsables de la dégradation biochimique de la matière organique, les vers de terre conditionnent le substrat et améliorent l'activité biologique (Munroe, n.d).

Les vers de terre utilisés à des fins de compostage dans les climats nordiques sont les vers rouges *Eisenia foetida* (Card et al., 2004). La transformation des déchets organiques par les vers prend de 22 à 32 jours, selon la densité des déchets et la maturité des vers (Chaoui, 2010). Ainsi, la masse des déchets organiques est réduite de 30% (Chaoui, 2010). Les vers rouges ont une gamme de température large allant de 5 à 40 °C, mais ces organismes vivants sont plus actifs à des températures élevées (Manna et al., 1997). Ils peuvent même survivre quelque temps dans la matière organique gelée (Card et al., 2004). Les cocons peuvent également survivre au point de congélation et à haute altitude (Hill et Baldwin, 2012). Cependant, la reproduction est interrompue à des températures inférieures à 10°C. Les vers de type *Eisenia foetida* peuvent ingérer 75% de leur poids corporel par jour (Chaoui, 2010). De plus, un taux d'alimentation optimal de 0,75 kg d'aliment / kg de ver / jour est recommandé (Ndegwa, et al., 1999). La source alimentaire des vers doit avoir un rapport C:N d'environ 25:1 et une densité de peuplement de 1,60 kg-vers/m² est recommandée. Domínguez et Edwards (1997) ont montré qu'une teneur en humidité appropriée de 60-90% est idéale puisque les vers de terre respirent à travers leur peau. Au contraire, si la teneur en humidité est inférieure 50%, cela peut devenir dangereux pour eux (Domínguez et Edwards, 1997). Les vers rouges sont responsables de processus physiques/mécaniques. En effet, la présence de vers de terre aide à aérer, mélanger, broyer et fragmenter le substrat par digestion enzymatique et aide également à la décomposition microbienne du substrat dans l'intestin des vers (Card et al., 2004). Comme suggéré par Garg et Gupta (n.d), une bonne aération dans le vermicompost peut être réalisée par le tournage périodique ou le mélange mécanique de la biomasse du substrat. De même, les vers sont très sensibles à la fluctuation du pH. Les vers peuvent survivre dans une plage de pH allant de 5 à 9 (Edwards, 1998). Le pH optimal est proche de neutre (Garg et Gupta, n.d). Les vers respirent et ne peuvent survivre à des conditions anaérobiques (absence d'oxygène). Ainsi, si certains facteurs tels qu'une humidité excessive combinée à une mauvaise aération s'additionnent et restreignent l'arrivée d'oxygène, le système entier peut devenir anaérobie, ce qui tuera les vers très rapidement. Il n'y a pas que le manque d'oxygène qui est fatal aux vers; ils sont également tués par des substances toxiques tel que l'ammoniac dégagées par divers types de microbes qui prospèrent dans ces conditions (Munroe, n.d). Et puis, les vers sont très sensibles aux sels et préfèrent une salinité inférieure à 0,5 %. Afin de se reproduire, une densité de peuplement de 1,60 kg-vers/m² pour avoir des chances raisonnables de se rencontrer et de se reproduire fréquemment. Si les conditions sont optimales, la population peut doubler tous les 60 à 90 jours. Les vers produisent 3 cocons par semaine et il y a environ 1 à 4 éclosions par cocon avec un taux de réussite de 75% par éclosion (Piccirillo, 2010). La période d'éclosion des cocons est d'environ

21 jours et il faut habituellement de 30 à 45 jours pour atteindre la maturité sexuelle. Les vers ont une espérance de vie d'environ 4 ans (Mingin, 2013). Une étude de Edwards et Fletcher (1988) relate les interactions entre les vers de terre et les microorganismes dans la décomposition de la matière organique. Ainsi, il est expliqué que le système digestif des vers de terre se compose d'un pharynx, d'un œsophage et d'un gésier suivie par l'intestin antérieur qui sécrète des enzymes et un intestin postérieur qui absorbe les nutriments. Lors de la progression de la nourriture dans le système digestif, une augmentation drastique du nombre de microorganismes est observée. *Eisenia foetida* semble préférer la matière organique en décomposition avancée comme source alimentaire. Ayant un système digestif unique, un large éventail de micro-organismes, y compris les bactéries, les algues, les protozoaires, les actinomycètes, les champignons et même les nématodes, se trouvent couramment sur toute la longueur de l'intestin de vers de terre. Les espèces microbiennes dans l'intestin des vers sont généralement très similaires à celles du sol environnant ou de la matière organique sur laquelle se nourrissent les vers de terre. Les microorganismes comme source alimentaire sont impliqués dans la croissance des vers de terre.

b. Substrat

Généralement, le lombricompostage aide à réduire le pH, le carbone organique total et le rapport C:N tout en augmentant les valeurs d'azote, de phosphate et de potassium. Plusieurs chercheurs ont signalé la réduction des teneurs en métaux lourds dans le lombricompost produit (Shahmansouri et al., 2005). Pour obtenir un taux de vermicompostage rapide, il est essentiel de créer les conditions idéales pour les vers, mentionnées ci-haut. Le rapport carbone/azote est un bon indicatif du niveau maturité du vermicompost. Pour obtenir un taux de décomposition rapide, il est suggéré d'avoir un ratio de 30:1. Une baisse du rapport C:N à moins de 20:1 indique un degré élevé de stabilisation de la matière organique et reflète un niveau satisfaisant de maturité des déchets organiques. De plus, la densité du matériau dans lequel les vers se trouvent doit être de 350 à 650 g/L (kg/m^3) afin de s'assurer qu'ils puissent circuler dans la matière (Chaoui, 2010).

Dans le processus de vermicompostage, le substrat subit une phase active et une phase de maturation. Dans la phase active, les vers modifient la composition physique du substrat organique. Dans la phase de maturation, les vers migrent vers la couche non digérée et les microorganismes prennent la tête du processus de décomposition. La durée de la phase de maturation dépend principalement de la densité des vers (Gómez-Brandón et al., 2013).

L'objectif du partenariat avec Myco-Rise est de vermicomposter leur production de déchets reliée à la production de champignons. Donc, en examinant différentes options pour le substrat de lombricompost, il faut garder à l'esprit que le substrat de champignons doit faire partie intégrante du mélange. Les résultats révèlent que le substrat dans lequel pousse les champignons

peut être mélangé à du fumier pour obtenir un milieu de vie adéquat pour les vers ainsi qu'un produit final riche en nutriments. D'après Jamaludin et al. (2009), il est possible de mélanger du fumier de vache ainsi que du substrat de champignon à base de sciure de bois pour créer une recette viable. Pour ce, il faut tout d'abord pré-composter les deux matériaux pendant trois semaines afin d'éviter l'exposition des vers à une température élevée pendant la phase thermophile initiale. Les résultats démontrent qu'un ratio de fumier de vache:substrat de champignon 1:1 permet d'avoir un environnement viable pour la reproduction des vers et d'obtenir un vermicompost avec une haute teneur en macronutriments par rapport aux autres proportions testées (N : 1.75%, P : 0.46%, K: 1.39%) (Jamaludin et al., 2009). En 2012, une seconde étude a été publiée par Jamaludin et al., cette fois proposant du fumier de chèvre avec du substrat de champignon épuisé à base de sciure de bois comme mélange pour le vermicompost. Les matériaux ont encore une fois été pré-composter trois semaines avant d'être utilisés. Le pourcentage de macronutriments retrouvés dans le substrat au rapport 1:1 était plus faible qu'avec le fumier de vache, sauf pour ce qui a trait au phosphore (N: 1.55%, P: 1.17%, K: 0.68%) (Jamaludin et al., 2012). Une autre étude démontre qu'il est également possible d'utiliser des déchets de fruits et légumes ainsi que du substrat de champignon dans un ratio 1:1 pour obtenir un mélange adéquat pour le vermicompostage. Dans cette expérience, le substrat de champignon a un ratio C:N de 11.39:1 et les fruits et légumes de 35.69:1, pour obtenir un substrat avec un rapport C:N de 23.54:1 et finalement avoir un vermicompost riche en nutriments. Par contre, les vers ont été adaptés pendant plus de 3 mois dans deux lits contenant un mélange de bouse de vache et de substrat de champignon, ce qui rallonge considérablement le temps de production (Tajbakhsh, J. et al., 2008).

c. Thé de ver et bacs de récupération

Le thé de ver est un produit dérivé nutritif de la culture de vers et un moyen direct d'améliorer la fertilité du sol suite à son application. Il peut être obtenu simplement en versant de l'eau sur le produit de lombricompost puis filtré pour séparer le substrat du thé. Les thés de compost peuvent être aérés, c'est-à-dire que le thé extrait du compost est activement aéré pendant le processus de fermentation. On retrouve également les thés de compost non-aérés qui se réfèrent à des produits dont l'extrait liquide de compost n'est pas aéré ou reçoit une aération minimale uniquement au stade de mélange initial du processus de fermentation. La majorité de la littérature scientifique appuie la suppression des phytopathogènes et des maladies des plantes par des thés de compost non aérés.

Le thé de compost non aéré est produit en ajoutant 4 à 10 parts d'eau à une part du lombricompost en fonction de la concentration en nutriments désirée. Ensuite, le thé doit être non perturbé entre 15 et 20 degrés Celsius pendant au moins trois jours. À la fin du processus,

on recueille un liquide riche en azote, phosphore et potassium avec un rapport d'environ 1: 1: 1 (N :P :K). Le produit final fixe aussi l'azote avec les bactéries aérobiques vivant en symbiose avec les vers dans le processus de compostage (St. Martin et Brathwait, 2012). Ces bactéries ont la capacité de combiner l'azote avec l'hydrogène pour former des ions d'ammonium sur les racines des plantes en présence d'humidité.

Suite à l'obtention d'un vermicompost stable, l'eau est ajoutée pour finalement obtenir le thé. Ces deux produits commercialisables sont récoltés dans des bacs de plastique recyclé tel que proposé dans le "Can-O-Worms worm composter" (Figure 8) (Abundant Earth, 2018).

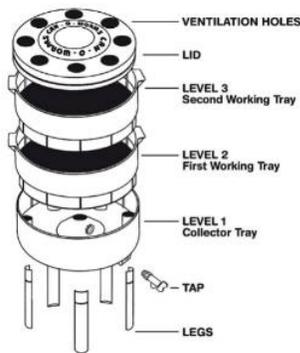


Figure 8: Can-O-Worms (Abundant Earth, 2018)

Un conteneur perforé doit être utilisé pour collecter le vermicompost tout en laissant l'eau circuler entre les deux bacs. Un second bac non-perforé doit se trouver sous le premier contenant pour recueillir le thé. Un matériel filtrant doit être placé au fond du premier collecteur pour empêcher le substrat de s'infiltrer dans le thé. Le matériel filtrant utilisé pour séparer le thé du vermicompost peut être du géotextile, un polymère très résistant souvent utilisé en agriculture. Un géotextile à haute résistance et perméable assure que la fibre ne se casse pas et permet à l'eau de passer rapidement à travers la fibre. Le polymère de filtration utilisé pourrait être le géotextile non tissé F-909 (Texel Technical Materials, 2017).

Un robinet doit être installé près de la partie inférieure du contenant de thé pour s'assurer que la pression de l'écoulement est suffisamment élevée pour récolter le produit par le robinet. Celui-ci est utilisé pour verser le liquide dans des récipients commercialisables. Le bac inférieur doit être sur roues pour permettre au client de laisser la poubelle dans une zone de 15 à 20 ° C pendant 3 jours sans dérangement, tout en continuant à faire fonctionner l'appareil tous les jours (St. Martin et Brathwait, 2012). Les glissières robustes pour tiroir pouvant supporter jusqu'à 225 kg permettent au tiroir d'entrer et de sortir le bac de collection du vermicompost.

Myco-Rise désire effectuer la vente de thé de ver. Les effets de ce produit sur la croissance végétale sont connus. Comparativement au compostage, le vermicompostage augmente drastiquement la concentration de nitrate dans le substrat (Subler et al. 1998; Atiyeh et al. 2000). Les nutriments disponibles dans le thé de ver est possible grâce à la minéralisation. La minéralisation est le processus par lequel les composés chimiques de la matière organique se décomposent ou s'oxydent en des formes facilement assimilables par les plantes. La capacité du ver de terre à augmenter la disponibilité des éléments nutritifs des plantes dépend de l'activité de la microflore intestinale des vers de terre.

Les lombricomposts peuvent influencer considérablement la croissance et la productivité des plantes en raison de leurs micro et macro éléments, vitamines, enzymes et hormones. Les

lombricomposts contiennent des nutriments tels que les nitrates, le phosphore échangeable, le potassium soluble, le calcium et le magnésium sous forme assimilable par les plantes (Edwards, 1998). L'utilisation de vermicomposts comme biofertilisants a récemment augmenté en raison de son extraordinaire statut nutritif et de son activité microbienne et antagoniste accrue.

Le lombricompostage est une technologie de gestion des déchets rentable et respectueuse de l'environnement qui prend en compte à la fois les vers de terre et les microbes associés et présente de nombreux avantages par rapport au compostage thermophile traditionnel. Les lombricomposts sont d'excellentes sources de biofertilisants et leur addition améliore les propriétés physiochimiques et biologiques des sols agricoles. Le lombricompostage amplifie la diversité et la population des communautés microbiennes bénéfiques.

4. Matériaux

En 2003-2004 en Nouvelle-Écosse, le « Good Earth Organic Resources Group » a créé un système de bacs empilés pour conduire une expérience sur le vermicompostage. 2.27 kg de vers ont intégré les bacs remplis de fumier et de carton durant 6 mois (Munroe, n.d.). Les bacs étaient faits de panneaux de particules de bois de 5/8 de pouce en utilisant des feuilles de 4 pieds par 8 pieds (1,22 m par 2,44 m) (Munroe, n.d.). Ces dernières étaient recouvertes de mousse isolante avec une résistance thermique évaluée à 2 ft².°F-h/BTU (Munroe, n.d.). Le dessus du modèle possédait d'ailleurs comme isolant une couche de laine de verre enveloppée d'une feuille de plastique. Le processus de vermicompostage fût en action tout l'hiver dans un bâtiment non-chauffé sans que le substrat ne gèle à aucun moment. Cette expérience démontre que le bois peut être utilisé comme matériel de fabrication pour un vermicomposteur avec une certaine couche d'isolation. De plus, la décomposition du fumier a permis au modèle d'atteindre des températures désirées par les vers même si les alentours étaient en dessous du point de congélation. Cette recherche prouve donc que, sous certaines conditions, le climat hivernal Canadien puisse tout de même procurer un environnement propice au vermicompostage.

Afin de protéger le bois contre la pluie, la neige et la glace, un protecteur sans entretien pour bois peut être apposé sur la partie extérieure du bois. Ce protecteur, se vendant sous forme de peinture, est résistant à l'écaillage et la fissuration. De plus, ce produit est sans vapeur incommodes. En effet, la faible teneur en composés organiques volatils (COV) de ce produit réduit les impacts sur la santé humaine (Techniseal, 2016)

Dans une étude de Crowe et Bowen (1954), des blocs de ciment sont utilisés comme chambre de vermicompost lors du vermicompostage de fumier de vache et de feuilles. Cette étude a inspiré Appelhof (1988) de faire une expérience avec un réservoir en métal galvanisé. Ces deux techniques de vermicompostage requièrent l'excavation du terrain.

Un contenant en plastique peut également être utilisé. Sherman (1994, 1997) stipule que le plastique est pratique puisqu'il est plus léger que le bois, et donc plus facilement transportable. De plus, ce dernier est peu coûteux. Les contenants en plastique ne doivent pas être transparent ou translucide puisque les vers sont sensibles à la lumière. Or, le plastique n'est pas efficace à réguler la température intérieure du contenant lorsqu'il y a des écarts importants de température à l'extérieur. Il retient d'ailleurs une trop grande quantité d'humidité.

IV. Procédure de conception

1. Hypothèses de conception

Des suppositions doivent être faites pour nous permettre de créer quelque conception. Tout d'abord, dans un modèle à flux continu, il est assumé que les vers se dirigeront vers l'apport d'intrant organique frais. Par conséquent, dans un vermicomposteur avec un convoyeur, la vitesse doit être suffisamment lente pour que la majorité des vers aient le temps de se diriger vers le mélange fraîchement déposé. Dans un appareil qui utilise un grattoir pour récolter le lombricompost, le même principe s'applique, mais à la verticale. La population de vers devrait se trouver dans la partie supérieure de la matière pour éviter de se faire déchiQUETER par le grattoir. Également, le client ne devra pas avoir à ajouter de vers à aucun moment lors du processus car les colonies de vers peuvent s'auto-réguler en termes de nombre d'individus.

En ce qui a trait aux contraintes, un volume de 1 m³ de substrat devra être vermicomposté par mois suite à la production du client. Il est assumé que le vermicompost et le thé de ver seront tous les deux recueillis tous les jours. Une autre considération à respecter est le fait que le client requiert que le vermicompostage se produise à l'extérieur, dû au manque d'espace intérieur. Lors du processus biologique du vermicompostage, qui devrait prendre entre 22 et 32 jours, il est essentiel que la température dans l'appareil se retrouve entre 5 et 40°C en tout temps pour assurer la survie des vers. Lors de la conception, 32 jours seront assumés pour le processus de vermicompostage.

Enfin, il est impératif de supposer que le vermicomposteur automatisé sera construit à partir de matériaux durables et utilisera le moins d'énergie possible afin de minimiser sa consommation énergétique et son empreinte écologique. En outre, le vermicomposteur automatisé devra être abordable pour des petites et moyennes entreprises, telles que Myco-Rise.

2. Processus de sélection du design

Afin de trouver le design idéal du vermicomposteur automatisé, deux conceptions préliminaires ont été imaginées. L'une avec une circulation horizontale et la seconde, verticale. Dans le premier design, le substrat organique entre par une ouverture sur le dessus de la machine et tombe sur un grand convoyeur extrêmement lent créant une mince couche de compost. Les vers se dirigent

donc vers la nouvelle matière organique et par la même occasion dans le sens opposé du convoyeur. Le convoyeur laisse tomber la matière organique décomposée par les vers dans un récipient. Pour créer le thé de ver, de l'eau est pulvérisée sur le vermicompost et ensuite filtrée. Le thé lui-même est collecté à la fin du processus dans le bac de collecte sous le convoyeur. En outre, à des fins d'isolation et de stockage, une chambre à fumier est installée sur le dessus de la machine. Le plus grand problème rencontré dans cette conception est tout ce qui relève du processus de collection du thé de ver. La boîte de collection est beaucoup trop petite et sa position va à l'encontre des principes ergonomiques de base. Le client devrait aller sous l'appareil pour faire sa collecte.

La seconde conception découle d'un principe de circulation verticale. Tout d'abord, la matière organique est déposée dans un grand récipient. Comme les vers sont attirés par la biomasse fraîche, ils auront tendance à s'élever pour se nourrir. La matière décomposée se retrouvera au fond, générant le flux vertical de la matière. Le substrat traité passe ensuite à travers une grille qui agit comme un filtre, et le grattoir pousse le vermicompost traité dans un tiroir qui est utilisé comme un bac de collecte pour le produit final. L'eau est ensuite pulvérisée sur le compost, avant de passer à travers un filtre pour séparer le solide du liquide. Le thé de ver est généré et recueilli dans un autre tiroir au fond. La complication potentielle la plus élevée pour ce prototype est la compaction du substrat qui peut empêcher le grattoir de se déplacer.

3. Projet Proposé

Suite à la création de ces deux designs, nous avons sélectionné les aspects positifs de chacun pour créer un design unique et novateur (Appendice A). Le prototype final utilise le convoyeur du premier design et la technique de collecte de thé du second. Un broyeur vertical avec une seule paire de rouleaux est ajouté au design pour s'assurer que les différents ingrédients de la recette de substrat créent un mélange homogène adéquat pour les vers. Le broyeur se retrouve dans une unité d'entreposage (entonnoir). Celui-ci utilise la force du moteur du broyeur pour fonctionner. Dans une optique de développement durable, les convoyeurs utilisés seront récupérés d'anciens tapis roulant pour faire de l'exercice. Le convoyeur du final utilise la force d'un second moteur indépendant du premier. Il est important de noter que les dimensions des vermicomposteurs auront tendance à se modifier en fonction de la taille du convoyeur recyclé. Les dimensions de la conception finale se retrouvent dans l'appendice B. Le matériel utilisé pour la structure du vermicomposteur est du contreplaqué standard en feuille. Il a été choisi pour ses capacités à réguler la température et l'humidité, pour sa durabilité lorsqu'on y ajoute une couche de protecteur pour bois sans entretien ainsi que pour son faible coût (Nilsson, 2011). En outre, un pulvérisateur de brume est utilisé afin d'humecter le vermicompost pour la préparation du thé de ver. Pour la collecte des substrats, deux bacs de plastique recyclés sont placés dans la chambre de collecte. Une membrane de géotextile non tissé F-909 (Texel Technical Materials, 2017) est placée entre les deux bacs pour permettre la filtration du thé. Le système est accessible par deux portes sur le dessus; une pour insérer le substrat qui donne accès au broyeur et une

autre pour avoir accès au convoyeur sur tout son long. Finalement, une porte donne accès à la chambre de collecte du vermicompost et du thé de ver.

Le procédé de transformation va comme suit et tel qu'illustré à l'appendice C : le substrat de champignon de Myco-Rise est mélangé à un ou plusieurs autres ingrédients et à de l'eau afin de créer un nouveau substrat pour la transformation. Ce dernier est incorporé dans le système par le broyeur, qui le réduit en particules fines afin de faciliter le traitement par les organismes. Le substrat se retrouve ensuite dans la chambre des vers tapissée du convoyeur et de l'air riche en oxygène pénètre la chambre par les trous d'aération. Tout au long du processus, le convoyeur avance à lente vitesse vers la chambre de récolte des produits. À la fin du délai de transformation, le substrat, devenu du vermicompost, atteint l'extrémité du convoyeur dans la chambre de récolte et y est recueilli dans un bac d'entreposage. Le pulvérisateur de brume humecte alors le vermicompost, puis l'eau percole au travers du produit en récoltant des nutriments, est filtrée dans le fond du bac et est recueillie par celui situé sous le premier. Les produits, soient le vermicompost et le thé de ver, sont ensuite prêts à être emballés et vendus.

Pour avoir un taux de vermicompostage maximal, le substrat dans le vermicomposteur doit avoir un ratio C:N d'environ 25:1, une teneur en humidité autour de 80% et contenir au moins 50% de substrat de champignon pour rendre le processus économiquement viable. Aussi, selon la revue de littérature, il faut utiliser les vers *Eisenia foetida*. De plus, une aération est requise pour la survie des vers. Ainsi, des trous d'aération de 2 cm de diamètre sont présents sur tout le pourtour de la partie supérieure du recouvrement en bois. Afin qu'aucun insectes ou vermines entre dans le vermicomposteur par les trous d'aération, un filet de protection est apposé à l'intérieur de ce dernier afin de boucher les trous.

Pour répondre aux besoins de Myco-Rise, soit de vermicomposter 1m^3 de substrat par jour, il faut 11 vermicomposteurs tel que proposé ci-haut, donc une surface de $17,1963\text{ m}^2$ est requise sur le terrain de Myco-Rise. Pour pouvoir circuler autour des vermicomposteurs, il faudrait 1 mètre entre ceux-ci.

Pour le broyeur, un broyeur à cylindre vertical est utilisé. Ce dernier est composé de deux cylindres de 0,405 m de long et 0,05 cm de diamètre. Les deux cylindres sont dentés pour favoriser l'entraînement lors de la rotation. Un moteur est connecté à l'une des roues dentées, faisant tourner l'appareil mélangeur.

Afin que le vermicomposteur soit automatisé, une minuterie est installée. Cette dernière contrôle la mise en marche des moteurs du convoyeur et du broyeur.

a. Moteur du convoyeur

Plusieurs calculs et principes d'ingénierie sont nécessaires afin de trouver le moteur approprié pour le convoyeur (Appendice D). D'une part, il faut tenir compte du poids que le moteur doit déplacer. Avec le poids, il est possible de trouver le couple nécessaire. Le couple est le facteur déterminant pour l'achat du moteur. Ensuite, il faut calculer la vitesse linéaire du moteur en

tenant compte de la transmission. Finalement, la durée de mise en marche du moteur peut être calculée. Cette dernière est utilisée pour trouver la consommation énergétique du moteur.

Le poids maximal (en kg) sur le tapis du convoyeur correspond à la densité du substrat multiplié par le volume contenu sur le convoyeur:

$$Poids (kg) = densité \text{ du substrat } \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times Volume \text{ sur le convoyeur } (m^3)$$

Avec le poids maximal contenue sur le convoyeur, il est possible de trouver la force nécessaire déployé par le moteur :

$$Force (N) = Poids(kg) \times g \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

où g est l'accélération gravitationnelle sur terre soit $9.81 \frac{m}{s^2}$

Par la suite, le couple (N.m) du moteur peut être calculé :

$$Couple (N.m) = Force (N) \times r_{moteur} (m)$$

où r_{moteur} est le rayon de l'arbre de transmission du moteur

Cependant, l'arbre de transmission du moteur n'est pas directement relié au rouleau du convoyeur qui permet son avancement. L'arbre de transmission du moteur est relié par un système de courroie et de poulie à une grande poulie. Ce système permet de réduire la vitesse déployée par le moteur. La grande poulie et le rouleau du convoyeur n'ont pas le même rayon, mais ils ont la même vitesse angulaire puisqu'ils ont un centre de rotation commun. Ainsi, il faut trouver le rapport de transmission entre l'arbre de transmission du moteur et la grande poulie.

Rapport de transmission

r_m = rayon de l'arbre de transmission du moteur

r_{gp} = rayon de la grande poulie

$$\frac{r_m}{r_{gp}}$$

Avec le rapport de transmission obtenue grâce au système de courroie et poulie, le couple (N.m) requis par le moteur est le suivant :

$$Couple_{moteur} (N.m) = Couple (N.m) \times \frac{r_m}{r_{gp}}$$

Ainsi, le moteur requis doit avoir un couple qui tient compte de la transmission du système de poulie et courroie.

Afin de trouver le temps requis pour que le tapis du convoyeur avance à la distance appropriée par jour, il faut trouver la vitesse linéaire du moteur (V_{LM}), la vitesse angulaire du rouleau (RPM_r)

et la vitesse linéaire du rouleau (V_{LR}). La vitesse angulaire du moteur est définie par le moteur acheté (RPM_m).

Vitesse linéaire du moteur

$$V_{LM} = 2\pi \times r_m \times \frac{RPM_m}{60 \text{ s}}$$

où

V_{LM} : Vitesse linéaire du moteur (m/s)

r_m : Rayon de l'arbre de transmission du moteur(m)

RPM_m : Vitesse angulaire du moteur, rotation par minute (rpm)

Vitesse angulaire du rouleau

$$RPM_r = RPM_m \times \frac{r_m}{r_{gp}}$$

où

RPM_r : Vitesse angulaire du rouleau, rotation par minute (rpm)

RPM_m : Vitesse angulaire du moteur, rotation par minute (rpm)

r_m : Rayon de l'arbre de transmission du moteur(m)

r_{gp} : Rayon de la grande poulie (m)

Vitesse linéaire du rouleau

$$V_{LR} = \frac{RPM_r}{60 \text{ s}} \times r_r \times 2\pi$$

où

V_{LR} : Vitesse linéaire du rouleau (m/s)

RPM_r : Vitesse angulaire du rouleau, rotation par minute (rpm)

r_r : Rayon du rouleau (m)

Avec la vitesse linéaire du rouleau, il est possible de trouver la durée de temps pendant laquelle le moteur doit fonctionner pour faire avancer le tapis du convoyeur à la distance désiré. La distance parcourue par le tapis du convoyeur quotidiennement dépend de la longueur du convoyeur et du nombre de jour de décomposition du substrat.

$$D_{quotidien} = \frac{L_{convoyeur}}{Nb \text{ de jours de décomposition}}$$

où

$D_{quotidien}$: Déplacement quotidien du tapis (m)

$L_{convoyeur}$: Longueur du convoyeur (m)

Pour trouver la durée de mise en marche du moteur, il suffit de diviser le déplacement quotidien par la vitesse linéaire du rouleau:

$$T_{quotidien} = \frac{D_{quotidien}}{V_{LR}}$$

Où

$T_{quotidien}$: durée de la mise en marche du moteur (s)

$D_{quotidien}$: Déplacement quotidien du tapis (m)

V_{LR} : Vitesse linéaire du rouleau (m/s)

Ainsi, la conception proposée a un moteur ayant un couple de 28.23 N.m, un courant de 1.1 A et un voltage de 115 V. Le moteur est mis en marche 5.664 secondes par jour.

b. Moteur du Broyeur

Afin d'avoir un moteur approprié pour le broyeur, un calcul de couple est nécessaire (Appendice D). La formule suivante est applicable :

$$\text{Couple (N.m)} = \text{Force (N)} \times r_{mixeur} \text{ (m)}$$

Puisque l'appareil mélangeur peut être confronté à de gros morceaux de substrats à décomposer, un facteur de sécurité doit être appliqué. Généralement, un facteur de sécurité de 2 est utilisé dans l'industrie. Ainsi, le couple du broyeur est évalué comme suit:

$$\text{Couple}_{mixeur} \text{ (N.m)} = \text{Force (N)} \times r_{mixeur} \text{ (m)} \times \text{facteur de sécurité}$$

Donc, le moteur utilisé pour le broyeur a un couple de 6.77 N.m, un voltage de 12 V et un courant de 2.12 A.

c. Pulvérisateur

Un pulvérisateur de brume est fixé à une hauteur de 68 cm à l'un des murs de la chambre de collecte. Ce dernier a pour rôle d'humecter uniformément le vermicompost recueilli dans le bac de récolte afin de produire du thé de ver, après que l'eau introduite aie percolé au travers de vermicompost et aie été filtrée dans le fond du bac supérieur. Le pulvérisateur est joint à un tuyau d'arrosage qui le lie à la sortie d'eau de jardin, d'où le système d'humectage prend source.

Il a été calculé que la pression minimale à la sortie d'eau nécessaire à un humectage optimal est de 137,66 kPa, et que cette opération s'effectue en environ 25 min (Appendice E).

4. Considérations pour la conception d'un design durable

a. Santé et sécurité

Dans le cadre de ce projet, la santé et la sécurité au travail concerne deux partis, soient l'équipe de conception lors de la construction et des séries d'essais du dispositif de vermicompostage, ainsi que le client lors de l'utilisation du dispositif après achat. Les documents servant de référence à cet effet sont le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario » (Ministry of the Environment, 2009) et le document intitulé *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage (Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage, 2018)* qui régissent entre autres la réglementation de la santé et de la sécurité au travail au sein des installations de production de compost en Ontario.

D'abord, le design doit minimiser ses émissions dans l'air du bâtiment, des changements d'air horaires suffisants soient assurés au sein du bâtiment, il doit y avoir des raccords d'eau et des drains de plancher pour faciliter le nettoyage fréquent et qu'il doit y avoir des toilettes accessibles au personnel (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage, 2018*). Au cours de la phase de conception et d'essai, le dispositif était entreposé dans le laboratoire de conception de design d'ingénierie du campus de Macdonald de McGill, dirigé par Scott Manktelow. L'endroit est pourvu de drains de plancher, de toilettes accessibles à tous et d'un système d'aération fonctionnel. Ainsi, l'équipe de conception était en mesure de travailler dans de bonnes conditions. En ce qui concerne le design en tant que tel, celui-ci sert au vermicompostage d'une quantité de substrat que l'on peut qualifier de minime comparée au volume d'air compris dans le vaste laboratoire, ainsi les émissions dans l'air du bâtiment peuvent être jugées négligeables dans cet espace intérieur. En outre, lorsque le client utilisera le dispositif à ses fins, ce dernier sera placé à l'extérieur du bâtiment de sa compagnie, ce qui rendra le dispositif totalement irresponsable de toute contamination de l'air au sein du bâtiment. Le bâtiment de notre client est également pourvu de drains, de toilettes et d'un système d'aération fonctionnels.

Ensuite, en ce qui concerne les aspects opérationnels liés au design, le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario » (Ministry of the Environment, 2009) mentionne que tout usager doit être en bonne santé, ce qui est le cas de tous les membres de l'équipe de conception et de l'équipe de Myco-Rise, et que tout usager doit s'abstenir de manger, boire, ou fumer en utilisant le dispositif et qu'il ou elle doit s'assurer d'une bonne hygiène avant de faire l'une de ces actions après avoir manipulé le dispositif. Avant de remettre le design au client, lors d'une rencontre avec celui-ci, l'équipe de conception s'assurera de souligner l'importance de cet aspect. Cette dernière s'est également assurée de ne pas déroger à cette précaution durant la période de construction et d'essai du dispositif.

Aussi, le règlement exige que les personnes faisant usage du design soient protégées contre les risques liés à l'exposition à des gaz nocifs, liquides, fumées ou poussières, des objets pointus ou déchiquetés qui peuvent percer, couper ou abraser la peau, des objets chauds, liquides chauds ou métaux en fusion et de la chaleur radiante (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). Dans le cas du design proposé, les gaz résultants du procédé de vermicompostage, soient l'ammoniac (NH_3) et le sulfure d'hydrogène (H_2S) (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018), l'utilisation de fumier de vache pour la recette de substrat et les objets pouvant percer ou couper la peau sont les éléments à considérer en matière de santé et sécurité parmi cette liste. Le règlement ontarien intitulée « Control of Exposure to Biological or Chemical Agents » (Government of Ontario, 1990) indique que la valeur d'exposition moyenne pondérée, soit « la concentration atmosphérique moyenne pondérée dans le temps d'un agent biologique ou chimique auquel un travailleur peut être exposé au cours d'une journée de travail ou d'une semaine de travail », du H_2S est de 10 ppm, et que la valeur plafond d'exposition à tout moment est de 15 ppm. La valeur d'exposition moyenne pondérée du NH_3 est de 25 ppm ou 17 mg/m^3 , et la valeur plafond d'exposition est de 35 ppm ou 24 mg/m^3 (« Fiche complète pour Ammoniac – CNESST », 2002). L'émission des gaz provenant du design ne peut être limitée étant donné qu'elle est nécessaire à la complétion du procédé de décomposition du substrat, en revanche le risque qu'ils présentent peut être contrôlé. Durant la phase de construction et d'essai, le fait que le volume de substrat et les émissions qu'il génère sont négligeables par rapport à la taille de la pièce du bâtiment dans laquelle le dispositif était entreposé et le fait que le laboratoire en question soit pourvu d'un système d'échange d'air fonctionnel permet d'amoindrir de manière satisfaisante le risque lié à l'exposition à l'ammoniac et au sulfure d'hydrogène. De plus, lorsque le dispositif sera en la possession du client, le fait qu'il sera placé à l'extérieur, et donc en espace ouvert, diminuera davantage le risque en question. Ensuite, l'utilisation de fumier de vache dans la recette de substrat entraîne la possibilité de contamination par des pathogènes qui pourraient se retrouver dans le fumier, le substrat, le vermicompost fini et le thé de ver, ce qui peut être efficacement contrôlé par de bonnes pratiques d'hygiène, comme par exemple en se lavant les mains avant de manger, boire ou fumer et en utilisant des équipements de protection contre le contact direct, tels que des gants et des lunettes de travail (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). En ce qui concerne les objets coupants, le système de broyeur à rouleaux a été sélectionné pour limiter ce risque. En effet, les rouleaux du broyeur étant placés à l'intérieur de l'entrée du vermicomposteur, le risque de contact direct entre la peau et les lames de ceux-ci est très limité, puisque le substrat est inséré par le tunnel d'entrée sans requérir l'insertion des mains à l'intérieur du dispositif. Cependant, il est conseillé de ne pas porter de vêtements amples pouvant s'introduire dans le broyeur et de s'attacher les cheveux en tout temps afin d'éviter tout accident.

Le vermicompostage pourrait également générer des bioaérosols, soient des organismes biologiques dispersés dans l'air et qui peuvent provoquer des effets néfastes sur la santé

humaine, tels que champignons, bactéries, actinomycètes, endotoxines, enzymes microbiennes, glucanes et mycotoxines (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). Cependant, des études épidémiologiques sur les travailleurs des sites de compostage aux États-Unis et en Europe indiquent que le risque est minime pour les utilisateurs en bonne santé et maximal lors d'opérations de compostage qui libèrent de la poussière (Ministry of the Environment, 2009). En effet, il est déconseillé aux personnes atteintes d'asthme, bronchite, tuberculose, emphysème et d'allergies graves de travailler dans des usines de production de compost (Ministry of the Environment, 2009), et donc il serait également déconseillé à ces personnes d'utiliser le prototype du projet. De plus, le design proposé ne présente pas un risque au niveau de la libération de poussière, car il nécessite un taux d'humidité de substrat élevé pour les vers, diminuant ainsi la possibilité de libération de poussières.

En outre, le vermicompost peut attirer des insectes, des oiseaux, des rongeurs et de la vermine, qui présentent un risque pour la santé humaine (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). Le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario » propose les mesures ci-dessous afin de mitiger ce risque de contamination. D'abord, entreposer les ingrédients du substrat dans des contenants fermés permet de limiter les infestations. Aussi, incorporer les ingrédients du substrat dans le dispositif le plus rapidement possible, donc éviter un long entreposage et débiter le processus de transformation rapidement, permet de contraindre l'installation des insectes, oiseaux, rongeurs et de la vermine dans les réserves. L'ajout de matériel carbonique au substrat, comme des feuilles et des copeaux de bois, permet aussi de limiter l'attraction des animaux et des insectes envers le substrat. De plus, la matière en décomposition anaérobie constituant en un élément très attractif auprès des insectes comme les mouches, le fait d'assurer une bonne ventilation du système, et donc une décomposition absolument aérobie par le fait même, permet de restreindre cette attraction. Les mouches sont aussi attirées par les composés comportant un taux élevé d'ammoniac, ainsi le contrôle du ratio de carbone et d'azote est requis. Dans le cas du dispositif présenté, le pré-compostage du fumier, l'un des ingrédients potentiels du substrat intrant, permet la volatilisation de l'ammoniac, avant que le fumier ne soit inséré dans le dispositif (Gunadi et Edwards, 2003). Aussi, l'entrée du dispositif pour le substrat et sa sortie pour le vermicompost et le thé de ver sont fermées par un couvercle et une porte respectivement, afin que les animaux et les insectes ne puissent pénétrer dans le système. La cavité où les contenants récipiendaires du vermicompost et du thé de ver sont entreposés dans le dispositif comporte un fond pour cette même fin. Finalement, au lieu d'utiliser des produits antiparasitaires, tel qu'il est proposé par le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario », pouvant être toxiques pour les humains, comporter un risque pour l'environnement ou compromettre la qualité du vermicompost et du thé de ver, un filet de protection pour jardinage écologique est installé à l'intérieur du dispositif au niveau des trous d'aération, afin d'éviter à la fois que les insectes puissent entrer dans le système et que les animaux puissent déchirer le filet.

b. Aspects sociaux

Avant tout, le dispositif doit être convivial pour le client à l'usage. Le fait que le système suive le principe de processus en continu simplifie toutes les manœuvres qui doivent être effectuées par l'utilisateur(e). En effet, ce dernier ou cette dernière n'a qu'à préparer la recette de substrat, l'incorporer dans le dispositif par son entrée, mettre en marche le broyeur jusqu'à ce que la totalité du substrat soit entré à l'intérieur, et récupérer les contenants de vermicompost et de thé de ver lorsque ceux-ci sont pleins. En dehors de cela, ce sont les vers qui effectuent le travail. Ensuite, l'entrée du dispositif se trouve à une hauteur de 146 cm, donc à une hauteur accessible pour tout usager de taille moyenne, soit autour de 160 cm de hauteur. Si toutefois un usager serait de taille insuffisante pour pouvoir incorporer du substrat par l'entrée de l'appareil, celle-ci est restée accessible à l'aide d'un tabouret. De plus, il a été calculé que 2,565 kg de substrat doit être incorporé dans chaque vermicomposteur à chaque jour et que chaque vermicomposteur génère 1,795 kg de vermicompost et 8,484 kg de thé de ver (Appendice F), qui sont récoltés chaque jour. Ainsi, les poids quotidiens de substrat, vermicompost et thé de ver sont raisonnables et peuvent être transportés par tout utilisateur. Ensuite, l'esthétisme n'étant pas un aspect important pour le client, cet élément n'a jamais contraint les technicalités de la conception, mais l'équipe de conception a tout de même fait un effort en ce sens lorsque cela était de mise.

Le procédé de vermicompostage peut générer des odeurs désagréables, provenant notamment de la présence de NH_3 (ammoniac) dans l'air, qui indique un bas ratio de carbone et azote ou la présence de conditions anaérobies indésirables dans le système (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). Cependant, ces odeurs ne représentent pas un risque pour la santé selon les concentrations généralement rencontrées et elles peuvent être limitées par une bonne aération du substrat, des vers et du milieu environnant (Ministry of the Environment, 2009). Les odeurs ne représenteront pas non plus un inconvénient pour le client, puisque ce dernier placera le dispositif à l'extérieur de son bâtiment, où l'aération est optimale. En revanche, il lui sera conseillé de le placer derrière un mur de son bâtiment à l'abri du vent, afin de limiter la propagation des odeurs sur son terrain et celui de ses voisins (Ministry of the Environment, 2009). Le niveau d'odeur émanées peut également être limité en réduisant le temps d'entreposage des ingrédients du substrat et en les incorporant rapidement dans le système pour subir le procédé de transformation, tel qu'il a été suggéré plus haut par le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario » (Ministry of the Environment, 2009), qui suggère également qu'un bon entretien de la machine contribue à la mitigation des odeurs. En outre, si les réserves d'ingrédients ne peuvent être traitées rapidement, les odeurs qui en émanent peuvent être limitées en y incorporant des agents séchants, comme de copeaux de bois, et/ou du vermicompost fini (Ministry of the Environment, 2009). Le fait d'adapter une recette avec le moins d'ingrédients putréscibles permet aussi de limiter les odeurs provenant du système de vermicompostage (Ministry of the Environment, 2009). De plus, lorsque le dispositif sera en marche à l'usine de production du client, ce dernier devra faire effectuer une évaluation d'impact d'odeur par un professionnel, afin d'obtenir la certification démontrant que le système n'est pas néfaste au niveau de ses émanations.

odorantes auprès des voisins de l'entreprise et/ou de déterminer les méthodes de mitigation adaptées pour son installation (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). Cependant, Myco-Rise étant situé dans une zone rurale et possédant de nombreux arbres sur son terrain, la propagation des odeurs chez les voisins devrait être grandement amoindrie et ne pas présenter de problème.

Ensuite, au niveau de l'entretien, il suffit simplement de passer un jet à haute pression dans le broyeur et la chambre en ouvrant le couvercle de l'entrée et la trappe de la chambre. Le tapis roulant doit aussi être mis en marche pour le nettoyer sur toute sa surface, ainsi que pour recueillir et transporter les particules décollées des parois vers les contenants de vermicompost. Ces derniers servent alors de contenants d'entreposage des particules en solution dans l'eau pour le substrat. En effet, les particules recueillies après nettoyage ne comportant pas de savon, elles peuvent être réutilisées pour le processus de production de vermicompost, et ainsi limiter la génération de déchets par le système. De plus, le nettoyage de l'appareil ne devrait être requis qu'en cas d'odeurs persistantes.

c. Aspects environnementaux

D'abord, les matériaux utilisés pour le design ont été choisis pour leur durabilité, afin de faire en sorte que l'appareil puisse assurer la transformation des déchets de l'entreprise et la production de vermicompost et de thé de ver le plus longtemps possible sans qu'aucun changement de pièces ne soit requis. En effet, les tapis roulants de course sont des appareils robustes conçus pour résister au poids d'un être humain qui court sur sa surface pendant de longues durées. Ils sont donc tout à fait enclins à résister à celui d'une couche de vermicompost statique sur toute leur longueur. Les matériaux qui les composent sont surtout du métal, qui donne une force de support, du plastique, qui protège le moteur de l'humidité ambiante dans la chambre des vers de manière imperméable, et du caoutchouc au niveau du convoyeur à courroie, un matériel solide qui lui aussi résiste à l'humidité ambiante. Aussi, la chaleur dégagée dans la chambre des vers lors du processus de lombricompostage a démontré être insuffisante pour abîmer ces matériaux (consulter la section VI. Résultats et Analyse à cet effet) (. L'entreprise donne en plus une seconde vie aux tapis roulant de course, ce qui contribue à restreindre les déchets liés aux compagnies de production de tapis roulants tout en diminuant sa propre empreinte écologique. En ce qui concerne le bois et la couche de mousse qui constituent la chambre des vers, l'expérience de Munroe (n.d.) a démontré qu'il s'agit de matériaux tout à fait adaptés aux contraintes biologiques que présente le processus de lombricompostage (consulter la section III. Matériaux à cet effet). Il faut également souligner le fait que le bois est un matériel biodégradable. Quant aux bacs de récupération de vermicompost et de thé de ver, l'équipe de conception prend l'initiative de proposer l'utilisation de bacs faits à base de plastique recyclé. De plus, tel qu'il a été expliqué précédemment, le protocole de nettoyage du vermicomposteur permet de récupérer le plus de déchets possibles et de les réutiliser dans le processus de transformation du vermicompost et ainsi de limiter la libération de ses détritiques dans l'environnement. Le vermicompostage permet en outre à l'entreprise d'adopter le principe

d'économie circulaire au sein de sa chaîne de production, c'est-à-dire de donner une seconde vie à certains des déchets qu'elle génère (Korhonen et al., 2018), en l'occurrence le substrat utilisé pour la pousse de ses champignons. Le vermicompost ainsi que le thé de ver pourront ensuite être utilisés comme fertilisants organiques pour une production végétale. Ceci engendrera une réduction d'amendements inorganiques ainsi qu'une réduction de déchets dans les sites d'enfouissement.

Ensuite, d'un point de vue biologique, le vermicomposteur représente un environnement aux conditions propices au développement et au bien-être des vers. En effet, la mousse isolante permet d'assurer une stabilité au niveau de la température ambiante, malgré les changements de températures à l'extérieur de la chambre. Cette dernière a également le rôle, de protéger la colonie contre les conditions climatiques extérieures et de conserver un taux d'humidité confortable pour les petits être vivants. Ce taux d'humidité est également maintenu par l'action des pulvérisateurs au sein de la chambre. Le convoyeur, quant à lui, est programmé pour rouler à une vitesse adaptée à celle du mouvement des vers en direction du substrat frais, afin de ne pas perturber leur activité. De plus, le design étant basé sur le principe du processus en flux continu, la population de vers s'autorégule selon la quantité de nutriments présente dans le substrat, l'espace de vie disponible dans la couche de vermicompost, le taux de reproduction des vers et leur durée de vie naturelle. Ainsi, le design n'engendre pas de perte au niveau de l'espèce *Eisenia foetida* au sens large, puisqu'aucun ajout de nouveaux vers et aucune perte totale de la population ne sont de mise.

Aussi, la consommation en énergie du système est minime. Effectivement, la température à l'intérieur de la chambre est régulée par la décomposition du substrat, l'activité des vers, les trous d'aération et la couche isolante de mousse, faisant en sorte qu'aucun apport d'énergie thermique ou pour de l'aération supplémentaire ne soit requis. Le moteur et le minuteur ne consomment quant à eux qu'un niveau faible en énergie électrique. Par conséquent, le vermicomposteur n'est pas un design énergivore et n'utilise que de l'électricité comme ressource énergétique, or l'hydroélectricité québécoise est une source renouvelable d'énergie (House Committee on Natural Resources, n.d.).

Tel qu'il a été mentionné plus haut, le processus de compostage peut engendrer la libération de certains gaz dans l'atmosphère (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018). En revanche, selon une étude de Wang et al. (2014), la présence des vers contribue à faire diminuer le taux de méthane (CH₄) libéré de 65% par rapport au processus de compostage sans vers. Aussi, la quantité d'ammoniac (NH₃) libérée peut être diminuée de 48% en ajoutant de la paille de roseau au substrat initial (Wang, 2014). La quantité de dioxyde d'azote (N₂O) peut également être diminuée de 7% grâce à la présence des vers et 43% grâce à la présence de vers et à l'ajout de paille de roseau (Wang, 2014).

Le procédé de vermicompostage présente également des risques de contamination de l'eau (Ministry of the Environment, 2009; *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de*

compostage, 2018). Selon le « Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario » (Ministry of the Environment, 2009), ce risque peut être contrôlé en s'assurant que l'appareil soit positionné sur une surface d'une perméabilité inférieure à 10^{-7} cm/sec, dont la pente induit un ruissellement en direction d'un bassin de rétention servant au recueillement de l'eau contaminée et ayant un volume correspondant à 110% de celui d'un ruissellement causé par une précipitation de 24 heures et d'une période de récurrence de 25 ans au site de production de l'entreprises (Ministry of the Environment, 2009). Cependant, étant donné que le design repose sur le principe du flux continu et que celui-ci est un système semi-ouvert à l'environnement extérieur, le risque de contact entre l'eau de précipitation et le substrat riche en nutriments est très limité. Le nettoyage de l'appareil n'étant pas fréquent non plus, la quantité d'eau contaminée par le design est donc minime. Si la méthode du bassin de rétention est optée par le client, alors l'eau de nettoyage recueilli par les bassins peut être réutilisée pour l'hydratation du système manuellement (Ministry of the Environment, 2009). Sinon, le client peut également opter pour la technique de traitement par infiltration des eaux contaminées en les étalant sur le sol couvert de gazon de son terrain. Les nutriments sont alors filtrés par le sol et absorbés par les plantes (Ministry of the Environment, 2009). Toutefois, afin de s'assurer d'être en règle quant à cette pratique, Myco-Rise doit obtenir une autorisation du Ministère de l'Environnement (Ministry of the Environment, 2009) et un suivi de l'étanchéité du système via des campagnes d'échantillonnage devra être effectué par un professionnel (*Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, 2018).

d. Aspects économiques

Myco-Rise a attribué un budget de 1000\$ à l'équipe de conception pour la construction du prototype de vermicomposteur. Ainsi, les matériaux ont été choisis de manière à respecter cette contrainte. Effectivement, la chambre des vers a été construite en contre-plaqué, un tapis roulant de course a été recyclé et transformé en structure de support et le tapis sert au transport du vermicompost durant le processus de transformation.

Ensuite, les coûts liés à l'entretien et à l'opération du système sont plus que raisonnables, puisque l'eau nécessaire pour le nettoyage peu fréquent de l'appareil est gratuite au Québec, et que les tarifs d'électricité d'Hydro-Québec sont bas. Le client utilise le tarif D à son bâtiment de production.

En outre, le fait que l'entreprise adopte le principe de l'économie circulaire (Korhonen & al., 2018) comme démarche de production lui permet de générer des revenus supplémentaires. Effectivement, dans le cas de Myco-Rise, les déchets transformés en vermicompost et en thé de ver par l'appareil ont une valeur monétaire sur le marché et seront revendus par la compagnie. Cela permettra donc à l'entreprise de rentabiliser l'utilisation du vermicomposteur et de faire des profits supplémentaires après la période de remboursement de l'appareil.

Une analyse économique complète pour l'obtention d'un projet comme celui-ci se retrouve à l'appendice G. Premièrement, une période de retour sur l'investissement de 5 ans est estimée

pour faciliter l'analyse. Avant que tout revenu soit généré, les coûts initiaux, comprenant les coûts des matériaux ainsi que les coûts investis au développement du projet, sont calculés. Le coût de matériaux pour 11 vermicomposteurs incluant les taxes s'élève à 14 049,22\$. Le coût de recherche et développement comprend l'investissement payé pour la génération d'un prototype. Le coût des matériaux pour le prototype ainsi que celui du design proposé se retrouvent à l'appendice H.

Les revenus engendrés par l'entreprise sont faits par l'entremise de la vente de vermicompost et du thé de ver. Alors que le prix de vente de vermicompost se situe entre 226\$/tonne et 31 000\$/tonne (Munroe, n.d.), il est possible d'obtenir jusqu'à 8\$/gallon pour le thé de ver (Dept. of Public Worms, 2018). Il est assumé que le client sera en mesure d'avoir 12 500\$/m³ pour son vermicompost. Puisqu'il est difficile de connaître la valeur marchande des deux produits finaux mais il est connu que le marché est en croissance, il est évalué que la croissance de vente annuelle sera de 3% et que le client possède 2% des parts du marché québécois.

Les autres coûts annuels réalisés par l'entreprise comprennent les frais d'entretien et réparation, les frais de vente, les frais d'exploitation ainsi que les frais financiers. Les coûts engendrés suite à la réparation de certains matériaux sont assumés d'être à peu près égaux au coût initial d'un vermicomposteur complet. Ensuite, les frais de vente sont établis selon le possible revenu généré durant la première année. Ceux-ci comprennent l'achat de contenants, de sacs et d'étiquettes requis à la vente des produits finaux. Quand aux frais d'opérations, ces derniers comptent seulement le coût requis en électricité du minuteur, puisque ceux pour le fonctionnement des deux moteurs sont négligeables selon les calculs performés dans l'appendice D. Les frais financiers sont les intérêts reliés à l'emprunt par la compagnie pour commencer le projet. L'emprunt doit être supérieur ou égal au coût de l'investissement initial plus les coûts engendrés durant la première année. Un prêt de 18 000\$ payable sur 5 ans est assumé avec des intérêts à 8%. De plus, les coûts annuels sont assumés de suivre une croissance similaire aux revenus, soit de 3%.

En assumant une part du marché de 2%, le projet de Myco-Rise est viable. Cependant, si la part de marché de l'entreprise descend en-dessous de 1,5%, la compagnie devrait songer à réduire la production, et ainsi réduire les frais annuels et les coûts de matériaux. Puisque le marché du vermicompost et du thé de ver est méconnu au Québec, la compagnie devrait commencer par une production avec peu d'unités. Sinon, la période de retour sur l'investissement peut être augmentée.

5. Considérations des standards d'ingénierie

Il existe au Canada différents standards pour le compostage, alors qu'aucun n'existe pour le vermicompostage. Il est stipulé dans l'ouvrage *Ligne directrice pour les installations de compostage et l'utilisation du compost en Ontario* que ces standards ne s'appliquent pas au

vermicompostage. Par contre, dans le *Standard Canadien sur les systèmes de production biologique*, il est inscrit que le vermicompost doit se soumettre aux exigences émises par le Conseil canadien des ministres de l'environnement sur les niveaux acceptables de pathogènes humains pour être utilisé comme amendement pour toute production végétale (CCN, 2011). De plus, la matière utilisée comme source de nourriture pour les vers doit correspondre aux critères requis par ce même standard. Certaines matières acceptées par les deux ouvrages sont les déjections animales et les produits végétaux. Pour se conformer à la loi, la teneur en organismes pathogènes ne doit pas dépasser ces deux limites:

« coliformes fécaux: moins de 1000 nombre le plus probable (NPP) par gramme de solides totaux (base sèche)

Salmonella sp: moins de 3 NPP par 4 g de solides totaux (base sèche) » (CCME, 2005).

Alors que la teneur en pathogène semble être le seul élément préoccupant par le gouvernement pour le vermicompost, d'autres critères d'évaluation existent pour qualifier le compost, tels que la maturité, la matière étrangère et la présence de métaux lourds. Selon Hala Chaoui du Ministère de l'Agriculture, des Aliments et des Affaires Rurales de l'Ontario (2010), le vermicompost serait équivalent à du compost de type A dû à son faible taux en pathogènes. En assumant un compost de type A, le vermicompost respecte les critères de qualité pour la matière étrangère s'il respecte les deux standards suivants:

« ne doit pas contenir plus d'un corps étranger dont la plus grande dimension dépasse 25 mm pour un échantillon de 500 mL en ce qui a trait aux corps étrangers tranchants.

ne doit pas contenir de corps étranger tranchant dont la plus grande dimension dépasse 3 mm pour un échantillon de 500 mL en ce qui à trait aux autres corps étrangers» (CCME, 2005).

De plus, la qualité du vermicompost et celle du substrat peuvent être prouvées en respectant les concentrations maximales pour les éléments traces (métaux lourds) contenues dans le tableau suivant:

Tableau 1: Teneur en éléments traces dans le compost et le substrat pour un compost de type A (Compilé de: CCME, 2005 : Ministry of the Environment, 2009)

Éléments traces (métaux lourds)	Teneur maximale dans le compost type A (mg/kg) (base sèche)	Teneur maximale dans le substrat pour un compost type A (mg/kg) (base sèche)
Arsenic (As)	13	170
Cobalt (Co)	34	340
Chrome (Cr)	210	2800

Cuivre (Cu)	400	1700
Molybdène (Mo)	5	94
Nickel (Ni)	62	420
Sélénium (Se)	2	34
Zinc (Zn)	700	4200
Cadmium (Cd)	3	34
Mercurure (Hg)	0,8	11
Plomb (Pb)	150	1100

Le dernier élément pouvant déterminer la qualité du produit est la maturité du vermicompost au moment de la vente de celui-ci. Il est stipulé que le compost doit avoir recours à une phase de maturation de 21 jours pour être jugé stable (CCME, 2005). Toutefois, le processus de vermicompostage ne requiert pas de phase de maturation (Chaoui, 2010). L'évaluation de la qualité du vermicompost par le stade de maturité demeure alors superflu. Néanmoins, un ratio C:N en bas de 20, un pH entre 5,5 et 8,5 ainsi que des particules d'une taille de moins de 25 millimètres démontrent des caractéristiques typiques d'un vermicompost de qualité (Ministry of the Environment, 2009).

En ce qui a trait au thé de ver, il est stipulé que ce dernier doit être fait à partir de vermicompost qui correspond aux exigences mentionnées précédemment sur les pathogènes (CCN, 2011).

En se basant sur le guide de l'Ontario en assumant toujours un compost de type A, il est à noter qu'une évaluation sur les impacts environnementaux n'est pas requise lorsque le processus de vermicompostage ne dépasse pas les 1000 tonnes par jour (Ministry of the Environment, 2009). Il faut également mentionner que Myco-Rise devra se doter d'un certificat d'autorisation au traitement des déchets si la compagnie désire effectuer le projet avec l'envergure proposée, soit de 11 vermicomposteurs, afin de traiter la quantité de substrat visée par l'entreprise, selon la Loi canadienne sur la Protection de l'Environnement (Ministry of the Environment, 2009).

De plus, un certificat d'approbation pour l'utilisation et la transportation du vermicompost n'est pas nécessaire lorsque le produit respecte les critères de qualité de compost de catégorie A (Ministry of the Environment, 2009). Cependant, tous les composts de catégorie A vendus doivent être étiquetés avec les informations suivantes:

«ce produit ne devrait pas être utilisé sur les sols avec des concentrations élevées de cuivre ou de zinc

le taux d'application maximal devrait être moins de 8 tonnes base sèche par hectare par année (80kg/100m²)» (Ministry of the Environment, 2009).

6. Construction du prototype

Afin de tester les différents éléments du design, un prototype a été construit (Appendice I), dont les dimensions sont présentées à l'appendice J. Pour ce faire, différentes pièces et matériaux ont été utilisés. Le coût des matériaux pour la construction du prototype se trouvent dans l'appendice H.

Premièrement, l'élément central du design est le convoyeur. Ce dernier est donc l'élément restreignant de la construction du prototype. Plusieurs recherches ont été nécessaires pour trouver un convoyeur de grandeur adéquate à un prix abordable. Par l'intermédiaire d'un site internet d'achat d'objets de secondes mains, un tapis roulant d'exercice a été acheté et modifié pour répondre aux critères expérimentaux. Par la suite, un recouvrement de bois a été construit sur mesure pour compléter la construction du prototype.

Le tapis roulant acheté mesure 1,44 m de long et 0,61 m de large, et ce incluant les appuis pieds en plastique latéraux. Le convoyeur du tapis a les dimensions suivantes : 1,2 m de long et 0,405 m de large. Afin de prévenir l'infiltration d'eau ou de substrat entre le convoyeur et les appuis de pieds en plastique latéraux, deux languettes de polyéthylène ont été disposées de chaque côté du convoyeur. Les deux languettes de 0,02m de hauteur et 1,2m de longueur ont été fixées par deux vis chacune sur les appuis pieds en plastique afin de courber les extrémités latérales du tapis du convoyeur et ainsi créer une pente descendante vers l'intérieur du convoyeur pour garder l'eau et le substrat sur le tapis.

Pour obtenir une vitesse de convoyeur moindre, des modifications au moteur existant ont été effectuées. Avec une bague de couplage, l'arbre du moteur existant a été couplé avec un nouveau moteur pour permettre de réduire la vitesse du tapis. De plus, un interrupteur à bouton poussoir a été relié entre l'alimentation et le moteur afin de faire fonctionner le moteur manuellement. Autrement, une minuterie est installée pour permettre une automatisation du système. Le moteur a une alimentation électrique de 12 volts.

Le recouvrement en bois a été confectionné sur mesure. Presque deux feuilles complètes de contreplaqué standard (4 pouces par 8 pouces) à 12 mm d'épaisseur ont été utilisées. Afin de couper les feuilles de bois, un banc de cis a été utilisé. Des vis ont servi à relier les pièces de bois ensemble. Un tournevis électrique a servi à fixer les vis. Afin de solidifier la structure, des pièces de renforcement ont été disposées aux jointures des morceaux de bois. Les pièces de renforcement ont été découpées dans un morceau de bois de 2 pouces par 4 pouces sous forme de languette.

Afin d'avoir des portes ouvrables, deux pentures par portes ont été installées, pour un total de six.

Afin de surélever le tapis roulant, deux pattes en métal de support étaient déjà en place. Ces dernières étaient fixées au tapis lors de son achat. Deux autres pattes ont été installées afin de surélever le tapis du sol. Ces dernières sont plus courtes que ceux en métal afin de créer un effet

de pente et de permettre à l'eau de s'écouler dans les bacs de récolte. Les deux pattes ajoutées sont en bois (2x4) et ont été fixées par des boulons et des écrous.

Le coût des matériaux pour le prototype s'élève à 238,23\$ (Appendix H). Considérant que le client était prêt à investir jusqu'à 1000\$ pour celui-ci, nous avons su minimiser le coût par l'utilisation d'un ancien tapis roulant peu coûteux relativement à l'achat d'un convoyeur industriel. Le coût peu élevé se traduit d'ailleurs par l'acquisition d'un moteur de convoyeur gratuitement, ainsi que par l'absence des éléments automatisés qui requièrent plus d'investissements.

V. Matériel et méthode

1. Expériences biologiques

Expérience 1:

Le processus biologique de vermicompostage a débuté le 16 février 2018. Le prototype a un volume de vermicompostage total de 0.0486 m³. Pour obtenir un ratio C:N adéquat selon nos hypothèses, il fallait deux parts de substrat de champignon (majoritairement composé de fibre de coco) pour une part de fumier de vache. Au tout début du processus, une livre de vers (0,45 kg) a été ajoutée au processus pour démarrer la production. Pendant 27 jours, l'équivalent de 1.0125 litre de substrat de champignon par jour et 0.50625 litre de fumier (2:1) par jour ont été ajoutés dans le vermicomposteur automatisé et l'équivalent de 0.0375 mètre de distance a été parcourue par le convoyeur par jour (1.2m (longueur du convoyeur) /32 jours). Le décès des vers a été constaté au 28e jour du processus de vermicompostage complet, donc l'ajout de substrat n'a pas été poursuivi étant donné l'incapacité de production de vermicompost.

Expérience 2:

Pour poursuivre l'expérience et essayer de déterminer les facteurs de l'origine de la mort des vers, différentes recettes ont été créées pour tester le substrat et les vers ont été placés dans différents environnements pour tester l'aération pendant 7 jours. Dans le vermicomposteur perforé, quatre piles (quatre mélanges de substrat) d'environ 10 cm³ ont été déposées à 10 cm de distance l'une de l'autre et quatre autres piles ont été disposés dans des verres de styromousse recouverts de papier d'aluminium perforé, à l'extérieur du vermicomposteur (Appendice K).

Le premier mélange a été élaboré pour déterminer si l'origine du décès des vers était reliée aux ingrédients précédemment choisis. Pour cela, le fumier et le substrat de champignon ont été exclus de la recette 1. Celle-ci est composée de 72% de sciure de bois et de 28% de déchets alimentaires. Les pourcentages ont été choisis en fonction du ratio C:N de chacun des éléments. De l'eau a été ajoutée pour obtenir une teneur en humidité de 50% ou plus dans chacun des mélanges (Domínguez et Edwards, 1997). Le calcul de la composition du mélange a pu être fait grâce aux approximations du *Compost Mix Calculator* (Klickitat County, 2017).

La seconde recette a été réalisée pour augmenter le pourcentage de carbone de la recette tout en gardant le substrat du client puisque l'objectif du vermicomposteur automatisé est de décomposer la matière organique de Myco-Rise. Celle-ci se compose donc de 80% de sciure de bois et de 20% de substrat de champignon.

Même si la recette précédente avait un pourcentage de carbone trop faible pour les vers, elle a été testée pour observer si les vers pouvaient survivre dans un mélange où le substrat de champignon prend une plus grande place puisqu'il n'est pas viable économiquement de décomposer seulement que 20% de substrat de champignon pour Myco-Rise. La troisième recette est constituée de 50% de sciure de bois et 50% de substrat de champignon.

Le mélange final est une alternative peu coûteuse du mélange puisque les feuilles d'arbres morts se retrouvent en abondance sur le terrain de Myco-Rise et dans les alentours. Par contre, il est facile d'introduire des pathogènes dans la mixture à cause des feuilles malades ou infestées. La recette 4 est faite de 50% feuilles de chêne et 50% de substrat de champignon.

2. Tests

a. Rapport massique carbone sur azote

Le rapport C:N est le ratio de la masse de carbone sur la masse d'azote dans une substance. Pour déterminer le ratio C:N d'une substance, il faut utiliser un appareil mettant en œuvre la chromatographie en phase gazeuse, un processus qui permet de séparer les molécules d'un mélange. Il est aussi possible de calculer ratio C:N à l'aide de la formule suivante:

$$R = \frac{Q_1(C_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(C_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(C_3 \times (100 - M_3)) + \dots}{Q_1(N_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(N_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(N_3 \times (100 - M_3)) + \dots}$$

où

R = ratio C:N (sans unité)

Q_n = masse de la substance n (kg)

C_n = pourcentage de carbone de la substance n (%)

N_n = pourcentage d'azote de la substance n (%)

M_n = pourcentage d'humidité de la substance n (%) (Richard, T. et Trautmann, N., 1996)

Dans notre cas, un échantillon de substrat a été séché (60 ° C) et finement broyé pour passer à travers un tamis de 1 mm avant d'être analysé pour le C et N total par combustion directe (900°C) avec l'analyseur de CN Thermo Finnigan Flash EA 1112 (Carlo Erba, Milan, Italie) (Benslim, 2018). Ce test a permis de vérifier si les vers vivaient dans un environnement avec un ratio C:N adéquat.

b. Teneur en humidité

La teneur en humidité (MC) est le poids de l'eau contenue dans une substance par rapport au poids de cette même substance séchée au four. La teneur en humidité peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$Mc = \frac{(Ww - Wd)}{Ww} \times 100$$

où

MC = teneur en humidité (%)

Ww = masse de la substance mouillée (g)

Wd = masse de la substance sèche (g)

Pour mesurer la teneur en humidité de nos substances, une balance analytique *Mettler Toledo NewClassic MS* et un four à air forcé *Sheldon VWR 1327F* ont été utilisés. Pour obtenir le poids de la substance, nous avons séché nos échantillons à 105° C pendant 48 heures (Clark, 2018). Ce test nous a permis de vérifier si les vers vivaient dans un environnement avec une teneur en humidité entre 50 et 90%.

c. Température

La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre. Dans notre cas, la température a été mesurée durant presque tout le processus de décomposition à l'aide d'un Thermocouple de type K avec un enregistreur de données BenchLink. Le logiciel Keysight BenchLink data logger 3 constitue un moyen pratique de collecter et d'analyser les données. Le logiciel est une application Windows qui utilise un visuel de feuille de calcul simple pour définir les données collectées. En ce qui a trait au capteur thermocouple, il se compose de deux métaux de nature différente reliés à une extrémité, Nickel-Chromium et Nickel-Alumel dans le cas du type K. Quand la jonction des deux métaux est chauffée ou refroidie, une tension se produit qui peut être transcrite en température. La température mesurée nous a permis de vérifier si les vers vivaient dans un environnement adéquat.

d. Densité absolue

La densité absolue est le rapport de la masse d'un corps à son volume (synonyme de masse volumique).

La formule utilisée pour calculer la masse volumique est la suivante:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

où

ρ = masse volumique (g/cm³ ou g/ml)

m = masse (g)

V = volume (cm³ ou ml)

La masse des substrats a été mesurée à l'aide de la balance *Mettler Toledo NewClassic MS* qui a une précision de 0.01 g et le volume à l'aide d'un cylindre gradué de 500 mL. La densité absolue a permis d'évaluer si les vers pouvaient théoriquement circuler à travers le substrat.

VI. Résultats et Analyse

1. 27/02/2018 - jour 12 de l'expérience 1

Tableau 2: Teneur en humidité du mélange 2:1 avant vermicompostage

	Mélange 2:1
Masse humide (g)	34,73
Masse sèche(g)	6,66
Teneur en humidité (%)	80,82

La teneur en humidité du mélange de deux parts de substrat de champignon pour une part de fumier de vache est idéale puisqu'elle se trouve entre 60 et 90% (Domínguez et Edwards, 1997).

2. 09/03/2018 - jour 22 de l'expérience 1

Tableau 3: Ratio C:N du mélange 2:1 avant vermicompostage

Mélange 2:1	N(%)	C(%)	C:N
Copie 1	2,40	30,25	12,59:1
Copie 2	2,64	29,89	11,32:1
Copie 3	2,45	30,31	12,38:1

Le rapport massique carbone sur azote (C:N) du mélange de deux parts de substrat de champignon pour une part de fumier de vache, avant le processus de vermicompostage, s'avère beaucoup trop faible. Il doit se trouver entre 25:1 et 30:1 pour que les vers le décomposent. Un rapport C:N à moins de 20:1 indique un degré élevé de stabilisation de la matière organique et reflète un niveau satisfaisant de maturité des déchets organiques (Chaoui, 2010). Par contre, avec l'aide du résultat précédent, il est impossible de déterminer quel composant a un ratio aussi faible.

Aussi, si le rapport C:N est trop faible, un excès d'azote sera fourni, entraînant la production d'ammoniac. Les fumiers frais ont également tendance à contenir des niveaux de sel plus élevés

et ont une plus grande tendance à rejeter l'ammoniac. Les sels et l'ammoniac sont dangereux pour les vers, même à des niveaux très bas. Il est donc nécessaire de pré-composter le fumier avant de le vermicomposter pendant au moins une semaine (Gunadi et Edwards, 2003). La perte d'ammoniac dans le fumier est généralement plus importante pendant les premières heures suivant l'application comme il peut être observé dans la figure 9 (Jokela et Meisinger, 2004). Le fumier ajouté au vermicomposteur le premier jour du processus a été produit une heure avant par les vaches laitières de l'étable de la ferme du Campus Macdonald. Le reste a été placé dans une boîte de styromousse en attendant d'être introduit dans le vermicomposteur. Il aurait nécessaire de pré-composter le fumier pour s'assurer que la majorité de l'ammoniac soit volatilisé.

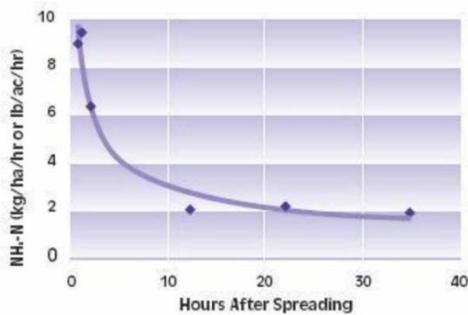


Figure 9: Taux d'émission de NH₃ (kg/ha/hr) provenant du fumier de vaches laitières appliquée en surface à 65 300 L / ha (17 000 gal / ac) à Williston, VT en fonction du temps (h) après l'épandage. (W.E. Jokela et J.J. Meisinger, 2004)

3. 15/03/2018 - jour 28 de l'expérience 1

Tableau 4: Densité absolue du substrat de champignon, du fumier et du mélange 2:1

	Substrat de champignon	Fumier	Mélange 2:1
Masse (kg)	0,36	0,54	1,27
Volume (m ³)	0,00050	0,00050	0,0015
Densité absolue (kg/m ³)	725,75	1088,62	846,71

Tableau 5: Teneur en humidité du substrat de champignon, du fumier et du mélange 2:1

	Substrat de champignon	Fumier	Mélange 2:1
Masse humide (g)	37,65	27,98	103,28
Masse sèche (g)	8,25	4,10	20,60
Teneur en humidité (%)	78,09	85,35	80,05

Mortalité des vers (/100)	100
---------------------------	-----

L'origine de la mortalité de la totalité des vers est probablement liée à la production d'ammoniac, dû au rapport C:N bas ainsi qu'au manque flagrant d'aération du système. En effet, le système n'est pas scellé, mais il ne comportait aucun system d'aération autre que l'ouverture pour l'ajout de substrat, une fois par jour. Au départ, dans le vermicomposteur, les vers ont été placés dans 100 g du substrat dans lequel ils ont grandi pour leur permettre de s'adapter à leur nouvel environnement. Par contre, ceux-ci ne se sont jamais déplacés vers le mélange de fumier et de substrat de champignons. Sachant que la température tout au long du processus a été entre 18 et 24°C et que la teneur en humidité se trouvait toujours, après 28 jours, à 80,05%, ces deux facteurs ne sont pas problématiques pour la survie des vers. La densité devrait se trouver entre 350 et 650 kg/m³ (Chaoui, 2010), elle est par contre plus grande, ce qui pourrait empêcher les vers de circuler dans le substrat.

4. 26/03/2018

Tableau 6: Rapport C:N du substrat de champignon, du fumier et du mélange 2:1

	N (%)	C (%)	C:N
Substrat de champignon 1	2,20	15,38	6,98
Substrat de champignon 2	2,07	15,74	7,60
Fumier 1	2,08	23,11	11,09
Fumier 2	2,06	22,83	11,08
Mix 1	2,16	17,96	8,30
Mix 2	2,07	18,11	8,76

Le rapport massique carbone sur azote du substrat de champignon est d'environ 7:1 et celui du fumier de vache 11:1. Il est donc impossible d'obtenir, avec ses deux ingrédients, un mélange avec un ratio de 25-30:1. Compte tenu du fait que l'objectif du vermicomposteur est de vermicomposter le substrat de champignon de Myco-Rise, il est essentiel de l'utiliser dans le mélange. Par contre, il faudrait le mélanger avec un ingrédient ayant une teneur élevée en carbone pour pouvoir réussir à balancer le ratio C:N faible du substrat avec lequel il faut travailler. On peut aussi constater que le rapport du mélange est plus faible que lors du test précédent (09/03/2018). La concentration d'azote a diminué d'environ 0,5%, probablement à cause de la volatilisation partielle de l'ammoniac dans la boîte de styromousse et la concentration de carbone a aussi diminué d'environ 50%. Il se pourrait que les échantillons pris ne soient pas représentatifs dû à l'hétérogénéité des substances.

5. 05/04/2018 - jour 7 de l'expérience 2

Recette 1	72% sciure de bois et 28% déchets alimentaires
Recette 2	80% sciure de bois et 20% substrat de champignon
Recette 3	50% sciure de bois et 50% substrat de champignon
Recette 4	50% feuilles de chêne et 50% substrat de champignon

Tableau 7: Mortalité des vers dans les verres à l'extérieur du vermicomposteur (/10)

État des vers	Recette 1	Recette 2	Recette 3	Recette 4
Morts	0	0	9	0
Vivants	10	10	1	12

Tableau 8: Mortalité des vers dans le vermicomposteur (/10)

État des vers	Recette 1	Recette 2	Recette 3	Recette 4
Morts	10	10	10	10
Vivants	0	0	0	6

Les vers dans le vermicomposteur sont presque tous morts à cause du manque d'eau. Les piles de substrats avaient une grande aire exposée à l'air, ce qui a augmenté le taux d'évaporation de l'eau. Avoir eu des piles plus volumineuses comme il sera le cas normalement aurait grandement aidé pour réduire l'espace d'air. Seulement 60% des vers sont demeurés en vie au centre de la pile du mélange 4, puisque l'humidité était encore présente. Les vers à l'extérieur du vermicomposteur sont pratiquement tous demeurés en vie puisque le niveau d'humidité a été conservé grâce à la plus petite surface en contact avec l'air. Dans la recette 3, 90% des vers sont morts à cause du ratio C:N trop bas et de la production d'ammoniac qui découle de ce fait. Dans la recette 4, il y avait deux vers de plus qu'au départ, prouvant que les conditions étaient assez bonnes pour faire éclore les œufs en plus de permettre aux vers de survivre. Il est donc possible pour les vers de survivre dans les mélanges 1,2 et 4. Par contre, étant donné que les verres peuvent survivre dans au moins 50% de substrat de champignon, il est inutile de considérer la recette 1 comme recette potentielle pour Myco-Rise puisqu'elle ne comporte pas de substrat de champignon. En ce qui a trait à la recette 1, il est peu avantageux pour Myco-Rise de l'utiliser puisqu'elle comporte que 20% de substrat. Finalement, la recette 4 est la plus viable, mais elle comporte des risques puisque les feuilles d'arbres recueillies peuvent avoir des maladies fongiques ou des insectes indésirables.

Pour pouvoir obtenir plus de possibilités quant aux mélanges possibles et pour pouvoir composter du fumier avec le substrat de champignon, il faudrait que celui-ci ait un rapport C:N plus élevé. Il serait possible de faire pousser les champignons dans un substrat à base de paille plutôt qu'à base de fibre de coco pour l'obtenir.

6. 06/04/2018

Tableau 9: Densité absolue et teneur en humidité du substrat de champignon, du fumier et du mélange 2:1

	Substrat de champignon	Fumier	Mix 2:1
Masse humide (g)	32,84	33,62	99,30
Masse sèche (g)	8,01	5,45	21,47
Volume humide (cm ³)	50,00	50,00	150,00
Densité absolue	0,66	0,67	0,66
Densité absolue (kg/m ³)	656,80	672,40	662,00
Teneur en humidité (%)	75,61	83,79	78,38

On peut constater qu'en près de deux mois, la teneur en humidité a légèrement diminué, mais que la densité des deux substrats a diminué drastiquement, particulièrement pour le fumier. Il est possible que cet écart soit dû au fait que le niveau de compaction du fumier lors des deux échantillonnages ait été différent. Le mélange a finalement une densité acceptable pour que les vers y vivent.

Durant l'expérience 1, la température du substrat a été monitorée. Elle a varié tout au long du processus entre 18 et 24°C (Figure 10), température acceptable pour la survie des vers. Cette température est celle que l'on retrouve à l'atelier de la ferme Macdonald. On peut remarquer qu'à environ chaque semaine, la température chute sous 20°C pendant 3 jours. Cette diminution de la température pourrait être dû au fait que le substrat était ajouté le mardi et le jeudi, donc l'appareil était ouvert deux fois par semaine à une journée d'intervalle.

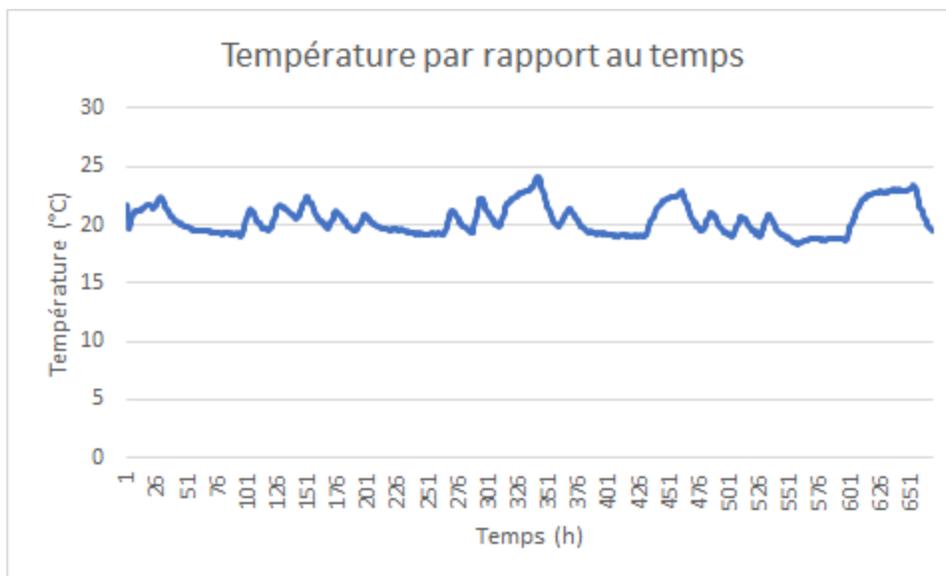


Figure 10: Température par rapport au temps

VII. Recommandations

Plusieurs recommandations sont proposées afin d'offrir un produit de plus haute performance.

En ce qui a trait aux expériences, trois tests supplémentaires auraient pu être effectués. Tout d'abord, il aurait été pertinent de déterminer le niveau d'oxygène dans le vermicomposteur afin de déterminer s'il était suffisamment élevé pour que les vers survivent. Il n'a pas été possible de faire ce test puisque le capteur d'oxygène *Apogee SO-100 series* était déficient. Le pH aurait aussi pu être déterminé pour savoir si le substrat dans lequel vivaient les vers était trop acide ou basique. Ce paramètre aurait pu être mesuré grâce à un pH-mètre, instrument scientifique qui mesure l'activité des ions hydrogène dans les solutions à base d'eau, indiquant son acidité ou son alcalinité exprimée en pH. Finalement, la salinité aurait dû être mesurée puisque les vers ne tolèrent pas des substrats très salins. Les concentrations de sel peuvent être déterminées en mesurant la conductivité électrique d'une solution puisque les sels sont des composés chimiques composés d'ions qui ont une charge positive ou négative et qui transporteront donc un courant électrique. Lorsque la concentration en sel augmente, la conductivité électrique augmente également. L'appareil utilisé pour mesurer la salinité est un conductimètre. D'un autre côté, il aurait été intéressant d'évaluer la porosité du substrat dans lequel les vers ont vécu. La porosité d'un substrat est un facteur pouvant conduire à des conditions anaérobies non-souhaitables pour les vers. La porosité du mélange de vermicompost peut entraîner un niveau d'humidité élevé et réduire le transport de l'oxygène. La forme, la taille et la structure des particules sont tous des facteurs qui affectent la façon dont se compacte un substrat. Un mélange compact a tendance à faire augmenter la densité apparente et à réduire la porosité.

D'un autre côté, différentes améliorations pour le design sont pertinentes. Tout d'abord, le vermicomposteur devrait être placé à l'ombre. En effet, lors de journées ensoleillées, le vermicomposteur exposé au soleil absorbe une grande quantité d'énergie thermique ce qui provoque une augmentation de la température intérieure de ce dernier. Ainsi, une exposition moindre au soleil peut être bénéfique pour s'assurer que la température intérieure ne devienne pas trop élevée pour la santé des vers et pour le processus de décomposition. Rappelons qu'une température intérieure supérieure à 40 °C n'est pas tolérée par les vers et provoque un processus de décomposition thermophilique (Manna et al., 1997). En outre, pour une protection supérieure, le vermicomposteur peut être placé sous un toit. En plus de réduire la radiation solaire absorbé par la boîte, un toit peut protéger le vermicompost des intempéries. Ainsi, une réduction de l'exposition à la pluie et au soleil conduit vers une plus grande durabilité du produit.

Le substrat de fibre de coco utilisé pour le vermicompostage n'est pas optimal. Ce dernier a un ratio C:N très bas, soit de 6,9. Un substrat avec une concentration supérieure en carbone, donc avec un ratio C:N plus élevé, permettrait d'obtenir de meilleurs résultats.

D'autre part, l'aspect mécanique du design pourrait être amélioré. La conception présentée requiert que l'utilisateur remplisse le réservoir du vermicompost quotidiennement. L'ajout d'un bras mécanique permet une autonomie plus grande du produit. En effet, un bras mécanique programmé et ajusté adéquatement pourrait prendre le substrat entreposé près du lieu de vermicompostage et le déposer dans le réservoir du vermicomposteur. Le même dispositif pourrait également servir à récolter les produits finaux de manière automatique. Cependant, un tel dispositif est dispendieux. Multiples simulations peuvent également être effectuées pour, entre autres, analyser les transferts de chaleur du vermicompost. En effet, le vermicompost produit de la chaleur qui peut être perdu par les parois du recouvrement en bois. Des transferts de chaleur sont également présents entre les parois du recouvrement en bois et l'air ambiant. Dépendamment de la température extérieure, la chaleur à l'intérieur de la boîte est susceptible de changer. Ainsi, avec une simulation, de meilleures conclusions quant à l'isolation peuvent être établies.

Afin de pouvoir vermicomposter quatre saisons par année, le vermicomposteur pourrait être placé dans une unité fermée et isolée. Cette dernière doit avoir une température adéquate pour la survie des vers et pour maintenir un processus de décomposition mésophile ainsi qu'une aération adéquate. Cependant, la construction d'une nouvelle unité n'est pas toujours possible dû aux réglementations en vigueur et à l'espace nécessaire à la construction. De plus, ce processus peut être coûteux.

D'autres matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication du produit. Effectivement, un contreplaqué traité contre les intempéries peut être utilisé. Également, du plastique recyclé peut servir de chambre à vermicompost.

La conception présentée peut être utilisée dans d'autres provinces ou d'autres pays. Cependant, le produit final, soit le vermicompost et le thé de vers, ne peuvent être mis en vente.

Effectivement, les deux produits finaux sont régis par la législation de la province ou du pays, notamment quant à la présence de pathogène. Ainsi, une prise de connaissance des réglementations en vigueur sont nécessaire pour la mise en vente des produits recueillis par notre design lorsque ce dernier est utilisé ailleurs qu'au Québec.

De plus, des capteurs d'ammoniac peuvent être apposés dans la chambre de vermicompost. Avec ces derniers, l'utilisateur peut s'assurer qu'il n'y a pas de risque de mortalité pour la communauté de vers. De plus, tel que mentionné précédemment, l'ammoniac peut être toxique pour l'humain. Ainsi, l'installation d'un capteur peut être bénéfique. Un capteur d'humidité peut également être apposé au-dessus du tapis du convoyeur afin de s'assurer que la teneur en humidité du substrat est appropriée en tout temps.

Avec plus de ressources, une analyse du cycle de vie peut être performée permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étage d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. De plus, une telle analyse permettrait d'avoir des conclusions quant aux principes d'économie circulaire et d'aller vers le principe de zéro déchet. Cette analyse légitimerait les impacts tout au long de la chaîne de production et de transformation des produits finaux.

VIII. Conclusion

Pour conclure, la conception d'un design a pu être exécutée grâce à l'identification du problème de Myco-Rise et une analyse approfondie de la littérature sur le procédé biologique et les vermicomposteurs à flux continu. Différentes stratégies et mitigations pour assurer un environnement sain ont été abordées. Outre l'environnement, les aspects économiques et sociaux ont été évalués pour constater si le design était viable ou non selon les revenus générés par la compagnie. Pour valider si le design était approprié, un prototype a été construit et différents tests ont été performés selon certains principes d'ingénierie. Même s'il ne fût possible de comparer le produit final créé avec les standards Canadiens dû au manque de temps pour effectuer une décomposition complète, certaines recommandations quant à l'optimisation design et au substrat ont pu être identifiées selon l'interprétation des résultats.

Remerciements

Toute l'équipe de design du vermicomposteur automatisé voudrait remercier Jérôme Boutin pour son aide précieuse à la conception du vermicomposteur ainsi que pour son savoir en ingénierie électrique. Les précieux conseils de notre mentor Mr. Clark, ainsi que ceux de notre professeur Mr. Madramootoo, furent appréciés tout au long de l'aventure. Un grand merci à

Scott Manktelow pour son dévouement et pour nous avoir permis d'établir notre prototype dans l'atelier. Il est honorable de remercier tous les professeurs et techniciens du campus Macdonald qui ont participé à la réussite de ce projet grâce à leur aide technique, leurs conseils ainsi que leur temps consacré à l'analyse.

Bibliographie

- Abundant Earth (2018). Récupéré de <http://www.abundantearth.com/store/canoworms.html>
- Appelhof, M. (1988). Domestic Vermicomposting Systems.: In *Earthworms in Waste and Environmental Management*, ed. Clive A. Edwards and Edward F. Neuhauser, 157–161.
- Atiyeh, R.M., Subler, S., Edwards, C.A., Bachman, G., Metzger, J.D., Shuster W. (2000). Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticulture container media and soil. *Pedobiologia*.;44:579–590. doi: 10.1078/S0031-4056(04)70073-6
- Benslim, H., Université McGill (2018). Communication personnelle.
- Card, A.B, Anderson, J.V, Davis, J. G. (2004). Vermicomposting Horse Manure, Colorado State University Cooperative Extension, no 1224. Récupéré de <http://www.ext.colostate.edu/pubs/livestk/01224.html>
- CCME. (2005). PN 1341: Lignes directrices pour la qualité du compost. Winnipeg, Manitoba: CCME.
- Chaoui, H. O. (2010). Vermicasting (or Vermicomposting): Processing Organic Wastes Through Earthworms. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/10-009.htm>
- Conseil canadien des normes. (2011). CAN/CGSB-32.311-2006: Systèmes de production biologique - Listes des substances permises. Gatineau, Québec: CCN.
- Crowe, M., and Bowen, G. (1954). *With Tails We Win!* Eagle River, WI: Shields.
- Department of Public Worms. (2018). Worm tea sales. UCBS Associated Students. Récupéré de <https://worms.as.ucsb.edu/worm-tea-sales/>
- Desai, N., Tanksali, A., Soraganvi, V.S. (2016). Vermicomposting – Solution for Milk Sludge. *Procedia Environmental Sciences*, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.027>
- Domínguez, J. and Edwards, CA. (1997). Effects of stocking rate and moisture content on the growth and maturation of *Eisenia andrei* (Oligochaeta) in pig manure. *Soil Biol Biochem* 29, 743–746.
- Edwards, C. A., et Arancon, N. Q. (n.d.). The science of vermiculture: the use of earthworms in organic waste management. Récupéré de <https://static1.squarespace.com/static/57feac2959cc68a6cf9dc4b9/t/5898fb7c725e254b85f598f4/1486420862290/THE+SCIENCE+OF+VERMICULTURE.pdf>
- Edwards, C.A., et Fletcher, K.E. (1988). Interactions between earthworms and microorganisms in organic-matter breakdown. *Agric. Ecosystems Environ.*, 24: 235-247.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., et Sherman R. L. (2011). Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management. Boca Raton: CRC Press. pp. 91-100.

Engineering Toolbox. (n.d.). Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient. Récupéré de https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html

Fiche complète pour Ammoniac- CNESST. (2002). Csst.qc.ca. Récupéré de http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=273

Garg, V.K., and Gupta, R. (2009). Vermicomposting of agro-industrial processing waste. In *Biotechnology for Agro-industrial Residues Utilisation*, ed. by Singh nee' Nigam P and Pandey A. Springer, Dordrecht, 431-456.

Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2013). Recycling of Solid Organic Wastes Through Vermicomposting: Microbial Community Changes Throughout the Process and Use of Vermicompost as a Soil Amendment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44.

Government of Canada. (2017). Canada Occupational Health and Safety Regulations Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail, 222. Récupéré de <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/Sor-86-304/page-49.html#docCont>

Government of Ontario. (1990). Control of Exposure to Biological or Chemical Agents (pp. 1, 4). Government of Ontario.

GreenMap. (n.d.). Vermicomposting / Red Wiggler Haven. Faculté d'architecture, Université du Manitoba. Récupéré de http://www.arch.umanitoba.ca/greenmap/pages/HS_RedWrigler/pages/3.htm

Gunadi, B. et Edwards, C. (2003). The effects of multiple applications of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (Savigny) (Lumbricidae). *Pedobiologia* 47, 321–329.

Gunadi, B. et Edwards, C. A. (2003). The effects of multiple applications of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (Savigny) (Lumbricidae). *Pedobiologia*, 47(4), 321–329. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00196>

Hill, G. et Baldwin, S. (2012). Vermicomposting toilets, an alternative to latrine style microbial composting toilets, prove far superior in mass reduction, pathogen destruction, compost quality, and operational cost. *Waste Management*, 32(10), 1811-1820.

House Committee on Natural Resources. (n.d.). Hydropower as a Renewable Energy Source. Récupéré de <https://naturalresources.house.gov/issues/issue/?IssueID=8267>

Hughes, K.D. (2011). Worm Culture Systems. U.S. Patent No. 20120214223A1.

Jamaludin, A.A., Mahmood, N.Z. et Izyan, N.N. (2009) Potential of Spent Mushroom Substrate in Vermicomposting. Global Science book. Récupéré de [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0906/DSDP_3\(SI2\)/DSDP_3\(SI2\)87-90o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0906/DSDP_3(SI2)/DSDP_3(SI2)87-90o.pdf)

Jamaludin, A.A., Mahmood, N.Z., et Abdullah, N. (2012). Waste Recycling: Feasibility of Saw Dust Based Spent Mushroom Substrate and Goat Manure in Vermicomposting. Récupéré de http://eprints.um.edu.my/10807/1/Waste_Recycling_Feasibility_of_Saw_Dust_Based_Spent_Mushroom_Substrate_and_Goat_Manure_in_Vermicomposting.pdf

Jokela W.E. et Meisinger J.J. (2004). Liquid Manure: Ammonia Loss and Nitrogen Availability. Advanced Silage Corn Management: A Production guide for coastal British Columbia and the Pacific Northwest. Dans : Advanced Silage Corn Management: A Production guide for coastal British Columbia and the Pacific Northwest. Agassiz, BC: Pacific Field Corn Association. Récupéré de <http://www.farmwest.com/node/956>

Klickitat County. (2017). Compost Mix Calculator. Récupéré de <http://www.klickitatcounty.org/DocumentCenter/Home/View/3523>

Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Kumar, J., Kumar, S., Kumar, A., et Singh, U. (2017). Performance analysis of vermicompost grinding machine by using different waste materials. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 2017; SP1: 876-881. Récupéré de <http://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue6S/PartU/SP-6-6-209.pdf>

Lefsrud, M. (2016). Lecture 8 – Piping. *Bree 314 - Agrifood Buildings*. McGill University.

Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage. (2018). Récupéré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/lignesdirectrices/compostage.pdf>

Manna, M.C., Singh, M., Kundu, S., Tripathi, A.K. and Takkar, P.N. (1997). Growth and reproduction of the vermicomposting earthworm *Perionyx excavatus* as influenced by food materials. Récupéré de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01420233>

Ministry of the Environment. (2009). Guideline for Composting Facilities and Compost Use in Ontario November 2009 – Draft for Consultation

Ministry of the Environment. Facilities, (November). Récupéré de http://www.compost.org/CCC_Science_Web_Site/pdf/Regulations/Guideline for Composting Facilities and compost use in Ontario.pdf

Mingin, G. (2013). Will a Red Worm Population Double in 3 Months. Récupéré de <https://www.redwormcomposting.com/general-questions/will-a-red-worm-population-double-in3-months/> on November 21st, 2017.

- Munroe, G. (n.d). Guide du lombricompostage et de la lombriculture à la ferme, *Centre d'agriculture biologique du Canada*. Récupéré de https://www.agrireseau.net/documents/Document_96310.pdf
- Ndegwa, P.M., Thompson, S.A., Das, K.C. (1999). Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. *Biores. Technol.* 71 (1), 5–1.
- Nilsson, J. (2011). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* edited by Clive A. Edwards, Norman Q. Arancon, and Rhonda Sherman. *The Quarterly Review of Biology* 2011 86:4, 358-359
- Piccirillo, P. (2010). About Worms and Worm Reproduction. Récupéré de <https://www.wormfarmingrevealed.com/wormreproduction.html>
- Prosino. (n.d). Single Shaft Shredder Machine. Récupéré de <http://www.sinoshredder.com/shredders/twin-shaft-shredder-dual-motor/>
- Richard, T. et Trautmann, N., Cornell Waste Management Institute (1996). C/N ratio. Récupéré de: http://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html
- Sherman, R. (1994). Worms Can Recycle Your Garbage. AG-473-18. Raleigh, NC: Cooperative Extension Service.
- Shahmansouri, M.R., Pourmoghadass, H., Parvaresh, A.R. & Alidadi, H. (2005). Heavy metal bioaccumulation by Iranian and Australian earthworms (*Eisenia fetida*) in sewage sludge vermicomposting. *Iranian J. Env. Health Sci. Eng.* 2(1): 28-32.
- Sherman, R. 1997. Worm Away Your Cafeteria Food Scraps. AG-551. Raleigh, NC: Cooperative Extension
- Singh, R.P., Singh, P., Araujo, A.S.F., Ibrahim, M.H., Sulaiman, O. (2011). Management of urban solid waste: vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 719-729.
- St. Martin, C.C.G. and Brathwaite, R.A.I. (2012). Compost and compost tea: Principles and prospects as substrates and soil-borne disease management strategies in soil-less vegetable production. Récupéré de https://solvita.com/wp-content/uploads/2014/04/Compost-and-compost-tea-Principles_Martin-et-al_2012.pdf
- Subler S, Edwards CA, Metzger PJ. (1998). Comparing vermicomposts and composts. *Biocycle*.;39:63–66.
- Tajbakhsh, J., Abdoli, M. A., Mohammadi Goltapeh, E., Alahdadi, I., Malakout, M. J. (2008). Recycling of spent mushroom compost using earthworms *Eisenia foetida* and *Eisenia andrei*. *Environmentalist*. 28:476–482. DOI 10.1007/s10669-008-9172-6

Techniseal. (2016). Protecteur pour bois sans entretien. Récupéré de https://www.techniseal.com/sites/default/files/products/datasheet/ft_protecteur_pour_bois.pdf

Texel Technical Materials. (2017). Geotextiles. Récupéré de <http://texel.ca/market-segments/geosynthetics/products/geotextiles/?L=1>

Toet, G. (2012). Vermicomposting method and apparatus. U.S. Patent No. 20140130744A1.

Wang, J., Hu, Z., Xu, X., Jiang, X., Zheng, B., Liu, X., Kardol, P. (2014). Emissions of ammonia and greenhouse gases during combined pre-composting and vermicomposting of duck manure. *Waste Management*, 34(8), 1546–1552. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.010>

Wani, K.A., Mamta, Rao, R.J. (2013). Bioconversion of garden waste, kitchen waste and cow dung into value-added products using earthworm *Eisenia fetida*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.01.001>

Will, S. (2010). Roller Mill Grinders. Milleral, integrated milling system. Récupéré de <https://www.mpechicago.com/sites/default/files/resource-library/gfmt10-02f2ds.pdf>

Windle, H. N. (2001). High efficiency vermiculture process and apparatus. U.S. Patent No. 6223687 B1.

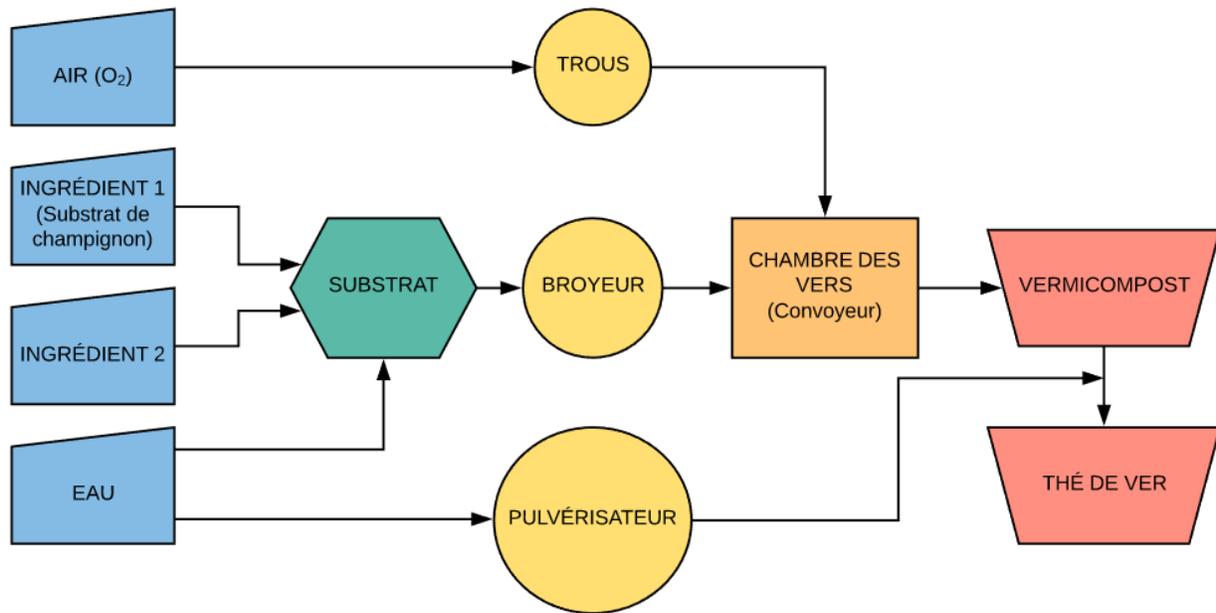
Yadav, A., Garg, V. K. (2010). Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology*, 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.083>

Appendice A – Projet proposé : allure générale



RÉVISIONS				TOUTES LES UNITÉS SONT EN CENTIMÈTRES	DESSINÉ PAR	DATE	PROTOTYPE DU				
RÉV	DESCRIPTION	DATE	PAR		CES DESSINS SONT LA PROPRIÉTÉ DU DÉPARTEMENT D'INGÉNIÉRIE DES BIORESSOURCES DE L'UNIVERSITÉ MCGILL	VÉRONIQUE BEAUDIN	25 FÉV, 2018	VERMICOMPOSTEUR AUTOMATIQUE			
					VÉRIFIÉ PAR	DATE	NOM DU DESSIN	DIMENSIONS DWG	RÉV		
					APPROUVÉ PAR	DATE	CONFIDENTIEL	TAILLE DU DESSIN	LÉGAL	ÉCHELLE 1:1	FEUILLE 1 DE 1

Appendice C – Diagramme de flux du processus



Ce diagramme a été dessiné par l'équipe de conception en utilisant Lucidchart.

Appendice D – Calculs moteur du convoyeur

Avec les formules de la section Projet proposé, les calculs suivants sont requis.

Caractéristiques du moteur

RPM_m (Vitesse angulaire du moteur) : 4.5rpm;

$Couple_{moteur}$: 28.23 N.m

1.1 A;

115 V.



Le poids contenu sur le tapis roulant :

$$Poids (kg) = \text{densité du substrat} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \text{Volume sur le convoyeur} (m^3)$$

$$Poids = 846.46 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 0.0972 m^3 = 82.237 kg$$

La force nécessaire pour transposer le poids sur le tapis :

$$Force (N) = Poids(kg) \times g \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

où g est l'accélération gravitationnelle sur terre soit $9.81 \frac{m}{s^2}$

$$Force (N) = 82.237(kg) \times 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) = 806.74 N$$

Par la suite, le couple (N.m) du moteur peut être calculé :

$$Couple (N.m) = Force (N) \times r_{moteur} (m)$$

où

Force=806.74 N

r_{moteur} = rayon de l'arbre de transmission du moteur = 0.035 m

$$\text{donc, } Couple (N.m) = 806.74 (N) \times 0.035(m) = 56.47 N.m$$

Un rapport de transmission doit être calculé entre l'arbre de transmission du moteur et la grande poulie du système de courroie et poulie.

Rapport de transmission

r_m =rayon de l'arbre de transmission du moteur = 0.035m

r_{gp} = rayon de la grande poulie = 0,07m

$$\frac{r_m}{r_{gp}} = \frac{0.035}{0.07} = 0,5$$

Avec le rapport de transmission obtenue grâce au système de courroie et poulie, le couple (N.m) requis par le moteur est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{Couple}_{\text{moteur}} (N.m) &= \text{Couple} (N.m) \times \frac{r_m}{r_{gp}} \\ &= 56.47 N.m \times 0,5 = 28.23 N.m \end{aligned}$$

Les autres paramètres peuvent être calculés :

Vitesse linéaire du moteur

$$V_{LM} = 2\pi \times 0.035 \times \frac{4.5}{60 s} = 0.0165 \text{ m/s}$$

où

V_{LM} : Vitesse linéaire du moteur (m/s)

r_m : Rayon de l'arbre de transmission du moteur (m) = 0.035

RPM_m : Vitesse angulaire du moteur, rotation par minute (rpm) = 4.5 (selon le moteur acheté)

Vitesse angulaire du rouleau

$$RPM_r = 4.5 \times \frac{0.035}{0.07} = 2.25 \text{ rpm}$$

où

RPM_r : Vitesse angulaire du rouleau, rotation par minute (rpm)

RPM_m : Vitesse angulaire du moteur, rotation par minute (rpm) = 4.5

r_m : Rayon de l'arbre de transmission du moteur (m) = 0.035

r_{gp} : Rayon de la grande poulie (m) = 0.07

Vitesse linéaire du rouleau

$$V_{LR} = \frac{2.25}{60 s} \times 0.0281 \times 2\pi = 0.00662 \text{ m/s}$$

où

V_{LR} : Vitesse linéaire du rouleau (m/s)

RPM_r : Vitesse angulaire du rouleau, rotation par minute (rpm) = 2.25

r_r : Rayon du rouleau (m) = 0.0281

Puisque notre substrat prend 32 jours à se décomposer et que la longueur du convoyeur est de 1.2m, il faut que le tapis avance de 0.0375m quotidiennement.

$$D_{quotidien} = \frac{1.2}{32} = 0.0375 \text{ m}$$

Où

$D_{quotidien}$: Déplacement quotidien du tapis (m)

$L_{convoyeur}$: Longueur du convoyeur (m) = 1.2 m

Pour trouver la durée de mise en marche du moteur, il suffit de diviser le déplacement quotidien par la vitesse linéaire du rouleau :

$$T_{quotidien} = \frac{0.0375}{0.00662} = 5.664 \text{ s}$$

Où

$T_{quotidien}$: durée de la mise en marche du moteur (s)

$D_{quotidien}$: Déplacement quotidien du tapis (m) = 0.0375

V_{LR} : Vitesse linéaire du rouleau (m/s) = 0.00662

Calculs moteur du broyeur

Caractéristiques du moteur

12 V

118 RPM

2 A



Afin d'avoir un moteur approprié pour le broyeur, un calcul de couple est nécessaire. La formule suivante est applicable :

$$\text{Couple (N.m)} = \text{Force (N)} \times r_{\text{mixeur}} \text{ (m)}$$

Puisque l'appareil mélangeur peut être confronté à de gros morceaux de substrats à décomposer, un facteur de sécurité doit être appliqué. Généralement, un facteur de sécurité de 2 est utilisé dans l'industrie. Ainsi, le couple du broyeur est évalué comme suit :

$$\text{Couple}_{\text{mixeur}} \text{ (N.m)} = \text{Force (N)} \times r_{\text{mixeur}} \text{ (m)} \times \text{facteur de sécurité}$$

Coût électrique du moteur du convoyeur

La puissance peut être calculé par la formule suivante :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Tension (Volts)} \times \text{Intensité du courant (A)}$$

Le moteur du convoyeur a une tension de 115 Volts et une intensité de 1.1 A. Ainsi, la puissance requise est :

$$\text{Puissance (W)} = 115 \text{ (Volts)} \times 1.1 \text{ (A)} = 126.5 \text{ W}$$

Au Québec, le tarif résidentiel d'électricité est de 5,68 ¢/kWh. Sachant que le moteur fonctionne 5.664 s par jour (voir calculs du moteur), la consommation quotidienne d'électricité est :

$$\begin{aligned} \text{Consommation quotidienne (kWh)} \\ = \frac{\text{Puissance (W)}}{1000} \times \text{Temps de consommation (s)} \times \frac{1 \text{ heure}}{3600 \text{ s}} \end{aligned}$$

$$\text{Consommation quotidienne (kWh)} = \frac{126.5 \text{ (W)}}{1000} \times 5.664 \text{ (s)} \times \frac{1 \text{ heure}}{3600 \text{ s}} = 1.99 \times 10^{-4} \text{ kWh}$$

Le coût quotidien est de:

$$\text{Coût quotidien} = \text{Consommation quotidienne (kWh)} \times \text{Tarif résidentiel} \left(\frac{\text{¢}}{\text{kWh}} \right) \times \frac{1\$}{100 \text{ ¢}}$$

$$\text{Coût quotidien} = 1.99 \times 10^{-4} \text{ (kWh)} \times 5.68 \left(\frac{\text{¢}}{\text{kWh}} \right) \times \frac{1\$}{100 \text{ ¢}} = 1.13 \times 10^{-5} \$$$

Coût électrique du moteur du broyeur

La puissance peut être calculé par la formule suivante :

$$Puissance (W) = Tension (Volts) \times Intensité du courant (A)$$

Le moteur du broyeur a une tension de 12 Volts et une intensité de 1.12 A. Ainsi, la puissance requise est :

$$Puissance (W) = 12 (Volts) \times 1.12 (A) = 13.44 W$$

Puisque la puissance du moteur du broyeur est encore plus petite que celle du moteur du convoyeur, le coût d'opération est négligeable.

Appendice E – Calcul de pression requise pour le pulvérisateur

Le flux requis pour le pulvérisateur est hypothétiquement rehaussé par rapport à son flux réel, car il est assumé que le client désire que l'opération d'humectage du vermicompost s'effectue sur une courte période de temps.

$$\text{Flux}_{\text{pulvérisateur de brume}} \cong 0,0275 \text{ gpm} \cong 1 \text{ gpm} = 0,06309 \text{ L/s}$$

$$\text{Diamètre}_{\text{tuyau,réel}} = \frac{5}{8} \text{ pouce} = 1,5875 \text{ cm}$$

$$\text{Diamètre}_{\text{tuyau}} = \frac{1}{2} \text{ pouce} = 1,27 \text{ cm}$$

Or, ½ pouce est assumé pour le diamètre du tuyau, car les tuyaux au diamètre plus petit engendrant plus de perte de pression, cela permet de conceptualiser le système d'hydratation avec un certain facteur de sécurité.

$$\text{Longueur}_{\text{tuyau}} = 50 \text{ pieds} = 15,24 \text{ m}$$

Il est assumé que le caoutchouc du tuyau engendre des pertes de pression similaires à celles engendrées par les tuyaux en PVC. Ainsi, en utilisant la figure suivante présentant les pertes de friction due à la longueur d'un tuyau en PVC en psi/100 pieds (Lefsrud, 2016), la valeur suivante est obtenue pour la perte de pression sur toute la longueur du tuyau:

$$Perte\ en\ longueur_{PVC} = 0,81 \frac{psi}{100\ pieds} = 5,585 \frac{kPa}{30,48\ m}$$

$$\begin{aligned} Perte\ en\ longueur_{tuyau} &= Perte\ en\ longueur_{PVC} \times Longueur_{tuyau} \\ &= 0,81 \frac{psi}{100\ pieds} \times 50\ pieds = 0,405\ psi = 2,792\ kPa \end{aligned}$$

Ensuite, Il est assumé que la hauteur approximative d'une sortie d'eau de jardin conventionnelle est d'environ 1 m (3,281 pieds). Sachant que la hauteur à laquelle le pulvérisateur est positionné sur le vermicomposteur est de 68 cm ou de 0,68 m (2,231 pieds), la différence de hauteur que l'eau a à parcourir dans le système d'hydratation, de la sortie d'eau jusqu'à l'appareil, est de:

$$\begin{aligned} Hauteur &= Hauteur_{pulvérisateur} - Hauteur_{sortie\ d'eau} = 2,231\ pieds - 3,281\ pieds \\ &= -1,05\ pied = -0,3200\ m \end{aligned}$$

La hauteur négative indique que la perte de pression que devrait représenter la perte de hauteur est en fait un gain de pression dans le cas du système du pulvérisateur, car la sortie d'eau de jardin se situe à une hauteur plus élevée que celle du pulvérisateur dans l'espace (ceci en assumant une pente négligeable du terrain sur lequel le vermicomposteur est positionné).

La chute de pression due à la hauteur est calculée avec le facteur suivant (Lefsrud, 2016) :

$$Facteur_{hauteur} = 2,304 \frac{pied}{psi} = 0,1019\ m/kPa$$

Alors, la perte de pression due à la hauteur est de :

$$\begin{aligned} Perte\ de\ pression_{hauteur} &= Hauteur \div Facteur_{hauteur} = -1,05\ pied \div 2,304 \frac{pied}{psi} \\ &= -0,4557\ psi = -3,142\ kPa \end{aligned}$$

En utilisant la figure suivante présentant les valeurs équivalentes en longueur (pieds) de la friction due aux joints d'un système d'irrigation, en fonction du type, du matériel et de la taille du joint (Lefsrud, 2016), la perte due aux deux joints du système d'hydratation en prenant les valeurs pour un tuyau de diamètre ½ pouce (1,27 cm) comprenant des joints en cuivre est de:

Table 801-22. Friction loss in fittings.

Equivalent lengths of straight pipe for fittings and equipment.

¹Loss figures are based on equivalent lengths of indicated pipe material.

²Loss figures are for screwed valves and are based on equivalent lengths of steel pipe.

Type Fitting & Application	Pipe & Ftg ¹ Material	Equivalent Length in feet Nominal Size of Fitting & Pipe						
		1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"
Insert coupling	Plastic	3'	3'	3'	3'	3'	3'	3'
Threaded adapter	Copper	1'	1'	1'	1'	1'	1'	1'
Plastic or copper to thread	Plastic	3	3	3	3	3	3	3
90° standard elbow	Steel	2'	3'	3'	4'	4'	5'	6'
	Copper	2	3	3	4	4	5	6
	Plastic	4	5	6	7	8	9	10
Standard tee, straight flow thru run	Steel	1'	2'	2'	3'	3'	4'	5'
	Copper	1	2	2	3	3	4	5
	Plastic	4	4	4	5	6	7	8
Standard tee, turn flow thru	Steel	4'	5'	6'	8'	9'	11'	14'
	Copper	4	5	6	8	9	11	14
	Plastic	7	8	9	12	13	17	20
Gate or ball valve ²	Steel	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
Swing check valve ²	Steel	4	5	7	9	11	13	16
Globe valve	Steel	15	20	25	35	45	55	65
30-gal vertical water heater	---	4'	17'	56'				
Water softener	---				Up to 10 psi loss			
Iron or sediment filter	---				Up to 20 psi loss			
Chlorinator	---							

$$Perte \text{ équivalente}_{joints} = 2 \times 1 \text{ pied} = 2 \text{ pieds} = 0,3048 \text{ m}$$

$$Perte \text{ de pression}_{joints} = Perte \text{ équivalente}_{joints} \times Perte \text{ en longueur}_{PVC}$$

$$= 2 \text{ pieds} \times 0,81 \frac{\text{psi}}{100 \text{ pieds}} = 0,01620 \text{ psi} = 0,1117 \text{ kPa}$$

Par conséquent, en assumant une pression minimale requise à la sortie d'eau de jardin de 20 psi (137,895 kPa) (Lefsrud, 2016), la perte totale de pression, et donc la pression minimale requise à la sortie d'eau de jardin nécessaire au bon fonctionnement du système d'hydratation est de:

$$Perte \text{ totale pression} = Pression \text{ minimale requise}$$

$$= Perte \text{ en longueur}_{tuyau} + Perte \text{ de pression}_{hauteur}$$

$$+ Perte \text{ de pression}_{joints} + Pression \text{ minimale sortie d'eau}$$

$$= 0,405 \text{ psi} - 0,4557 \text{ psi} + 0,01620 \text{ psi} + 20 \text{ psi} = 19,97 \text{ psi}$$

$$= \mathbf{137,66 \text{ kPa}}$$

Aussi, sachant que le volume d'eau requis pour un vermicomposteur par jour pour produire du thé de ver est de 0,09332 m³ (93,32 L) et que le flux du pulvérisateur est de 1 gpm (0,06309 L/s) le temps d'humectage nécessaire pour un vermicomposteur par jour est donc de :

$$Temps \text{ humectage} = 93,32 \text{ L} \div 0,06309 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 1479,16 \text{ s} \cong \mathbf{24,65 \text{ min}}$$

Appendice F – Estimation des masses et volumes entrants et sortants du système et estimation du nombre de vermicomposteurs requis

Densité du substrat :

$$\delta_{substrat} = 846,706 \text{ kg/m}^3$$

Densité du thé de ver :

Puisqu'aucun thé de ver n'a pu être obtenu au cours de la phase expérimentale du projet, il est assumé que le thé de ver a la même densité maximale que l'eau (Engineering Toolbox, n.d.), soit la valeur suivante:

$$\delta_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Volume de substrat requis par jour :

1m³ de substrat est à transformer à chaque mois, ce qui donne une quantité quotidienne à introduire dans le système de :

$$Volume \text{ quotidien}_{substrat} = 1\text{m}^3 \div 30\text{jours} = 0,03333\text{m}^3/\text{jour}$$

Poids quotidien de substrat à incorporer :

$$\begin{aligned} Poids \text{ quotidien}_{substrat,total} &= Volume \text{ quotidien}_{substrat} \times \delta_{substrat} \\ &= \frac{0,03333\text{m}^3}{\text{jour}} \times 846,706 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 28,22\text{kg}/\text{jour} \end{aligned}$$

Distance d'avancement du convoyeur :

Puisque le convoyeur a une longueur de 1,2 m et que le processus de transformation se fait sur une période de 32 jours :

$$\begin{aligned} Distance \text{ d'avancement convoyeur} &= Longueur_{convoyeur} \div temps_{processus} \\ &= 1,2\text{m} \div 32\text{jours} = 0,0375\text{m}/\text{jour} \end{aligned}$$

Volume de vermicompost et de thé de ver requis par jour :

La transformation du vermicompost s'effectue sur 32 jours, après lesquels le volume de vermicompost représente 70% du volume de substrat initial dû au processus de décomposition. Aussi, il faut ajouter 4 fois le volume du vermicompost fini en eau afin de faire le thé de ver. Selon ces considérations et en assumant que l'humidité élevée du vermicompost permet de faire en sorte que toute l'eau qui y est ajoutée pour la conception du thé arrive à rejoindre le contenant de réception, les valeurs suivantes sont obtenues:

$$Volume \text{ quotidien}_{vermicompost} = 70\% \times 0,03333\text{m}^3/\text{jour} = 0,02333\text{m}^3/\text{jour}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume quotidien}_{\text{thé de ver}} &= \text{Volume quotidien}_{\text{vermicompost}} \times 4 = 0,02333\text{m}^3/\text{jour} \times 4 \\ &= 0,09332\text{m}^3/\text{jour} \end{aligned}$$

Poids quotidien recueilli de vermicompost et de thé de ver :

Il est assumé que la densité du vermicompost est équivalente à celle du substrat malgré après avoir subi le processus de transformation :

$$\begin{aligned} \text{Poids quotidien}_{\text{vermicompost,total}} &= \text{Volume quotidien}_{\text{vermicompost}} \times \delta_{\text{vermicompost}} \\ &= \frac{0,02333\text{m}^3}{\text{jour}} \times 846,706 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 19,75\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Poids quotidien}_{\text{thé de ver,total}} &= \text{Volume quotidien}_{\text{thé de vers}} \times \delta_{\text{thé de vers}} = \\ 0,09332\text{m}^3 \frac{\text{m}^3}{\text{jour}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} &= 93,32\text{kg} \end{aligned}$$

Nombre de vermicomposteurs requis :

Puisque le convoyeur a une longueur de 1,20m et une largeur 0,405m et que la couche de substrat doit être de 0,20m de hauteur afin d'optimiser le processus de transformation:

$$\begin{aligned} \text{Nombre de vermicomposteurs} &= \text{Volume quotidien}_{\text{substrat}} \\ &\div (\text{Distance d'avancement convoyeur} \times \text{largeur convoyeur} \\ &\times \text{hauteur couche substrat}) = \frac{0,03333\text{m}^3}{\text{jour}} \div \left(\frac{0,0375\text{m}}{\text{jour}} \times 0,405\text{m} \times 0,20\text{m} \right) \\ &= 10,97 \text{ vermicomposteurs} \end{aligned}$$

Donc, afin de satisfaire ses besoins, le client doit se procurer 11 vermicomposteurs.

Poids quotidien recueilli par un vermicomposteur :

Puisque 11 vermicomposteurs sont requis pour rencontrer les besoins de production du client, les poids de substrat, vermicompost et thé de ver pour un vermicomposteur sont les suivants :

$$\begin{aligned} \text{Poids quotidien}_{\text{substrat}} &= \text{Poids quotidien}_{\text{substrat,total}} \div 11 = \frac{28,22\text{kg}}{\text{jour}} \div 11 = \\ \frac{2,565\text{kg}}{\text{jour}} &/\text{vermicomposteur} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Poids quotidien}_{\text{vermicompost}} &= \text{Poids quotidien}_{\text{vermicompost,total}} \div 11 = \frac{19,75\text{kg}}{\text{jour}} \div 11 = \\ \frac{1,795\text{kg}}{\text{jour}} &/\text{vermicomposteur} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Poids quotidien}_{\text{thé de vers}} &= \text{Poids quotidien}_{\text{thé de ver,total}} \div 11 = \frac{93,32\text{kg}}{\text{jour}} \div 11 = \\ \frac{8,484\text{kg}}{\text{jour}} &/\text{vermicomposteur} \end{aligned}$$

Appendice G – Analyse économique

	Années					
	0	1	2	3	4	5
Revenus						
Thé de vers	- \$	6 154,08 \$	6 338,70 \$	6 528,86 \$	6 724,73 \$	6 926,47 \$
Vermicompost	- \$	2 100,00 \$	2 163,00 \$	2 227,89 \$	2 294,73 \$	2 363,57 \$
Total	- \$	8 254,08 \$	8 501,70 \$	8 756,75 \$	9 019,46 \$	9 290,04 \$
Coûts						
Recherche et développement	238,23 \$					
Matériaux	14 049,22 \$					
Entretien et réparations		1 277,20 \$	1 315,52 \$	1 354,98 \$	1 395,63 \$	1 437,50 \$
Frais de vente		280,83 \$	289,26 \$	297,93 \$	306,87 \$	316,08 \$
Frais d'exploitation		44,17 \$	45,49 \$	46,86 \$	48,26 \$	49,71 \$
Frais financier		5 040,00 \$	4 752,00 \$	4 464,00 \$	4 176,00 \$	3 888,00 \$
Total	14 287,45 \$	6 642,20 \$	6 402,27 \$	6 163,77 \$	5 926,77 \$	5 691,29 \$
Profit (perte)	(14 287,45) \$	1 611,88 \$	2 099,44 \$	2 592,98 \$	3 092,69 \$	3 598,75 \$

Hypothèses											
croissance annuelle vente	3%										
Revenu thé de ver	Total (m3)	Perte (m3)	Réel (m3)	Eau	Réel x eau (m3)	Annuel (m3)	Gallons (gal)	\$/gal	% marché		
	1	0,3	0,7		4	2,8	33,6	38 463	8	2%	
Revenu vermicompost	Total (m3)	Perte (m3)	Réel (m3)	Annuel (m3)	\$/m3	% marché					
	1	0,3	0,7	8,4	12 500	2%					
Frais d'exploitation	Voltage (V)	Courant (A)	Puissance (kW)	Durée (h)	Coût (\$)						
	12	10	0,12	6480	0,0568						
Frais de vente	Contenants	Capacité (gal)	Prix (\$)	Sacs	Prix (\$)	Étiquettes					
	154	5	4,98	80	2	40					

Frais financier	Coûts au t=0 + t=1							
	15 889,65 \$	environ	18 000\$ de prêt à 8% payable sur 5 ans			8%	18 000	5
Tableau de la dette								
	0	1	2	3	4	5		
Dette début	18 000	18 000	14 400	10 800	7 200	3 600		
Capital	0	3600	3600	3600	3600	3600		
Intérêts	0	1440	1152	864	576	288		
Dette fin	18 000	14 400	10 800	7 200	3 600	0		

Appendice H – Coût des matériaux du prototype et d'un design complet

Coût des matériaux du prototype

Matériaux et pièces	Montant (\$)
Coupleur pour moteur	2,00 \$
Bois et autres	37,46 \$
Bois et vis	49,31 \$
Boulons	1,54 \$
Vis	7,92 \$
Sous-total	98,23 \$
Vers de terre	40,00 \$
Convoyeur	100,00 \$
Total	238,23 \$

Coût des matériaux d'un vermicomposteur complet selon le nombre requis

Matériaux et pièces	Montant	Source
Coupleur pour moteur	2,00 \$	Home Depot
Contre-plaqué	86,84 \$	Home Depot
Protecteur sans entretien pour bois	49,31 \$	Rona
Boulons	1,54 \$	Home Depot
Vis	7,92 \$	Home Depot
Vers de terre	20,00 \$	Kijiji
Convoyeur	100,00 \$	Kijiji
Moteur du convoyeur	242,00 \$	Electric Motor Warehouse
Minuteur	7,50 \$	Banggood
Moteur du mixeur	59,99 \$	ServoCity
Rouleaux pour mixeur	129,90 \$	Amazon
Bacs	15,99 \$	Reusable Transport Packaging
Géotextile	75,99 \$	Rona
Polystyrène	165,72 \$	Home Depot
Ajutage	9,98 \$	Home Depot
Tuyau d'arrosage	89,98 \$	Home Depot
Filet de protection	45,95 \$	Dubois Agrinovation
Total	1 110,61 \$	
Taxes (15%)	166,59 \$	
Total pour 11 vermicomposteurs	14 049,22 \$	

Appendice I – Prototype : allure générale



RÉVISIONS				DÉPARTEMENT D'INGÉNIERIE DES BIORESSOURCES CES DESSINS SONT LA PROPRIÉTÉ DU DÉPARTEMENT D'INGÉNIERIE DES BIORESSOURCES DE L'UNIVERSITÉ MCGILL	DESSINÉ PAR	DATE	PROTOTYPE DU		
RÉV	DESCRIPTION	DATE	PAR		VÉRIFIÉ PAR	DATE	VERMICOMPOSTEUR AUTOMATIQUE		
					APPROUVÉ PAR	DATE	NOM DU DESSIN	VERMICOMPOSTEUR.DWG	RÉV
					CONFIDENTIEL	TAILLE DU DESSIN	LÉGAL	ÉCHELLE 1:1	FEUILLE 1 DE 1

Appendice K – Recettes de substrat pour la deuxième phase de tests

Recette de substrat 1



Recette de substrat 2



Recette de substrat 3



Recette de substrat 4

