

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

**Valorisation énergétique du fumier de cheval pailleux :
états des lieux et production de biogaz par digestion
anaérobie**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
VANOSMAEL, Anne-Lise
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique : 2015-2016

Directeur : Prof. Bernard GODDEN
Co-Directrice : Prof. Marie-Françoise GODART

RÉSUMÉ

Cette recherche désire démontrer qu'il existe des solutions de valorisation s'offrant au fumier de cheval devenu excédentaire pour les gestionnaires d'écuries. Et plus particulièrement, que la biométhanisation, appelée également digestion anaérobie, est pleinement envisageable dans la gestion de ce substrat. D'une part, la situation actuelle de la filière équine en Belgique sera abordée ainsi que la réglementation en vigueur relative à la gestion des fumiers. D'autre part, les installations de biogaz en Europe et plus spécifiquement celles en Belgique seront développées ainsi que les démarches nécessaires à la mise en place d'un projet de biométhanisation en Belgique. Cela, dans le but de cerner la situation dans laquelle cette nouvelle méthode de valorisation évolue à l'heure actuelle. Non seulement, les caractéristiques physicochimiques, biochimiques et microbiologiques du fumier de cheval pailleux seront exposées afin de connaître précisément les forces et les faiblesses de ce type de substrat, mais également les méthodes de valorisation qui s'offrent aux propriétaires d'équidés. Les techniques d'épandage, de compostage, de combustion, le recours aux champignonnières et à la biométhanisation seront, ensuite, présentés avec leurs avantages et inconvénients respectifs. Par la suite, la digestion anaérobie sera abordée plus en détail avec ses principales variantes et les facteurs pouvant l'influencer. Les avantages de cette méthode seront également décrits ainsi que la pertinence du fumier de cheval comme substrat pour ce processus biologique. Enfin, cette recherche se terminera par l'analyse d'un cas, à savoir l'unité de biométhanisation située à la Ferté Saint-Aubin en France, qui utilisait en moyenne 60 % de fumier de cheval pour ses intrants. Cette étude de cas permettra de dégager les inconvénients relatifs à la mise en pratique de la biométhanisation du fumier de cheval.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont pu m'aider dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à remercier Bernard GODDEN qui, en tant que Directeur de mémoire, m'a guidé tout au long de mon travail et m'a fourni des remarques constructives pour avancer.

Je remercie aussi Marie-Françoise GODART, ma co-Directrice de mémoire, pour ses conseils et sa bienveillance.

Merci également à Wouter ACHTEN et Michel HUART pour l'attention qu'ils m'ont portée.

Merci à Philippe PERRETTE, fondateur de la société projet *Sologne Biogaz*, et à Michael LEMOINE qui m'ont permis de visiter l'unité de biométhanisation de la Ferté Saint-Aubin en France.

Merci à ma maman, pour le temps qu'elle a consacré à ce mémoire, pour ses remarques averties et surtout pour m'avoir permis d'effectuer mes études universitaires.

Merci à Bernard, d'avoir été un relecteur consciencieux et pour le soutien qu'il m'a apporté durant ces cinq dernières années.

Merci à Céline et à Elsa, mes amies de toujours, pour leurs relectures attentives et leurs conseils judicieux.

Merci à Eya, pour sa présence durant ses deux années de Masters et son soutien quotidien.

Enfin merci à ma famille et à tous mes proches pour leurs encouragements.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I – PROBLÉMATIQUE	4
1.1. Gestion du fumier	4
1.2. Situation de la filière équine	5
1.3. Litières	7
CHAPITRE II – CONTEXTE BELGE	8
2.1. Réglementation	8
2.1.1. <i>Épandage</i>	9
2.1.2. <i>Stockage</i>	10
a. À la ferme	10
b. Au champ	11
c. Location d'infrastructure de stockage	11
2.2. Installations de biométhanisation	11
2.2.1. <i>État actuel</i>	11
2.2.2. <i>Démarches pour un projet de biométhanisation</i>	14
CHAPITRE III – CARACTÉRISATION DU FUMIER DE CHEVAL PAILLEUX.....	16
3.1. Caractéristiques physicochimiques	16
3.1.1. <i>Humidité et teneur en matière sèche</i>	16
3.1.2. <i>potentiel Hydrogène (pH)</i>	17
3.2. Composition biochimique	18
3.2.1. <i>Taux de matière organique</i>	18
3.2.2. <i>Rapport C/N</i>	19
3.2.3. <i>Macroéléments [NPK]</i>	21
a. Azote	21
b. Phosphore	21
c. Potassium	21
d. Concentrations massiques des [NPK]	21
3.2.4. <i>Teneurs en éléments de traces métalliques</i>	23
3.3. Caractéristiques microbiologiques	25
3.4. Autres substances	25

CHAPITRE IV – MÉTHODES DE VALORISATION	26
4.1. Épandage	26
4.1.1. <i>Description générale</i>	26
4.1.2. <i>Utilisation du fumier de cheval pailleux</i>	27
4.2. Compostage	29
4.2.1. <i>Description générale</i>	29
4.2.2. <i>Utilisation du fumier de cheval pailleux</i>	30
4.3. Combustion	32
4.3.1. <i>Description générale</i>	32
4.3.2. <i>Utilisation du fumier de cheval pailleux</i>	33
4.4. Champignonnières	36
4.5. Digestion anaérobie / Méthanisation	36
CHAPITRE V – VALORISATION PAR DIGESTION ANAÉROBIE	38
5.1. Processus de digestion anaérobie	38
5.1.1. <i>Définition générale</i>	38
5.1.2. <i>Processus biochimique</i>	38
a. Hydrolyse.....	39
b. Acidogénèse	39
c. Acétogénèse.....	40
d. Méthanogénèse	40
5.1.3. <i>Principales variantes</i>	40
a. Différenciation selon la teneur en matière sèche	40
b. Différenciation selon la température de réaction	42
c. Différenciation selon les modes d'alimentation et d'extraction	43
5.1.4. <i>Facteurs influençant le processus de digestion anaérobie</i>	43
a. Teneur en oxygène	43
b. Teneur en eau	44
c. potentiel Hydrogène (pH)	44
d. Température	45
5.1.5. <i>Produits finaux</i>	45
a. Composition du biogaz.....	45
b. Composition du digestat.....	45
5.2. Intérêts de la méthode	46
5.2.1. <i>Économiques</i>	46
5.2.2. <i>Agronomiques</i>	47
5.2.3. <i>Environnementaux</i>	48
5.2.4. <i>Autres</i>	49
5.3. Pertinence du fumier de cheval pailleux pour la digestion anaérobie	49
5.3.1. <i>Potentiel méthanogène du substrat</i>	49

5.3.2. Taux de MO du substrat.....	52
5.3.3. Rapport C/N du substrat.....	52
5.3.4. Teneurs en éléments de traces métalliques du substrat.....	52
CHAPITRE VI – ÉTUDE DE CAS : UNITÉ DE MÉTHANISATION SOLOGNE	
BIOGAZ.....	55
6.1. Introduction	55
6.2. Objectifs.....	56
6.3. Contexte.....	56
6.4. Présentations du site d'exploitation.....	58
6.4.1. Fonctionnement général de l'usine.....	59
6.4.2. Intrants.....	59
6.4.3. Digestat valorisé.....	59
6.4.4. Installations et processus	60
6.4.4.1. Réception des intrants.....	60
6.4.4.2. Préparation de la matière à méthaniser	61
6.4.4.3. Méthanisation	63
6.4.4.4. Valorisation du biogaz.....	64
6.4.4.5. Traitement du digestat	64
6.4.4.6. Gestion des odeurs	66
6.4.4.7. Chauffage	66
6.4.4.8. Personnels.....	67
6.5. Impacts des installations.....	67
6.5.1. Nuisances olfactives.....	67
6.5.2. Nuisances sonores.....	68
6.5.3. Risques sanitaires.....	68
6.5.4. Impacts sur le réchauffement climatique	69
6.5.5. Consommation d'eau.....	69
6.6. Limites de l'unité.....	69
6.6.1. En amont	69
6.6.2. Pendant le processus	70
6.6.3. Solutions de Sologne Biogaz.....	70
6.7. Conclusion et perspectives de l'étude de cas.....	71
CONCLUSION.....	73
BIBLIOGRAPHIE.....	75
ANNEXE 1 – Teneurs moyennes en N dans les engrais de ferme par catégories animales (Moniteur Belge, 2014).....	88
ANNEXE 2 – Normes moyennes d'épandage pour l'azote organique sur cultures et prairies (en kg par ha et par an) (Moniteur Belge, 2014)	89

ANNEXE 3 – Normes de production moyenne d’azote par animal pour une année (Moniteur Belge, 2014).....	89
ANNEXE 4 – Installations de biométhanisation de types agricole et industriel en Wallonie en 2012 ; adresse, technologie, capacité du digesteur, quantité et type de substrat utilisés (Mignon, 2012)	91
ANNEXE 5 – Installations de biométhanisation de types agricole et industriel en Wallonie en 2012 ; Quantité de biogaz produit, utilisation du biogaz, quantité de digestat et utilisation du digestat (Mignon, 2012)	93

LISTE DES FIGURES

Fig. 1	Évolution du nombre d'équidés en Belgique de 1960 à 2012	6
Fig. 2	Zone vulnérable en Wallonie depuis le 1er janvier 2013 (Nitrawal, 2014).....	9
Fig. 3	Classement des pays d'Europe par rapport au nombre croissant d'unités produisant du biogaz en 2013 (d'après EBA, 2014 _a)	13
Fig. 4	Représentation simplifiée du processus de digestion anaérobie (d'après Costa <i>et al.</i> , 2013).....	38
Fig. 5	Illustration de fumier de cheval pailleux, prise à Hennuyères (Photo personnelle, 02 novembre 2015).	46
Fig. 6	Valorisation du fumier de cheval pailleux par digestion anaérobie (d'après Costa <i>et al.</i> , 2013).....	46
Fig. 7	Azote organique transformé en NH_4^+ après digestion anaérobie (EDORA & Valbiom, 2012).....	48
Fig. 8	Unité de méthanisation <i>Sologne Biogaz</i> , prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	55
Fig. 9	Schéma général de l'usine (Sologne Biogaz, 2014)	58
Fig. 10	Bâtiment de réception, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	60
Fig. 11	Quai de réception, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	60
Fig. 12	Extérieur du broyeur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	61
Fig. 13	Intérieur du broyeur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	61
Fig. 14	Trémie vue du haut, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	62

Fig. 15	Trémie vue du bas, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	62
Fig. 16	Vis sans fin permettant l'alimentation de la cuve d'hydrolyse, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	62
Fig. 17	Cuve d'hydrolyse, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	63
Fig. 18	Digesteur horizontal, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	63
Fig. 19	Agitateur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	64
Fig. 20	Cuve tampon du digestat brut, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	65
Fig. 21	Cuve de stockage temporaire du digestat liquide, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	65
Fig. 22	Cuve de stockage du digestat liquide, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)	65
Fig. 23	Résumé des opérations dans l'usine <i>Sologne Biogaz</i> (THEMA Environnement, 2014).....	66
Fig. 24	Pièces métalliques retrouvées au cours du processus , prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016).....	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Évolution du nombre d'habitants par équidé et du nombre d'équidés par km ² en Belgique	6
Tableau 2	Teneur en MS du fumier équin pailleux rapportée par diverses études.	17
Tableau 3	pH du fumier équin pailleux rapporté par diverses études.	18
Tableau 4	Rapport C/N du fumier équin pailleux rapporté par diverses études	20
Tableau 5	Concentrations massiques moyennes en N _{tot} , P ₂ O ₅ et K ₂ O par tonne de MS de fumier équin pailleux.....	22
Tableau 6	Concentrations massiques moyennes en N _{tot} , P ₂ O ₅ et K ₂ O par tonne de MB de fumier équin pailleux.....	22
Tableau 7	Teneurs en éléments de traces métalliques dans le fumier équin pailleux rapportées par diverses études.....	24
Tableau 8	Comparaison entre la digestion anaérobie par voie humide et celle par voie sèche (ADEME, 2015 ; France Galop <i>et al.</i> , 2007)	41
Tableau 9	Comparaison entre les digestions anaérobies mésophile et thermophile (ADEME, 2015)	43
Tableau 10	Potentiel méthanogène fumier équin pailleux rapporté par diverses études.	50
Tableau 11	Teneurs en éléments de traces métalliques dans le fumier équin pailleux rapportées par diverses études et valeurs optimales pour la production de biogaz	54

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

As	Arsenic
ATP	Adénosine triphosphate
C/N	Rapport C/N
CBM	Caractérisation biochimique de la matière organique
Cd	Cadmium
CH ₄	Méthane
Co	Cobalt
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
CUMA	Coopérative d'utilisation de matériel agricole
CWATUPE	Code wallon de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire, du patrimoine et de l'énergie
DGO4	Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie
Fe	Fer
GES	Gaz à effet de serre
H ₂	Dihydrogène
H ₂ O	Eau
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
Hg	Mercure
ISB	Indice de stabilité biochimique
ISMO	Indice de stabilité de la matière organique
K	Potassium
K ₂ O	Oxyde de potassium
LCFA	Long chain fatty acids , acides gras à long chaîne
LD	Limite de détection
LS	Taux de liaison au sol
MB	Matière brute
Mn	Manganèse
MO	Matière organique
Mo	Molybdène
MS	Matière sèche
N	Azote
N ₂	Diazote

NA	Not available, non disponible
NH ₃	Ammoniac
NH ₄ ⁺	Ammonium
Ni	Nickel
NIMBY	Not in my back yard
NO _x	Oxyde d'azote
N _{tot}	Azote total
O ₂	Dioxygène
P	Phosphore
P ₂ O ₅	Hémipentoxyde de phosphore
Pb	Plomb
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PGDA	Programme de gestion durable de l'azote
pH	potentiel Hydrogène
S ²⁻	Ion sulfure
Se	Sélénium
SO ₂	Dioxyde de soufre
UE	Union européenne
UE27	Union européenne des vingt-sept
VFA	Volatile fatty acids, acides gras volatils
VS	Volatile solids, solides volatils
Zn	Zinc

LISTE DES UNITÉS

% v/v	Pourcentage volume par volume
°C	Degré celsius
dB	Décibel
kg	Kilogramme
kW	Kilowatt
L	Litre
m	Mètre
MJ	Mégajoule
Mtep	Mégatonne équivalent pétrol
MW _{el}	Megawatt electric
MWh	Mégawatt heure
TJ	Térajoule
TJ/a	Térajoule par are
t _{MB}	Tonne de matière brute
t _{MS}	Tonne de matière sèche

INTRODUCTION

Pour de nombreux élevages et centres équestres, écouler son fumier est un problème (Lundgren and Pettersson, 2009). Du fait de mon expérience dans le monde équestre, j'ai pu me rendre compte des difficultés qui se présentaient aux gestionnaires d'écuries concernant la gestion de leur fumier. Les écuries ne possèdent que très peu de terres où épandre leur fumier et n'ont, généralement, pas le matériel adéquat ni les compétences nécessaires pour effectuer une telle action sur leurs terres. En outre, la majorité des fermiers ne veulent pas prendre le fumier produit par les écuries, car, eux-mêmes, en produisent déjà une trop grande quantité. Il est vrai que les fermiers doivent respecter des quantités précises de fumier pour l'épandage en fonction de la superficie des terres qu'ils possèdent (Moniteur Belge, 2014). Ceux-ci sont, également, réticents en raison des nombreuses formalités qu'engendre la prise en charge du fumier provenant d'une autre exploitation. En outre, la majorité des exploitations d'élevage possède de moins en moins de terre ; désormais, seul un bâtiment suffit. Par ailleurs, le fumier de cheval intéresse rarement les agriculteurs, puisque celui-ci comporterait trop de paille pour un épandage optimal et contiendrait des mauvaises herbes d'avoine. Cela est donc un réel problème pour les centres équestres, qui ne valorisent pas leur fumier et qui le considèrent comme un déchet. De ce fait, la gestion du fumier équin représente généralement un poids.

1

Question de recherche et méthodologie

Ce travail vise à identifier la pertinence de la digestion anaérobie, appelée également (bio)méthanisation, comme méthode de valorisation pour le fumier équin à base de litière de paille. Pour ce faire, il apparaît essentiel de connaître la situation de la filière équine en Belgique. Pourquoi le fumier de cheval est-il devenu excédentaire pour les gestionnaires d'écuries ?

Il fut alors choisi d'étudier la réglementation belge relative à cette problématique. D'abord, afin de vérifier si les législations concernant le stockage et la manutention des engrais de ferme étaient contraignantes envers les propriétaires de chevaux. Ensuite, pour évaluer si celle-ci pouvait être une des causes de l'existence d'un excédent de fumier équin. Il apparut, également, nécessaire d'exposer la situation actuelle de la filière de biométhanisation en Europe et, plus précisément, en Belgique. Identifier les démarches

requis pour qu'un gestionnaire d'écurie réalise un tel projet en Belgique semblait, également, essentiel.

D'autre part, connaître la composition du fumier équin semblait être primordial. Quelles étaient les caractéristiques techniques de celui-ci ? Qu'en est-il de la diversification des litières, influençaient-elles les proportions des différentes substances dans le fumier ?

Par ailleurs, il fut évident qu'il fallait étudier les différentes méthodes se prêtant à la valorisation du fumier équin. Il était, également, important de se demander si celles-ci étaient favorables à l'utilisation de fumier équin pailleux ? Plus spécifiquement, la filière de valorisation par digestion anaérobie semble faire l'objet d'une attention particulière à l'heure actuelle. Cette méthode relativement moderne semble prometteuse et méritait un approfondissement particulier dans ce mémoire. Fondé sur un manque d'informations à son sujet, il était cependant nécessaire de dégager les avantages et les inconvénients de cette méthode. En outre, était-il possible d'influencer le processus de digestion anaérobie et de quelle manière ? L'utilisation du fumier de cheval était-elle pertinente ? Quelles étaient les forces et les faiblesses liées à ce type d'intrant ? Celui-ci pouvait-il être utilisé seul ou fallait-il le mélanger à d'autres substances ? Dès lors, quelles limites présentaient cette méthode ?

Sur cette base, il fallait encore déterminer un cas d'étude et en particulier, un cas d'utilisation du fumier de cheval pailleux en digestion anaérobie. Après une première phase d'exploration du sujet, et même quelques aléas liés à la confidentialité des installations due au risque de concurrence et à l'abandon de la construction d'autres unités, il fut décidé d'étudier l'usine de *Sologne Biogaz* située à La Ferté Saint-Aubin en France, région où le nombre de centres équestres est important.

Au final, il s'ensuit une question de recherche relativement concrète, répondant bien à l'ensemble de ces préoccupations : « La digestion anaérobie est-elle une méthode de valorisation du fumier équin pailleux pleinement envisageable pour les propriétaires de chevaux et quelles autres possibilités s'offrent à la gestion de ce substrat ? ». Plus généralement, ce mémoire tentera de cerner un moyen d'utiliser le fumier de cheval pailleux devenu excédentaire pour les propriétaires de chevaux. En outre, ce mémoire se veut interdisciplinaire ; il tente de développer un sujet traitant de la gestion de l'environnement englobant les points de vue législatif, écologique et de mise en pratique.

La méthodologie employée pour répondre à cette question a commencé par une revue de la littérature, principalement basée sur des articles scientifiques, dans le but de regrouper des informations sur le fumier de cheval et ses techniques de valorisation. La

recherche de l'étude de cas a permis de se rendre compte du manque d'intérêt que la filière de valorisation par méthanisation porte au fumier équin. La visite d'une unité de biométhanisation a permis d'observer la mise en œuvre réelle de cette méthode et de discuter avec des personnes travaillant dans ce domaine. De fait, certaines limites de la mise en pratique d'une telle technique de valorisation ont pu être dégagées.

Structure du travail

Ce travail est composé de six chapitres. Un premier chapitre sera consacré à l'étude de la situation Belge de la filière équine, dans le but de placer le contexte de la problématique que pose la gestion du fumier équin à base de paille. Le second chapitre décrira la réglementation relative à ce sujet ainsi que la situation des installations de biométhanisation en Europe et en Belgique ainsi que les démarches nécessaires à l'élaboration d'un projet de méthanisation. Ce chapitre permettra de comprendre le cadre juridique correspondant à la problématique. Un troisième chapitre reprendra un ensemble de caractéristiques physicochimiques, biochimiques et microbiologiques du fumier de cheval pailleux. Le chapitre IV s'intéressera aux filières de valorisation de ce dernier et le chapitre V, plus particulièrement, au procédé impliquant la digestion anaérobie. Enfin, le chapitre VI se penchera sur une étude de cas d'une unité de biométhanisation en France où le fumier équin pailleux occupe une place cruciale.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire, en tirant parti de toutes les informations collectées au travers d'études scientifiques et des leçons apprises de la mise en pratique du procédé de digestion anaérobie du fumier équin pailleux.

CHAPITRE I – PROBLÉMATIQUE

1.1. Gestion du fumier

La gestion du fumier est un problème pour de nombreux élevages et centres équestres. Pourtant, le fumier équin pourrait être utilisé comme fertilisant sur les terres arables voisines à l'écurie (Lundgren and Pettersson, 2009). Toutefois, il est important de noter que, les matières organiques mal gérées ont été, pendant longtemps, des polluants majeurs des milieux aquatiques. Leurs sources étaient diverses ; ordures ménagères, sources industrielles et sources agricoles (engrais). Les déjections animales ruissellent et s'évacuent dans les cours d'eau et les nappes phréatiques entraînant, ainsi, une source de pollution pour l'eau (Khan and Mohammad, 2014). Les matières organiques que constituent les déjections animales, vont être facilement biodégradées. Cependant, lorsqu'elles sont en trop grandes quantités, leur décomposition peut entraîner l'asphyxie de la faune aquatique (Krouk *et al.*, 2010). L'utilisation d'engrais doit, donc, être effectuée de manière raisonnée et calculée en fonction des besoins du sol.

Dans les zones urbaines, par exemple, le fumier des écuries est souvent envoyé à l'élimination de déchets ou dans des installations de combustion (Liljenstople, 2009). Dans de nombreux cas, l'utilisation du fumier comme fertilisant sur les terres arables nécessite de longs transports de grandes quantités de fumier représentant un coût important que de nombreux propriétaires de chevaux ne peuvent pas se permettre. En effet, beaucoup d'écuries utilisent de la paille comme litière mais selon Airaksinen *et al.* (2001), le volume annuel de fumier à base de paille représenterait deux fois le volume annuel de fumier à base d'autres matériaux de litière. En outre, les agriculteurs céréaliers hésitent souvent à accepter le fumier de cheval, puisque ce dernier pourrait contenir des mauvaises herbes d'avoine, provenant de la nourriture des chevaux, forçant les agriculteurs à sarcler manuellement leurs champs. Par ailleurs, les surfaces épandables de ces derniers sont souvent limitées et le fumier de cheval très pailleux est un produit peu adapté à l'épandage (Lundgren and Pettersson, 2009).

Lorsque la quantité de fumier est trop importante, le gestionnaire d'écurie peut décider de se débarrasser de la matière organique d'une quelconque manière, combler un trou par exemple, alors que celle-ci pourrait être utilisée autrement. Afin de développer une industrie du cheval écologiquement viable, cette problématique reste à résoudre (Liljenstople, 2009). Le fumier équin peut être utilisé pour la fabrication de compost

(Romano *et al.*, 2006), pour une production de chaleur par combustion (Lundgren and Pettersson, 2009) ou pour un processus de méthanisation (Kusch *et al.*, 2008). Le processus de méthanisation, également appelé digestion anaérobie, met à profit la dégradation anaérobie microbienne. Cette dégradation se produit naturellement dans l'intestin de la plupart des animaux, y compris dans celui des humains. La digestion anaérobie est un processus qui se déroule en l'absence d'oxygène, où des bactéries décomposent un substrat donné en méthane (CH₄) et en dioxyde de carbone (CO₂) (McKennedy and Sherlock, 2015). Si les processus de méthanisation sont mis en œuvre dans des digesteurs, le méthane peut être utilisé pour le chauffage et/ou pour la production d'électricité. Dans le cas où le fumier équin serait valorisé par digestion anaérobie, il pourrait être utilisé en tant que substrat unique dans une unité de méthanisation à l'écurie même, ou être utilisé à l'échelle régionale avec d'autres matières premières (Ahring, 2003). Ces processus de valorisation de la biomasse semblent constituer de bonnes opportunités écologiques et économiques. En effet, le contenu énergétique du volume annuel de fumier produit par une écurie de taille moyenne pourrait facilement couvrir son chauffage et sa demande en eau chaude pour plus d'un an. De ce fait, cela diminuerait les coûts énergétiques, mais également le volume de fumier à stocker (Lundgren and Pettersson, 2009). Les méthodes de valorisation du fumier de cheval pailleux seront développées plus en détail dans le chapitre IV.

1.2. Situation de la filière équine

L'industrie équine est économiquement importante pour beaucoup de pays du monde. Le nombre total de chevaux au sein de l'Union Européenne est estimé à plus de cinq millions. L'équidé représente aujourd'hui une activité de loisir ou sportive, un mode de vie, un compagnon de travail mais également de la nourriture (Liljenstople, 2009)

Comme le montrent plusieurs études, concertées dans le cadre de ce mémoire, le nombre d'équidés en Belgique a augmenté considérablement durant ces dernières années. Un graphique reprenant les résultats de ces études (Fig.1) dévoile qu'en 1960, le nombre total d'équidés en Belgique était estimé à 171 217 dont 169 745 étaient des chevaux (FAO, 1967). Pour l'année 2007, une étude recensait 300 000 équidés pour la Belgique (Liljenstople, 2009) et, pour l'année 2012, une autre étude estimait ce nombre à 350 000 (CEC *et al.*, 2010). La Belgique posséderait la plus forte concentration mondiale d'équidés (CEC *et al.*, 2010).

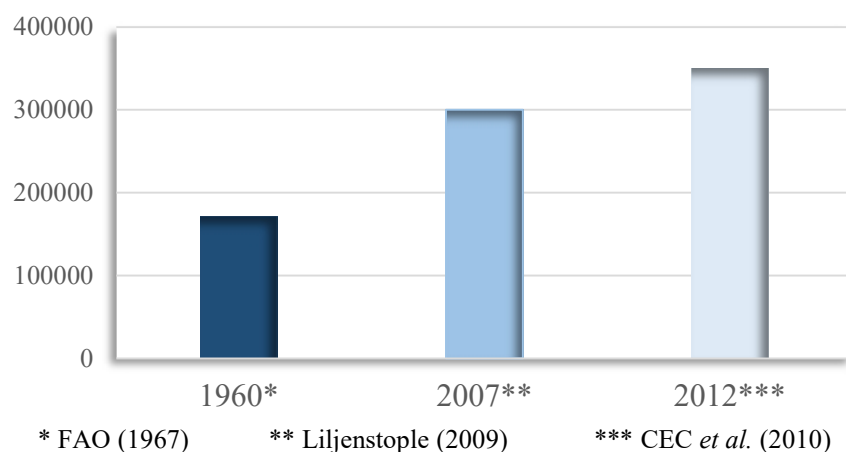


Fig. 1. Évolution du nombre d'équidés en Belgique de 1960 à 2012.

Le nombre d'habitants par équidé a, ainsi, nettement diminué entre les années 1960 et 2012 (Tableau 1). En effet, le nombre d'habitants belges par équidé est passé de 54, en 1960, à 32 estimés pour 2012. Concernant le nombre d'équidés par km², ce dernier est passé de 5, en 1960, à 11 estimés pour 2012 (Tableau 1). Les équidés ont ainsi pris une importance économique et sociale en Belgique.

Tableau 1. Évolution du nombre d'habitants par équidé et du nombre d'équidés par km² en Belgique

	Nombre d'équidés	Nombre d'habitants	Nombre d'habitants/équidé	Superficie de la Belgique	Nombre d'équidés /km ²
1960	171 217	9 153 489	~54 habitants	30 528 km ²	~5 équidés/km ²
2007	300 000	10 584 534	~36 habitants		~9 équidés/km ²
2012	350 000	11 035 948	~32 habitants		~ 11 équidés/km ²

Le nombre total de chevaux et poneys de selle, que les ménages Belges possédaient en 2009, s'élevait à 138 139, représentant ainsi plus de 39 % du nombre total d'équidés recensés cette année-là. Ce nombre n'inclut pas les chevaux de trait, ni les chevaux des manèges. La proportion des ménages belges possédant au moins un cheval s'élevait alors à 3 % du nombre total de ménages belges ; le nombre moyen de chevaux détenu par ces ménages s'élèverait à 1,87 (Gouvernement Fédéral Belge, 2009). En comparant ces chiffres à ceux de l'année 2008, une augmentation importante peut être observée ; le nombre de chevaux et poneys de selle possédés par les ménages en Belgique cette année-

là étant estimés à 123 592. En effet, cela représente un accroissement de plus de 14 500 chevaux et poneys de selle en une seule année (Gouvernement Fédéral Belge, 2008). Qui dit augmentation d'équidés dit augmentation de la production de fumier équin. La production annuelle de fumier semble, ainsi, représenter plusieurs milliers de tonnes pour le pays (Wartell *et al.*, 2012).

1.3. Litières

Les litières utilisées dans les boxes et stabulations dépendent de différentes variables. En effet, la qualité de l'air de l'écurie, le volume et la qualité du fumier peuvent être améliorés en choisissant une litière adaptée. La litière optimale ne doit pas causer des problèmes d'hygiène dans l'écurie, doit absorber l'ammoniac, être économique dans son utilisation, sans effet négatif pour l'environnement et représenter un lit confortable pour l'équidé. La paille de blé, la sciure, les copeaux de bois, le lin et les pellets sont les plus répandues, mais la tourbe, le chanvre, et des journaux déchiquetés sont également utilisés. Des mélanges de copeaux de bois/tourbe, tourbe/sciure et tourbe/paille peuvent également être retrouvés (Airaksinen *et al.*, 2001). D'après l'étude d'Airaksinen *et al.* (2001), la tourbe et les mélanges de tourbe ont une meilleure qualité d'absorption de l'ammoniac, de rétention d'eau et de valeur de fertilisation pour le fumier produit. Le nombre de champignons et de bactéries sont en plus faible quantité dans les journaux déchiquetés et dans les matériaux de bois que dans la paille, le lin, le chanvre ou encore la tourbe (Airaksinen *et al.*, 2001).

La paille de blé est largement présente dans les écuries à la vue de son faible coût d'achat. Les copeaux de bois, le lin et les pellets, remplaçant la paille, sont généralement utilisés pour rendre plus facile l'entretien quotidien de la litière, mais également pour des raisons d'allergies. En effet, la paille peut contenir davantage de poussières respirables que dans les copeaux de bois par exemple (Airaksinen *et al.*, 2001). En outre, ces litières peuvent également éviter des problèmes de coliques, phénomène fréquent chez les équidés entraînant la mort dans le pire des cas.

De nombreuses litières sont donc utilisées à l'heure actuelle. Le fumier équin peut, ainsi, être très différent d'une écurie à l'autre.

CHAPITRE II – CONTEXTE BELGE

2.1. Réglementation

Le stockage et la manutention des engrais de ferme sont soumis à différentes règles d'après les législations européenne et nationale. En effet, de nombreux composants du fumier peuvent être perdus par ruissellement et peuvent, ainsi, atteindre facilement les cours d'eau. L'agriculture dans l'Union Européenne semble être responsable de 40 à 80% de l'azote (N) entrant dans les eaux de surface. Concernant le phosphore (P), 20 à 40% de celui-ci entrant dans les eaux de surface proviendrait de l'agriculture (OCDE, 2001).

La Directive Nitrates de 1991 (Directive 91/676/CEE) est l'une des premières formes de législation européenne visant à contrôler et améliorer la qualité de l'eau. En effet, celle-ci concerne la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (European Union, 2010).

La Directive Nitrates est un précurseur de la Directive Cadre sur l'Eau de 2000 (2000/60/CE) (JOCE, 2000). Cette dernière vise à minimiser l'excédent d'azote et de phosphore, perdus par l'agriculture, pour le milieu aquatique. Les éléments nutritifs dans les engrais favorisent la croissance des plantes, mais l'application au-delà de l'exigence de la plante peut provoquer des externalités environnementales négatives comme l'eutrophisation par exemple (Buckley, 2012).

La Directive Nitrate exige que chaque État membre introduise un programme de mesures dans les zones vulnérables à ce problème. Le programme de mesures de la Directive Nitrate a été mis en œuvre en Wallonie, le 10 octobre 2002, au travers du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA), dont le troisième programme d'actions est d'application depuis le 15 juin 2014. La Directive Nitrate prévoit une révision du PGDA tous les 4 ans (European Union, 2010 ; Moniteur Belge, 2014 ; Nitrawal, 2014).

Il faut savoir qu'en Wallonie, 9 % des prises d'eau souterraine échantillonnées durant la période 2008-2011 dépassaient la norme de potabilité de l'OMS fixée à 50 mg NO_3^-/L (Nitrawal, 2014).

La Directive Nitrate impose une limitation des apports d'azote organique et minéral et la délimitation de zones vulnérables. Ces dernières sont des zones qui alimentent les eaux souterraines et de surface qui contiennent ou risquent de contenir, une

concentration en nitrates supérieure à 50 mg/L si des mesures adéquates ne sont pas prises. La zone vulnérable en Wallonie (Fig. 2), qui représente plus de 60 % de la surface agricole utilisée dans ce territoire, a été délimitée afin de protéger les eaux souterraines et les eaux de la Mer du Nord des effets résultant d'une mauvaise gestion de l'azote (Godden, 2014-2015 ; Nitrawal, 2014).



Fig. 2. Zone vulnérable en Wallonie depuis le 1er janvier 2013 (Nitrawal, 2014)

2.1.1. Épandage

Le PGDA impose que chaque exploitation dispose de superficies en suffisance pour épandre les fertilisants organiques sans dommage pour l'environnement. Toute exploitation doit respecter un taux de liaison au sol (LS) inférieur à l'unité. Ce taux de liaison au sol représente le rapport entre l'azote organique à épandre disponible et l'azote qui peut être valorisé sur l'exploitation (capacité d'épandage) (Moniteur Belge, 2014). Afin de calculer ce taux, l'équation (1) peut être utilisée.

$$\text{Taux de liaison au sol (LS)} = \frac{N_{\text{organique produit}} + N_{\text{organique importé}} - N_{\text{organique exporté}}}{N_{\text{organique épandable}}} \quad (1)$$

Avec $N_{organique\ produit}$ = Azote organique produit par les animaux

= [Nombre annuel d'animaux répertoriés dans le système informatique d'identification et d'enregistrement du cheptel (SANITEL) ou nombre annuel de places] × teneur moyenne en azote de l'engrais (à savoir 8,2 kg d'azote par tonne pour le fumier équin) (cf. annexe 1)

$N_{organique\ importé}$ = Azote organique des engrais de ferme importés.

= Quantité importée (tonne) × teneur moyenne en azote de l'engrais importé (cf. annexe 1)

$N_{organique\ exporté}$ = Azote organique des engrais de ferme exportés

= Quantité exportée (tonne) × teneur moyenne en azote de l'engrais exporté (cf. annexe 1)

10

$N_{organique\ épandable}$ = Quantité d'azote organique épandable ou la capacité d'épandage

= Nombre d'hectares de cultures et de prairies repris dans la déclaration de superficie × normes moyennes d'épandage (en kg par ha et par an) (cf. annexe 2)

Il est également possible de calculer la production moyenne d'azote par animal (cf. annexe 3).

2.1.2. Stockage

Les exploitants peuvent avoir différents systèmes de stockage du fumier ; à la ferme, au champ et en infrastructures de stockage en location. La réglementation relative à ces formes présente diverses caractéristiques décrites ci-dessous.

a. À la ferme

Une aire bétonnée et étanche d'une capacité de stockage minimale de trois mois est requise pour les engrais solides. Celle-ci doit être accompagnée d'un système de récolte des jus d'écoulement. Le jus d'écoulement doit être, à son tour, stocké dans des cuves d'une capacité de stockage de minimum six mois, qui soient étanches et sans trop-plein.

Concernant, des fientes humides (taux de matière sèche < 35%), l'aire de stockage se doit être couverte (Moniteur Belge, 2014).

b. Au champ

Concernant le stockage des fumiers, fientes et des composts au champ, celui-ci reste autorisé pour autant que certaines conditions, citées ci-dessous, soient respectées (Moniteur Belge, 2014).

- Le tas doit être installé à plus de 20 mètres d'un égout, d'une eau de surface ou d'un puits,
- Le tas ne doit pas être disposé dans un point bas du relief, dans une zone inondable ou sur une pente supérieure à 10 %,
- Le tas doit être déplacé de minimum 10 mètres chaque année,
- Les fientes de volailles doivent présenter une teneur en matière sèche supérieure à 55 % et que leur stockage n'excède pas 1 mois,
- Les fumiers doivent être secs et leur stockage ne doit pas excéder 10 mois.

L'emplacement et la date de stockage au champ doivent être repris, chaque année, dans un cahier d'enregistrement tenu à la ferme (Moniteur Belge, 2014).

11

c. Location d'infrastructure de stockage

La location d'une infrastructure de stockage chez un tiers est possible, avec l'aval de l'administration, pour autant qu'elle soit située dans un rayon de 10 km du « lieu de résidence » des animaux. Les caractéristiques réglementaires du stockage restent les mêmes qu'à la ferme (Moniteur Belge, 2014).

Dans le cas où l'infrastructure de stockage se situerait à plus de 10 km, un document de suivi devra être communiqué à l'administration préalablement par voie électronique ou par fax deux jours ouvrables avant chaque transfert (Moniteur Belge, 2014).

2.2. Installations de biométhanisation

2.2.1. *État actuel*

Comme décrit brièvement dans le chapitre I, le processus de (bio)méthanisation peut être une méthode de valorisation pour les fumiers. Celle-ci met à profit la dégradation anaérobie microbienne et permet une production de biogaz et de digestat. Le biogaz peut,

entre autres, être utilisé pour le chauffage et/ou pour une production d'électricité (McKennedy and Sherlock, 2015). Concernant le digestat, chaque membre de l'Union Européenne possède sa propre législation au sujet de son utilisation. En Belgique, une base légale existe, mais rien n'est totalement défini. Le digestat est considéré, dans la loi, comme un agent d'enrichissement agricole et peut être épandu sur le sol. La directive Nitrate 91/676/CE définit les règles à suivre en matière de gestion durable de l'azote, aujourd'hui transposées au PGDA (Mignon, 2009).

D'après EBA (2014_a), la quantité d'énergie électrique et d'énergie thermique produites à partir de biogaz en Europe correspondrait à la consommation annuelle des ménages de Belgique et de Slovénie mis ensemble. Une telle production pourrait remplacer quinze centrales au charbon avec une capacité moyenne de 500 MWe (Megawatt electric).

En 2013, il y avait déjà plus de 14 500 installations de biogaz en Europe (Fig. 3), majoritairement implantées en Allemagne et en Italie. Concernant la Belgique, celle-ci comptait, en 2013, 181 installations de biométhanisation, principalement de type agricole (EBA, 2014_a). L'annexe 4 et 5 reprennent la liste des installations de biométhanisation de types agricole et industriel présentes en Wallonie en 2012 ; adresse, technologie, capacité du digesteur, quantité et type de substrat utilisés pour l'annexe 4 et quantité de biogaz produit, utilisation du biogaz, quantité de digestat et utilisation du digestat pour l'annexe 5.

De nouvelles unités de biométhanisation ou projets d'unité voient le jour chaque année. À la fin 2014, l'Europe comptait 17 240 installations de biogaz soit une augmentation de près de 19 % par rapport à l'année 2013. Cet accroissement est principalement dû aux taux de croissance qui a augmenté de manière importante dans certains pays, comme au Royaume-Uni, où le nombre d'installations de biogaz a doublé en un an (EBA, 2015). Concernant la Belgique, cinq nouvelles installations ont vu le jour en 2014 (Evlard and Heneffe, 2015_a).

Cependant, une stagnation est observée chez certains des plus grands contributeurs de biogaz, comme l'Allemagne et l'Italie. De plus, les prévisions ne sont pas brillantes pour le reste de l'Europe. Néanmoins, il serait important d'avoir une croissance continue de la production d'énergie à base de biogaz sur l'ensemble du continent européen, d'autant que cela est extrêmement important pour la sécurité et la décarbonisation de l'énergie de l'Europe (EBA, 2014_b ; Stambasky, 2015).

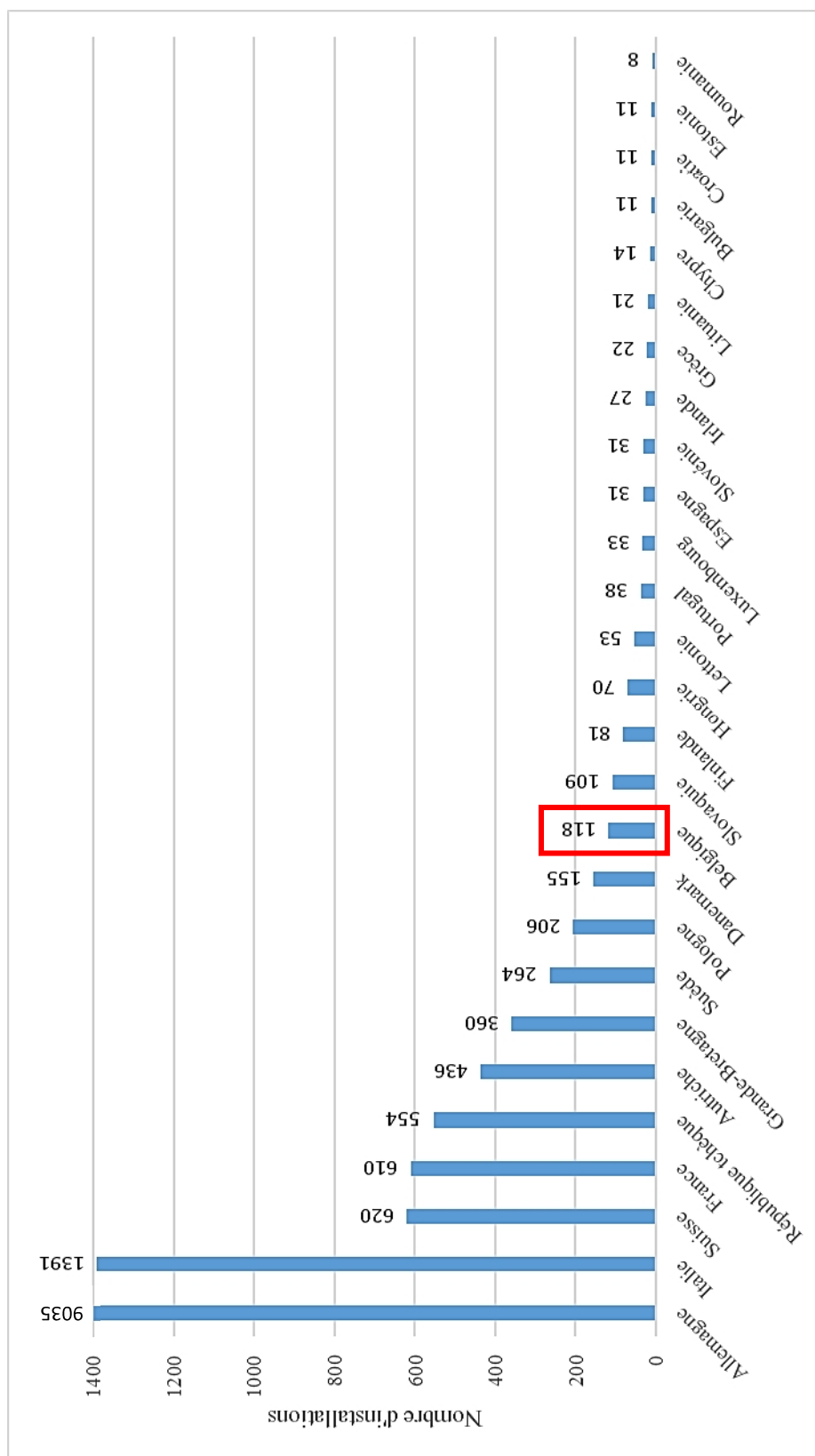


Fig. 3. Classement des pays d'Europe par rapport au nombre croissant d'unités produisant du biogaz en 2013 (d'après EBA, 2014.)

2.2.2. Démarches pour un projet de biométhanisation

En 2014, la Belgique recensait cinq nouvelles installations de biométhanisation (Evlard and Heneffe, 2015_a). Afin de réaliser au mieux l'installation d'une unité de biométhanisation au sein d'une exploitation, plusieurs démarches devraient être effectuées avant de démarrer le projet.

Tout d'abord, il faut procéder à un état des lieux. En effet, il est important de déterminer, au préalable, les besoins énergétiques de l'exploitation. De sorte qu'après avoir analysé les quantités de matières disponibles pour le processus de méthanisation, il soit possible de réaliser un bilan économique de l'installation de l'unité. Il est, également, impératif de veiller à la conformité de la zone sur le plan de secteur pour vérifier si celle-ci autorise l'implantation d'une unité de biométhanisation (Evlard and Heneffe, 2015_b ; Evlard and Heneffe, 2015_c). Pour ce faire, la DGO4 met à disposition du public des informations à titre indicatif sur un site internet disponible à l'adresse suivante ;

http://spw.wallonie.be/dgo4/site_thema/index.php?thema=modif_ps

Dans un second temps, bien que celle-ci ne soit pas obligatoire, une étude de pertinence peut être effectuée. Celle-ci déterminera si le projet est pertinent et permet, également, de quantifier les besoins énergétiques et les ressources de l'exploitation. Pour ce faire, il faut contacter un Facilitateur Bioénergies. En effet, ce dernier est « *chargé par la Wallonie de conseiller les acteurs de la filière et de les aider dans le développement de projets dans ce domaine* ». Cette étude de pertinence sera réalisée gratuitement par le Facilitateur (Evlard and Heneffe, 2015_b ; Evlard and Heneffe, 2015_c).

Si cette étude avait révélé que le projet était pertinent, une étude de faisabilité a, ensuite, besoin d'être effectuée par un bureau d'études. Celle-ci permettra de dimensionner l'unité de méthanisation, de préparer la demande du permis d'environnement mais également d'élaborer un plan financier (Evlard and Heneffe, 2015_b ; Evlard and Heneffe, 2015_c). En Wallonie, tous les « *établissements* » nécessitent au préalable l'obtention d'un permis d'environnement pour pouvoir être exploités, car ils peuvent engendrer des impacts sur la santé humaine et sur l'environnement. La notion d'« *établissement* » reprend les activités et les installations de production, de service, de fabrication, de recherche et développement, de transport, de divertissement, etc.

Les installations et les activités sont réparties en trois classes (établies en fonction de l'ampleur des effets attendus ou observés sur l'environnement) (S.P.W., [s.d.]_a) ;

- Classe 1 = impact le plus lourd, pour les activités ayant le plus d'impact sur la santé et l'environnement,
- Classe 2 = impacts moyens, pour les activités intermédiaires,
- Classe 3 = impacts légers, pour les activités les moins polluantes.

Un permis d'environnement va être requis pour les installations de classes 1 et 2, tandis que les installations de classe 3 ne requièrent qu'une déclaration (Evlard and Heneffe, 2015_c).

Pour la construction ou la transformation d'un bâtiment, des modifications paysagères, la création d'un dépôt, la pose d'une enseigne, un permis d'urbanisme est requis (régi par le CWATUPE). Le permis d'environnement pourra intégrer ces demandes spécifiques et deviendra un permis unique (Evlard and Heneffe, 2015_c ; S.P.W., [s.d.]_a).

Concernant la biométhanisation, deux rubriques existent dans laquelle l'installation ou l'activité est répertoriée (Evlard and Heneffe, 2015_c ; S.P.W., [s.d.]_a) ;

- La *rubrique 40.40.10*, pour les installations de biométhanisation de biomatières (=intrants) ne constituant pas un déchet,
- La *rubrique 90.23.15*, pour les installations de biométhanisation de biomatières (=intrants) constituant un déchet. Les informations relatives aux installations de biométhanisation visées par cette rubrique sont reprises sur ce document.

Le déchet est défini, par le Décret relatif aux déchets du 27 juin 1996, comme étant « *toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* » (S.P.W., [s.d.]_b). Les intrants ne sont pas qualifiés de « déchets » s'ils sont traités par biométhanisation sur le site de leur production, conformément au permis d'exploiter. Dans le cas où les biomatières quitteraient matériellement l'exploitation où elles ont été produites, en vue d'être traitées par biométhanisation dans une autre exploitation, ces intrants sont considérés comme déchets car il y a l'intention de s'en défaire (Evlard and Heneffe, 2015_c).

CHAPITRE III – CARACTÉRISATION DU FUMIER DE CHEVAL PAILLEUX

3.1. Caractéristiques physicochimiques

3.1.1. Humidité et teneur en matière sèche

Lors d'une première campagne d'analyse, l'étude de Pouech (2009) a analysé six fumiers de cheval prélevés dans différents sites en France ; quatre d'entre eux étaient composés de litière de paille (fumier n°2, 3, 5 et 6) et deux de copeaux de bois (fumier n°1 et 4). Il est apparu que les quatre fumiers équins pailleux analysés avaient respectivement des teneurs en humidité de 71,90 %_{Matière Brute (MB)}, 56,60 %_{MB}, 16,80 %_{MB} et 70,40 %_{MB}, soit une valeur moyenne de 53,90 %_{MB}. Cette notion d'humidité peut, également, être traitée via la teneur en Matière Sèche (MS). Dans le cas présent, ces quatre fumiers avaient une teneur moyenne en MS de 46,14 %_{MB}. Il est à noter que la teneur en humidité du fumier n°5 est bien inférieure aux valeurs des autres fumiers ; cela pourrait s'expliquer par l'origine de ce fumier. En effet, le fumier n°5 est issu d'un hippodrome ; lieu où se déroulent des courses hippiques (Pouech, 2009). Généralement, dans ce type de lieu, les chevaux restent pendant une faible durée dans leur boxe ; ils ne restent que le temps d'une journée de courses. Dans la majorité des cas, les boxes sont vidés toutes les 24 heures et le fumier est, donc, beaucoup moins souillé que dans la plupart des centres équestres où les boxes sont vidés en moyenne de deux à quatre fois par mois (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015).

Les valeurs rapportées par Pouech (2009) semblent être corroborées par l'étude d'Airaksinen *et al.* (2001), où la teneur en MS était de 36,80 %_{MB} et par celle de Mönch-Tegeder *et al.* (2013), où la teneur moyenne en MS était de l'ordre de 44,29 %_{MB}. Dans l'étude réalisée par RITTMO Agroenvironnement (2014), le fumier de cheval pailleux avait une teneur en MS relativement élevée de 79,70 %_{MB} par rapport à celles citées précédemment. Cette tendance se retrouve également chez Doligez and Leveau (2007), avec un pourcentage en MS de 66,40 %_{MB}. Ces valeurs sont reprises dans le Tableau 2.

Tableau 2. Teneur en MS du fumier équin pailleux rapportée par diverses études.

	Teneur _{moyenne} en MS (% _{MB})
Airaksinen <i>et al.</i> (2001)	36,80
Doligez and Leveau (2007)	66,40
Mönch-Tegeder <i>et al.</i> (2013)	44,29
Pouech (2009)	46,14
RITTMO Agroenvironnement (2014)	79,70

En 2001, Airaksinen *et al.* ont étudié la qualité de différents matériaux de litières pour chevaux. Les résultats de cette étude ont montré que $69,7 \pm 10,01$ L de paille étaient nécessaires pour retenir 10 L d'eau et $31,9 \pm 3,72$ L de copeaux de bois étaient nécessaires à la rétention de cette même quantité d'eau. Les copeaux de bois semblent donc mieux retenir l'eau, il est ainsi normal que les fumiers à base de ce type de litière aient une plus grande proportion d'humidité. Airaksinen *et al.* (2001) ont également analysé d'autres litières, la sciure semble être celle qui retient une même quantité d'eau avec un volume moindre. Cependant, il est important de préciser que la paille est une litière très aérée en comparaison à des litières de copeaux de bois ou à de la sciure qui forment, plutôt, un lit dense pour les équidés ; un volume de paille plus important est donc nécessaire. Ces résultats semblent être confirmés par l'étude de Pouech, 2009, où en comparaison aux fumiers à base de litière de paille, les fumiers à base de copeaux de bois contenaient 37,9 %_{MB} et 26,2 %_{MB} de MS, soit une moyenne de 32,05 %_{MB}. Les fumiers contenant des copeaux de bois semblaient, donc, relativement plus humides que ceux qui sont à base de paille.

Les teneurs en MS des fumiers équins vont, donc, inévitablement dépendre du type d'activité effectuée à l'écurie et du type de litière utilisée.

3.1.2. *potentiel Hydrogène (pH)*

Le pH est le logarithme négatif, à la base 10, de la concentration molaire volumique des H^+ . Sa valeur se situe entre 0 et 14, avec un milieu acide à un pH inférieur à 7 et un milieu basique à un pH supérieur à 7.

D'après Doligez and Leveau (2007), le pH moyen du fumier de cheval pailleux (sur huit échantillons) est de 7,6. Cette valeur semble être corroborée par l'étude de Pouech (2009) où le pH moyen sur quatre échantillons était de 7,22. Tandis que le fumier analysé par RITTMO Agroenvironnement (2014) montre un pH de 8,4 ; celui-ci semble être faiblement plus basique que les deux résultats précédents. En outre, l'étude de Smith and Almquist (2014) montre un pH de 6,6. D'après ces données, reprises dans le Tableau 3, le pH du fumier de cheval pailleux peut être compris entre 6,6 et 8,4 ; il reste, malgré tout, proche de la neutralité.

Tableau 3. pH du fumier équin pailleux rapporté par diverses études.

	pH moyen
Doligez and Leveau (2007)	7,6
Pouech (2009)	7,22
RITTMO Agroenvironnement (2014)	8,4
Smith and Almquist (2014)	6,6

3.2. Composition biochimique

3.2.1. Taux de matière organique

Cet indicateur représente la teneur en Matière Organique (MO) d'un produit, celle-ci permet de comparer différentes sources de matière organique. Il est important de noter que ce taux de MO est uniquement un indicateur de quantité. Aucune information sur l'évolution du produit dans le sol ni sur sa capacité à donner de l'humus ne peut être déduite à partir de cet indicateur (Cahurel, 2012).

D'après Pouech, 2009, les quatre fumiers équins pailleux analysés ont respectivement des teneurs en MO de 86,3 %_{MS}, 75,3 %_{MS}, 92,8 %_{MS}, 80,4 %_{MS}, soit une valeur moyenne de 83,7 %_{MS} de MO contre 53,6 %_{MS} pour les fumiers à base de copeaux de bois (Pouech, 2009). Les teneurs en MO rapportées dans l'étude réalisée par RITTMO Agroenvironnement (2014) sont du même ordre de grandeur ; 79,4 %_{MS}, soit 63,3 %_{MB}. Les analyses agronomiques de Doligez and Leveau (2007) ont montré qu'après plus de deux mois de stockage, le fumier perdrait de sa teneur en MO. Ces résultats montrent qu'après le stockage et par rapport à du fumier frais, des pertes de composants digestibles ont lieu (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

3.2.2. Rapport C/N

Le rapport C/N (ratio carbone/azote) est l'un des indices de la qualité des fertilisants (Cahurel, 2012). Il permet d'estimer globalement la rapidité de minéralisation de l'azote des fumiers. Plus le rapport C/N est élevé, moins l'azote est rapidement disponible (Weill and Duval, 2009). Cependant, il est important de noter que ce critère de qualité présente certaines limites. En effet, deux produits ayant le même C/N peuvent avoir des actions différentes sur l'évolution de la teneur en MO. C'est le cas, de l'humus et des fientes de volailles avec un rapport C/N de 10 mais qui n'ont pas la même vitesse d'action. D'autres informations doivent venir compléter ce ratio comme le type et les proportions des constituants par exemple (Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon, 2012).

Concernant la caractérisation des matières organiques, deux approches assez voisines ont été proposées : l'Indice de Stabilité Biochimique (ISB) de Linères, M. et Djakovitch, J.L. (1993) et la Caractérisation Biochimique de la Matière organique (CBM) de Robin, D. (1997). Ces deux méthodes consistent à identifier différentes fractions de la MO par séparation biochimique et à en déduire la résistance à la biodégradation. Quatre fractions organiques, de plus en plus résistantes à la dégradation biochimique, (fractions solubles, hémicelluloses, cellulose, lignine) et la fraction minérale sont identifiées et séparées (Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon, 2012). Un nouvel Indicateur de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) a été proposé ; il remplace désormais l'ISB et la CBM. ISMO représente la proportion de C_{organique} des produits organiques s'incorporant à long terme à la MO du sol. Il exprime la potentialité de stockage du carbone des produits organiques dans les sols (Lashermes *et al.*, 2007).

Dans l'étude de Pouech (2009), le rapport moyen C/N de quatre échantillons de fumier équin pailleux était de 42,30 et dans l'étude de Mönch-Tegeder *et al.* (2013), ce rapport était de 30,89 (moyenne sur cinq échantillons). En outre, Doligez and Leveau (2007) ont obtenu un rapport moyen de 37,20 sur huit échantillons de fumier pailleux. Swinker *et al.* (1998) cite, également, un rapport de cet ordre de grandeur pour le fumier de cheval (C/N : 30). L'étude de Smith and Almquist (2014) a montré un rapport C/N de 27,20 pour un échantillon de fumier de cheval pailleux. Cette valeur est relativement inférieure à celles qui ont été citées précédemment. De même que le rapport C/N calculé dans l'étude de RITTMO Agroenvironnement (2014) qui est également inférieur avec un ratio de 26,40. Ces valeurs sont reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4. Rapport C/N du fumier équin pailleux rapporté par diverses études.

	Rapport C/N
Doligez and Leveau (2007)	37,20
Mönch-Tegeder <i>et al.</i> (2013)	30,89
Pouech (2009)	42,30
RITTMO Agroenvironnement (2014)	26,40
Smith and Almquist (2014)	27,20
Swinker <i>et al.</i> (1998)	30,00

Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que la paille a un rapport C/N aux alentours de 100 (Swinker *et al.* (1998) cite 127) et a, donc, une influence importante sur le ratio C/N. Au plus il y aura de paille dans le fumier équin, au plus le rapport C/N sera élevé (Doligez and Leveau, 2007). Afin de le réduire, des produits riches en azote pourront être ajoutés ; comme des fumiers de bovins mous (C/N : 15), de poulets (C/N : 8), etc. (Godden, 2012).

20

La composition du fumier et l'alimentation des équidés influenceront également le rapport C/N. La paille appartient à la classe des matériaux lignocellulosiques difficiles à dégrader. La lignocellulose est composée de cellulose, hémicellulose, lignine, ainsi que de plusieurs matériaux inorganiques. La lignine, qui protège la cellulose et l'hémicellulose, assure l'intégrité et la rigidité structurelle du bois, de la paille et des fibres textiles de nombreuses plantes. La teneur et la distribution de la lignine sont responsables de la dégradation enzymatique restreinte de lignocellulose, en limitant l'accessibilité des enzymes (Aslanzadeh *et al.*, 2011). Dans l'étude d'Aslanzadeh *et al.* (2011), le fumier de cheval pailleux avait une teneur en lignine totale (soluble dans l'acide et insoluble) de 32,92 %_{MS} et une teneur en hydrates de carbone de 44,68 %_{MS}. En comparaison, le fumier bovin à base de paille avait une teneur en lignine totale du même ordre de grandeur (39,53 %_{MS}) et une teneur en hydrates de carbone plus faible (25,44 %_{MS}). Il est à noter que les polysaccharides (hydrates de carbone complexe) sont des composés qui se décomposent très vite au contraire de la lignine.

Il est, ainsi, impératif d'effectuer une analyse chimique de son fumier afin de connaître les différentes caractéristiques chimiques de ce dernier, avant même de l'utiliser à des fins de valorisation.

3.2.3. Macroéléments [NPK]

a. Azote

L'azote (N) est naturellement excrété par les animaux sous différentes formes. Il est essentiel à la vie, car celui-ci entre dans la composition des acides aminés, des protéines et des acides nucléiques des organismes (Krouk *et al.*, 2010).

Lorsque les acides nucléiques et les protéines sont dégradés ou lorsqu'ils sont convertis en glucides ou en lipides, des enzymes libèrent l'azote qu'ils renferment et forment avec celui-ci de l'ammoniac (NH_3) ; molécule extrêmement toxique. Afin d'excréter cette molécule, les mammifères vont d'abord convertir le NH_3 en des composés organiques moins toxiques tels que l'urée par exemple. Les types de déchets azotés excrétés dépendent de l'histoire évolutive et de l'habitat de l'animal et, en particulier, de la disponibilité en eau. La quantité de déchets azotés produits dépendra de la quantité et des types d'aliments absorbés (Campbell and Reece, 2012). L'azote compris dans les fumiers se trouvera sous forme minérale, principalement de l'ammoniac, et sous forme organique (Weill and Duval, 2009).

b. Phosphore

Le phosphore (P) est, également, un élément essentiel pour les organismes ; c'est un des principaux éléments des acides nucléiques, des phosphoglycérolipides, de l'ATP et d'autres molécules qui stockent l'énergie. Il entre aussi dans la constitution des os et des dents (Campbell and Reece, 2012).

Dans les fumiers, le phosphore sera, surtout, présent sous forme organique (Weill and Duval, 2009).

c. Potassium

Le potassium (K) sera, principalement, présent dans le fumier sous forme minérale (Weill and Duval, 2009).

d. Concentrations massiques des [NPK]

Plusieurs auteurs ont étudié la composition chimique du fumier équin pailleux. Celle-ci dépend de nombreux facteurs ; race de l'équidé, alimentation, fréquence de curage, etc.

Dans l'étude de Pouech (2009), le fumier équin pailleux contenait en moyenne (sur quatre échantillons) $10,30 \text{ kg}_{\text{N}_{\text{tot}}}/\text{t}_{\text{MS}}$, $6,31 \text{ kg}_{\text{P}_2\text{O}_5}/\text{t}_{\text{MS}}$ et $22,80 \text{ kg}_{\text{K}_2\text{O}}/\text{t}_{\text{MS}}$. Dans l'analyse

de RITTMO Agroenvironnement (2014), ces valeurs étaient de l'ordre de 15,06 kg_{N_{tot}}/t_{MS}, 8,15 kg_{P₂O₅}/t_{MS}, 16,31 kg_{K₂O}/t_{MS}, soit 12,00 kg_{N_{tot}}/t_{MB}, 6,50 kg_{P₂O₅}/t_{MB}, 13,00 kg_{K₂O}/t_{MB} par rapport à la masse brute du fumier. Dans l'étude de Doligez and Leveau (2007), les concentrations en macroéléments ont été calculées par rapport à la masse brute du fumier ; 8,70 kg_{N_{tot}}/t_{MB}, 3,70 kg_P/t_{MB} et 17,00 kg_K/t_{MB}. Ces valeurs (Tableau 6) sont naturellement inférieures à des concentrations calculées à partir de la masse sèche du fumier (inférieure à la masse brute du fumier) (Tableau 5).

Tableau 5. Concentrations massiques moyennes en N_{tot}, P₂O₅ et K₂O par tonne de MS de fumier équin pailleux

	kg _{N_{tot}} /t _{MS}	kg _{P₂O₅} /t _{MS}	kg _{K₂O} /t _{MS}
Pouech (2009)	10,30	6,31	22,80
RITTMO Agroenvironnement (2014)	15,06	8,15	16,31

Tableau 6. Concentrations massiques moyennes en N_{tot}, P₂O₅ et K₂O par tonne de MB de fumier équin pailleux

	kg _{N_{tot}} /t _{MB}	kg _{P₂O₅} /t _{MB}	kg _{K₂O} /t _{MB}
Doligez and Leveau (2007)	8,70	3,70	17,00
RITTMO Agroenvironnement (2014)	12,00	6,50	13,00

D'après ces auteurs, la concentration en azote total dans le fumier de cheval pailleux serait, donc, de l'ordre de 10,30-15,06 kg_{N_{tot}}/t_{MS}, celle en phosphore entre 6,31-8,15 kg_{P₂O₅}/t_{MS} et celle en potassium entre 16,31-22,8 kg_{K₂O}/t_{MS}

Ces concentrations peuvent être comparées avec celles d'autres matières premières telles que des épluchures de légumes par exemple ; où la concentration en N_{tot} y est de l'ordre de 35,09 kg_{N_{tot}}/t_{MS}, ce qui représente deux à trois fois plus que dans le fumier de cheval à base de paille. La concentration en P dans les épluchures de légumes est de 12,05 kg_{P₂O₅}/t_{MS}, soit une fois et demie à deux fois plus que dans le fumier équin pailleux. Concernant la concentration en K, celle-ci est de l'ordre de 6,86 kg_{K₂O}/t_{MS}, soit deux à

trois fois moins que dans le fumier de cheval pailleux (RITTMO Agroenvironnement, 2014).

Selon Airaksinen *et al.*, (2001), le temps de stockage influencerait la teneur en macroéléments du fumier équin. En outre, Mönch-Tegeder *et al.* (2013) a étudié la composition chimique de fumiers équins frais composés de différents matériaux de litière. Sur la base de cinq échantillons de fumier équin pailleux, la teneur totale d'azote était de $14,17 \text{ kg}_{\text{N}_{\text{tot}}}/\text{t}_{\text{MS}}$. Après stockage, la teneur totale en azote était de $12,55 \text{ kg}_{\text{N}_{\text{tot}}}/\text{t}_{\text{MS}}$, soit une diminution de $1,62 \text{ kg}_{\text{N}_{\text{tot}}}$ par t_{MS} . Comme décrit précédemment, cela semble, également, montrer qu'après le stockage du fumier et par rapport à du fumier frais, des pertes de composants digestibles ont lieu. Cette perte d'azote dans le fumier stocké souligne la nécessité de réviser le système actuel de stockage du fumier. Les longues périodes de stockage doivent être évitées afin d'empêcher la réduction des composés facilement dégradables et les effets négatifs sur l'environnement (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

3.2.4. Teneurs en éléments de traces métalliques

Les teneurs en éléments de traces métalliques du fumier de cheval pailleux sont reprises dans le Tableau 7. Dans le fumier de cheval, les concentrations en fer (Fe), manganèse (Mn), cuivre (Cu) et en zinc (Zn) semblent être les plus importantes (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech, 2009 ; RITTMO Agroenvironnement, 2014).

Les concentrations en éléments de traces métalliques se verront être cruciales dans le processus de digestion anaérobie, ce point sera développé au chapitre V.

Tableau 7. Teneurs en éléments de traces métalliques dans le fumier équin pailleux rapportées par diverses études.

[mg/kg _{MS}]	Ni	Se	Mo	Co	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Hg	As
Mönch-Tegeder <i>et al.</i> (2013)	1,8 ± 0,74	0,27 ± 0,12	1,48 ± 0,85	0,37 ± 0,28	810,67 ± 621,22	89 ± 23,83	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
RITMO Agroenvironnement (2014)	2,01	< 0,55	< 2,51	N.A.	N.A.	N.A.	17,57	42,68	2,13	0,34	< 7,03	< 0,14	< 1,38
Pouech (2009)	4,32	< LD	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	13,62	60,52	10,25	< LD	< LD	< LD	< LD

N.A. = Not Available, LD = Limite de détection

3.3. Caractéristiques microbiologiques

D'après l'étude de Pouech (2009) et de RITTMO Agroenvironnement (2014), il n'y avait pas de trace de pathogènes salmonelles ou d'œufs d'helminthes viables dans tous les fumiers échantillonnés.

D'après l'étude de RITTMO Agroenvironnement (2014), le fumier de cheval contiendrait des micro-organismes en grande quantité ; plus de $3 \cdot 10^8$ de micro-organismes aérobies à 30°C par exemple. Cependant, la présence de micro-organismes dans le fumier va, également, dépendre de leur présence dans la litière de base. En effet, la qualité sanitaire de la paille, du lin et du chanvre, par exemple, peut dépendre de la météo pendant la récolte de ceux-ci, de la méthode de récolte et de la conservation. En outre, les litières à base de bois, telles que les copeaux de bois ou la sciure, contiendraient des quantités plus faibles de microbes que les matériaux à base de matières végétales (Airaksinen *et al.*, 2001).

3.4. Autres substances

Des produits pharmaceutiques vétérinaires sont généralement administrés aux chevaux (maladies, blessures, vermifuges, etc.). À la suite de ces pratiques, une certaine fraction des produits pharmaceutiques est excrétée dans le fumier (Song *et al.*, 2010).

Cependant, il est à noter, qu'en Belgique, il existe deux catégories de chevaux ; ceux qui sont définitivement exclus de la chaîne alimentaire et ceux qui ne sont pas exclus de la chaîne alimentaire. La Confédération Belge du Cheval estimait qu'en 2012, il y avait 60 % des chevaux recensés dans leur base de données qui étaient maintenus dans la chaîne alimentaire (CBC, 2016). Pour ces derniers, ne peut leur être administré que les médicaments autorisés aux chevaux non exclus de la chaîne alimentaire et mis sur le marché en Belgique pour les chevaux et qui contiennent des substances reprises dans Règlement européen 37/2010. Concernant les chevaux exclus de la chaîne alimentaire, ceux-ci peuvent recevoir tous les médicaments autorisés et mis sur le marché en Belgique pour les chevaux (Commission Européenne, 2009 ; SPF *et al.*, 2016).

Pour chaque technique de valorisation, il faudra apprécier la dangerosité sanitaire de l'utilisation du fumier de cheval pailleux comme substrat.

CHAPITRE IV – MÉTHODES DE VALORISATION

Actuellement, notre manière de créer est sans cesse reconsidérée. En effet, l'idée est de penser au-delà d'une économie linéaire (appelée également « *Cradle-to-Grave* » ; c'est-à-dire « *du berceau à la tombe* ») se basant sur des ressources fossiles qui ne cessent de diminuer. Le concept d'économie circulaire « *Cradle-to-Cradle* » (c'est-à-dire « *du berceau au berceau* ») apporte ainsi une opportunité de changement. D'après la notion de « *Cradle-to-Cradle* », les déchets et sous-produits devraient réintégrer le cycle de production et l'énergie transportée devrait provenir de sources renouvelables (Costa *et al.*, 2013).

De nouvelles solutions innovantes traduisent de la volonté de traiter le fumier équin non plus comme un déchet, mais comme étant une source d'énergie et de fertilisants (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

Ce chapitre énoncera les solutions majeures qui s'offrent aux gestionnaires d'écurie quant à la valorisation de leur fumier, à savoir l'épandage, le compostage, la combustion, les champignonnières et la digestion anaérobie. Plus particulièrement, la digestion anaérobie est un processus multifonctionnel qui intègre la protection de l'environnement, la production d'énergie renouvelable et le recyclage des éléments nutritifs et de l'eau, elle remplit parfaitement les conditions d'une bioéconomie telle que celle inspirée par « *Cradle-to-Cradle* » (Costa *et al.*, 2013).

4.1. Épandage

L'épandage sur les terres arables est la voie principale et la plus ancienne pour recycler les fumiers animaux (Jardé *et al.*, 2007 ; Kush, 2014). Dans l'étude de Pettersson and Lundgren (2002), il a été constaté que la plus grande partie du fumier de cheval produit était recyclée via l'épandage sur des terres agricoles.

4.1.1. Description générale

Le fumier est une excellente source d'azote et peut contribuer de manière significative à l'amélioration des sols (Krouk *et al.*, 2010). L'épandage de fumier constitue un moyen efficace de recyclage des éléments nutritifs du fumier au sol (Agnew *et al.*, 2010). En plus des nutriments fournis, l'entrée de la matière organique améliore les

conditions physiques du sol, réapprovisionne celui-ci en matière organique et stoppe la dégradation des structures bénéfiques d'agrégation du sol, améliore la capacité de rétention d'eau, et stimule l'activité microbienne (Krush, 2014). De plus, épandre des fumiers réunit un effet direct d'apport en éléments fertilisants l'année de l'épandage mais également un arrière effet les années suivantes grâce à l'enrichissement du sol en humus (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

Toutefois, cette pratique a récemment soulevé des préoccupations environnementales en raison de la récente intensification de l'agriculture et une mauvaise gestion des effluents d'élevage conduisant à une sur-application des fumiers animaux sur les sols (Jardé *et al.*, 2007). Les nitrates, nitrites et l'ammoniac présents dans le lixiviat peuvent présenter des risques pour les écosystèmes ; acidification des sols, pollution de l'eau et eutrophisation (Kush, 2014). En effet, l'utilisation intensive d'engrais sur les cultures va entraîner la constitution de dépôts d'azote et des concentrations importantes d'éléments nutritifs dans le ruissellement agricole ce qui menace considérablement l'environnement (Khan and Mohammad, 2014) et cela est particulièrement vrai pendant un court laps de temps après l'application du fumier au champ (Kush, 2014). Après l'application des engrais de ferme sur les terres, les éléments nutritifs et les matières organiques vont être sensibles aux transports par ruissellement. À long terme, les problèmes pour l'environnement seront principalement liés au lessivage et les nitrates y joueront un rôle-clé (Kush, 2014).

Cette méthode de valorisation induit des odeurs provenant des activités d'épandage du fumier qui pourraient entraver son activité ; les riverains peuvent se plaindre des nuisances olfactives (Agnew *et al.*, 2010).

Concernant le coût de cette méthode, celui-ci est estimé à 90€/ha par la Chambre d'Agriculture de Région du Nord Pas-de-Calais en France. Cette valeur est calculée sur la base de la location en Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole (CUMA) d'un épandeur de dix tonnes à deux hérissons verticaux, de la main-d'œuvre, du carburant et d'une quantité moyenne de dix à quinze tonnes de fumier épandu par hectare (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

4.1.2. *Utilisation du fumier de cheval pailleux*

Comme développé précédemment au chapitre II, les agriculteurs hésitent souvent à accepter le fumier équin provenant des écuries et cela pour plusieurs raisons. Par ailleurs, l'épandage sur les pâturages est une pratique incertaine en raison de la présence d'œufs de parasites internes et de produits vétérinaires dans les fumiers. Les œufs de parasites

internes présents dans le fumier de cheval peuvent créer des problèmes de santé pour les chevaux en cas d'ingestion. Des produits pharmaceutiques (vermifuges) permettent de traiter et de contrôler les parasites tels que les strongles chez les chevaux. Les grands strongles plus dangereux, genre *Strongylus* (*Strongylus vulgaris*, *S. edentatus*, *S. equinus*), sont effectivement contrôlés par ces médicaments de manière à ce que dix à quinze types de petits strongles (genre *Trichonema* ou *Cyathostominae*) soient les seuls à représenter un réel problème (Romano *et al.*, 2006). Cependant, les petits strongles montrent de plus en plus de résistance aux médicaments (Kaplan, 2002) et les coûts associés au traitement des strongles peuvent être élevés (Romano *et al.*, 2006). En plus des parasites internes, les chevaux peuvent être malades, infectés mais également "porteurs" sains et représentent des sources d'autres organismes pathogènes tels que des bactéries, virus et protozoaires. Certains de ces organismes pathogènes peuvent aussi provoquer des maladies chez d'autres hôtes, y compris chez l'humain. Les bactéries pathogènes trouvées chez le cheval qui pourraient potentiellement infecter les humains comprennent *Clostridium tetani* (responsable du tétanos chez l'homme), *Campylobacter* spp., les souches pathogènes d'*Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. et *Yersinia enterocolitica* (Romano *et al.*, 2006). Cependant, d'après Swinker *et al.* (1998), l'épandage direct du fumier de cheval sans aucun traitement préalable permettrait de tuer les agents pathogènes du fumier par exposition aux rayons du soleil et par le séchage du fumier.

D'autres produits pharmaceutiques vétérinaires sont généralement administrés aux chevaux (maladies, blessures, etc.). À la suite de ces pratiques, une certaine fraction de ces produits pharmaceutiques est excrétée dans le fumier. L'épandage ce type d'engrais contaminerait les sols avec les produits pharmaceutiques vétérinaires, qui peuvent, ensuite, conduire à la contamination des eaux de surface et souterraines (Song *et al.*, 2010). Song *et al.* (2010) ont étudié la présence et le sort de quatre produits pharmaceutiques vétérinaires couramment utilisés dans une ferme de bovins. Deux d'entre eux ont été fréquemment détectés dans les eaux de surface à proximité, alors que deux autres ont rarement été trouvés. En outre, les résultats rapportés par cette étude indiquent que le sol est un réservoir pour les produits pharmaceutiques vétérinaires. Il serait intéressant d'effectuer des contrôles des concentrations de ces produits dans les eaux de surface à proximité des champs où du fumier équin frais aurait été épandu.

4.2. Compostage

4.2.1. Description générale

Le compostage est une méthode de valorisation qui permet la maturation et la dégradation de la matière organique grâce à la production de chaleur au sein du tas de fumier et sous l'action des micro-organismes (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂) ; elle consiste à aérer la matière organique pour déclencher un processus de décomposition de type aérobie (Luxen *et al.*, 2012).

Pendant les deux dernières décennies, le compostage a acquis une grande popularité en réponse aux préoccupations environnementales croissantes au sein de la filière équine et de la mise en place de restrictions législatives concernant la mise en décharge (Kush, 2014).

Le compostage se déroule en deux phases. La première phase est celle de la dégradation active de la matière organique. Une augmentation de la température jusqu'à 65-70°C est observée durant cette phase ; c'est le résultat de l'activité des bactéries thermophiles. Par la suite, la température redescend à une température ambiante et lors de cette phase, des modifications chimiques et biochimiques ont lieu dans le fumier ; plus de la moitié des matériaux de départ vont changer de composition. Le volume du fumier est, ainsi, réduit de $\pm 50\%$ avec dégagement de CO_2 (g) et H_2O (g). La phase de maturation lente vient en second lieu ; l'humidification se poursuit ainsi que la minéralisation de la biomasse microbienne (Luxen *et al.*, 2012).

Deux types de composts peuvent être différenciés ; le compost jeune et le compost mûr. Le premier a subi la phase de dégradation active et possède une température qui est redescendue à 30-35°C. Le compost mûr est obtenu après une maturation prolongée et obtient une odeur de terreau. Par ailleurs, celui-ci est friable et les matériaux d'origine de ce compost mûr ne sont plus distinguables (Luxen *et al.*, 2012).

C'est une pratique courante utilisée dans de nombreux cas et qui a l'avantage de ne pas requérir de logistiques sophistiquées (Rutz, 2014). Le compostage donne un produit final stable et stockable à haute valeur ajoutée pour une utilisation à la ferme et hors ferme (Krush, 2014 ; Romano *et al.*, 2006 ; Rutz, 2014).

Par ailleurs, le compost permet la diminution des pertes d'azote dans l'environnement (volatilisation, lessivage, etc.). En effet, l'épandage d'engrais azotés sous forme uréique ou ammoniacale (présents dans les déjections animales) va entraîner un risque de volatilisation sous forme d'ammoniac. Avec le compostage, une «

réorganisation » de l'azote uréique et ammoniacal contenu dans le fumier a lieu en réincorporant de la masse microbienne qui l'utilise pour sa propre synthèse, réduisant ainsi une partie des mauvaises odeurs. Cette suppression des mauvaises odeurs (Krush, 2014 ; Luxen *et al.*, 2012) permet d'appliquer les composts sur des prairies pâturées sans diminuer l'appétence de l'herbe et réduit également les nuisances olfactives pour les riverains à proximité. Les pertes d'azote par lessivage ou ruissellement sont également diminuées (Luxen *et al.*, 2012).

Cette méthode permet également une réduction du volume de 30 à 50 % du fumier et une réduction des distances d'interdiction d'épandage vis-à-vis des habitations (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂ ; Krush, 2014).

Néanmoins, un point négatif de cette méthode de valorisation pourrait être le fait qu'elle ne permette pas de rendement énergétique et qu'elle n'est, également, pas possible dans les zones urbaines (Rutz, 2014).

Le compostage réduit la quantité d'agents pathogènes et adventices dans le fumier grâce à son élévation de température (Luxen *et al.*, 2012 ; Rutz, 2014). Cela n'a pas seulement lieu au centre du tas où la température est élevée mais également dans l'ensemble du tas. En outre, d'autres mécanismes sont à l'origine de l'assainissement du fumier, tels que les antagonismes microbiens, la production de phénols et d'acide acétique toxiques pour les micro-organismes pathogènes et les graines d'adventices (Luxen *et al.*, 2012).

Le coût du compostage est estimé à 278 €/heure. Cette valeur reprend la location en CUMA d'un retourneur/composteur, de la main-d'œuvre, du carburant et d'une utilisation de la machine de 15 000 m³/an. La performance d'un retourneur s'élève à 300 t/heure pour un premier retournement et à 500 t/heure pour le deuxième (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

4.2.2. *Utilisation du fumier de cheval pailleux*

Les streptocoques fécaux sont des organismes indicateurs de la réduction des agents pathogènes dans le fumier. Ceux-ci sont plus résistants dans l'environnement que d'autres micro-organismes entériques tels qu'*E. coli*, et sont considérés comme l'un des meilleurs organismes indicateurs de réduction des agents pathogènes dans le traitement des déchets organiques (Romano *et al.*, 2006). Dans l'étude de Romano *et al.* (2006), les œufs de strongles suivis n'ont pas semblé être très robustes et, par conséquent, ne sont pas des organismes indicateurs appropriés pour montrer la réduction d'autres organismes

pathogènes. Le compostage du fumier de cheval a permis la destruction des œufs de strongles mais pas la destruction des larves. Cependant, d'après cette même étude, il est possible de supposer que les larves sont également réduites dans le tas de compost. Dans l'ensemble, la méthode de compostage testée dans cette étude a réussi à réduire la quantité d'agents pathogènes jusqu'à un certain degré. En outre, le niveau requis de réduction des agents pathogènes devrait être approprié à l'utilisation finale du compost. Il est vrai que les composts qui seraient utilisés d'une manière où ils entreraient en contact direct avec les humains exigeraient que les teneurs en agents pathogènes humains soient en dessous des niveaux détectables. Et des exigences moins strictes seraient nécessaires lorsqu'ils seraient utilisés sur les pâturages ou pour des applications d'aménagement paysager (Romano *et al.*, 2006).

Comme énoncé précédemment, une certaine fraction des produits pharmaceutiques administrés aux chevaux est excrétée dans le fumier (Song *et al.*, 2010). Cependant, d'après Cessna *et al.* (2011), le compostage semble conduire à la dissipation des antimicrobiens par exemple. Il est important de noter que le processus de compostage microbien pourrait être inhibé par la présence de produits vétérinaires dans le fumier.

Cette méthode ne conviendrait pas à un fumier de cheval très pailleux avec un rapport C/N supérieur à 30 (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂). En effet, le rapport optimal du substrat pour le compostage se situe le plus souvent entre 15 et 30 (Luxen *et al.*, 2012). Krush (2014) cite un intervalle de 25-30. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que quatre études ont décrit des rapports C/N supérieur à 30 pour le fumier équin pailleux (Doligez and Leveau, 2007 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech, 2009 ; Swinker *et al.*, 1998). Deux autres études ont montré des rapports C/N de 27,2 (Smith and Almquist, 2014) et de 26,4 (RITTMO Agroenvironnement, 2014) ; malgré tout, ces deux valeurs restent assez proches de 30.

Le fumier équin pailleux ne semble pas avoir le rapport C/N souhaitable pour être valorisé par compostage. Néanmoins, le nettoyage quotidien des litières permettrait de diminuer ce rapport C/N. En effet, il est conseillé de collecter sélectivement les crottins et la litière souillée afin de diminuer la proportion de paille dans le fumier responsable du ratio élevé. Dans cette idée, il est, également, souhaitable d'ajouter au fumier les crottins provenant des zones en plein air (Krush, 2014).

Toutefois, afin de permettre l'activité microbienne et la décomposition du fumier de cheval pailleux, il sera indispensable de le mélanger à un autre produit ayant une forte teneur en azote tel que de l'herbe, des fumiers de bovins mous (C/N : 15), des fumiers de

poulets (C/N : 8), etc. (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015 ; Godden, 2012 ; Krush, 2014 ; Swinker *et al.*, 1998).

Selon l'étude de Swinker *et al.* (1998) portant sur l'analyse de trois litières (sciure de bois, papier-journal et paille), la paille était le matériel le moins souhaitable pour le compost. Airaksinen *et al.* (2001) ont également étudié l'influence de différents matériaux de litière sur la compostabilité du fumier de cheval. Après trois semaines de stockage, la proportion de masse sèche avait augmenté et en particulier avec comme matériaux de litière le chanvre, la paille, les copeaux de bois et du papier-journal déchiqueté. Après un mois de compostage, une grande quantité du fumier s'était émietlée et décomposée en particules plus petites tandis que le matériau de litière était presque resté inchangé. Les facteurs limitatifs du compostage après une période de compostage de trois semaines peuvent être l'humidité, la teneur en oxygène, et la concentration d'azote soluble dans la masse (Airaksinen *et al.*, 2001). Le choix d'un matériau de litière correct est significatif pour l'utilisation de compost de fumier de cheval. En outre, le matériel qui contient de la litière indécomposable peut encore absorber l'azote soluble (ce qui avait déjà été l'une de ses principales fonctions) à partir du sol, ce qui pourrait signifier un très faible effet de fertilisation pour le sol (Airaksinen *et al.*, 2001 ; Krush, 2014). Dans l'étude d'Airaksinen *et al.* (2001), seul le fumier à base de litière de la tourbe était prêt à être utilisé après la période de compostage d'un mois. D'autres matériaux de litière n'ont été décomposés que dans une faible mesure ou pas du tout, y compris le fumier équin pailleux.

4.3. Combustion

4.3.1. Description générale

Le principe de cette voie de valorisation est de brûler la matière organique du fumier afin de produire de la chaleur. Néanmoins, lorsqu'un surplus est produit, la chaleur n'est pas utilisée et est perdue. De plus, aucune utilisation de nutriments n'est possible. Les coûts d'investissement sont généralement élevés ce qui représente un obstacle pour de nouvelles installations. Lorsque la combustion du fumier est effectuée par une installation centralisée, de longs transports seront nécessaires pour amener le fumier ; ce qui induit des coûts économiques et environnementaux (Rutz, 2014).

Cependant, la fourniture d'énergie à base de fumier semble diminuer les émissions de gaz à effet de serre et réduit également la détérioration de la qualité de l'air. Cela est dû au fait que la biomasse utilisée contient des teneurs relativement faibles en soufre et

en métaux lourds comparée aux combustibles fossiles tels que le charbon (Tsai *et al.*, 2015).

Le coût qu'engendre cette méthode de valorisation est estimé à un minimum de 100 000 € pour l'achat, l'installation, le stockage et le raccordement d'une chaudière biomasse d'une puissance de 100 kW. En plus de ce montant, il faut prévoir des coûts de maintenance pour la chaudière (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

4.3.2. *Utilisation du fumier de cheval pailleux*

Pour beaucoup d'écuries, le contenu énergétique du fumier, produit chaque année, pourrait facilement être suffisant pour couvrir la demande énergétique pour l'eau chaude et le chauffage des bâtiments et des installations (Lundgren and Pettersson, 2009). Les cendres produites pourront, également, être épandues sur les terres si la quantité de métaux lourds, comme le cadmium, est inférieure à la norme fournie par la législation puisqu'elles ont caractère minéral fort (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂; Lundgren and Pettersson, 2009).

L'avantage de cette méthode est qu'elle apporte une alternative énergétique aux combustibles fossiles (Rutz, 2014). Selon Lundgren and Pettersson (2009), en se basant sur les émissions de chaleur, le fumier équin pourrait être utilisé comme combustible à des fins de production de chaleur. Cependant, dans l'étude de Pettersson and Lundgren (2002), la combustion avait peu d'importance dans le choix des filières de valorisation du fumier de cheval. Bien que le fumier équin ait une biomasse à haute énergie, son utilisation pour la production d'énergie est limitée à quelques exemples. Effectivement, le fumier de cheval se tient loin derrière d'autres fumiers et autres déchets organiques comme choix de combustible (Krush, 2014). Très peu d'études portant sur le fumier de cheval ont été trouvées pour la production d'énergie par combustion (Lundgren and Pettersson, 2009). Les déchets équins peuvent contenir différents composants et vont subir des changements/dégradation pendant leur stockage ou leur transport. De ce fait, il est difficile d'évaluer la récupération possible de son énergie (Krush, 2014). Néanmoins, il existe plusieurs études qui ont traité de la conversion en chaleur d'autres types de fumier (Priyadarshan *et al.*, 2005 ; Zhu and Lee, 2005).

Une évaluation préliminaire grossière pourrait fournir la preuve que la production d'énergie à base de déchets équins est en effet pertinente. Lorsque l'on suppose une valeur de chauffage d'au moins 15 MJ par kg de combustible sec (valeur minimale dans la pratique), et en supposant en outre une teneur en matière sèche de 35 %, la teneur globale en énergie peut être évaluée pour surpasser $2,5 * 10^6$ TJ/a à l'échelle mondiale et $0,2 *$

10^6 TJ/a en Europe (Krush, 2014). A titre de comparaison, l'énergie disponible dans le bois est de 10^4 TJ/a au sein des forêts belges (Sintzoff, 2001). Par ailleurs, la consommation finale d'énergie dans l'UE27 était de 1 103,3 Mtep en 2011, ce qui équivaut à environ $46 * 10^6$ TJ/a. Cette évaluation semble indiquer que dans l'UE27 la teneur énergétique du fumier de cheval représente $\sim 0,5$ % de la consommation finale d'énergie (Krush, 2014).

Outre les défis techniques, il y a toujours la question de la législation. Les questions importantes sont de savoir si la combustion du fumier est permise et quelles limitations et règlements sont obligatoires. Dans les États membres de l'Union Européenne, il est tout d'abord important de déterminer si le fumier est considéré comme déchets conformément à la directive de combustion des déchets, Directive 2000/76/CE (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2000), ou comme un carburant renouvelable pour la production de chaleur. Si la production de chaleur à partir du fumier suit la Directive 2000/76/CE cela signifie que le propriétaire de l'installation doit satisfaire à la réglementation concernant un permis pour une nouvelle installation, aux conditions de fonctionnement, aux émissions atmosphériques, aux rejets d'eau provenant de l'épuration des gaz d'échappement, au traitement des cendres, d'un système de contrôle et de surveillance, aux exigences pour prises de mesures, à l'accès à l'information et à la participation du public (Edström *et al.*, 2011 ; Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2000). Si la production de chaleur à base de fumier est considérée comme une installation de production de biocarburant, il n'y a pas de directive de l'UE à respecter (Edström *et al.*, 2011).

Cependant, les interprétations nationales de la législation de l'UE varient considérablement et peuvent également dépendre de la taille de l'installation de combustion. En effet, en Suède, la combustion du fumier suit la Directive 2000/76/CE mais en dépit du statut de déchet du fumier de cheval, celui-ci peut être brûlé sans exigence de la Directive 2000/76/CE. Cela est sans doute dû au fait que le fumier de cheval contiendrait beaucoup de litières, par opposition aux fumiers habituels tels que ceux de volailles, de bovins et de porcs. Au contraire, en Finlande, le fumier de cheval est considéré comme déchet et donc sa combustion doit être conforme aux exigences de la Directive 2000/76/CE (Edström *et al.*, 2011).

Pour garder l'avantage qu'apporte la combustion du fumier de cheval en apportant un rendement énergétique, il est important que les émissions de substances nocives soient maintenues à un niveau inoffensif pour l'environnement (Lundgren and Pettersson, 2009). Lors de la combustion de la biomasse, la teneur en oxydes d'azote (NOx) dans le gaz de

combustion est déterminée principalement par la teneur en azote du combustible. En comparaison au bois, le fumier a une teneur en azote élevée et cela va conduire à des émissions de NOx importantes. Si les concentrations en NOx dans le gaz de combustion ne correspondent pas aux limites d'émission, des mesures primaires (modification de l'alimentation en air par exemple) et/ou des mesures secondaires (réduction catalytique des gaz d'échappement) devront être mises en œuvre (Edström *et al.*, 2011)

Un problème commun à la biomasse non-bois est sa fusibilité élevée ; c'est la capacité d'un corps à passer de l'état solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur, ce qui signifie un point de fusion des cendres aux températures basses. Pour éviter un tel comportement, la température à l'intérieur de la chaudière doit être limitée. Les chiffres réels dépendent de la quantité de cendres ainsi que de leur composition, et en particulier de leurs teneurs potassium et silicium. Néanmoins, une diminution de la température entraîne une augmentation de la concentration de monoxyde de carbone (CO) produit résultant d'une mauvaise combustion. Une adaptation éventuelle dans la conception de la chaudière devra avoir lieu, tel que le concept de combustion étagée qui donnera la possibilité de maintenir des températures basses dans le lit de combustion (première étape) et des températures plus élevées nécessaires lors de la deuxième étape afin d'obtenir une combustion complète (Edström *et al.*, 2011).

35

Dans l'étude de Schuster and Strömberg (1997), les expériences de combustion ont eu lieu en utilisant du fumier de cheval à base de paille comme combustible. Les résultats indiquent un mauvais processus de combustion avec des émissions très élevées de CO. Par ailleurs, Lundgren and Pettersson (2009) ont étudié la combustion du fumier de cheval avec copeaux de bois. D'après cette étude, la qualité du combustible, en particulier sa teneur en eau, est d'une grande importance et en particulier sa teneur en eau. Il est possible d'obtenir un bon processus de combustion avec de faibles émissions de gaz non brûlés lorsque la teneur en eau ne dépasse pas 50 % en masse. Il est, ainsi, nécessaire que le fumier de cheval soit stocké à l'abri de la pluie et des intempéries.

Le fumier de cheval pailleux pourrait être valorisé par combustion et récupération de chaleur (Lundgren and Pettersson, 2009), mais il serait essentiel d'effectuer des mesures précises quant aux émissions des gaz de combustion.

4.4. Champignonnières

La culture des champignons est un procédé biotechnologique précieux qui produit des aliments sains tout en convertissant un large éventail de résidus organiques (Farnet *et al.*, 2013).

Les champignons ne contiennent pas de chlorophylle ; ils ne sont, donc, pas en mesure de produire de l'énergie à partir de la lumière via la photosynthèse. Les champignons de Paris (*Agaricus bisporus*) et les Coprins chevelus (*Coprinus comatus*) possèdent en outre la particularité d'être des décomposeurs secondaires ; ils ne sont pas capables de décomposer la cellulose et la lignine. Ils ont besoin de micro-organismes pour rendre ces matières assimilables pour eux. Leur culture nécessitera, ainsi, l'utilisation de substrats tels que le fumier de cheval ou de poulet où ces micro-organismes spécifiques sont présents (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂ ; Farnet *et al.*, 2013).

Cependant, l'inconvénient de cette technique de valorisation est qu'elle induit des odeurs qui peuvent provoquer des nuisances pour les personnes vivant près de la champignonnière et peuvent, également, être un problème pour les travailleurs.

De plus, le nombre de champignonnières est en déclin. Pourtant, cette méthode de valorisation était autrefois un acteur majeur dans la gestion du fumier de cheval (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

4.5. Digestion anaérobie / Méthanisation

La digestion anaérobie est un processus de décomposition de la matière organique par des micro-organismes dans un environnement sans oxygène. Ce processus a lieu dans de nombreux environnements anoxiques, il peut également être appliqué à une large gamme de matières premières tels les effluents agricoles (Ward *et al.*, 2008).

La méthanisation du fumier équin pour produire du biogaz a déjà été étudiée à la fin du XIX^e siècle, et est documentée via diverses approches dans la littérature moderne (Agayev and Ugurlu, 2011 ; Böske *et al.*, 2014 ; Böske *et al.*, 2015 ; Deublein and Steinhauser, 2008 ; Kalia and Singh, 1998 ; Kusch *et al.*, 2008 ; Mandal and Mandal, 1998 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Smith and Almquist, 2014).

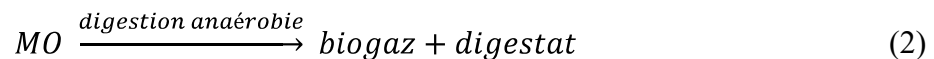
Concernant le coût de l'utilisation d'une telle méthode, celui-ci va être très variable en fonction du type d'installation (à la ferme ou usine) (Chambre d'Agriculture Région NPDC, 2015₂).

Cette méthode de valorisation de la matière organique permet d'obtenir un rendement énergétique élevé avec un produit final, le biogaz, qui a également une haute valeur économique. Elle produit également un engrais de qualité qui pourrait remplacer les engrais provenant d'énergies fossiles (Rutz, 2014). L'énergie renouvelable produite pourrait être utilisée comme carburant (biométhane) pour des moyens de transport, ce qui réduirait l'utilisation de combustibles fossiles. Le biométhane est un vecteur d'énergie verte qui a une valeur particulière ; il est facile d'utilisation et il est stockable (Rutz, 2014). Cette méthode sera détaillée plus en profondeur dans le chapitre V.

5.1. Processus de digestion anaérobie

5.1.1. Définition générale

La digestion anaérobie, ou (bio)méthanisation, est un processus biologique qui produit un gaz principalement composé de méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2), autrement connu sous le nom de biogaz. Ce gaz est produit à partir de déchets organiques tels que les effluents d'élevage, les déchets alimentaires, etc. Ce processus est basé sur la dégradation de la matière organique (MO) par des micro-organismes dans des conditions anaérobies (sans oxygène). La méthanisation aboutit, également, à la production d'un digestat, produit humide riche en matière organique partiellement stabilisée. L'équation (2), énoncée ci-dessous, décrit le bilan réactionnel de la digestion anaérobie (ADEME, 2015).



5.1.2. Processus biochimique

La dégradation de la matière organique par digestion anaérobie se déroule en une série d'étapes avec l'intervention de plusieurs groupes de micro-organismes différents (Fig. 4).

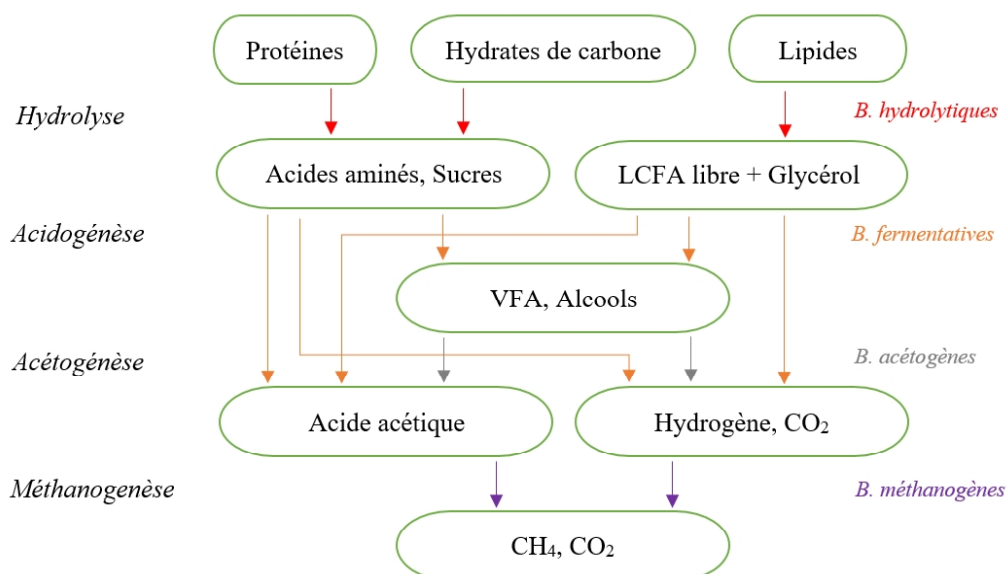


Fig. 4. Représentation simplifiée du processus de digestion anaérobie (d'après Costa *et al.*, 2013).

a. Hydrolyse

La digestion anaérobie commence par l'hydrolyse de molécules organiques complexes, telles que des protéines, des hydrates de carbone et des lipides, en composés plus simples. Ces macromolécules sont normalement présentes sous forme de composés en suspension ou de matières colloïdales, et ont besoin d'être transformées en molécules plus petites (Costa *et al.*, 2013). De tels processus ont lieu dans l'étape d'hydrolyse, dans laquelle ces composés complexes (polymères) sont hydrolysés en leur unité de construction de base (monomères ou dimères) (Pereira, 2003).

Les organismes ne peuvent pas absorber les substrats non solubles qui seraient trop grands pour passer à travers la membrane cellulaire et, par conséquent, des enzymes extracellulaires (les cellulases, les amylases, les protéases, les lipases) sont libérées, par des bactéries hydrolytiques, pour cliver les polymères en molécules de substrat plus petites (Costa *et al.*, 2013 ; Pereira, 2003).

Les hydrates de carbone sont convertis en sucres solubles (saccharides) par les cellulases, les amylases, les xylanases et d'autres enzymes hydrolytiques. Les protéines sont dégradées en peptides et acides aminés par les protéases et les peptidases et les lipides, sont transformés en acides gras à longue chaîne (LCFA : Long Chain Fatty Acids) et en glycérol par les lipases (Costa *et al.*, 2013). Dans le cas de substrats complexes, l'hydrolyse des biopolymères peut être l'étape limitant la vitesse dans l'ensemble du processus de dégradation (Costa *et al.*, 2013 ; Masse *et al.*, 2002 ; Van Lier *et al.* 2001). Une étape d'hydrolyse efficace est importante pour permettre l'accessibilité des substrats complexes aux communautés microbiennes anaérobies (Costa *et al.*, 2013).

b. Acidogénèse

L'acidogénèse est la première étape produisant de l'énergie, où les substrats solubles tels que des acides aminés et des sucres, sont dégradés après avoir été transportés à travers la membrane dans la cellule, en acides gras volatils (VFA : Volatile Fatty Acids) et en alcools dans un processus également connu sous le nom de fermentation (Costa *et al.*, 2013 ; Pereira, 2003).

Les principaux substrats pour l'acidogénèse comprennent des saccharides solubles, des acides aminés et du glycérol et aboutissent à la formation d'acétate (CH_3COO^-), de propionate ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COO}^-$), de butyrate ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COO}^-$), de dioxyde de carbone (CO_2), d'ion hydrogène (H^+) et d'autres produits biologiques, tels que le lactate et des alcools (Costa *et al.*, 2013).

En général, la population des bactéries fermentatives représente environ 90 % du total de la population microbienne présente dans les digesteurs anaérobies. Ils ont un temps court de doublement ; l'acidogénèse ne constitue, donc, pas une étape limitante dans le processus global de la méthanisation (Pereira, 2003).

c. Acétogénèse

Les produits de la fermentation, les acides gras à courte chaîne, ou acides gras volatiles (VFA) et les alcools, sont, en outre, oxydés via les bactéries acétogènes, en acide acétique (CH_3COOH) tout produisant du CO_2 et en réduisant les ions H^+ en H_2 (Costa *et al.*, 2013 ; Pereira, 2003).

d. Méthanogénèse

La méthanogénèse est la production de méthane (CH_4) et est la dernière étape de la dégradation de la matière organique. Les micro-organismes (bactéries méthanogènes) qui réalisent cette étape font partie des archées (*Archaea*), autrefois classés comme Archéobactéries, et sont répartis en deux groupes ; les hydrogénotrophes (qui utilisent du H_2 et CO_2) et les acétoclastes (qui utilisent l'acide acétique). La méthanogénèse a lieu par réduction du CO_2 des bactéries méthanogènes acétoclastes et par décarboxylation de l'acide acétique par l'action des bactéries méthanogènes hydrogénotrophes (Costa *et al.*, 2013 ; Pereira, 2003).

5.1.3. Principales variantes

Différents procédés de biométhanisation existent. Ces derniers se différencient grâce à l'étude de plusieurs de leurs caractéristiques. Les procédés de digestion anaérobie vont, principalement, être caractérisés selon la teneur en matière sèche du fumier, selon la température de réaction et selon les modes d'alimentation et d'extraction des réacteurs.

a. Différenciation selon la teneur en matière sèche

D'après la teneur en matière sèche (MS) du composé entrant, deux procédés de biométhanisation existent à l'heure actuelle ; la méthanisation par voie humide et par voie sèche.

La méthanisation par voie humide est utilisée lorsque le fumier comporte moins de 15 % de MS (Cui *et al.*, 2011), ou moins de 20 % de MS selon d'autres auteurs (Kusch *et al.*, 2008) et celle par voie sèche, lorsque le composé entrant est composé de 15 à 40 % de MS. Les effluents liquides, tels que des boues et des lisiers, seront traités par un

procédé à voie humide. Les procédés par voie sèche traitent principalement des matières entrantes solides. Cependant, il est possible de traiter ces dernières par voie humide en les diluant préalablement (ADEME, 2015 ; Cui *et al.*, 2011 ; Kusch *et al.*, 2008). Les avantages et inconvénients de ces deux procédés sont énoncés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Comparaison entre la digestion anaérobie par voie humide et celle par voie sèche (ADEME, 2015 ; France Galop *et al.*, 2007).

	Voie humide	Voie sèche
Avantages	- Bonne homogénéisation du substrat - Optimisation du transfert de matière et de chaleur - Amélioration de la production de biogaz	- Flux de matière limité - Taille réduite du digesteur - Taux de matière sèche équivalent à celui de déchets entrants
Inconvénients	- Flux de matière élevé (car dilution) - Coût de déshydratation du digestat - Production forte de jus et de lixiviats - Important volume du digesteur	- Conditions moins favorables des transferts de matière et chaleur
Coût d'investissement	5 000 000 €	De 500 000 à 1 000 000 €

Comme vu au chapitre III, plusieurs auteurs ont rapporté des teneurs en MS relativement élevées pour le fumier équin pailleux, généralement au-dessus de 40 % de MB (Airaksinen *et al.*, 2001 ; Doligez and Leveau, 2007 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech, 2009 ; RITTMO Agroenvironnement, 2014). Le procédé par voie sèche semble donc devoir être privilégié pour le fumier équin pailleux.

En outre, le fumier de cheval pailleux contient des quantités élevées de grandes particules fibreuses qui peuvent poser certains problèmes (Cui *et al.*, 2011). En effet, Kalia and Singh (1998) ont observé une séparation de phase, avec la partie fibreuse du fumier flottant au-dessus de la phase liquide (Kusch *et al.*, 2008). De plus, ce substrat est

connu pour causer des problèmes tels que des obstructions dans les pompes ou dans les tuyaux (Ward *et al.*, 2008 ; Cui *et al.*, 2011).

Le fumier de cheval pailleux semble donc moins approprié à la méthanisation par voie humide ; la voie sèche sera privilégiée.

b. Différenciation selon la température de réaction

Différents types de méthanisation vont se distinguer selon la température de la réaction de digestion anaérobie. En effet, le taux de dégradation des composés organiques dépend principalement de la nature et de la concentration des micro-organismes (ADEME, 2015).

Les micro-organismes sont classés en fonction de la gamme de températures dans laquelle ils se développent ; psychrophiles ($T < 20^{\circ}\text{C}$), mésophiles ($20 < T < 45^{\circ}\text{C}$) et thermophiles ($T > 45^{\circ}\text{C}$). La méthanisation peut donc être réalisée en zone psychrophile ($15\text{-}25^{\circ}\text{C}$), en zone mésophile ($30\text{-}37^{\circ}\text{C}$) ou en zone thermophile ($45\text{-}60^{\circ}\text{C}$) (Böske *et al.*, 2014 ; Fernández-Rodríguez *et al.*, 2013 ; Rennela *et al.*, 2010 ; Kusch *et al.*, 2008 ; Provenzano *et al.*, 2013 ; Vanegas and Bartlett, 2013 ; Ward *et al.*, 2008).

Généralement, la sélection de l'intervalle de température pour la digestion anaérobie dépend des conditions climatiques du pays, de la matière organique à dégrader et des performances du processus. Les saisons peuvent également influencer ce choix (Vanegas and Bartlett, 2013).

Dans la majorité des cas, les études sur la digestion anaérobie du fumier de cheval pailleux ont été réalisées à températures mésophiles (Böske *et al.*, 2014 ; Krush *et al.*, 2008 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). Böske *et al.* (2015) ont voulu analyser la digestion anaérobie de ce fumier à températures thermophiles. Cependant, en comparaison à l'étude que ces mêmes auteurs avaient réalisée en 2014 (Böske *et al.*, 2014), les températures thermophiles ne semblent pas augmenter le potentiel méthanogène du fumier de cheval pailleux par rapport aux températures mésophiles.

Ces deux types de digestion anaérobie présentent chacun des avantages et des inconvénients considérables à prendre en compte dans le choix de la méthode, ceux-ci sont décrits dans le Tableau 9.

Tableau 9. Comparaison entre les digestions anaérobies mésophile et thermophile (ADEME, 2015).

	Mésophile	Thermophile
Spécificités	- Environ 20 % de chaleur autoconsommée - Plus facile à maîtriser car biologie plus stable - Le plus couramment utilisé	- Environ 35 % de chaleur autoconsommée - Hygiénisation plus poussée des germes pathogènes - Temps de séjour plus court - Meilleure dégradation des chaînes carbonées - Biologie plus difficile à maîtriser

c. Différenciation selon les modes d'alimentation et d'extraction

Procédés en continu : L'alimentation et la vidange du digesteur se font en permanence avec la quantité entrante égale à la quantité sortante. Les procédés en continu sont les plus utilisés, car ils requièrent peu de maintenance. Ce sont des procédés qui sont mieux adaptés au traitement des déchets liquides (ADEME, 2015 ; Demirel, 2009 ; Demirel and Scherer, 2009 ; Markowski *et al.*, 2014).

Procédés discontinus (« batch ») : La matière organique est chargée dans le digesteur qui est, ensuite, fermé pendant une durée déterminée pendant laquelle la matière se dégrade. Lorsque la production de biogaz chute ou devient nulle, le digesteur est vidé séquentiellement (ADEME, 2015 ; Arhoun *et al.*, 2013 ; Kusch *et al.*, 2008).

Procédés semi-continus : Les digesteurs vont être remplis progressivement par des petites quantités successives de matière partagées dans le temps. La vidange est réalisée lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz n'est plus suffisante (ADEME, 2015 ; Arhoun *et al.*, 2013 ; Fezzani and Ben Cheikh, 2010 ; Rajendran *et al.*, 2013).

5.1.4. Facteurs influençant le processus de digestion anaérobie

a. Teneur en oxygène

Les bactéries acétogènes et méthanogènes sont des bactéries anaérobies strictes. Ces dernières ne se développent pas en présence d'oxygène ; les entrées d'air dans le réacteur de méthanisation doivent donc être évitées (Ferry, 2003 ; Rennela *et al.*, 2010). A part pour l'hydrolyse, l'O₂ inhibe quasiment toutes les phases de la digestion anaérobie. Dès lors, s'il y a présence d'O₂, une accumulation des produits de l'hydrolyse va être observée et un arrêt de la production de CH₄ aura lieu (Delfosse, 2010). Cependant, une petite introduction d'air (1 à 2 % v/v) peut être acceptée afin d'éviter la formation de sulfure d'hydrogène (H₂S) dans le réacteur (Rennela *et al.*, 2010). Les bactéries fermentatives et les bactéries acétogènes, et plus particulièrement les bactéries sulfato-réductrices, utilisent les sulfates comme source d'énergie pour dégrader la matière organique et produisent des sulfures dissous (S₂⁻) et de l'H₂S. L'H₂S a un effet inhibiteur sur l'acétogénèse et l'acidogénèse ; une accumulation des produits de l'hydrolyse et une diminution de la quantité de biogaz produit en résulteront (Delfosse, 2010).

b. Teneur en eau

La teneur en eau optimale pour le processus de digestion anaérobie est de 85 % et de 70 % respectivement, pour la voie humide et la voie sèche (Rennela *et al.*, 2010).

c. potentiel Hydrogène (pH)

Le processus de digestion anaérobie est très dépendant du pH (Chen *et al.*, 2008 ; Vanegas and Bartlett, 2013). En effet, afin que les bactéries responsables du processus de digestion anaérobie se développent de manière optimale, le pH du milieu doit être proche de la neutralité (pH = 7) (Rennela *et al.*, 2010). Selon Chen *et al.*, 2008, celui-ci doit être environ à 7,4 (Chen *et al.*, 2008). D'après Krush *et al.* (2008), l'intervalle de pH recommandé serait de 6,5 (ou 6,8) à 7,5 et pour Weiland (2010), celui-ci se situerait entre 7,0 et 8,0.

La valeur du pH semble augmenter par accumulation d'ammoniac (NH₃) lors de la dégradation des protéines, tandis que l'accumulation de VFA diminue le pH (Weiland, 2010).

Lorsque le pH du milieu est inférieur à 6, les bactéries méthanogènes pourraient être fortement inhibées (Rennela *et al.*, 2010). L'accumulation de VFA se traduira, généralement par une chute du pH, mais pas toujours en raison de la capacité tampon du

substrat. En effet, le fumier animal a un excédent d'alcalinité qui stabilise la valeur de pH lors l'accumulation de VFA. Les VFA sont des intermédiaires clés dans le procédé de digestion anaérobie et sont capables d'inhiber la méthanogenèse dans des concentrations élevées, comme énoncé précédemment (Weiland, 2010).

Afin de garantir une production optimale de biogaz, il est important de contrôler le pH pendant le processus. En effet, la réduction du pH de 7,5 à 7,0 au cours de la digestion anaérobie thermophile du fumier de vache a montré une augmentation de la production de méthane par un facteur quatre (Chen *et al.*, 2008).

D'après les données développées au chapitre III, le pH du fumier de cheval pailleux serait compris entre 6,6 et 8,4, soit proche de la neutralité et de l'optimal de pH (Doligez and Leveau, 2007 ; Pouech, 2009 ; RITTMO Agroenvironnement, 2014 ; Smith and Almquist, 2014).

d. Température

La température est considérée comme un des facteurs les plus importants dans le processus de digestion anaérobie (Ahring *et al.*, 2001 ; Chen *et al.*, 2008 ; Holm-Nielsen *et al.*, 2009 ; Vanegas and Bartlett, 2013). En effet, la dégradation de la matière organique par digestion anaérobie est peu exothermique. Pour favoriser l'activité des micro-organismes dans un tel processus, il est donc nécessaire de chauffer les digesteurs (Rennela *et al.*, 2010).

5.1.5. Produit finaux

a. Composition du biogaz

Le biogaz est composé d'environ 48-65% de CH₄ et de 36 à 41% de CO₂ (Rasi *et al.*, 2007 ; Rennela *et al.*, 2010 ; Sahlström, 2003). La nature de la matière organique à dégrader va influencer les proportions de ces derniers dans le biogaz. D'autres gaz sont, également, retrouvés en différentes proportions ; [H₂S] < 1% v/v, 0 < [N₂] < 6% v/v, [H₂] < 1% v/v, [O₂] < 2% v/v, H₂O et des COV (ADEME, 2015).

b. Composition du digestat

La composition du digestat va varier en fonction de la matière organique à dégrader mais, également, en fonction des conditions opératoires du digesteur. Le digestat est composé, essentiellement, de matière organique non biodégradable (lignine), de matières minérales (azote, phosphore) et de bactéries excédentaires (Rennela *et al.*, 2010).

5.2. Intérêts de la méthode

D'après Costa *et al.* (2013), la méthode de valorisation par digestion anaérobie devrait être au cœur de tout processus de traitement de déchets biodégradables ou d'eaux usées riches en carbone, accompagnée de processus de post-traitements physico-chimiques ou biologiques appropriés.

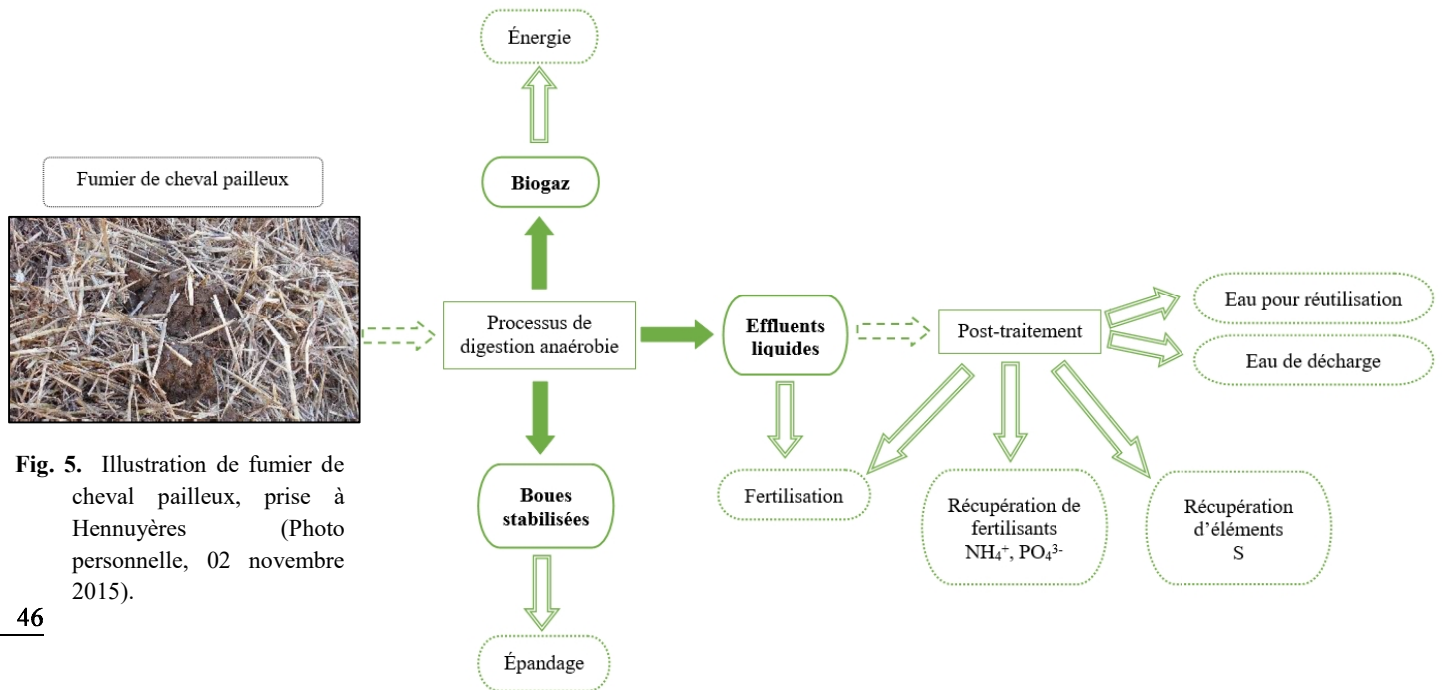


Fig. 5. Illustration de fumier de cheval pailleux, prise à Hennuyères (Photo personnelle, 02 novembre 2015).

Fig. 6. Valorisation du fumier de cheval pailleux par digestion anaérobie (d'après Costa *et al.*, 2013).

5.2.1. Économiques

La possibilité de récupérer l'énergie renouvelable sous forme de biogaz apporte un très grand avantage à la filière de valorisation par digestion anaérobie (Costa *et al.*, 2013). En effet, le biogaz est un vecteur d'énergie polyvalent ; il peut être utilisé pour la production de chaleur et/ou d'électricité, à des fins de chauffage, pour le remplacement du gaz naturel par injection de biogaz épuré dans le réseau de distribution et comme carburant pour les véhicules (ADEME *et al.*, 2015 ; Costa *et al.*, 2013). La production biotechnologique de produits chimiques peut, également, être une voie de valorisation pour le biogaz produit (Costa *et al.*, 2013).

Il est important de préciser, que la production de chaleur à partir de biogaz n'est intéressante que si le besoin en chaleur est assez important pour permettre la valorisation d'un maximum d'énergie disponible. De plus, cela requiert des débouchés à proximité

afin de limiter le transport de la chaleur par canalisations, ce qui représente un coût économique et augmente les pertes d'énergie (ADEME *et al.*, 2015 ; Costa *et al.*, 2013).

Dans un contexte d'augmentation des coûts de l'énergie, la valorisation du fumier équin pailleux par digestion anaérobie apporte, aux propriétaires de chevaux, une autonomie en chaleur pour les écuries ; chauffage de l'eau et des installations du site d'exploitation, réduisant ainsi les coûts d'achat d'autres types d'énergie nécessaires au maintien de la température souhaitée. La vente du surplus de biogaz généré induit, également, des revenus supplémentaires. Des partenariats locaux peuvent être établis afin de valoriser le surplus de chaleur produite ; champignonnières, serres horticoles, complexes sportifs (aquatiques), etc. (ADEME *et al.*, 2015).

De plus, si le gestionnaire de l'unité de biométhanisation dispose de terres agricoles (prairies ou sols arables), le digestat peut être épandu comme fertilisant, apportant, ainsi, une réduction de l'achat d'engrais traditionnels et donc une économie de budget. Si ce n'est pas le cas, le digestat peut être vendu, ce qui permet un revenu complémentaire pour l'exploitant (ADEME *et al.*, 2011). Le digestat est post traité afin de produire de l'engrais sous forme de granulés qui sont ensuite distribués à l'échelle internationale comme engrais commercial (Tafdrup, 1995). Par ailleurs, cette technique de valorisation renforce les liens entre l'agriculture et le territoire suite à la création de services pour la collectivité (ADEME *et al.*, 2011).

5.2.2. Agronomiques

La digestion anaérobie convertit le fumier de cheval pailleux en un produit fertilisant, plus facilement assimilable par les plantes car les éléments fertilisants sont sous forme minérale (Tafdrup, 1995 ; Ward *et al.*, 2008). En effet, avant la digestion, l'azote est essentiellement sous forme organique ; celle-ci est difficilement assimilable (certains acides aminés peuvent être assimilés par les racines), voir même non-assimilable par les plantes. Après digestion, 50 % de l'azote organique est transformé en azote minéral (NH_4^+) ; capable d'être capté par les végétaux (Fig. 7) (EDORA and Valbiom, 2012).

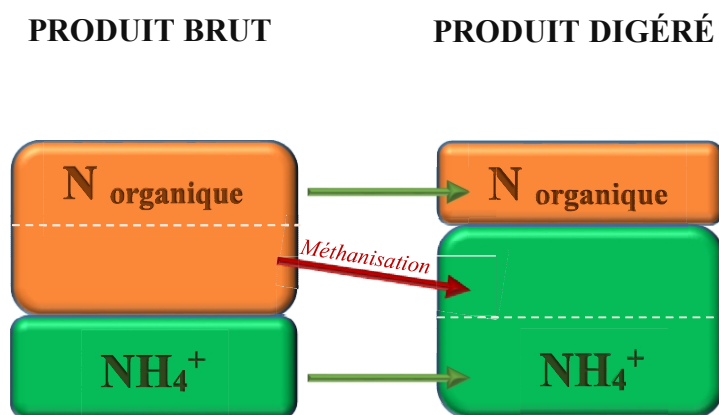


Fig. 7. Azote organique transformé en NH_4^+ après digestion anaérobie (EDORA & Valbiom, 2012).

Ce qui, de plus, améliore le rendement pour la plupart des cultures (ADEME *et al.*, 2011 ; Tafdrup, 1995 ; Ward *et al.*, 2008). Par ailleurs, cette technique apporte une réduction des odeurs. En effet, 99 % des composés volatils sont décomposés par oxydation lors de la combustion, comme par exemple, l'oxydation de H_2S en SO_2 (Smet *et al.*, 1999). La réduction des odeurs de stockage et d'épandage de fumier est importante pour de nombreux agriculteurs. Cela peut être un incitatif majeur, voire décisif pour la construction d'une installation de biogaz (Tafdrup, 1995). Ce dernier avantage profite aux propriétaires d'écurie mais également au voisinage de cette dernière (Ministère de la Région Wallonne, 2006 ; ADEME *et al.*, 2011 ; Ward *et al.*, 2008). La digestion anaérobie éliminerait, également, plus efficacement les agents pathogènes que d'autres méthodes (Sahlström, 2003 ; Tafdrup, 1995 ; Ward *et al.*, 2008). De plus, les installations de biogaz seraient un moyen efficace pour tuer les graines de mauvaises herbes (Tafdrup, 1995).

5.2.3. Environnementaux

La mauvaise gestion du fumier équin contribue, considérablement, à une pollution diffuse de l'environnement et peut affecter les habitats humides et contaminer les sources d'eau potable (Romano *et al.*, 2006 ; Chen *et al.*, 2008). La biométhanisation offre un grand potentiel pour l'élimination rapide de cette matière organique et diminue, ainsi, les risques de pollution (Chen *et al.*, 2008).

La digestion anaérobie induit une réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, le biogaz produit sera valorisé énergétiquement en substitution à une autre énergie potentiellement productrice de gaz à effet de serre (ADEME *et al.*, 2011 ; Ward

et al., 2008). Cela est également permis grâce au captage du CH₄ produit naturellement au cours du stockage du fumier. En effet, l'effet de serre du CH₄ est 20 à 25 fois plus important que celui du CO₂ qui serait émis lors de la combustion du biogaz. Par ailleurs, le CO₂ produit par la combustion du biogaz s'inscrirait dans un cycle de carbone neutre, sans effet positif ni négatif car cette molécule n'est pas d'origine fossile et fait partie du cycle de vie naturel de la biomasse (Markowski *et al.*, 2014 ; Ward *et al.*, 2008). Cette méthode de valorisation semble, également, réduire les problèmes des pluies acides (Tafdrup, 1995).

La production des engrais minéraux utilisés habituellement est très consommatrice en énergies non renouvelables. L'utilisation du digestat permet, ainsi, l'utilisation d'engrais renouvelables non consommateurs d'énergie fossile (ADEME *et al.*, 2011).

5.2.4. *Autres*

Il y a d'autres avantages à cette technique de valorisation, qui profitent également à d'autres acteurs économiques du territoire. En effet, il y a création d'une filière locale de recyclage et de valorisation des déchets organiques. La fourniture d'énergie verte pour les entreprises permet une autonomie énergétique du territoire et améliore, également, l'image des entreprises utilisatrices de ses nouveaux services. Avec la construction et l'exploitation de l'installation de biogaz, se crée une série d'activités économiques et sociales telles qu'une route touristique ou pédagogique des énergies renouvelables par exemple (ADEME *et al.*, 2011).

5.3. **Pertinence du fumier de cheval pailleux pour la digestion anaérobie**

5.3.1. *Potentiel méthanogène du substrat*

Le potentiel méthanogène d'un substrat est le volume de méthane (CH₄) produit par masse d'intrant. Celui-ci détermine si le substrat est adapté à cette méthode de valorisation (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

Cependant, peu d'informations sont disponibles sur le potentiel méthanogène du fumier de cheval (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). Néanmoins, le fumier équin pailleux aurait un potentiel méthanogène respectable pour la biométhanisation (Pouech *et al.*, 2009). Mönch-Tegeder *et al.* (2013) ont, également, démontré la pertinence du fumier de cheval comme substrat pour la digestion anaérobie. Ils ont analysé des fumiers équins à base de différentes litières. Le potentiel méthanogène de cinq échantillons de fumier

équins pailleux analysés, à températures mésophiles, allait de 0,175 à 0,207 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$. D'après cette même étude, le potentiel méthanogène du fumier à base de litière de paille était légèrement inférieur à celui du matériau de litière brute (de 0,174 à 0,231 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ pour la paille), mais plus élevé que celui des échantillons de crottins de cheval seuls (de 0,173 à 199 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$). Ces valeurs semblent être corroborées par l'étude de Krush *et al.* (2008), où le potentiel méthanogène du fumier équin pailleux était de 0,277 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ à températures mésophiles et celui du crottin de cheval était de 0,170 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$. Cet effet de dilution a été déjà rapporté plus tôt par Møller *et al.* (2004) et Hashimoto (1983), qui ont déclaré que l'augmentation de la paille dans le fumier solide augmentait le rendement en CH_4 .

Dans l'étude de Böske *et al.* (2014), la digestion anaérobie mésophile de fumier équin à base de différentes litières et provenant d'équidés nourris avec du foin et avec de l'herbe ensilée a été étudiée. Les résultats de cette étude ont montré un taux de 0,2354 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ pour le fumier pailleux d'équins nourris au foin et un taux de 0,2226 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ pour celui d'équins nourris à l'herbe ensilée. Cette tendance avait également été trouvée avec des températures thermophiles chez Böske *et al.* (2015), avec un taux de 0,2457 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ pour le fumier pailleux d'équins nourris au foin et un taux de 0,2018 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ pour celui d'équins nourris à l'herbe ensilée. Les températures thermophiles ne semblaient pas augmenter le potentiel méthanogène du fumier de cheval pailleux (Böske *et al.*, 2015).

Les potentiels méthanogènes du fumier de cheval pailleux, rapportés par ces études, sont repris dans le Tableau 10.

	Potentiel méthanogène
Böske <i>et al.</i> (2014)	0,2226 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ * et 0,2354 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$ **
Krush <i>et al.</i> (2008)	0,277 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$
Mönch-Tegeder <i>et al.</i> (2013)	de 0,175 à 0,207 $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{vs}}$

Tableau 10. Potentiel méthanogène du fumier équin pailleux rapporté par diverses études

* Fumier provenant d'équins nourris à l'herbe ensilée

** Fumier provenant d'équins nourris au foin

Pour les deux types de nourritures de l'étude de Böske *et al.* (2014), les fumiers à base de lin, de chanvre et de copeaux de bois avaient des valeurs nettement inférieures à celle du fumier à base de paille (Böske *et al.*, 2015). Cependant, Wartell *et al.* (2012) rapportent trois valeurs, à températures mésophiles, pour le potentiel méthanogène de fumier équin à base de copeaux de bois (68, 191 et 273 m³_{CH₄}/ kg_{vs}) dont deux se rapprochent de celle de fumier à base de paille. Ces valeurs très différentes montrent une variabilité dans le matériau.

Comme vu au chapitre I, les matériaux alternatifs à la paille comme les copeaux de bois, le lin ou les pellets, présentent des avantages en réduisant les risques de santé pour les chevaux, ont une capacité d'absorption élevée (Airaksinen *et al.*, 2001), mais sont à déconseiller pour la digestion anaérobie (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). En effet, les faibles rendements de méthane des fumiers à base matériaux de litière ne sont pas réalisables pour une production rentable d'énergie (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). En outre, la biomasse ligneuse conduit à la formation de couches dans le digesteur provoquant ainsi des taux d'échec plus élevés. Malheureusement, les enquêtes de ces effets négatifs sont extrêmement difficiles à effectuer à l'échelle du laboratoire (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). Selon Mönch-Tegeder *et al.* (2013), le mélange de paille avec d'autres matériaux de litière doit être évité pour la digestion anaérobie de fumier équin. La valorisation des fumiers équins à base d'autres matériaux de litière devrait, préférentiellement, être faite par combustion (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

Il est à noter que les conditions de récolte des litières ont un effet important sur le rendement en méthane de la paille. Une récolte tardive provoquée par des conditions météorologiques conduit à une réduction de la qualité de la paille et une diminution du rendement en méthane. En outre, l'intensité de l'alimentation des chevaux semble également avoir un impact sur le rendement en méthane du fumier (Böske *et al.*, 2014 ; Böske *et al.*, 2015 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

En comparaison, Quiñones *et al.* (2012), a déclaré avoir obtenu un résultat de 0,165 m³_{CH₄}/kg_{vs} pour le fumier solide bovin. Le fumier équin semble, donc, présenter des valeurs plus élevées de potentiel méthanogène.

Selon différents auteurs, en se basant sur le potentiel méthanogène du fumier de cheval pailleux, celui-ci serait donc tout à fait adapté à la valorisation énergétique par production de biogaz (Böske *et al.*, 2014 ; Böske *et al.*, 2015 ; Chamy and Ramos, 2011 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech *et al.*, 2009).

5.3.2. Taux de MO du substrat

Pour que la valorisation du fumier équin par biométhanisation soit pertinente, il est important que le fumier ait un taux de matière organique (MO) élevé afin qu'une grande quantité de biogaz soit produite (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013). D'après les valeurs rapportées au chapitre III, le taux de MO du fumier de cheval pailleux se situerait entre 79,4 %_{MS} (RITTMO Agroenvironnement, 2014) et 83,7 %_{MS} (Pouech, 2009).

5.3.3. Rapport C/N du substrat

D'après Weiland (2010) et Horan *et al.* (2011), l'intervalle optimal du rapport C/N du substrat pour la production de biogaz par digestion anaérobie serait de 20 à 30.

Au chapitre III, plusieurs rapports C/N de fumier de cheval pailleux ont été exposés. Quatre de ceux-ci se situaient au-delà du maximum de cet intervalle et deux se situaient dans l'intervalle, tout en étant dans la partie supérieure de celui-ci (Doligez and Leveau, 2007 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech, 2009 ; RITTMO Agroenvironnement, 2014 ; Smith and Almquist, 2014 ; Swinker *et al.*, 1998). Ces valeurs semblent être trop élevées pour une production optimale de biogaz par digestion anaérobie.

Cette tendance peut s'expliquer par le fait que la paille ait un rapport C/N élevé, comme énoncé au chapitre III ; Doligez and Leveau, 2007 citent un rapport C/N de 100 et Swinker *et al.* (1998) un rapport de 127. Afin de réduire ce ratio, des produits riches en azote devront être ajoutés ; fumiers de bovins mous (C/N : 15), de poulets (C/N : 8), etc. (Godden, 2012 ; Krush, 2014 ; Swinker *et al.*, 1998). Le mélange de plusieurs substrats à des fins de méthanisation est alors appelé co-digestion. Le nettoyage quotidien des litières permet, également, de diminuer le rapport C/N. Comme énoncé précédent pour le compostage au chapitre IV, il est conseillé de collecter sélectivement les crottins et la litière souillée afin de diminuer la proportion de paille dans le fumier. Il est, également, souhaitable d'ajouter, au fumier, les crottins provenant des zones de plein air (Krush, 2014).

5.3.4. Teneurs en éléments de traces métalliques du substrat

Les données provenant d'IS Forschungsgesellschaft (2011) représentent des valeurs optimales de teneurs en éléments de traces métalliques pour la production de biogaz par digestion anaérobie et sont reprises dans le Tableau 11.

Comme vu au chapitre III, les concentrations en fer (Fe), manganèse (Mn), cuivre (Cu) et en zinc (Zn) dans le fumier de cheval semblent être les plus importantes. Les valeurs optimales dans le cadre de la digestion anaérobie provenant d'IS Forschungsgesellschaft (2011) citent également ces quatre éléments comme ceux ayant les concentrations les plus élevées. En se basant sur l'ensemble des valeurs optimales disponibles (IS Forschungsgesellschaft, 2011), le fumier de cheval semble ne pas pouvoir fournir des quantités suffisantes d'oligoéléments pour un processus de production de biogaz stable ; ces éléments sont en particulier le nickel (Ni), le fer (Fe), le cobalt (Co), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo) et le sélénium (Se) (Böske *et al.*, 2015). En comparaison avec des ensilages, les concentrations des oligoéléments de ce type de substrat sont égales à celles de l'ensilage d'herbe. Ainsi, les conditions optimales du processus de digestion anaérobie ne peuvent pas être satisfaites avec le fumier de cheval pailleux comme intrant (Mönch-Tegeder *et al.*, 2013).

Le Ni est essentiel au développement des bactéries méthanogènes. En effet, celui-ci est nécessaire à la synthèse du cofacteur F430, qui est impliqué dans la formation de méthane (Weiland, 2010). Or, celui-ci fait largement défaut dans le fumier de cheval pailleux. Une carence en Ni entraîne l'inhibition de la méthanogenèse, induisant une diminution de la production de CH₄ ainsi qu'une augmentation de la concentration en VFA, et donc une diminution du pH et un risque d'acidose (Delfosse, 2010).

Afin de tenir compte de ce manque d'oligoéléments lié à l'utilisation de fumier de cheval pailleux comme substrat pour la biométhanisation, une solution d'oligoéléments pourrait être introduite dans le processus (Abdoun and Weiland, 2009 ; Böske *et al.*, 2015).

Tableau 11. Teneurs en éléments de traces métalliques dans le fumier équin pailleux rapportées par diverses études et valeurs optimales pour la production de biogaz.

[mg/kg _{MS}]	Ni	Se	Mo	Co	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Hg	As
IS Forschungsgesellschaft (2011)	16	0,5	4	1,8	2400	300	40	200	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Mönch-Tegeder <i>et al.</i> (2013)	1,8 ± 0,74	0,27 ± 0,12	1,48 ± 0,85	0,37 ± 0,28	810,67 ± 621,22	89 ± 23,83	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
RITMO Agroenvironnement (2014)	2,01	< 0,55	< 2,51	N.A.	N.A.	N.A.	17,57	42,68	2,13	0,34	< 7,03	< 0,14	< 1,38
Pouech (2009)	4,32	< LD	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	13,62	60,52	10,25	< LD	< LD	< LD	< LD

N.A. = Not Available, LD = Limite de détection

CHAPITRE VI – ÉTUDE DE CAS

UNITÉ DE MÉTHANISATION SOLOGNE BIOGAZ



Fig. 8. Unité de méthanisation *Sologne Biogaz*, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)

6.1. Introduction

Après une première phase d'exploration du sujet, l'étude d'un cas pratique devait être réalisée afin de ne pas aboutir à une conclusion sur la filière de valorisation par digestion anaérobie uniquement valable sur un point théorique. Des premières recherches ont été effectuées sur les unités opérationnelles de type agricole en Wallonie. J'ai premièrement pris contact avec une installation à Recht du nom de *Gebrüder Lenges PGmbH*, malgré que le fumier équin ne fût pas répertorié dans ses intrants. Néanmoins, celle-ci semblait utiliser une part de son énergie produite pour chauffer des écuries de chevaux. Dans un souci de confidentialité et par peur de la concurrence, je n'ai pas été autorisée à étudier cette unité. Selon moi, il était nécessaire de trouver une installation qui utilisait du fumier de cheval comme intrant et il n'y en avait pas de répertoriée en 2012 pour la Wallonie. Mes recherches se sont, donc, élargies à la France, où j'ai pu repérer quelques projets incluant l'utilisation de fumier de cheval. J'ai ainsi

trouvé la *Ferme Équestre de Bois Guilbert* située en Haute-Normandie en France, dont l'élevage équin comptait 210 poneys en 2011. Les travaux de cette unité ont débuté en 2012, mais après avoir pris contact avec les responsables, j'ai appris que leur installateur *Erigène* était toujours en redressement judiciaire et avait de grandes difficultés à terminer l'unité. J'ai ainsi continué mes recherches et trouvé le projet *EQUIMETH* qui s'appuie sur la filière équine en Seine-et-Marne, France. En effet, il y aurait plus de 3 000 chevaux stationnés autour du massif forestier de Fontainebleau (appelée également capitale française du cheval). Sa construction aurait dû débuter dès 2012 et être terminée à l'heure actuelle mais n'avait toujours pas commencé au début 2016. J'ai ensuite découvert l'unité de *Sologne Biogaz*, qui est une unité industrielle de méthanisation qui utilise du fumier de cheval à plus de 60 % et dont un des fondateurs de cette société projet a accepté ma requête d'étudier cette installation.

6.2. Objectifs

L'étude de ce cas permet, avant tout, de voir la mise en place réelle de l'utilisation du processus de digestion anaérobie décrit largement de manière théoriquement dans le chapitre précédent.

De fait, les buts principaux sont d'identifier la nature des opportunités et des difficultés liées à la mise en pratique d'une unité de méthanisation utilisant du fumier de cheval comme intrant.

6.3. Contexte

Cette étude de cas porte sur l'installation de méthanisation située à La Ferté-Saint-Aubin (France). Cette unité a été développée et construite par *HELIOPROD METHANISATION* et est détenue par la société projet *Sologne Biogaz*. Cette dernière, fondée en 2012, est détenue pour 51 % par *HELIOPROD METHANISATION* et pour 49 % par *123 Venture Méthanisation*.

HELIOPROD METHANISATION ambitionne de devenir un acteur français majeur des énergies renouvelables au niveau national et pour ce faire, souhaite développer, construire et opérer quinze installations de méthanisation d'ici 2020 en France.

En 2014, la France comptait déjà 610 unités de méthanisation (EBA, 2014_a). Le gouvernement français continue à soutenir activement ce secteur dans le but d'obtenir 2 000 unités d'ici 2020 (Sologne Biogaz, 2014).

L'exploitation de l'unité de *Sologne Biogaz* a démarré le 30 octobre 2014. Pour développer cette unité de méthanisation, les responsables du projet ont eu recours à la société *OGIN Biogaz Technology B.V.* située aux Pays-Bas. Cette société est spécialisée dans la méthanisation depuis plus de 30 ans et en particulier dans la technologie de digestion anaérobie par voie sèche ; *OGIN* développe et fournit des installations de biogaz. Cependant, après moins d'un an de fonctionnement, l'unité de *Sologne Biogaz* a dû se mettre à l'arrêt pour plusieurs raisons. Contrairement à ce qu'*OGIN* avait soutenu, cette technologie a montré ses limites lors de l'exploitation de l'unité de La Ferté Saint-Aubin. Celles-ci seront développées plus loin dans ce chapitre (P. Perrette, communication virtuelle, 07 mars 2016 ; M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

6.4. Présentation du site d'exploitation

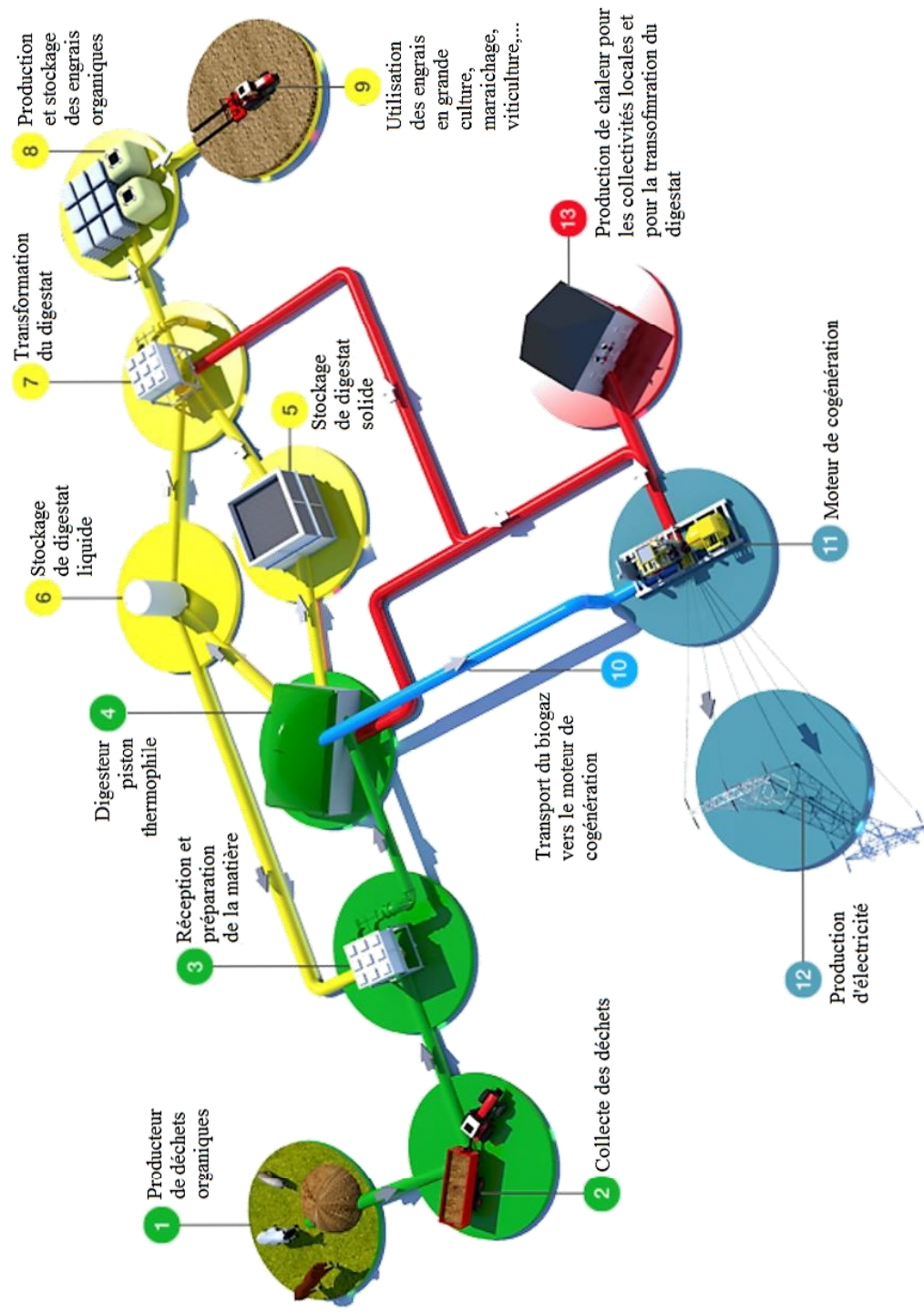


Fig. 9. Schéma général de l'usine (Sologne Biogaz, 2014).

6.4.1. *Fonctionnement général de l'usine*

Les intrants, récupérés chez les exploitants, sont acheminés jusqu'au site d'exploitation par des transporteurs extérieurs à *Sologne Biogaz*. Après réception de la matière sur le site de l'usine, celle-ci est stockée avant d'être broyée et hydrolysée. Le processus continu par voie sèche a été choisi et les intrants séjournent 20 jours à 55°C (conditions thermophiles) dans le digesteur ; c'est durant ce séjour que le biogaz est produit. Le biogaz sera, ensuite, acheminé vers le moteur de cogénération pour produire de l'électricité et de la chaleur. Une partie du digestat liquide produit est réintroduit dans le système pour maintenir un niveau suffisant de bactéries et liquéfier le mélange. Les digestats liquide et solide sont, par la suite, partiellement déshydratés et transformés afin de produire des engrais organiques à destination des fermiers et des particuliers. Les étapes de fonctionnement sont reprises dans la Fig. 9 (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.4.2. *Intrants*

Sologne Biogaz traite des déchets à l'échelle territoriale et dans un rayon de ~35 kilomètres autour de la ville. Afin d'assurer le fonctionnement d'une usine de biométhanisation en continu, il est nécessaire de pouvoir être approvisionné en intrant tout au long de l'année. C'est pourquoi le fumier de cheval a été choisi pour cette unité ; vu le nombre important de centres équestres dans cette région. La biomasse traitée est de l'ordre de 10 945 tonnes par an ; avec 6 445 tonnes de fumier équin issu des centres équestres locaux (~60 %) et 4 500 tonnes provenant des exploitations agricoles locales (semences, légumes, betteraves, etc.). Avant d'être utilisée, toute semence produite en France fait l'objet de contrôles de qualité stricte ; pureté d'espèce, germination et état sanitaire. Tous les ans, les semences invendues sont déclassées et dirigées vers des solutions de valorisation afin de ne pas les revoir sur le marché. Toutes les variétés sont concernées mais en fonction du marché, les proportions changent année après années (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.4.3. *Digestat valorisé*

Le processus continu par voie sèche thermophile à 55°C utilisé par cette unité de méthanisation permet d'éliminer tous les éléments pathogènes, les graines d'adventices

et les acides gras volatils responsables, en partie, des nuisances olfactives sans en atténuer les valeurs nutritives du digestat. Une fois séché, celui-ci est utilisé pour produire des engrais organiques à destination des fermiers et des particuliers. Ce type de fertilisant représente une excellente alternative aux engrais minéraux provenant d'énergies fossiles (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.4.4. Installations et processus

6.4.4.1. Réception des intrants

Une construction de type « préfabriquée » se trouve à l'entrée du site de l'exploitation et constitue le bâtiment de réception de l'usine (Fig. 10). Les matières organiques à méthaniser sont collectées auprès des agriculteurs et acheminées à l'usine. Les intrants sont, ensuite, placés sur les quais de réception des matières entrantes à l'entrée de l'usine (Fig. 11) et sont stockés temporairement. Les déchets végétaux non odorants sont placés sur deux aires extérieures tandis que les produits odorants sont, eux, stockés dans un bâtiment où un traitement d'odeurs a été installé (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

Fig. 10. Bâtiment de réception, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 11. Quai de réception, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



6.4.4.2. Préparation de la matière à méthaniser

La matière solide est placée dans un broyeur (Fig. 12 et 13), permettant ainsi de réduire de 50 cm à 20 cm la taille des intrants. Du fumier, des légumes et des semences y sont introduits, permettant d'homogénéiser dans un premier temps le mélange. Une faible quantité d'eau y est, également intégrée, de sorte qu'avec la chaleur du fumier, les semences introduites gonflent et germent. Dans le cas où cette dernière étape n'aurait pas lieu, les semences ressortiraient presque intactes du processus de méthanisation et représenteraient un problème pour l'utilisation du digestat sur les terres agricoles (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).



Fig. 12. Extérieur du broyeur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 13. Intérieur du broyeur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)

Un chargeur à bras télescopique alimente, ensuite, en matières solides une trémie de 80 m³ (Fig. 14 et 15) et une pompe de recirculation permet l'alimentation de la trémie en digestat liquide. Le fond mouvant de la trémie va permettre de faire avancer la matière au fur et à mesure et grâce à un système de malaxage, les matières à méthaniser sont mélangées et la structure cellulaire des matières fibreuses est cassée ; facilitant la

digestion. Une vis sans fin (Fig. 16) et une pompe spécifique permettent l'alimentation d'une cuve d'hydrolyse (Fig. 17) depuis la trémie (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

Fig. 14. Trémie vue du haut, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 15. Trémie vue du bas, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 16. Vis sans fin permettant l'alimentation de la cuve d'hydrolyse, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)





Fig. 17. Cuve d'hydrolyse, prise à La Ferté Saint-Aubin
(Photo personnelle, 31 mars 2016)

La réintroduction d'une partie digestat liquide dans la cuve d'hydrolyse est nécessaire pour fluidifier la matière et ajuster la teneur en matière sèche selon les exigences. Cela apporte également une population bactérienne minimale. L'hydrolyse, qui a lieu en milieu aérobie et à $\sim 35^{\circ}\text{C}$, permet une prédigestion des matières à méthaniser et facilite la production de biogaz. C'est une étape indispensable comme vu dans le chapitre V (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ;).

6.4.4.3. Méthanisation

Le digesteur (Fig. 18) horizontal thermophile (entre 55 et 57°C) est alimenté depuis la cuve d'hydrolyse par pompage. Afin d'assurer le brassage des matières, le digesteur est équipé d'un système de mélange interne, appelé agitateur (Fig. 19). Le procédé en continu est de type piston (« plug flow »), le temps de séjour dans le digesteur est garanti au contraire des systèmes classiques de type « infiniment mélangé ». Les matières sont, ainsi, exposées 20 jours à 55°C (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014).



Fig. 18. Digesteur horizontal, prise à La
Ferté Saint-Aubin (Photo
personnelle, 31 mars 2016)

Fig. 19. Agitateur, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



6.4.4.4. Valorisation du biogaz

Le biogaz produit est stocké temporairement dans un gazomètre de 1000 m³ au-dessus du digesteur. Celui-ci est constitué de deux bâches, la première retenant le gaz et la deuxième étant une bâche de secours, mais permet également une isolation thermique. Le gaz est ensuite désulfuré par injection contrôlée d'air dans le digesteur et une désulfuration du biogaz a, à nouveau lieu au niveau du co-générateur en passant au travers d'un filtre de charbon actif. Entre le digesteur et le co-générateur, le biogaz est déshumidifié grâce à des puits de condensation le long des conduites de gaz. La composition moyenne du biogaz est de 60 %v/v de CH₄, 40 %v/v de CO₂ et de moins de 300 ppm de composés soufrés.

Une fois dans l'unité de cogénération, le biogaz permet une production de chaleur et d'électricité avec une puissance de 1,3 MW (PCI). *Sologne Biogaz* a un contrat avec *Suez*, producteur d'électricité, et réinjecte son électricité produite dans le réseau, soit ~6 000 MWh/an. La chaleur produite sert au maintien en température du processus, au séchage du digestat solide, et est revendue au club aquatique pour le chauffage de leurs installations. Une chaudière gaz/biogaz, avec une puissance de 1,5 MW (PCI), est également prévue en cas d'indisponibilité de la cogénération pour assurer la production de chaleur (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; *Sologne Biogaz*, 2014 ; *THEMA Environnement*, 2014).

6.4.4.5. Traitement du digestat

Une presse à vis permet une séparation de phases du digestat et d'obtenir un digestat liquide et un digestat solide (Fig. 20). Le digestat liquide est stocké temporairement dans une cuve fermée (Fig. 21) ; une partie de celui-ci est, ensuite, remise en circulation en amont de la cuve d'hydrolyse et l'autre partie est placée dans une cuve de stockage (Fig.

22) où du biogaz produit est encore récupéré. Le digestat solide et l'excédent du digestat liquide sont séchés dans un séchoir automatique jusqu'à obtenir ~40 % de MS. Le digestat séché est stocké dans des bennes de 30 m³ afin d'être évacué. Le digestat solide sec est repris par une société de formulation d'engrais pour être valorisé en engrais de culture ou pour les particuliers (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; THEMA Environnement, 2014 ; Sologne Biogaz, 2014).



Fig. 20. Cuve tampon du digestat brut, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 21. Cuve de stockage temporaire du digestat liquide, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



Fig. 22. Cuve de stockage du digestat liquide, prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)

6.4.4.6. Gestion des odeurs

Un système d'aspiration est installé dans les bâtiments et permet un captage des odeurs à la source (de la réception, au stockage et préparation des matières entrantes, à la séparation de phase et de séchage). L'air capté est ensuite traité par un laveur acide (élimination de l'ammoniac, des odeurs et des poussières) avant le rejet par un émissaire en toiture (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; THEMA Environnement, 2014).

6.4.4.7. Chauffage

Les bureaux, vestiaires, sanitaires et autres locaux sociaux ainsi que le digesteur sont chauffés par un réseau d'eau chaude issu de l'unité de cogénération (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; THEMA Environnement, 2014).

La Fig. 23 ci-dessous reprend l'ensemble des opérations de l'usine de *Sologne Biogaz*.

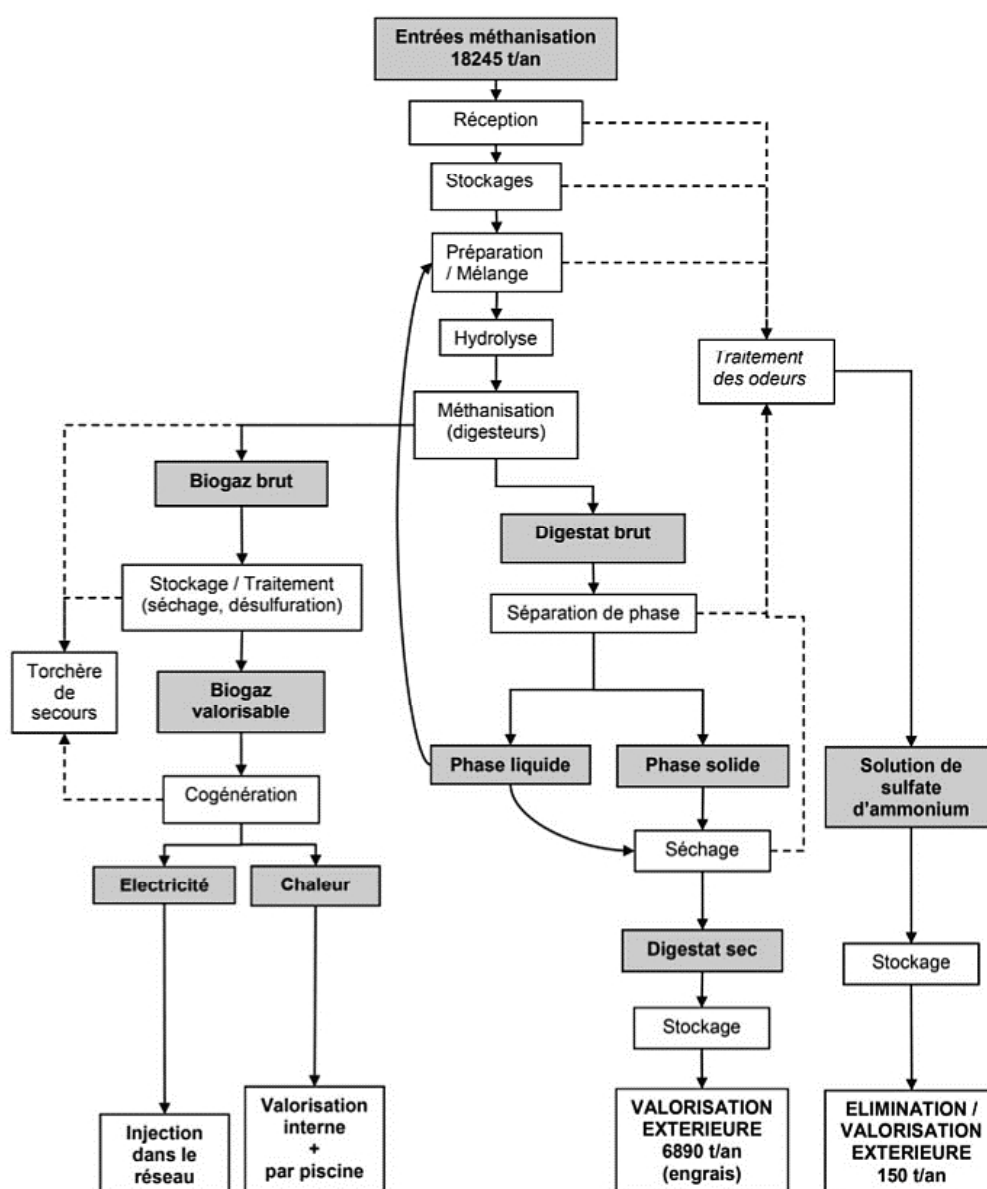


Fig. 23. Résumé des opérations dans l'usine *Sologne Biogaz* (THEMA Environnement, 2014)

6.4.4.8. Personnels

L'effectif prévu sur le site est composé de une Unité Travail humain technicien, de type électromécanicien, pour la réception des matières, le suivi du processus de méthanisation, le suivi du processus de traitement du digestat, et le suivi du processus de valorisation du biogaz. Les horaires de présence du personnel sont de 8 h 00 à 18 h 00 du lundi au vendredi ; il n'y a pas d'activité humaine sur le site la nuit, ni le dimanche et les jours fériés. Cependant, les équipements de l'unité de biométhanisation fonctionnent de manière continue grâce au système d'automatisation en raison du caractère biologique du processus. Tous les processus sont donc contrôlés par un automate ; un grand nombre de données, telles que les débits, les pressions, les températures, le pH, les caractéristiques du biogaz sont surveillées en permanence sur un ordinateur et les valeurs sont enregistrées. Ces valeurs permettent une régulation automatique des différents systèmes. Le système informatique bénéficie d'une connexion à distance qui permet une supervision éloignée et un téléopérage, que ce soit par l'exploitant du site ou par un service de support technique. La résolution d'alarmes ou de problèmes techniques peut ainsi se faire dans la plupart des cas sans déplacement d'un technicien. Les alarmes sont reportées sur le téléphone portable du personnel d'astreinte (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; THEMA Environnement, 2014).

6.5. Impacts des installations

6.5.1. Nuisances olfactives

La digestion anaérobie se produit dans un milieu où il n'y a pas d'oxygène présent sous forme de dioxygène (O_2) ; donc sans contact avec l'air ambiant et sans odeur. Des nuisances olfactives peuvent se produire lors du déchargement des intrants à la réception de l'usine. La matière à méthaniser est transportée dans des caissons étanches et systématiquement bâchés ; cela ne génère donc pas de nuisance olfactive. Concernant le stockage de ces intrants, les déchets non odorants sont placés à l'extérieur et les produits odorants sont stockés à l'intérieur comme décrit précédemment ; il n'y a donc pas de nuisance olfactive due au stockage. De plus, pour limiter les pertes de méthane durant le pré-stockage, les émissions d'odeurs éventuelles lors du stockage et lors du transport de fumier en dégradation, les intrants sont consommés « frais ». La manutention du fumier est réalisée à l'intérieur du bâtiment en enceinte close. Un système de traitement d'air de type industriel a été installé à l'intérieur des bâtiments pour limiter les nuisances dans les

zones habitées. Le système de traitement est équipé d'un biofiltre et l'intérieur du bâtiment est soumis à dépression pour limiter les fuites vers le milieu extérieur.

De plus, le site est relativement isolé par rapport aux zones d'occupation humaine, il se situe à plus de 100 m d'une piscine, à plus de 200 m d'un camping, à plus de 125 m d'une aire d'accueil des gens du voyage, à plus de 200 m des habitations de tiers les plus proches, ainsi que des stades, des zones destinées à l'habitation par des documents d'urbanisme opposables aux tiers, et établissements recevant du public autre que ceux qui sont en lien avec la collecte des déchets.

La valorisation par biométhanisation permet également de réduire des nuisances olfactives aux abords des centres équestres ; le fumier étant généralement entreposé en tas à l'extérieur. Les nuisances olfactives liées à l'épandage des fumiers sont aussi évitées. En effet, dans le digesteur, la dégradation de la matière organique permet de transformer les acides gras volatils qui sont, en partie, responsables des odeurs (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.5.2. *Nuisances sonores*

Les nuisances sonores de l'unité sont minimales. En effet, seuls cinq camions par jour sont autorisés à transporter les intrants. De plus, l'agitation dans le digesteur est réalisée grâce à des vérins hydrauliques n'émettant aucun bruit. Concernant le moteur de cogénération, celui-ci est placé dans un caisson insonorisé spécialement conçu avec isolation acoustique par panneaux de laine minérale ; son bruit est perceptible dans un rayon très limité, à savoir 64 dB à dix mètres de l'usine (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.5.3. *Risques sanitaires*

Cette unité de méthanisation ne présente pas de risque sanitaire car n'utilise pas de matière toxique (Sologne Biogaz, 2014). De plus, le temps de séjour de la matière dans le digesteur (20 jours) est beaucoup plus long que celui du rumen d'une vache (24h) et ce procédé a lieu à une température relativement élevée, écartant ainsi quasi tout danger de contamination sanitaire (EDORA & Valbiom, 2012).

Une unité de méthanisation permet un assainissement des déchets et une réduction des risques sanitaires. La digestion anaérobie assure une élimination quasi totale des éléments pathogènes qui sont présents dans les intrants. Les conditions thermophiles du digesteur permettraient de détruire 99,9 % des agents pathogènes ; le digestat utilisé sur

les cultures agricoles est, ainsi, plus sain (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

6.5.4. Impacts sur le réchauffement climatique

La création d'une unité de biométhanisation permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. En effet, les émissions de CH₄ et de CO₂ dans l'atmosphère attribuées au stockage en plein air des déjections animales (production non contrôlée de GES) et à proximité des centres équestres sont réduites (EDORA & Valbiom, 2012 ; Sologne Biogaz, 2014). De plus, l'usine produit du biogaz et du digestat, ce biogaz produit permet de remplacer les énergies non renouvelables. La transformation du digestat en matières fertilisantes naturelles et leurs ventes permettent une réduction de l'utilisation d'engrais chimiques conventionnels qui requièrent plus d'énergie fossile à la production et qui sont souvent importés, entraînant des émissions GES. Les émissions de GES évitées par cette unité de biométhanisation a été approchée à l'aide de l'outil DIGES de l'ADEME. Ce bilan est positif ; l'usine éviterait une émission de 1 315 tonnes d'équivalent CO₂ par an (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; Sologne Biogaz, 2014 ; THEMA Environnement, 2014).

69

6.5.5. Consommation d'eau

Les besoins en eau de cette unité de biométhanisation sont négligeables. La consommation d'eau pour des usages sanitaires est estimée à ~12,5 m³/an et pour les opérations de lavage à ~100 m³/an. (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016 ; THEMA Environnement, 2014).

6.6. Limites de l'unité

6.6.1. En amont

Au démarrage de l'usine, plusieurs problèmes se sont présentés. En effet, des pierres, des arroseurs automatiques et plus fréquemment des fers à cheval (Fig. 24) ont été retrouvés dans le fumier ; un tri a donc dû être effectué en amont du processus de digestion anaérobie et a engendré une grande perte de temps. Un licol, pièce de harnachement pour cheval, a également été retrouvé coincé dans une pompe. *Sologne Biogaz* a dû durcir ses conditions d'acceptation des intrants jusqu'à rapporter le fumier chez

les exploitants si celui-ci ne convenait pas. Cela n'a pas plu aux écuries, ceux-ci ont dû prendre certaines dispositions, comme ne plus stocker leur fumier à même le sol, mais sur une dalle en béton par exemple (M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

Fig. 24. Pièces métalliques retrouvées au cours du processus , prise à La Ferté Saint-Aubin (Photo personnelle, 31 mars 2016)



6.6.2. Pendant le processus

L'usine *Sologne Biogaz* est actuellement à l'arrêt et ce depuis bientôt un an. En effet, suite à un défaut de fabrication de l'agitateur, celui-ci s'est déformé ; rendant impossible la poursuite de l'activité de l'exploitation. Les responsables du projet *Sologne Biogaz* ont eu recours à la société *OGIN Biogaz Technology B.V.* située aux Pays-Bas pour le développement de l'unité. Cependant, le fumier de cheval étant composé d'une grande proportion de matière sèche, celui-ci a tendance à se tasser rendant très difficile son mélange par l'agitateur. La société *OGIN* a peut-être sous-estimé la force que l'agitateur devait surmonter dans le digesteur avec ce type d'intrant très pailleux et cela a conduit à une déformation de l'instrument (P. Perrette, communication virtuelle, 07 mars 2016 ; M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

6.6.3. Solutions de *Sologne Biogaz*

À l'heure actuelle, comme il n'y a plus de production de biogaz, la chaudière gaz/biogaz de l'installation a pris le relais afin de maintenir une production de chaleur pour le centre aquatique. *Sologne Biogaz* utilise donc du gaz provenant du réseau de distribution pour fournir de la chaleur au centre aquatique.

Après presque un an d'arrêt, les dirigeants de *Sologne Biogaz* souhaitent développer une solution plus simple et plus robuste qu'ils comptent valider par un pilote, mais qui ne donnera pas de résultat avant au moins un an. Le processus serait différent et comporterait

moins de fumier mais plus de semences ; l'agitateur aura, ainsi, plus facile à mélanger la matière. De plus, les semences semblent avoir un pouvoir méthanogène plus élevé que le fumier équin et les problèmes liés aux indésirables dans le fumier seraient également réduits. *Sologne Biogaz* compte également ajouter des plaques métalliques dans le digesteur rectangulaire afin d'arrondir sa forme ; cela permettra une meilleure agitation en réduisant les dépôts dans les coins du digesteur (P. Perrette, communication virtuelle, 07 mars 2016 ; M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

6.7. Conclusion et perspectives de l'étude de cas

L'usine semble, en général, avoir été conçue de manière optimale. Celle-ci se trouve loin des habitations et ne génère que très peu d'impacts olfactifs et sonores. Elle est principalement automatisée et permet une gestion autonome des processus. Elle est, également, dotée d'un système informatique très performant, capable de donner des informations précises sur le site et à l'extérieur de celui-ci. Cela permet au personnel de ne pas devoir travailler de nuit et aux dirigeants de ne pas devoir être sur le site pour superviser les activités (P. Perrette, communication virtuelle, 07 mars 2016 ; M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

Cependant, divers problèmes se sont posés lors de la mise en activité du projet. En effet, les premiers problèmes qu'a rencontrés cette usine de méthanisation se situaient dans la phase de préparation de la matière. En effet, de nombreux indésirables se trouvaient dans les intrants. À l'avenir, il sera impératif d'harmoniser les conditions de stockage et de manutention du fumier de cheval en Europe ; trop peu d'écuries respectent les exigences législatives à ce propos.

De manière générale, la valorisation de la matière organique par digestion anaérobie est encore une technique méconnue. Une sensibilisation du public et plus particulièrement, des acteurs de la filière permettrait d'attirer l'attention sur cette nouvelle énergie fortement prometteuse et, sans doute, de changer certains comportements. Plus généralement, ce manque de connaissances de la part du public représente également un obstacle dans la mise en place d'unité de biométhanisation ; phénomène NIMBY (Not In My Back Yard).

Lors le processus, l'agitateur (Fig. 19) s'est déformé ; sans doute en raison de la force sous-dimensionnée que l'instrument devait surmonter pour mélanger les substrats dans le digesteur. Il serait judicieux de diminuer la proportion de paille dans le fumier

équin afin de réduire les tassements dans le digesteur. Néanmoins, cela semble délicat de demander aux centres équestres d'utiliser moins de paille dans les boxes. En effet, ceux-ci pensent améliorer la qualité de vie des équidés en utilisant exagérément de la litière.

En outre, des problèmes sur l'usine en elle-même ont pu être décélés comme le fait qu'il ne soit pas possible de valoriser l'entièreté du biogaz produit. Ce constat va également se retrouver dans de nombreuses unités de biométhanisation. En effet, lorsque la production de biogaz est trop importante, l'excédent de gaz est brûlé et dans l'usine de *Sologne Biogaz*, celui-ci est brûlé sans récupération d'énergie. Dès lors, au lieu d'avoir recours à un système de cogénération électricité/chaleur, il serait plus facile de pouvoir injecter le biogaz produit dans le réseau de gaz naturel. Il serait donc impératif de promouvoir et faciliter l'injection de biométhane dans le réseau de distribution.

À l'heure actuelle, *Sologne Biogaz* souhaite, développer un nouveau procédé qui impliquerait plus de semences. Cependant, l'usine perdrait en partie de son avantage, celle-ci profitait en effet de la grande production de fumier équin de sa région afin de s'approvisionner en intrants. Néanmoins, l'unité étant située en bordure de la Beauce (région à vocation agricole), il y a beaucoup de semenciers à proximité (P. Perrette, communication virtuelle, 07 mars 2016 ; M. Lemoine, entrevue, 31 mars 2016).

CONCLUSION

À l'heure actuelle, l'humanité consomme plus que ce que la Terre ne peut générer. Il est nécessaire de continuer à raisonner afin d'inverser cette tendance et de valoriser les déchets produits. L'idée est de penser au-delà d'une économie linéaire qui se base sur des ressources fossiles.

Le secteur équin contemporain est d'une importance économique considérable pour l'Union Européenne (Liljenstople, 2009). Avec 350 000 équidés estimés pour l'année 2012, la Belgique possède la plus forte concentration mondiale d'équidés (CEC *et al.*, 2010). Les activités équines en Belgique génèrent ainsi d'énormes quantités de résidus organiques. La gestion de ce fumier implique une charge financière supplémentaire pour le gestionnaire d'écurie. De plus, le fumier équin est dans la plupart des cas, en vertu des pratiques actuelles, traité comme un déchet. Ce substrat est pourtant un matériau organique qui contient un potentiel réel pour la production d'énergie et/ou d'engrais. Non seulement valoriser les milliers de tonnes de fumier de cheval semble être économiquement rentable (Lundgren and Pettersson, 2009), mais c'est aussi un moyen de protéger l'environnement que de recycler ses composants.

La réglementation en matière de stockage et de manutention du fumier équin en Belgique est régie par le Programme de Gestion Durable de l'Azote (Moniteur Belge, 2014) qui est une mise en œuvre de la Directive Nitrate (Directive 91/676/CEE). Outre l'épandage, il existe d'autres solutions efficaces pour limiter les problèmes que rencontrent aujourd'hui les producteurs de fumier de cheval, comme la technique de biométhanisation par exemple. Concernant cette dernière, comparée à d'autres pays d'Europe, la production de biogaz par des installations agricoles est encore mal adoptée en Belgique et, particulièrement, par le secteur équin.

La mise en place d'unité de biométhanisation devrait, par exemple, être encouragée par des programmes ciblés. Il serait judicieux de fournir de l'information aux gestionnaires d'écurie et ce, via des canaux de communication propre à cette filière qui sont bien différents de ceux de la filière agricole. Une sensibilisation est également nécessaire afin d'éviter le prétraitement du fumier à l'entrée des unités de biométhanisation et cela, dans le but d'éviter les indésirables dans le processus. Des aides budgétaires pourraient être accordées aux gestionnaires d'écurie pour promouvoir cette

technique de valorisation qui semble être prometteuse pour l'avenir. Il serait, ainsi, judicieux que les autorités belges s'investissent dans la mise en place et dans le financement de nouvelles unités. De plus, la réglementation belge devrait aller en faveur de l'introduction du biogaz dans le système de distribution du gaz naturel, comme cela est déjà le cas en Allemagne.

Selon différents auteurs, en se basant sur le potentiel méthanogène du fumier de cheval pailleux, celui-ci serait tout à fait adapté à la valorisation énergétique par production de biogaz (Böske *et al.*, 2014 ; Böske *et al.*, 2015 ; Chamy and Ramos, 2011 ; Mönch-Tegeder *et al.*, 2013 ; Pouech *et al.*, 2009). Toutefois, pour tenir compte du manque d'oligoéléments dans celui-ci, une solution d'oligoéléments pourrait être introduite dans le processus afin de garantir une production de biogaz optimale (Abdoun and Weiland, 2009 ; Böske *et al.*, 2015).

Un des problèmes récurrents dans la valorisation du fumier de cheval est la forte proportion de paille dans celui-ci (ce qui augmente son rapport C/N). Il faudrait, ainsi, réduire cette proportion par un nettoyage quotidien des litières ; en collectant sélectivement les crottins et la litière souillée (Krush, 2014). Néanmoins, cela demande un travail plus régulier pour les gestionnaires d'écuries. Des substrats ayant des rapports C/N bas peuvent être ajoutés au fumier équin ; comme de l'herbe, des fumiers de bovins mous ou des fumiers de poulets. L'idéal serait donc de trouver des partenaires locaux qui pourraient fournir ces cosubstrats. Pour cela, une adaptation de la législation relative au statut de « déchet » du fumier quand celui-ci quitte l'exploitation est nécessaire. Intégrer la filière équine dans le système productif agricole permettrait de mettre en place des synergies ou des coopérations entre les producteurs des différentes filières. De plus, en valorisant le digestat issu de la biométhanisation, le secteur agricole pourrait ne plus être perçu comme un secteur impactant l'environnement mais comme un acteur majeur du recyclage et du réemploi.

En définitive, cette recherche nous permet de constater que l'utilisation du fumier de cheval pour la digestion anaérobie nécessiterait des études plus approfondies ainsi que des mises en place de projet hors laboratoire. Des études économiques plus élaborées devraient être réalisées afin d'évaluer la rentabilité de ces unités, ce qui pourrait, à terme, influencer positivement la décision des gestionnaires d'écurie pour la mise en place d'installations. Des projets de recherches connexes pourront peut-être, à la lumière de recommandations que nous faisons, permettre à d'autres chercheurs de montrer l'opportunité que représente la digestion anaérobie pour le fumier de cheval pailleux.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdoun, E., & Weiland, P. (2009). Optimization of monofermentation from renewable raw materials by the addition of trace elements. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, 68, 69–78.
- ADEME, Aile, Solagro, & Trame (2011, septembre). *La méthanisation à la ferme*. [Guide pratique]. Récupéré de http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/78866_7201methanisation_a_la_ferme.pdf
- ADEME. (2015, février). *Méthanisation*. [Fiche technique]. Récupéré de <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-methanisation-201502.pdf>
- Agayev, E., & Ugurlu, A. (2011). Biogas production from co-digestion of horse manure and waste sewage sludge. *NSTI-NanoTech*, 3, 657-660. Récupéré de <http://www.nsti.org/publications/Nanotech/2011/pdf/1448.pdf>
- Agnew, J., Laguë, C., Schoenau, J., Feddes, J., & Guo, H. (2010). Effect of manure type, application rate, and application method on odours from manure spreading. *Canadian Biosystems Engineering*, 52, 6-19. Récupéré de <http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/52/C1034.pdf>
- Ahring, B. K., Ibrahim, A. A., & Mladenovska, Z. (2001). Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Research*, 35(10), 2446–2452. doi:10.1016/S0043-1354(00)00526-1
- Ahring, B.K. (2003). Perspectives for anaerobic digestion. [Chapitre 1]. Dans B. K. Ahring (dir.), *Biomethanation I* (p. 1-30). Series: *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 81. doi: 10.1007/3-540-45839-5
- Airaksinen, S., Heinonen-Tanski, H., & Heiskanen, M. (2001). Quality of different bedding materials and their influence on the compostability of horse manure. *Journal of Equine Veterinary Science*, 21(3), 125-130. doi:10.1016/S0737-0806(01)70108-6

- Arhoun, B., Bakkali, A., El Mail, R., Rodriguez-Maroto, J. M., & Garcia-Herruzo, F. (2013). Biogas production from pear residues using sludge from a wastewater treatment plant digester. Influence of the feed delivery procedure. *Bioresource Technology*, 127, 242–7. doi:10.1016/j.biortech.2012.09.075
- Aslanzadeh, S., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2011). Pretreatment of straw fraction of manure for improved biogas production. *Bioresources*, 6(4), 5193-5205. Récupéré de https://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_06/BioRes_06_4_5193_Aslanzadeh_TH_Pretreat_Staw_Manure_Biogas_2027.pdf
- Gouvernement Fédéral Belge. (2008). Enquête sur le budget des ménages. Année 2008. Direction générale Statistique et Information économique. Récupéré de <http://statbel.fgov.be>
- Gouvernement Fédéral Belge. (2009). Enquête sur le budget des ménages. Année 2009. Direction générale Statistique et Information économique. Récupéré de <http://statbel.fgov.be>
- Böske, J., Wirth, B., Garlipp, F., Mumme, J., & Van den Weghe, H. (2014). Anaerobic digestion of horse dung mixed with different bedding materials in an upflow solid-state (UASS) reactor at mesophilic conditions. *Bioresource Technology*, 158, 111-118. doi:10.1016/j.biortech.2014.02.034
- Böske, J., Wirth, B., Garlipp, F., Mumme, J., & Van den Weghe, H. (2015). Upflow anaerobic solid-state (UASS) digestion of horse manure: Thermophilic vs. mesophilic performance. *Bioresource Technology*, 175C, 8–16. doi:10.1016/j.biortech.2014.10.041
- Buckley, C. (2012). Implementation of the EU nitrates directive in the republic of ireland - A view from the farm. *Ecological Economics*, 78, 29-36. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.02.031
- Cahurel, J. Y. (2012). *Raisonnement de la fertilisation organique en viticulture biologique*. Journées Techniques Légumes et Cultures Pérennes Biologiques 11-13 décembre 2012. Avignon. Récupéré de http://www.vignevin.com/fileadmin/users/ifv/actualites/Lettre_Oct12/DocSite/Fertilisation_organique.pdf

- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2012). *Biologie* (9e éd. ed.). Montréal: Pearson/Editions du Renouveau pédagogique.
- CBC. (2016). Chiffres de la CBC – 2012. Récupéré le 14 mai de <http://www.cbc-bcp.be/fr/cijfers-bcp-2012/>
- CEC (Centre Européen du Cheval de Mont-le-Soie), Département d'économie rurale de l'Université de Liège & Unité d'économie et de développement rural de l'ULg Gembloux Agro-Bio Tech. (2010). *Le poids socio-économique de la filière équine en Wallonie. Etude réalisée au cours de l'année 2009*. Récupéré de www.linalux-montlesoie.com/images/stories/filiereEquine/poids-socio-eco.pdf
- Cessna, A. J., Larney, F. J., Kuchta, S. L., Hao, X., Entz, T., Topp, E., & McAllister, T. A. (2011). Veterinary antimicrobials in feedlot manure: Dissipation during composting and effects on composting processes. *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 188-198. doi:10.2134/jeq2010.0079
- Chambre d'Agriculture Région NPDC. (2015, août). *Gestion du fumier de cheval. Présentation et caractérisation*. Fiche N°2. Récupéré de http://www.agriculture-npdc.fr/uploads/media/Fiche_gestion_du_fumier_de_cheval_-_Presentation_et_caracterisation_2.pdf
- Chambre d'Agriculture Région NPDC. (2015, août)². *Gestion du fumier de cheval. Valorisation de vos fumiers*. Fiche N°3. Récupéré de http://www.agriculture-npdc.fr/uploads/media/Fiche_gestion_du_fumier_de_cheval_-_Valorisation_de_vos_fumiers_3.pdf
- Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon. (2012). *Guide des produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon*. Récupéré de <http://www.languedocroussillon.chambagri.fr/guide-des-produits-organiques-utilisables-en-lr.html>
- Chamy, R., & Ramos, C. (2011). Factors in the determination of methanogenic potential of manure. *Bioresource Technology*, 102(17), 7673-7677. doi:10.1016/j.biortech.2011.05.044
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057

- Commission Européenne. (2009). Règlement (UE) No 37/2010 du 22 décembre 2009 relatif aux substances pharmacologiquement actives et à leur classification en ce qui concerne les limites maximales de résidus dans les aliments d'origine animale. Récupéré de http://ec.europa.eu/health/files/eudralex/vol-5/reg_2010_37/reg_2010_37_fr.pdf
- Costa, J. C., Sousa, D. Z., Pereira, M. A., Stams, A. J. M., & Alves, M. M. (2013). Biomethanation potential of biological and other wastes. [Chapitre 15]. Dans V. K. Gupta et M. G. Tuohy (dir.), *Biofuel Technologies*, (1st ed., p. 369-396). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-34519-7_15
- Cui, Z., Shi, J., & Li, Y. (2011). Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall. *Bioresource Technology*, 102(20), 9432–9437. doi:10.1016/j.biortech.2011.07.062
- Delfosse, P. (2010). *Microbiologie de la digestion anaérobie. Compte rendu de la présentation de Philippe Delfosse*. Centre de recherche public Gabriel Lippmann. Récupéré de http://www.aile.asso.fr/wp-content/uploads/2013/07/CR_presentation-Phillipe-Delfosse_avec-ppt_2011-06-21.pdf
- Demirel, B. (2009). Laboratory investigations on continuous bio-methanization of energy crops as mono-substrate without supplementation. *Biomass and Bioenergy*, 33(6-7), 988–993. doi:10.1016/j.biombioe.2009.03.005
- Demirel, B., & Scherer, P. (2009). Bio-methanization of energy crops through mono-digestion for continuous production of renewable biogas. *Renewable Energy*, 34(12), 2940–2945. doi:10.1016/j.renene.2009.05.013
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2010). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction, second edition*. doi:10.1002/9783527632794
- Doligez, P. & Leveau, J.M. (2007, juin). *Le compostage du fumier de cheval en élevage*. [Guide Pratique]. Les Haras nationaux, Programme Européen Leader + Groupe d'Action Locale (G.A.L) P.A.P.A.O et Conseil Général de L'Orne. Récupéré de <http://www.filierechevalpaca.com/pdf/7.pdf>
- EBA. (2014)_a. *EBA (European Biogas Association) Biogas Report 2014*. Récupéré de <http://european-biogas.eu/2014/12/16/4331/>

- EBA. (2014)_b. *Biomethane with bright opportunities towards the 2030 target*. Press Release. 27 mars 2014. Récupéré de http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2013/08/2014.03.27-Press-Release_Biomethane-workshop.pdf
- EBA. (2015). *EBA Biogas Report 2015 published – a record growth in Europe !* Récupéré de <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2015/12/2015.12.17-Press-Release-Biogas-Report-2015-a-record-growth-in-Europe.pdf>
- EDORA & Valbiom. (2012). *Comprendre la biométhanisation...* Document “FAQ” rédigé par EDORA dans le cadre de la plateforme biogaz, en collaboration avec Valbiom. Récupéré de http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Biomethanisation/faqbiogazedoravalbiom_vf1351069364.pdf
- Edström, M., Schüßler, I., & Luostarinen, S. (2011). *Combustion of manure: manure as fuel in a heating plant*. Presentation (knowledge report) at Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. Récupéré de http://www.balticmanure.eu/download/Reports/baltic_manure_combustion_final_2_2011_total.pdf
- European Union. (2010). *The EU Nitrates Directive*. Janvier 2010. Récupéré de <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/nitrates.pdf>
- Evlar, A., & Heneffe, C. (2015_a). *Infos pratiques sur la biométhanisation. Le point sur la législation et les aides. Etat des lieux en Wallonie*. Valbiom. 25 juillet 2015. Foire agricole de Libramont. Récupéré de http://valbiom.be/files/library/Even-Vignettes/Libramont-2015/Conf-biometh/1-20150725_VALBIOM-Introduction.pdf
- Evlar, A., & Heneffe, C. (2015_b). *Infos pratiques sur la biométhanisation. Le point sur la législation et les aides. Législation en vigueur*. Valbiom. 25 juillet 2015. Foire agricole de Libramont. Récupéré de http://valbiom.be/files/library/Even-Vignettes/Libramont-2015/Conf-biometh/2-20150725_VALBIOM-Legislation-en-vigueur-2015.pdf

- Evlard, A., & Heneffe, C. (2015c). *Etapes-clés de votre projet de biométhanisation. Démarches administratives et soutien financier*. Valbiom. Septembre 2015
Récupéré de <http://valbiom.be/files/library/Docs/Biomethanisation/150909-Etapes-cles-d-un-projet-V1.6-CH.pdf>
- FAO. (1967). *Rapport sur le recensement mondial de l'agriculture de 1960. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. Rome.
- Farnet, A., Qasemian, L., Peter-Valence, F., Ruauzel, F., Savoie, J. M., & Ferré, E. (2013). Capacity for colonization and degradation of horse manure and wheat-straw-based compost by different strains of *agaricus subrufescens* during the first two weeks of cultivation. *Bioresource Technology*, 131, 266-273. doi:10.1016/j.biortech.2012.12.141
- Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M., & Romero, L. I. (2013). Bio-methanization of organic fraction from municipal solid waste: temperature effects. *Polish Journal of Chemical Technology*, 15(2), 99–106. doi:10.2478/pjct-2013-0030
- Ferry, J. G. (2003). One-Carbon Metabolism in Methanogenic Anaerobes. [chapitre 11]. Dans L. G. Ljungdahl, M. W. Adams, L. L. Barton, J. G. Ferry, M. K. Johnson (dir.), *Biochemistry and Physiology of Anaerobic Bacteria*, (1st ed., p.143-156). New York : Springer New York. doi:10.1007/0-387-22731-8_11
- Fezzani, B., & Ben Cheikh, R. (2010). Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature. *Bioresource Technology*, 101(6), 1628–34. doi:10.1016/j.biortech.2009.09.067
- France Galop, FIVAL & Cheval Français. (2007). *Méthanisation en phase sèche discontinue. Trouvez la solution pour la gestion de votre fumier*. Valorisation du fumier de cheval – la méthanisation. Récupéré de <http://www.cheval-fumier.com/userfiles/1240/File/methanphaseseche.pdf>
- Godden, B. (2012). *VALOR* un logiciel pour l'optimisation de l'utilisation des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle*. Récupéré de http://www.cra.wallonie.be/img/page/valor/doc/Valor_presentation-godden.pdf
- Godden, B. (2014-2015). *Agriculture, forêts et environnement*. Notes de cours. Bruxelles, PUB.
- Hashimoto, A. G. (1983). Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnology and Bioengineering*, 25(1), 185-200.

- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–84. doi:10.1016/j.biortech.2008.12.046
- Horan, N. J., Siquiqui, Z. & Anaman, K. (2011). Optimisation of C:N ratio for co-digested processed industrial foodwaste and sewage sludge using the bmp Test. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9(1), 1-9. doi:10.1515/1542-6580.2327
- IS Forschungsgesellschaft. (2011). *Process for producing biogas. EP 1 997 901 B1*. Récupéré de <http://www.freepatentsonline.com/EP1997901.pdf>
- Jardé, E., Gruau, G., & Mansuy-Huault, L. (2007). Detection of manure-derived organic compounds in rivers draining agricultural areas of intensive manure spreading. *Applied Geochemistry*, 22(8), 1814–1824. doi:10.1016/j.apgeochem.2007.03.037
- JOCE (Journal Officiel des Communautés Européennes). (2000). *Etablissement d'un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive Cadre sur l'Eau)*. L327. 22 décembre 2000. Récupéré de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=OJ:L:2000:327:TOC>
- Kalia, A. K., & Singh, S. P. (1998). Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family-size biogas plants in a hilly region. *Bioresource Technology*, 64(1), 63–66. doi:10.1016/S0960-8524(97)00159-4
- Kaplan, R. M. (2002). Anthelmintic resistance in nematodes of horses. *Veterinary Research*, 33(5), 491.
- Khan, M. N. & Mohammad, F. (2014). Eutrophication: challenges and solutions. [Chapitre 1]. Dans A. A. Ansari et S. S. Gill (dir.), *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* (p. 1–15). Springer. Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-7814-6_1
- Krouk, G., Crawford, N. M., Coruzzi, G. M., & Tsay, Y. (2010). Nitrate signaling: Adaptation to fluctuating environments. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(3), 265-272. doi:10.1016/j.pbi.2009.12.00
- Krouk, G., Crawford, N. M., Coruzzi, G. M., & Tsay, Y. (2010). Nitrate signaling: Adaptation to fluctuating environments. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(3), 265-272. doi:10.1016/j.pbi.2009.12.003

- Kusch, S., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2008). Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99(5), 1280–1292. doi:10.1016/j.biortech.2007.02.008
- Kush, S. (2014). Management and valorisation of equine waste: a review and SWOT analysis. *News in Engineering*, 2(2), 47-54. Récupéré de http://www.sigrid-kusch.de/mediapool/55/553823/data/Management_and_Vvalorisation_of_equine_waste.pdf
- Lashermes, G., Houot, S., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Mary, B., Morvan, T., Chaussod, R., Linères, M, Metzger, L., Thuriès, L., Villette, C., Tricaud, A. & Guillotin, M.L. (2007). Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote. *Echo MO*, n°64. Récupéré de http://www.itab.asso.fr/downloads/com-agro/article_echo_mo_64.pdf
- Liljenstople, C. (2009). Horses in Europe. Swedish Horse Council Foundation, Swedish Board of Agriculture, Swedish University of Agricultural Sciences for EU Equus 2009. Récupéré de <http://www.wbfs.org/files/EU%20Equus%202009.pdf>
- Lundgren, J., & Pettersson, E. (2009). Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology*, 100(12), 3121–3126. doi:10.1016/j.biortech.2009.01.050
- Luxen, P., Godden, B. & Rabier, F. (2012). Le compostage des fumiers, une technique de valorisation des matières organiques en agriculture. Les livrets de l'agriculture. N°20 Guide méthodologique. SPW Editions. Récupéré de http://www.itab.asso.fr/downloads/com-agro/le_compostage_des_fumiers_bernard_godden.pdf
- Mandal, T., & Mandal, N. K. (1998). Biomethanation of some waste materials with pure metallic magnesium catalyst: Improved biogas yields. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1177-1179. doi:10.1016/S0196-8904(97)10056-5
- Markowski, M., Białobrzewski, I., Zieliński, M., Dębowski, M., & Krzemieniewski, M. (2014). Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 69, 219–225. doi:10.1016/j.renene.2014.03.039
- Masse, L., Masse, D.I., Kennedy, K.J., & Chou, S.P. (2002). Neutral fat hydrolysis and long-chain fatty acid oxidation during anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *Biotechnol. Bioeng.* 79, 43–52. doi:10.1002/bit.10284

- McKennedy, J., & Sherlock, O. (2015). Anaerobic digestion of marine macroalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1781-1790.
doi:10.1016/j.rser.2015.07.101
- Mignon, C. (2009). *Biométhanisation : Utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture*. Valbiom. Récupéré de <http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Biomethanisation/utilisationdudigestatcomme fertilisant en agriculture1284120093.pdf>
- Mignon, C. (2012). *Les unités de biométhanisation situées en Région Wallonne*. Valbiom. Octobre 2012. Récupéré de <http://valbiom.be/files/library/Docs/Biomethanisation/Monitoring-des-unites-de-biomethanisation-en-RW-2012.xlsx>
- Ministère de la Région Wallonne. (2006). *La biométhanisation en Région Wallonne*. Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie. Division de l'Energie. Récupéré de <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/la-biomethanisation-en-region-wallonne.PDF?IDR=6534>
- Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. K. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485-495.
doi:10.1016/j.biombioe.2003.08.008
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2013). Investigation of the methane potential of horse manure. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(2), 161-172. Récupéré de <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2445>
- Moniteur Belge. (2014, 12 septembre). Arrêté du Gouvernement Wallon du 13 juin 2014 modifiant le Livre II du Code de l'Environnement, contenant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture.
- Nitrawal. (2014). *Le Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture*. Récupéré de http://www.nitrawal.be/resources/shared/publications/fiches-techniques/Feuillet-PGDAlII_v4.pdf
- OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique). (2001). *Environmental Indicators for Agriculture: Methods and Results*. Paris, France. Récupéré de <http://www.oecd.org/agriculture/sustainable-agriculture/1916629.pdf>

Parlement européen & Conseil de l'Union européenne. (2000). Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets. Récupéré de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0076&from=FR>

Pereira, M.A. (2003). Anaerobic biodegradation of long chain fatty acids biomethanisation of biomass-associated LCFA as a challenge for the anaerobic treatment of effluents with high lipid-LCFA content. University of Minho, Braga, Portugal. Récupéré de <http://hdl.handle.net/1822/4650>

Pettersson, E., & Lundgren, J. (2002). Kretsloppsanpassad förbränning av strömedel/-gödsel från häststallar. Technical Report. NIFES 2002-2. Piteå, Sweden (in Swedish).

Pouech, P., Galibardy, C., Loustale, C., & Arribarrouy, E. (2009). *Étude de caractérisation des fumiers de cheval issus de centres équestres afin d'aider à la décision sur les possibilités de valorisation*. APESA (Centre technologique en environnement et maîtrise des risques) - rapport final. Récupéré de www.cheval-fumier.com/userfiles/1240/File/etude-fumier-equin-rapport-final-120909.pdf

Priyadarshan, P.M., Hoa, T.T.T., Huasun, H., & Gonçalves, P. (2005). Yielding potential of rubber (*Hevea brasiliensis*) in sub-optimal environments. *Journal of Crop Improvement*, 14(1/2), 221–247.

Provenzano, M. R., Daniela Malerba, A., Buscaroli, A., Zannoni, D., & Senesi, N. (2013). Anaerobic digestion of municipal solid waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111(3), 1861–1870. doi:10.1007/s10973-012-2598-6

Quiñones, T. S., Plöchl, M., Pätzolt, K., Budde, J., Kausmann, R., Nettmann, E. & Heiermann, M. (2012). Hydrolytic Enzymes Enhancing Anaerobic Digestion. [Chapitre 6]. Dans a. Mudhoo (dir.), *Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118404089.ch6

Rajendran, K., Jeihanipour, A., Taherzadeh, M. J., & Aslanzadeh, S. (2013). The Effect of Effluent Recirculation in a Semi-Continuous Two-Stage Anaerobic Digestion System. *Energies*, 6(6), 2966–2981. doi:10.3390/en6062966

Rasi, S., Veijanen, A., & Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, 32(8), 1375–1380. doi:10.1016/j.energy.2006.10.018

- Rennela, S., Evanno, S., Paillart, A., Zdanevitch, I., & Gay, G. (2010). *Mise au point d'un réacteur pilote de méthanisation de 5 litres. (18 Jan. DRA-09-104105-13976A)*. Paris (La Défense) : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS). Récupéré de <http://www.ineris.fr/centredoc/reacteur-pilote-methanisation-web.pdf>
- RITTMO Agroenvironnement. (2014). *Mise en œuvre d'une production de digestats séchés de fumier de cheval à l'échelle pilote dans le cadre de l'homologation du digestat de méthanisation*. Rapport final. Etude N° 13-220 R. Récupéré de http://www.loiret.gouv.fr/content/download/15043/102968/file/6%20-%20ICPE_dossier%20Enregistrement.pdf
- Romano, P. V., Krogmann, U., Westendorf, M. L., & Strom, P. F. (2006). Small-Scale Composting of Horse Manure Mixed with Wood Shavings. *Compost Science & Utilization*, 14(2), 132–141. doi:10.1080/1065657X.2006.10702274
- Rutz, D. (2014). *Biogas from waste in 5 European cities: the UrbanBiogas project*. European workshop on biomethane: markets, value chains and applications 11 March 2014 Brussels. Récupéré de http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2014/03/3_Dominik-Rutz_Urban-Biogas.pdf4
- S.P.W. (Service public de Wallonie). [s.d.]_a. *Permis d'environnement et permis unique*. Récupéré le 23 février de <http://www.wallonie.be/fr/formulaire/detail/20520>
- S.P.W. (Service public de Wallonie). [s.d.]_b. *27 juin 1996 - Décret relatif aux déchets (M.B. 02.08.1996)*. Récupéré le 23 février de <http://environnement.wallonie.be/legis/dechets/degen019.htm>
- Sahlström, L. (2003). A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource Technology*, 87(2), 161–166. doi:10.1016/S0960-8524(02)00168-2
- Schuster, R., & Strömberg, B. (1997). Förbränning av gödsel – en orienterande litteraturstudie med kommentarer. Teknisk rapport O3-513. Stiftelsen för värmeteknisk forskning, Stockholm, Sverige.
- Sintzoff, I. (2001, septembre). *Woodsustain - Contributions of wood energy to sustainable development in Belgium*. Final Summary. Récupéré de http://www.belspo.be/belspo/organisation/publ/pub_ostc/CG2131/rCG25s_en.pdf

- Smet, E., Van Langenhove, H. & De Bo, I. (1999). The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. *Atmospheric Environment*, 33, 1295–1303.
- Smith, D. B., & Almquist, C. B. (2014). The anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and horse manure mixtures in a bench-scale, two-phase anaerobic digestion system. *Environmental Technology*, 35(5-8), 859. doi:10.1080/09593330.2013.854398
- Sologne Biogaz. (2014). *Unité de méthanisation La Ferté-Saint-Aubin*. Récupéré le 15 mars 2016 de <http://www.solognebiogaz.fr/>
- Song, W., Ding, Y., Chiou, C. T., & Li, H. (2010). Selected veterinary pharmaceuticals in agricultural water and soil from land application of animal manure. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1211.
- SPF, AFMPS & AFSCA. (2016). *Synthèse sur l'administration de médicaments chez les équidés*. Version révisée du 21 avril 2016. Récupéré de http://www.fagg-afmps.be/sites/default/files/medicaments_pour_chevaux_et_inscription_fr_2016-04_version_def_4.doc
- Stambasky, J. (EBA President). (2015). *Biomethane for transportation in Europe. 13th European Week of Regions and Cities. Brussels, 14.10.2015*. Récupéré de [http://biofuelregion.se/wp-content/uploads/2015-10-14-Jan-Stambasky-EA-WS-sustainable-energy-supply-biomethane.pdf](http://biofuelregion.se/wp-content/uploads/2015-10-14-Jan-Stambasky-EBA-WS-sustainable-energy-supply-biomethane.pdf)
- Swinker, A.M., Tanner, M.K., Johnson, D.E. & Benner, M.S. (1998). Composting characteristics of three bedding materials. *Journal of Equine Veterinary Science*, 18 (7), 462-466. doi:10.1016/S0737-0806(98)80039-7
- Tafdrup, S. (1995). Viable energy production and waste recycling from anaerobic digestion of manure and other biomass materials. *Biomass & Bioenergy*, 9, 303-314. doi:10.1016/0961-9534(95)00098-4
- THEMA Environnement. (2014, juillet). *Unité de méthanisation de La Ferté-Saint-Aubin (45)*. Dossier d'incidence Natura 2000.
- Tsai, W., Huang, C., Chen, H., & Cheng, H. (2015). Pyrolytic conversion of horse manure into biochar and its thermochemical and physical properties. *Waste and Biomass Valorization*, 6(6), 975-981. doi:10.1007/s12649-015-9376-1

- Van Lier, J.B., Tilche, A., Ahring, B.K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyos, M., Hulshoff Pol, L.W., Lens, P., & Verstraete, W. (2001). New perspectives in anaerobic digestion. *Water Science & Technology*, 43(1), 1-18. Récupéré de http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_57-58/010024947.pdf
- Vanegas, C., & Bartlett, J. (2013). Anaerobic Digestion of *Laminaria digitata*: The Effect of Temperature on Biogas Production and Composition. *Waste and Biomass Valorization*, 4(3), 509–515. doi:10.1007/s12649-012-9181-z
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–40. doi:10.1016/j.biortech.2008.02.044
- Wartell, B. A., Krumins, V., Alt, J., Kang, K., Schwab, B. J., & Fennell, D. E. (2012). Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology*, 112, 42–50. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.012
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860. doi:10.1007/s00253-009-2246-7
- Weill, A. & Duval, J. (2009). « *Module 7, Amendements et fertilisation – Chapitre 12, Les amendements organiques : fumiers et composts* ». Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée. Equiterre. Récupéré de https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/MARAI_Chapitre_12Amendements.pdf
- Zhu, S., & Lee, S.W. (2005). Co-combustion performance of poultry wastes and natural gas in the advanced swirling fluidized bed combustor (SFBC). *Waste Management*, 25, 511–518.

ANNEXES

Annexe 1. Teneurs moyennes en N dans les engrais de ferme par catégories animales
(Moniteur Belge, 2014)

Types d'engrais	Catégories animales	Kg Azote par tonne
<i>Fumier</i>	Bovins	5,9
	Ovins	6,7
	Porcins	6,0
	Litière bio maîtrisée de porcins	10,5
	Caprins	6,1
	Équins	8,2
	Volailles	26,7
<i>Purin</i>	Stabulation entravée	2,4
	Jus d'écoulement de fumière	0,6
<i>Lisier ou fientes</i>	Bovins	4,4
	Porcins	6,0
	Phase solide bovins	5,1
	Phase solide porcins	6,9
	Volailles	
	- Fientes humides	15
	- Fientes préséchées	22
	- Fientes séchées	35
<i>Compost de fumier</i>	Lapins	8,5
	Bovins	6,1

Annexe 2. Normes moyennes d'épandage pour l'azote organique sur cultures et prairies
(en kg par ha et par an) (Moniteur Belge, 2014)

Normes moyennes pour l'azote organique (en kg par ha et par an)	Cultures	Prairies
<i>Norme valable sur l'ensemble de la Région Wallonne</i>	115	230
<i>Norme valable dans la zone vulnérable</i>	170	170

Annexe 3. Normes de production moyenne d'azote par animal pour une année (Moniteur
Belge, 2014)

	Catégories animales	Kg Azote/an
<i>Bovins</i>	Vache laitière	90
	Vache allaitante	66
	Vache de réforme	66
	Autre bovin de plus de 2 ans	66
	Bovin de moins de 6 mois	10
	Génisse de 6 à 12 mois	28
	Génisse de 1 à 2 ans	48
	Taurillon de 6 à 12 mois	25
	Taurillon de 1 à 2 ans	40
<i>Ovins et caprins</i>	De moins d'1 an	3,3
	De plus d'1 an	6,6

<i>Équins</i>	> 600 kg	65
	De 200 à 600 kg	50
	< 200 kg	35
<i>Porcins</i>	Truie et truie gestante	15
	Verrat	15
	Porc à l'engrais et cochette	7,8
	Porc à l'engrais et cochette sur litière biomaîtrisée	4,5
	Porcelet (de 4 à 10 semaines)	1,9
<i>Volailles</i>	Poulet de chair (40 jours)	0,27
	Poule pondeuse ou reproductrice (343 jours)	0,60
	Poulette (127 jours)	0,27
	Coq de reproduction	0,43
	Canard (75 jours)	0,43
	Oie (150 jours)	0,43
	Dinde, dindon (85 jours)	0,81
	Pintade (79 jours)	0,27
<i>Lapins</i>	Mère (naissage + engraissement)	3,6
	À l'engrais	0,32
Autruche et émeu		3
Caille		0,04

Annexe 4. Installations de biométhanisation de types agricole et industriel en Wallonie en 2012 ; adresse, technologie, capacité du digesteur, quantité et type de substrat utilisés (Mignon, 2012)

	Adresse	Technologie	Capacité du digesteur (m³)	Quantité et type de substrat utilisé
Pinguin Lutosa Foods	ZI du vieux-Pont, 5 7900 Leuze-en-Hainaut	Industriel - UASB	1200, 1500, 1500 Total : 4 200	Eaux de process : 1 100 000 m³/an
Filtre anaérobie CTA	Rue de la charmille, 16 4577 Modave	Filtre anaérobie	3 x 3,5 Total : 10,5	Lisier bovin : 700 t/an
Materne	Allée des cerisiers 5030 Floreffe	Entreprise (méthaniseur eaux usées)	3 150	Eaux usées
Cosucra (sucrierie Warcoing)	Rue de la sucrierie 1, 7740 Warcoing	UASB	2 000	Eaux usées d'usine agroalimentaire : 1 000 000 m³/an
Gebrüder Lenges pGmbH	Zur Ochsenbaracke 21 4780 RECHT	Infiniment mélangé	~ 10 000	Lisier porcins Lisiers bovins Coproducts d'agro-industries Total : ~ 49 000 t/an
Ferme Heck	Auf dem Schwartzberg, 11 4750 Butgenbach	Infiniment mélangé		
Ferme du Faascht	Faascht, 131 6717 Attert	Infiniment mélangé (agricole)	2 x 750, 2 400, 4 000 Total : 7 900	Lisier bovin : 2 250 t Fumier bovin : 2 750 t Résidu agro-industrie : 9 000 t Ensilage de maïs : 2 500 t Tonte de pelouse : 500 t Total : ~ 17 000 t/an
Surizénergie	Rue de la brasserie, 20 5600 Surice	Infiniment mélangé	1 500	Effluent d'élevage : 1 000 t Coproducts d'agro-industries : 2 000 t Déchets verts : 500 t Maïs énergie : 500 t Total : 4 000 t/an

Vanheede Biomass Solutions	Rue de l'épinette, 12 7040 Quévy	Infiniment mélangé	2 x 2 400 Total : 4 800	Coproduits d'agro-industries : 21 160 t Déchets d'abattoir (stercoraire) : 2 000 t Reste alimentaire - restaurant, grande surface : 28 400 t Maïs énergie : 8 440 t Total : 60 000 t/an
Bioenergie E.G.H.				
Bioenergie Libramont (L'oréal)				
Ferme Dries	Amel			
Mydibel SA	Rue du piro lannoy, 30 7700 Mouscron	UASB / UAC	3600, 1600, 1600 Total : 6 800	Eau épuration : 390 000 t/an
AIVE - site de Tenneville	Route de Beausaint, 3 6971 Champlon	Infiniment mélangé (intercommunale)	3150	Ordures ménagères organique (30 000 T/an) + dégazage CET
Joluwa	Chaussée de Hal, 150 1400 Nivelles	Procédé Greenwatt en deux étapes.	2 digesteurs : 400 et 55 1 post-digesteur : 400	Racines de chiclon : 3 400 t/an Maïs énergie : 600 t/an Total : 4 000 t/an
Sucrierie de Fontenoy				
Cinergie	Rue de Plomcot, 2b 6224 Wanfercée - Baulet	Infiniment mélangé ("tank in tank")	2 digesteurs et 1 post digesteur Total : 5 100	Fiente de poule lisier bovin fumier bovin Total : 45 000 t/an
Ferme Devos	Rue de la Montagne, 23 6853 Framont	Poche	360	Lisier bovin : 2 000 m³/an
Biogaz du Haut Geer SCRL	Rue du Pont de Darion, 18 4250 Geer	Centralisé - infiniment mélangé	1500, 1500, 3000 Total : 6 000	Boues industrielles Fumier bovin Coproduits agro-industrie Culture énergétique Résidu de culture Total : 45 000 t/an

Annexe 5. Installations de biométhanisation de types agricole et industriel en Wallonie en 2012 ; Quantité de biogaz produit, utilisation du biogaz, quantité de digestat et utilisation du digestat (Mignon, 2012)

	Quantité de biogaz produit (m³/an)	Utilisation du biogaz	Quantité de digestat (t/an)	Utilisation du digestat
Pinguin Lutosa Foods	4 000 000	Cogénération	300	Vendu
Filtre anaérobie CTA	6 000	Chaudière gaz (hiver uniquement)	660	Epandage sur terres agricoles
Materne	478 248	Chaudière gaz	1 100	Epandage sur terres agricoles
Cosucra (sucrierie Warcoing)	1 600 000	Cogénération	Digestat traité en station d'épuration (SBR)	
Gebrüder Lenges PGmbH	env. 8 8 00 000	Cogénération		
Ferme Heck		Cogénération	~35-40 000	Epandage sur terres agricoles
Ferme du Faascht	2 800 000	Cogénération	17 000	Séparation de phase : <u>Liquide</u> - 16.000 T dont 4.000 T séché et 12.000 T épandu sur terre agricole <u>Solide</u> - 380 T : fertilisant en attente de certification
Surizénergie	480 000	Cogénération	3 600	Epandage sur terres agricoles
Vanheede Biomass Solutions	8 000 000	Cogénération	55 000	Epandage sur terres agricoles
Bioenergie E.G.H.		Cogénération		
Bioenergie Libramont (L'oréal)		Cogénération		

Ferme Dries		Cogénération			
Mydibel SA	2 749 000	Cogénération	4 000	Vendu	
AIVE - site de Tenneville	4 000 000	Cogénération	26 400	Composté vendu (100%)	
Joluwa	360 000	Cogénération	3 600	Epandage sur terres agricoles	
Sucrerie de Fontenoy					
Cinergie		Cogénération		Epandage sur terres agricoles	
Ferme Devos	805	Cogénération	1600 m ³	Epandage sur terres agricoles	
Biogaz du Haut Geer SCRL		Cogénération	43 000	Epandage sur terres agricoles et traitement par évaporation sous vide de la fraction liquide non utilisée en agriculture.	