

Lactofermentation de fumier pailleux

Auteur : Vandevoorde, Noé

Promoteur(s) : 5610

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en agroécologie, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10545>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative" (BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ
LIBRE
DE BRUXELLES



LIÈGE
université



LACTOFERMENTATION DE FUMIER PAILLEUX

Noé VANDEVOORDE

*Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention
du diplôme de Master en Agroécologie*

Année académique 2019-2020

Promotrice : Marjolein Visser (ULB)

Expériences de terrain réalisées à la Chèvrerie de la Croix de la Grise

Le présent document n'engage que son auteur.

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique, représentée par la promotrice, membre du personnel enseignant de l'ULB.

LACTOFERMENTATION DE FUMIER PAILLEUX

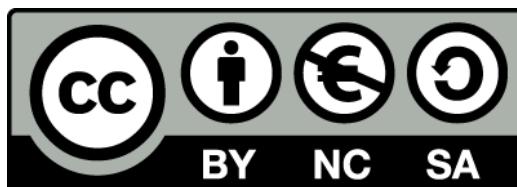
Noé VANDEVOORDE

*Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention
du diplôme de Master en Agroécologie*

Année académique 2019-2020

Promotrice : Marjolein Visser (ULB)

LICENCE DE DROITS D'AUTEUR



CC BY NC SA 4.0 International

VOUS ÊTES AUTORISÉ À :

PARTAGER. Copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats ;

ADAPTER. Remixer, transformer et créer à partir du matériel.

L'Offrant ne peut retirer les autorisations concédées par la licence tant que vous appliquez les termes de cette licence.

SELON LES CONDITIONS SUIVANTES :

ATTRIBUTION. Vous devez créditer l'Œuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'Œuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Œuvre.

PAS D'UTILISATION COMMERCIALE. Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Œuvre, ni en tout ni en partie du matériel la composant.

PARTAGE DANS LES MÊMES CONDITIONS. Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Œuvre originale, vous devez diffuser l'Œuvre modifiée dans les mêmes conditions, c'est à dire avec la même licence que celle avec laquelle l'Œuvre originale a été diffusée.

PAS DE RESTRICTIONS COMPLÉMENTAIRES. Vous n'êtes pas autorisé à appliquer des conditions légales ou des mesures techniques qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'Œuvre dans les conditions décrites par la licence.

NOTES :

Vous n'êtes pas dans l'obligation de respecter la licence pour les éléments ou matériel appartenant au domaine public ou dans le cas où l'utilisation que vous souhaitez faire est couverte par une exception.

Aucune garantie n'est donnée. Il se peut que la licence ne vous donne pas toutes les permissions nécessaires pour votre utilisation. Par exemple, certains droits comme les droits moraux, le droit des données personnelles et le droit à l'image sont susceptibles de limiter votre utilisation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS & PARTICIPATION FINANCIÈRE	v
RÉSUMÉ & ABSTRACT	vi
1 INTRODUCTION	1
1.1 FERTILITÉ ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	1
1.2 DESCRIPTION DE LA RECHERCHE	4
1.2.1 <i>Question de recherche</i>	4
1.2.2 <i>Partenariat</i>	5
1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE	7
2 ÉTAT DE L'ART	8
2.1 FUMIER COMPOSTÉ OU FERMENTÉ ?	8
2.1.1 <i>Fumier composté</i>	9
2.1.2 <i>Fumier fermenté</i>	11
2.1.2.1 <i>Bokashi</i>	11
2.1.2.2 <i>Ensilage</i>	11
2.1.2.3 <i>Lactosérum</i>	13
2.2 MICROBIOLOGIE DES ENSILAGES	14
2.2.1 <i>Bactéries et archées</i>	14
2.2.1.1 <i>Bactéries lactiques</i>	14
2.2.1.2 <i>Entérobactéries</i>	17
2.2.1.3 <i>Clostridia</i>	18
2.2.1.4 <i>Archées méthanoliques</i>	19
2.2.2 <i>Champignons, moisissures et levures</i>	20
2.3 BIOCHIMIE DES ENSILAGES	20
2.3.1 <i>Respiration et fermentation</i>	20
2.3.2 <i>Différentes phases de l'ensilage</i>	21
2.3.2.1 <i>Phase aérobiose initiale</i>	21
2.3.2.2 <i>Fermentation primaire</i>	22
2.3.2.3 <i>Stabilisation</i>	23
2.3.2.4 <i>Fermentation secondaire</i>	24
2.3.2.5 <i>Phase aérobiose finale</i>	24
2.3.3 <i>Étanchéité et stabilité aérobiose</i>	25
2.3.4 <i>Conditions nécessaires pour une bonne fermentation</i>	26
2.3.5 <i>Empreinte écologique</i>	27
2.4 BOKASHI, MÉTHODE ALTERNATIVE DE COMPOSTAGE ?	30

3 EXPÉRIENCES DE TERRAIN	32
3.1 MÉTHODOLOGIE	32
3.1.1 <i>Essais en situation réelle (tas)</i>	33
3.1.1.1 Mesure du poids des tas	34
3.1.1.2 Prise d'échantillons	36
3.1.2 <i>Tests à petite échelle (fûts)</i>	37
3.1.2.1 Microorganismes efficaces Microferm®	38
3.1.3 Matériel	38
3.1.4 <i>Calibration des échantillons</i>	39
3.1.5 <i>Protocoles des analyses en laboratoire</i>	41
3.1.5.1 Analyses classiques	41
3.1.5.2 Cinétique de minéralisation	43
3.1.6 <i>Incertitudes et calculs de significativité statistique</i>	45
3.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	46
3.2.1 <i>Température</i>	46
3.2.2 <i>Masse</i>	49
3.2.3 <i>Composition</i>	50
3.2.4 <i>Discussion intermédiaire</i>	52
3.2.4.1 Hétérogénéité, réplications et incertitudes	52
3.2.4.2 Variations du pH	56
3.2.4.3 Variations de composition des tas	58
3.2.4.4 Variations de composition des écoulements	59
3.2.4.5 Données au jour 126	61
3.2.4.5 <i>Influence du lactosérum</i>	61
3.2.4.6 <i>Cinétique de minéralisation</i>	65
4 CONCLUSION	68
4.1 NOS RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	68
4.2 ANALYSE RÉFLEXIVE	69
4.3 CONCLUSION DE LA LITTÉRATURE	73
4.4 OUVERTURE	74
4.4.1 <i>Améliorations des expériences</i>	74
4.4.2 <i>Un pas plus loin</i>	75
4.4.3 <i>Manquements plus larges</i>	76
4.4.4 <i>Recommandations</i>	76
4.5 CONCLUSION GÉNÉRALE	77
5 BIBLIOGRAPHIE	i
6 ANNEXES	viii
6.1 DONNÉES BRUTES	viii

6.2 ERREURS DE MESURE ET INCERTITUDES	xxiii
6.2.1 <i>Propagation des incertitudes</i>	xxiii
6.2.2 <i>Calcul des masses de fumier sec, de lactosérum dilué épandu et de lactose apporté</i>	xxiii
6.3 SIGNIFICATIVITÉ STATISTIQUE	xxv
6.3.1 <i>Cas de la masse après 47 jours</i>	xxv
6.3.1.1 Code R	xxvii
6.3.2 <i>Tests de Student sur base d'écart types propagés</i>	xxix
6.3.2.1 Code R	xxix
6.4 PHOTOS	xxx
DÉCLARATION SUR L'HONNEUR CONTRE LE PLAGIAT	xxxii

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Marjolein Visser pour son support durant toute la durée de ce mémoire, pour ses conseils d'orientation et ses relectures. Merci également à Vincent Delobel pour sa disponibilité, ses conseils et sa mise à disposition de fumier, de matériel et de place dans sa ferme ; merci à Christiane et Francis Delobel-Faux pour leur support et à Francis pour ses prises de température quasi quotidiennes durant de nombreuses semaines. Un tout grand merci à l'équipe d'Agra-Ost, et en particulier à José Wahlen (et à Claudy) pour son aide et son support, notamment lorsque nous étions dans le fumier jusqu'aux genoux. Merci aussi à l'équipe de Michamps, et en particulier à Thibaut Cugnon, pour leurs analyses et leurs conseils.

Merci à Caroline De Clerck d'avoir accepté d'être notre lectrice et de prendre part à notre jury. Merci à Sigrid Flahaut pour son orientation en microbiologie. Merci à Germain Van Bever pour son assistance en traitement statistique. Merci à Morgane De Toeuf pour sa relecture de nos traductions allemandes.

Merci à Basile Herpigny pour son support durant ce quatrième trimestre confiné. Merci à lui et à Mathieu Vandevoorde pour leurs relectures. Merci enfin à Alexandra Elbakyan pour son combat pour une science libre de droit et sa désobéissance civile, sans qui notre recherche bibliographique aurait été fort limitée.

PARTICIPATION FINANCIÈRE

Ce mémoire (non financé), n'aurait pu être réalisé sans la participation financière et logistique de l'ASBL Agra-Ost (frais de matériel, aide logistique, moitié des frais d'analyse réalisée à Michamps, frais d'analyses réalisées au CARAH et au Comité du Lait, accès aux données du réseau *Pameseb...*) ni sans celle de l'ASBL Centre de Michamps (réalisation d'analyses et prise en charge de la moitié des frais de celles-ci).

« *Tout l'engrais humain et animal que le monde perd, rendu à la terre au lieu d'être jeté à l'eau, suffirait à nourrir le monde.* » *Hugo, 1862.*

RÉSUMÉ

Inscrit dans une recherche initiée par Vincent Delobel à la Chèvrerie de la Croix de la Grise, ce mémoire s'intéresse à l'autonomie paysanne en fertilité et, en particulier, à une recherche d'une meilleure utilisation des cycles internes du carbone et de l'azote par lactofermentation de fumier pailleux humidifié avec du lactosérum (effluent de la transformation du lait sur la ferme).

Nos expériences confirment que l'ensilage anaérobiose du fumier permet une diminution significative des pertes en masse du la matière ensilée. Cependant, par manque de répétition et suite à des difficultés de prise d'échantillons représentatifs, la plupart de nos données de terrain sont inconclusives.

D'après la littérature existante, pour être efficace l'acidification au cours de la fermentation anaérobiose nécessite un taux de matière sèche de l'ordre de 20 à 30% de MS, un taux de sucre de l'ordre de 6 à 10% (MF) et des conditions anaérobies les plus strictes possibles. La lactofermentation, suite à une baisse du pH, permet une réduction des pertes en carbone et en azote tout en évitant l'émission de méthane. Elle permet, de plus, de valoriser le lactosérum.

ABSTRACT

This master thesis is part of a research project initiated by Vincent Delobel at the *Chèvrerie de la Croix de la Grise*. It focuses on peasants' autonomy in terms of fertility. In particular, we study in this dissertation a search for a better use of the internal cycles of carbon and nitrogen through the lacto-fermentation of strawy manure moistened with whey (effluent from milk processing on the farm).

Our field experiments confirm that anaerobic ensilage of manure allows a significant reduction in the mass losses of the ensilaged material. However, due to lack of repetition and difficulties in taking representative samples, most of our field data are inconclusive.

According to existing literature, acidification during anaerobic fermentation requires to be effective : a 20-30% DM content, a 6-10% (FM) sugar content, and the strictest possible anaerobic conditions. Lactofermentation, following a decrease in pH, allows a reduction in carbon and nitrogen losses while avoiding methane emissions. It also allows the valorization of whey.

Nous avons marché, un bandeau sur les yeux.

On nous a dit : « Investissez ! Produisez !

Le progrès fera de vous des dieux,

Produisez plus et plus encore. Allez-y à fond !

La performance ou la disparition. »

Nous avons suivi les consignes :

Les emprunts, les machines ;

Les emprunts pour payer les machines

Et les machines pour payer les emprunts.

Gagner du terrain,

Avaler son voisin.

Débrider son moteur,

Grossir les montagnes de beurre,

De sucre, de viande et de blé.

Et puis regarder,

Impuissants,

Les prix dégringoler

Sur l'autre versant.

Un seul moyen pour t'en sortir :

Force la dose, force la vache,

Force le sol ! Cravache !

Ou tu vas mourir.

Mon époux, réveille-toi, c'est un cauchemar !

Tu trimes la tête en bas,

Tu engraises ceux qui t'écrasent.

Abruti, ne vois-tu pas

Qu'ils ont dénaturé ton labeur ?

Parfois cependant, tu le dis si bien :

« Descendu de mon tracteur,

Je ne suis plus rien. »

Comment avons-nous cru aussi longtemps

Qu'en détruisant la mère

On nourrirait les enfants ?

Comment n'avoir pas compris auparavant

Que la paix sur la Terre

Passe par le respect de tous les paysans ?

Rebelles et solidaires,

Puissions-nous amorcer un virage salutaire,

Nous détourner des circuits

Qui nous tiennent asservis

Et bannissent, au Sud, les paysans, nos frères.

Qu'à nos propres yeux apparaisse notre vraie grandeur

Et notre urgente raison d'exister :

La Vie — toute vie — est sacrée,

Soyons ses irréductibles défenseurs !

« Parole d'une agricultrice du Nord »

Christiane Faux

INTRODUCTION

1

« L'agriculture et l'approvisionnement alimentaire sont responsables d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre. Nous en sommes pleinement conscients. Et nos productions subissent déjà les effets des changements climatiques. C'est pourquoi, au sein de nos fermes, réseaux et groupements, nous nous attelons à expérimenter, apprendre et partager de nouvelles pratiques et techniques qui visent à atténuer et à s'adapter aux changements climatiques. »

*Vincent Delobel,
8 décembre 2019,
Chaîne humaine
pour le Climat,
Bruxelles.*

1.1 FERTILITÉ ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Quelle que soit la vision de l'agroécologie — forte (deep) ou faible (shallow) —, toutes les définitions placent le recyclage de la biomasse et l'entretien de la vie des sols parmi ses tout premiers principes[→]. De plus, la mention implicite au sol dans la volonté de « permettre le recyclage de la biomasse, [d']optimiser la disponibilité des nutriments et [d']équilibrer le flot de nutriments »[→] implique un intérêt à limiter les pertes par volatilisation ou lixiviation au cours de ce recyclage, afin que les nutriments soient effectivement disponibles pour la vie du sol et pour les cultures. Ainsi, à travers une dualité des matières organiques animales entre polluant atmosphérique et / ou aquifère (lorsqu'elles sont mal gérées) et fertilisant (lorsqu'elles participent au recyclage efficace de la biomasse), la gestion de la fertilité des sols agricoles est intimement liée à l'impact environnemental des effluents d'élevage.

*Voir par exemple
Pavarotti (2018) et
les références qui y
sont citées.*

*Stassart et al. (2012,
p. 10).*

La fertilité d'un agroécosystème peut être définie comme étant « sa capacité à produire de la biomasse végétale »[→]. Au-delà d'un simple engrangement des sols, elle dépend largement de la texture (proportion relatives en argiles, limons, sables...) et de la structure du sol (présence d'agrégats, stratification en horizons...) et des propriétés physiques qui en découlent (rétention d'eau, compaction, susceptibilité

*Mazoyer et Roudart
(2002, p. 73).*

à l'érosion, aération, infiltration...). On distingue dès lors les engrais — substances destinées à stimuler directement la croissance des plantes, via l'apport d'éléments nutritifs minéraux ou d'hormones de croissance par exemple — des amendements — qui visent une amélioration de la structure et des propriétés physicochimiques et biologiques du sol, sans impacter directement la nutrition végétale. Cependant, certains apports fertilisants peuvent présenter à la fois les caractéristiques d'un engrais et d'un amendement : c'est le cas des matières organiques, dont le fumier (*i.e.* mélange de déjections et d'urines animales avec de la paille ou une autre litière sèche carbonée) [→]. De plus, offrant des perspectives de diminution des externalités négatives de l'agriculture, il a été montré de longue date que le fumier est l'un des meilleurs amendements organiques pour le stockage de carbone dans les sols [→].

*Voir par exemple
Weil et Brady (2017)
et les références qui y
sont citées.*

*Neal et Thorneley
(1983).*

La paysannerie, en cherchant à se détacher de l'agroindustrie et à reprendre son autonomie, fait grand usage de fumier au sein des cycles non marchands internes aux fermes. Cette recherche d'autonomie paysanne est triple : financière (en opposition aux emprunts à répétition ou à une dépendance totale aux aides et subsides agricoles), décisionnelle (quant aux pratiques agricoles, aux circuits de vente...) et de production (choix des productions, autoproduction et utilisation de cycles internes, possession des moyens de production...) au sein des fermes aussi bien qu'à une échelle collective [→]. L'autonomie en fertilité par l'utilisation de cycles internes (*e.g.* pailles et déjections pour la production de fumier) est dès lors l'un des pans de la (re)paysannisation et est au cœur des pratiques agroécologiques. Cette autonomie se base sur la volonté de mieux clore ces cycles (en évitant le plus possible les pertes), tout en se détachant des intrants dont les prix sont en constante augmentation (alors que le revenu agricole, lui continue de baisser) [→]. Elle revendique également l'utilisation de ces cycles internes de fertilité, notamment face aux réglementations environnementales souvent basées sur les effluents des élevages industriels hors sol.

*van der Ploeg
(2014).*

*van der Ploeg
(2014).*

Malheureusement, les modalités classiques de gestion, de stockage et d'épannage de la matière organique participent souvent à une perte significative de nutriments. Les pertes en matière sèche durant le stockage et le traitement des

lisiers et fumiers peuvent être considérables, dépassant régulièrement 50% de pertes en carbone et 10 à 40% de pertes en azote[→], réduisant d'autant la matière organique retournée aux sols et son contenu en éléments fertilisants. Par ailleurs, ces pertes signifient des émissions dans l'environnement, par volatilisation ou écoulement.

Voir par exemple Dewes (1995), Eghball et al. (1997) et Petersen, Lind et al. (1998) et les références qui y sont citées.

Le monde paysan, en travaillant de pair avec la nature, est généralement soucieux des impacts environnementaux liés aux techniques agricoles et en particulier au changement climatique qui l'affecte directement. Les volatilisations sous forme de CO_2 (source principale des pertes de carbone organique), de N_2 (source principale des pertes d'azote organique), de CH_4 (gaz à effet de serre de pouvoir de réchauffement global à 100 ans 25 fois supérieur à celui du CO_2), de NH_3 (causant acidification et eutrophisation) ou encore de N_2O (polluant, destructeur de la couche d'ozone et gaz à effet de serre de pouvoir de réchauffement global à 100 ans 298 fois supérieur à celui du CO_2)[→], le lessivage de NH_4^+ , de NO_3^- , etc. peuvent être produits à toutes les étapes du cycle de vie du fumier : de l'étable à l'épandage en passant par la gestion intermédiaire. Les pertes sur lesquelles il est le plus facile d'agir, sans devoir revoir complètement le fonctionnement et les pratiques d'une ferme, sont celles liées au stockage et à la gestion de ce fumier. Les mouvements paysans en sont conscients et œuvrent pour mettre en place une agriculture plus durable[→].

Forster et al. (2007).

Delobel (2019).

L'agroécologie, telle que décrite par le GIRAf, se doit de « stimuler l'exploration de situations éloignées des optimaux locaux déjà connus »[→]. Dans cette optique, depuis la fin de l'hiver 2019, Vincent Delobel ne compose plus le fumier pailleux de ses chèvres à la Chèvrerie de la Croix de la Grise (Havrinnes) : il le fermenté sous bâche après humidification avec du lactosérum dilué, issu de sa fromagerie (effluent de la transformation du lait sur la ferme). La technique, inspirée du *bokashi* japonais, revient à faire un ensilage du fumier pour le conserver par fermentation lactique anaérobie. Supposée n'avoir que très peu de pertes gazeuses et protégeant le fumier de la pluie, cette technique de gestion du fumier est supposée avoir un impact environnemental et climatique moindre et apporter plus de matière organique lors de l'épandage qu'un compostage traditionnel,

Stassart et al. (2012).

participant à une stimulation de la vie édaphique et à une potentielle augmentation des teneurs en matière organique du sol. La technique permet également de valoriser le lactosérum et les nutriments qu'il contient, qui doit sinon être épandu, opération couteuse.

Ainsi, l'intérêt premier de l'ensilage est de fortifier l'autonomie paysanne de la ferme en matière de fertilité, tout en présentant différentes externalités positives. Inscrit dans la recherche initiée par Vincent Delobel, ce mémoire s'intéresse dès lors à l'autonomie en fertilité et, en particulier, à une recherche d'une meilleure utilisation des cycles internes du carbone et de l'azote autour de la lactofermentation du fumier pailleux.

1.2 DESCRIPTION DE LA RECHERCHE

1.2.1 QUESTION DE RECHERCHE

La technique de fermentation anaérobiose du fumier porte des noms variés : fermentation anaérobiose, lactofermentation, ensilage, stockage sous bâche, bokashi... Elle pose de nombreuses questions, en particulier concernant la mise en pratique au sein d'une ferme paysanne. Le carbone et l'azote sont-ils mieux conservés durant la fermentation que durant le compostage ? Est-ce toujours le cas après épandage ? Quels sont les microorganismes à la base de la fermentation ? La fermentation a-t-elle besoin d'un inoculant ? Le substrat est-il adéquat à la fermentation lactique ? L'assainissement est-il suffisant lors de la fermentation ? Quel est l'impact de la matière fermentée sur la santé du sol et sur les cultures ? Y a-t-il un risque de faim d'azote ? Le fumier fermenté stimule-t-il la microflore édaphique et la pédofaune ? La fermentation permet-elle une séquestration accrue du carbone dans les sols ? Le fumier lactofermenté respecte-t-il la réglementation du Programme de gestion durable de l'azote wallon (PGDA)[→] ? Comment garantir de bonnes conditions anaérobies ? Y a-t-il des alternatives à une bâche plastique pour créer les conditions anaérobies ? Etc.

*Service publique de
Wallonie (2014).*

Le cadre d'un mémoire de master étant fortement réduit par la durée d'un quadrimestre, nous avons dû nous restreindre à quelques-unes des questions de la liste entamée ci-dessus. L'étude de l'impact sur la vie du sol et sur la séquestration de carbone, par exemple, nécessite plusieurs années d'expérimentation et est hors de notre portée. Ainsi, notre projet de recherche cherche à vérifier si :

« LA FERMENTATION ANAÉROBIE DU FUMIER EST UNE PRATIQUE AGROÉCOLOGIQUE
INTÉRESSANTE POUR LA GESTION PAYSANNE DE LA FERTILITÉ. »

Le but étant de donner plus d'autonomie aux paysan·ne·s, nous entendons par *pratique agroécologique intéressante* une pratique qui apporte à la fois des externalités positives (nous nous limiterons principalement à une étude des émissions de gaz à effet de serre) tout en renforçant l'autonomie en fertilité par rapport au compostage classique du fumier.

Nous tenterons de répondre à cette question sur base de la littérature existante (permettant d'aborder les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que de donner un aperçu de certaines questions de microbiologie), ainsi que sur base d'expérimentations en ferme (testant la mise en place *in situ* de la fermentation du fumier pailleux et analysant l'évolution de la composition du fumier au cours de la fermentation).

1.2.2 PARTENARIAT

En partenariat avec Vincent Delobel, le centre de recherche et de formation Agra-Ost (Saint-Vith) et le laboratoire du Centre de Michamps (Bastogne), nous avons obtenu un support matériel, logistique et d'analyses, nous permettant de mettre en place des expériences en ferme et de faire faire des analyses en laboratoires. Ainsi, l'ensemble des expériences a été mise en place à la Chèvrerie de la Croix de la Grise et la plupart des analyses de laboratoire ont été réalisées par l'équipe du Centre de Michamps.

Sans ce partenariat, nous n'aurions pas pu mettre en place les essais de terrain et nous aurions dû nous contenter d'un travail bibliographique. Cependant, il nous semble important de faire quelques remarques préliminaires, sur lesquelles nous reviendrons à la section *Analyse réflexive* (page 69). En effet, si la participation

avec différents acteurs est extrêmement enrichissante, elle peut également être source de confusions ou de limitations.

Notons premièrement que « l’expérimentation en ferme demande de simplifier les protocoles expérimentaux et de diminuer le nombre de répétitions »[→], impactant négativement la qualité des résultats obtenus. La Chèvrerie de la Croix de la Grise se situant dans le Tournaisis, il nous a été impossible de nous rendre sur place pour prendre des mesures de routine (de température, de pH, de volumes d’écoulements...) ou des échantillons intermédiaires, alors que nous suivions encore des cours à Bruxelles et Gembloux en parallèle. Vincent Delobel, travaillant déjà à plein temps dans sa ferme et engagé sur de nombreux autres fronts du mouvement paysan, n’a pas eu l’opportunité de donner de son temps pour nos expériences. Ainsi, ce n’est que grâce à l’investissement de Francis Delobel, le père de Vincent, que nous avons pu obtenir des précieux relevés de température quasi journaliers.

Van Dam et Visser (2019, p. 169).

Notons également que la distance à parcourir pour José et Claudy d’Agra-Ost, entre les Cantons de l’Est, le Tournaisis, puis en faisant un crochet via Bastogne pour déposer les échantillons avant la fermeture du Centre de Michamps, a impliqué un temps de travail à la Chèvrerie relativement restreint. Nous avons ainsi été amenés à réaliser des manipulations et prises d’échantillons les plus rapides possibles, au détriment de leur qualité.

De plus, il n’est pas facile d’assumer la position d’un étudiant mémorant et d’imposer des dispositifs et critères d’expérimentations face à un agriculteur, réel acteur du terrain, et des chercheurs de centres agronomiques. Position d’autant plus délicate que le partenariat s’est fait de manière tacite, posant $n = 3$ comme base de travail pour les prises d’échantillons, sans répétition des expériences, sans réflexion plus poussée entre balance financière d’analyse et de qualité des résultats.

Finalement, la mise en place du confinement suite à la crise sanitaire du COVID-19 ne nous a pas facilité les choses. Durant de longues semaines nous n’avons eu accès ni au matériel d’Agra-Ost et de Michamps, ni à l’aide de l’équipe d’Agra-Ost, ni même à la Chèvrerie. Alors que nous avions initialement envisagé des

discussions avec d'autres paysans et chercheurs intéressés par la thématique, pour partager sur leurs modes de gestion du fumier et nourrir notre réflexion de leurs expériences pratiques, il nous a été impossible de les rencontrer et d'organiser une présentation de notre dispositif expérimental et de nos résultats partiels. De plus, certaines parties du laboratoire du Centre de Michamps ont complètement fermé durant le confinement, reportant certaines analyses — dont celles de cinétiques de minéralisation, demandant 91 jours d'incubation — jusqu'à la mi-mai. La remise de notre mémoire a alors été reportée *de facto* à la seconde session.

Cela nous mène à conclure que les données présentées dans la partie *Expériences de terrain* doivent être interprétées avec prudence, les moyens (financiers, matériels, humains...) pouvant être mis en œuvre dans le cadre d'un mémoire en ferme étant limités, parfois aux dépens de la précision des résultats.

1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE

La suite de ce mémoire est divisé en trois grandes parties. L'*État de l'Art* fait un état des lieux de la littérature au sujet de l'ensilage de fumier et de la comparaison entre compostage et fermentation. Les *Expériences de terrain* reprennent la méthodologies, les résultats et la discussion de nos essais en ferme. Enfin, la *Conclusion* résume notre recherche bibliographie et de terrain et conclu en revenant sur notre question de recherche.

ÉTAT DE L'ART 2

« *Le recyclage des effluents [d'élevage] par [ensilage pour] l'alimentation [du bétail] semble être une approche plus rentable que leur élimination ou leur utilisation comme engrais.* »^a *Fontenot et Jurubescu (1980).*

Chacun des thèmes abordés dans cette première partie pourrait faire l'objet d'un mémoire à part entière et fait encore activement partie de la recherche en agroécologie. Nous ne ferons ici qu'aborder les aspects pertinents dans le questionnement entamé par Vincent Delobel : la fermentation anaérobiose du fumier puis l'épandage au champ de ces matières organiques fermentées permettent-ils de diminuer l'impact environnemental de l'agriculture paysanne tout en augmentant son autonomie en fertilité ?

Le premier chapitre de cette partie décrira les modes de gestion du fumier que sont le compostage et la lactofermentation (que nous décrirons en termes d'ensilage). Les deux chapitres suivants s'intéresseront plus en détail à la microbiologie et à la biochimie des ensilages. Enrichis de ces connaissances, nous conclurons cette partie avec un retour sur la comparaison entre compostage et fermentation ; en particulier, nous discuterons de leur empreinte écologique (en termes d'émissions de gaz à effet de serre).

2.1 FUMIER COMPOSTÉ OU FERMENTÉ ?

Traditionnellement, le fumier était empilé dans la cour de la ferme et conservé sur place jusqu'à épandage au champ ou en prairie. Cette pratique est d'ailleurs

a. Citation originale : « *Recycling of waste by feeding appears to be a more economically feasible approach than disposal or use as fertilizer.* »

encore courante[→]. Sans aération de la matière et en l’empilant sur plus d’un mètre cinquante de hauteur, un tassement naturel s’opère instaurant des conditions anaérobies au cœur du tas, menant à une fermentation interne. La couche extérieure du fumier en revanche, à l’air libre, chauffe et composte en présence d’oxygène. Le résultat donne ce que nous appellerons un *fumier composté-fermenté*. Le degré de compostage ou de fermentation dépend de la fréquence de l’apport de nouvelle matière, de la hauteur du tas stocké (faisant varier la pression de tassement interne), du temps de stockage, du taux d’humidité de la matière (en fonction de la provenance animale, la quantité de paillage, la protection contre les intempéries...), etc. D’autres modes de gestion du fumier, du compostage (avec aération et retournement d’un andain d’épaisseur modérée) à la fermentation anaérobie (avec bâchage), en passant par la protection contre le soleil et les intempéries du fumier sous un toit, le tassement du fumier sans le bâcher, voire en apportant des sucres à la matière pour favoriser la fermentation. Chacune de ces modalités influence les pertes par volatilisation et par écoulement, mais aussi les propriétés biochimiques de la matière produite, modifiant son comportement et son influence après épandage[→].

Anon et al. (2001).

Afin d’établir une comparaison de terrain basée sur l’itinéraire technique adopté par Vincent Delobel, nous nous sommes intéressé, d’un côté, au compostage passif (avec une seule aération initiale) à l’air libre du fumier pailleux — qui correspond au mode de gestion qu’il utilisait jusqu’en 2019 — et, de l’autre, à sa lactofermentation sous bâche — qu’il étudie depuis. Afin de faciliter à la fois le compostage et la fermentation (et d’offrir une matière initiale identique pour notre comparaison), le fumier pailleux sec a été humidifié dans les deux cas avec du lactosérum dilué (déchet de la fromagerie de la ferme, résidu de lait durant la production du fromage, collecté dans la citerne de la ferme où il est dilué avec les eaux du parcours extérieur des chèvres et les écoulements de la compostière).

Voir par exemple

G. M. Shah,

G. A. Shah et al.

(2015) et les

références qui y sont citées.

2.1.1 FUMIER COMPOSTÉ

Le PGDA entend par compost « la substance résultant du processus de décomposition biologique autotherme et thermophile en présence d’oxygène et dans des

conditions contrôlées de biomatière, sous l'action de micro et macro-organismes afin de produire une matière humique stable, hygiénisée, riche en matière organique »[→]. À la fois en tant qu'amendement et en tant qu'engrais, le compost présente de nombreuses propriétés intéressantes. Tout en conservant une bonne partie des nutriments, il permet d'éviter les mauvaises odeurs liées à l'application d'un fumier frais, d'assainir la matière compostée (par inactivation de pathogènes microbiens et de graines d'adventices) ou encore de réduire la masse de matière à épandre (réduisant d'autant les couts d'épandage). Cependant, la montée en température lors du compostage favorise les pertes par volatilisation, principalement de carbone et d'azote. Les autres nutriments, moins facilement volatilisés, se concentrent alors dans la matière, rendant le compost final plus riche si on compare les compositions par tonne de fumier initial ou par tonne de compost final[→].

Service publique de Wallonie (2014).

Les avantages généralement associés au compostage incluent[→] :

- la production d'une matière organique sans odeur et stable, qui peut être stockée jusqu'au moment de l'épandage ;
- une réduction de la masse permettant une manipulation simplifiée ;
- la production d'un fertilisant de rapport C/N équilibré (toute faim d'azote ayant été régulée par les microorganismes au sein du compostage) ;
- une minéralisation après épandage plus lente que celle du fumier frais ;
- un assainissement thermophile rapide de la matière organique.

Pour certains, une partie de ces avantages n'en sont pas, la réduction de masse étant synonyme d'une perte de matière organique qui aurait pu être apportée au sol, la minéralisation lente ne stimulant pas le développement des cultures, etc.

Voir par exemple Weil et Magdoff (2004) et Weil et Brady (2017) et les références qui y sont citées.

D'autres désavantages cités incluent[→] :

- une quantité totale de nutriments plus faible (en comparaison au fumier frais), par pertes par volatilisation et lixiviation ;
- une accessibilité lente aux minéraux présents pour les plantes ;
- une haute teneur en phosphore pouvant mener à une saturation des sols ;
- une moindre stimulation de la vie édaphique suite à l'oxydation de la matière organique la plus labile.

Lorsque le compostage et / ou le stockage du compost est fait en plein air, l'action de la pluie peut accentuer les pertes d'éléments minéraux et des matières organiques solubles par lixiviation.

2.1.2 FUMIER FERMENTÉ

2.1.2.1 *Bokashi*

Vincent Delobel donne le nom de bokashi à la technique qu'il a mis en place. Au Japon, le bokashi est utilisé comme complément au compost traditionnel, comme engrais et comme inoculant microbien améliorateur du sol[→]. Souvent réduites à une méthode de fermentation de la matière organique, les méthodes de préparation de bokashi sont en réalité variées. En agriculture biologique traditionnelle japonaise, le bokashi se prépare en aérobiose, avec retournement régulier de la matière dans le double but de l'oxygénérer et de la refroidir, afin de ne pas dépasser les 50°C et maintenir en vie les microorganismes mésophiles[→]. Il ne s'agit dès lors pas de fermentation, mais d'une sorte de compostage à froid. L'apparition de bokashi anaérobiose est survenue suite aux travaux de Higa (1997) et au brevetage de ses « microorganismes efficaces » (EM®). La technique de préparation du bokashi qu'il a mise en place se fait en anaérobiose, avec ajout d'EM® et de sucre (généralement sous la forme de mélasse) pour assurer leur développement. Promue par les adeptes du courant Nature Farming, elle est déconseillée sans l'utilisation d'inoculant et de sucre, menant généralement au développement de moisissures et pourritures[→].

Wakui (2009).

Nishio (1996).

Voir par exemple

Nishibuchi et al.

(2011), Nishio (1996)

et Wakui (2009)

2.1.2.2 *Ensilage*

La pratique mise en place à la Chèvrerie de la Croix de la Grise, si elle s'inspire du bokashi anaérobiose, est plus proche d'un ensilage classique de fourrage. Dans un silo en conditions anaérobies, une acidification rapide de la matière sous une valeur du pH de 5 mène à une inhibition du développement des microorganismes et à une préservation de la matière ensilée avant que les microorganismes n'aient pu la décomposer[→]. Cette acidification est assurée par le développement d'une population de bactéries lactiques, transformant les sucres simples en acide lac-

McGechan (1990).

tique. D'autres pratiques d'ensilage, court-circuitant la fermentation, se basent sur l'ajout d'acides pour atteindre directement une valeur du pH de 4[→].

Le processus de fermentation peut être divisé différentes en phases[→] :

1. une phase aérobie initiale ;
2. une phase de fermentation primaire ;
3. une phase de fermentation secondaire ;
4. une phase aérobie finale.

Durant la première phase, la respiration aérobie consomme l'oxygène piégé sous la bâche ainsi que les sucres solubles et produit dioxyde de carbone (CO₂) et chaleur. Les microorganismes qui dépendent d'oxygène pour survivre meurent (ou entrent en dormance) au fur et à mesure que l'oxygène vient à manquer. En parallèle, les microorganismes anaérobies sortent de leur dormance et colonisent la matière ensilée tout au long de la deuxième phase. Sous les conditions adéquates, les bactéries lactiques prennent rapidement le dessus durant la fermentation primaire, en produisant de l'acide lactique qui baisse le pH progressivement. Si la valeur du pH passe sous la barre de 5, le développement de la plupart des microorganismes présents dans l'ensilage sera inhibé, préservant la matière jusqu'à ouverture du silo. Si le pH ne descend pas assez bas ou que de l'oxygène parvient à l'intérieur du silo, une phase de fermentation secondaire peut avoir lieu. L'oxydation de l'acide lactique durant cette phase fait remonter le pH, restaurant des conditions viables pour les microorganismes neutrophiles et menant à une décomposition plus avancée de la matière. Enfin, à l'ouverture du silo, l'oxygène pénètre à nouveau dans la matière, rétablissant les conditions aérobies et la microflore associée.

Si la fermentation lactique peut être contrôlée efficacement en laboratoire (dans les étuves stérilisées, avec des populations de bactéries connues et un substrat contrôlé), la réalisation d'un silo en ferme est toujours plus délicate. La composition de la matière ensilée, aussi bien par ses teneurs en sucres que par son pouvoir tampon ou encore sa microflore, influencent le degré de réalisation de la fermentation[→]. En particulier, si le fumier est une source suffisante de bactéries

Voir par exemple les travaux de Virtanen (1947).

McDonald (1981).

lactiques — ne nécessitant dès lors pas d'inoculant —, il manque de sucre pour servir de substrat stimulant l'acidification du silo[→].

*Teixeira Franco,
Buffière et al.
(2018a).*

2.1.2.3 *Lactosérum*

L'humidification du fumier avec du lactosérum dilué avant l'ensilage a pour but premier de permettre une meilleure fermentation en diminuant le taux de matière sèche du fumier pailleux. En effet, cette humidification permet à la fois un meilleur développement microbien et aide à mettre en place les conditions anaérobies, en chassant l'air du fumier.

L'utilisation de lactosérum dilué pour l'humidification trouve également une justification multiple. Premièrement, étant acide, il opère une première baisse du pH du fumier ensilé qui nuit au développement des microorganismes neutrophiles et favorise l'établissement de la lactofermentation[→]. Il contient également encore un peu de lactose, apportant des sucres au développement des bactéries lactiques —ne connaissant pas le degré de dilution du lactosérum (dépendant de la production laitière et de la pluviométrie), nous analyserons l'impact de cet apport de sucre dans notre dispositif expérimental.

*Woolford et Pahlow
(1998).*

Enfin, produit en trop grande quantité pour la fosse septique, le lactosérum doit être stocké, puis épandu sous la réglementation des « jus agricoles » (ou comme aliment pour le bétail)^{b→}. L'utilisation de ce liquide pour la gestion du fumier permet ainsi de mieux valoriser les nutriments qu'il contient et d'éviter son épandage couteux (financièrement, en temps, en tassemement des sols...). Le rôle du lactosérum dans la fermentation du fumier tient donc plus de l'optimisation du substrat pour la fermentation que de l'inoculation.

*Service publique de
Wallonie (2014).*

b. L'utilisation du lactosérum comme engrais ou aliment pour le bétail ne peut être faite qu'au sein de l'exploitation où il est produit. Si la transformation du lait a lieu en dehors d'une exploitation agricole, le lactosérum doit être traité par Rendac ou être pasteurisé pour utilisation comme aliment dans une exploitation porcine agréée. Si ces démarches ne sont pas prises, le lactosérum est considéré comme un déchet et est sous la responsabilité de la Région wallonne (AFSCA, communication privée).

2.2 MICROBIOLOGIE DES ENSILAGES

2.2.1 BACTÉRIES ET ARCHÉES

2.2.1.1 Bactéries lactiques

La dénomination de *bactéries lactiques* regroupe des bactéries de l'ordre des *Lactobacillales* réparties dans quatre familles (*Lactobacillaceae*, *Enterococcaceae*, *Leuconostocaceae* et *Streptococcaceae*) présentant la propriété de secréter de l'acide lactique ($C_3H_6O_3$; pK_a de 3,1^c, cf. table 1 page 16) comme produit final principal de leur catabolisme des sucres. Cette sécrétion d'acide leur donne un rôle principal dans la production d'ensilage, permettant de baisser le pH jusqu'à des valeurs où tout développement microbien est inhibé, menant à une conservation du silo. Six genres parmi ces quatre familles sont régulièrement retrouvés dans les silos de fourrage : *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus* et *Lactococcus*[→].

Pahlow et al. (2003).

Toutes les bactéries lactiques se développent optimalement en anaérobiose, alors que la présence de dioxygène (O_2) inhibe partiellement ou totalement le développement de certaines d'entre elles, suite à la production de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) durant leur développement aérobiose. En présence d'oxygène ou en l'absence de substrat adéquat à leur développement, elles peuvent se mettre en dormance jusqu'à ce que leur environnement leur redevienne favorable.

Les bactéries lactiques se développent dans une gamme de température allant de 5°C à plus de 50°C — avec un optimum entre 25 et 40°C — et une gamme de pH allant de 5 à 6. En conditions optimales et en présence de substrat adéquat, elles présentent un temps de génération de seulement quelques heures, menant à une domination rapide sur le reste de la microflore[→].

*Voir par exemple
Pahlow et al. (2003)
et Rooke et Hatfield
(2003) et les
références qui y sont
citées.*

c. Le pK_a est défini, de manière similaire au pH, comme le logarithme inverse de la constante de dissociation acide : $pK_a = -\log_{10} K_a$. Il donne une mesure quantitative de la force d'un acide : la distinction entre acides faibles et forts étant déterminée par convention par le cation hydronium, $pK_a(H_3O^+) = -1,74$ (à 25°C), les acides forts ont des pK_a inférieurs à -1,74 et les acides faibles ont des pK_a variant entre -1,74 et 12. Ainsi, plus la valeur du pK_a est élevée (resp. négative), plus l'acide est faible (resp. fort).

Deux voies principales de fermentation des hexoses existent chez les bactéries lactiques McDonald, 1982 :

- la voie *homofermentaire* catabolise les hexoses en acide lactique ; elle dégage (en conditions optimales) deux moles d'acide lactique et deux moles d'adénosine triphosphate (ATP) par mole d'hexose consommée^d ($C_6H_{12}O_6 + 2 ADP + 2 P_i \rightarrow 2 C_3H_6O_3 + 2 ATP$). Cette voie est empruntée par des bactéries des genres *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Pediococcus* et *Streptococcus* ;
- la voie *hétérofermentaire* catabolise les hexoses en acide lactique, ainsi qu'en éthanol (C_2H_6O) et en dioxyde de carbone (CO_2) ; elle ne dégage qu'une seule mole d'acide lactique et une seule mole d'ATP par mole d'hexose consommée, accompagnées d'une mole d'éthanol et une mole de CO_2 ($C_6H_{12}O_6 + 2 ADP + 2 P_i \rightarrow C_3H_6O_3 + C_2H_6O + CO_2 + ATP$). Certaines bactéries des genres *Lactobacillus* et *Leuconostoc* empruntent cette voie ;

Parmi l'ensemble des bactéries lactiques, le genre *Lactobacillus* est le plus représenté en abondance. Il est traditionnellement divisé en trois groupes non phylogénétiques sur base de ses deux voies fermentaires des hexoses[→] :

- les bactéries *homofermentaires obligatoires* fermentent les hexoses à plus de 85% en acide lactique, mais sont incapables de fermenter les pentoses ;
- les bactéries *hétérofermentaires facultatives* fermentent les hexoses par métabolisme homolactique en conditions optimales, mais peuvent également les cataboliser par voie hétérofermentaire avec production d'acides acétique ($C_2H_4O_3$; pK_a de 4,76) et formique (CH_2O_2 ; pK_a de 3,75, cf. table 1 page suivante), d'éthanol et de CO_2 ; ces bactéries peuvent également cataboliser les pentoses avec production d'acides lactique et acétique (sans dégagement de CO_2) ;
- les bactéries *hétérofermentaires obligatoires* qui englobent le reste des bactéries lactiques du genre *Lactobacillus*, ne fermentant les hexoses qu'avec production importante d'acide acétique, d'éthanol et de CO_2 .

Voir par exemple
Pahlow et al. (2003)
et les références qui y
sont citées.

d. En comparaison, la respiration aérobie permet de dégager 38 moles d'ATP, cf. page 21.

	FORMULE BRUTE	F. SEMI-DÉVELOPPEE	pK _a (à 25°C)
Acide formique	CH ₂ O ₂	HCOOH	3,75
Acide acétique	C ₂ H ₄ O ₂	CH ₃ COOH	4,76
Acide propionique	C ₃ H ₆ O ₂	CH ₃ CH ₂ COOH	4,87
Acide lactique	C ₃ H ₆ O ₃	CH ₃ CHOHCOOH	3,1
Acide butyrique	C ₄ H ₈ O ₂	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH	4,81
Acide isobutyrique	C ₄ H ₈ O ₂	CH ₃ CH ₃ CHCOOH	4,86

TABLE 1 – *Acides gras volatils^e typiquement rencontrés dans les ensilages et leurs pK_a.*

Dans le cadre d'un ensilage, les bactéries lactiques homofermentaires obligatoires sont préférables, produisant plus d'acide lactique pour une même quantité de sucre consommé, sans production d'acides plus faibles, ni de gaz ou d'alcool[→].

McGechan (1990).

Pour la plupart des lactobacilles, la fermentation du lactose n'est pas connue en détail[→] : après hydrolyse en glucose et galactose, certaines catabolisent les deux monosaccharides par les voies homo- ou hétéro-fermentaire alors que d'autres expulsent le galactose lors de l'absorption du lactose dans la cellule et ne métabolisent que le glucose. Les bactéries lactiques sont également capables d'opérer certaines protéolyses, en particulier celles des caséines du lait, dégradées en peptides et acides aminés pouvant être assimilés par ces bactéries. La plupart des souches de *Lactobacillus acidophilus*, souvent présentes dans les produits laitiers, peuvent également dégrader l'amidon. Les deux seules espèces de bactéries lactiques connues pour leur capacité à dégrader le xylose (pentose), composant principale de l'hémicellulose des graminées, sont *Streptococcus bovis* et *Lactococcus lactis*[→].

Pahlow et al. (2003).

Les lactobacilles peuvent également oxyder l'acide lactique lorsque les ressources en sucres sont devenues rares. Suivant l'espèce et la quantité d'oxygène présente dans le milieu, ce catabolisme produit des acides acétique et formique, de l'éthanol et du CO₂. Cette oxydation prend généralement place lors d'une fermentation secondaire dans un silo mal scellé ou à l'ouverture du silo, lorsque la matière ensilée est mise en contact avec l'air extérieur. Cette oxydation de l'acide

De Angelis et
Gobbetti (2016).

e. Les acides gras volatils sont des acides gras (i.e. des acides carboxyliques à chaîne hydrocarbonée non-cyclique) à chaîne courte (de un à six atomes de carbone).

lactique en acides faibles (*i.e.* de pK_a plus élevés, *cf.* **table 1** page précédente), augmente le pH de l'ensilage et nuit à la conservation de la matière ensilée[→]. *Pahlow et al. (2003)*.

2.2.1.2 *Entérobactéries*

Les entérobactéries sont des bactéries qui se retrouvent principalement dans le système digestif des mammifères. Elles sont ainsi largement présentes dans le fumier. Comme les bactéries lactiques, elles sont anaérobies facultatives, avec des températures de développement allant de 10 à 45°C — avec un optimum autour de 40°C — et une gamme de pH idéale entre 6 et 8. Elles peuvent réduire les nitrates (NO_3^-), dégrader les acides aminés et utiliser d'autres composés azotés comme substrat énergétique. Ainsi, dès la phase aérobie initiale, elles sont en compétition avec les bactéries lactiques. Elles sont responsables durant cette période de la dégradation de protéines et sont les organismes causant le plus de dégradation des nitrates par réduction en ammoniac (NH_3) et / ou en monoxyde d'azote (NO)^f. L'ammoniac ainsi produit augmente le pouvoir tampon de la matière ensilée et diminue la vitesse d'acidification par les bactéries lactiques. Lorsque le pH reste au-dessus de 5, les pertes en nitrate peuvent être très élevées[→].

Bien que leur température optimale de croissance soit généralement plus élevée que celle des bactéries lactiques, elles peuvent résister à des températures froides et même maintenir un développement à des températures proches de 0°C, sans compétition avec les bactéries lactiques qui ne se développent en conditions extérieures qu'à partir de températures moyennes de 10°C[→].

*Voir par exemple
Pahlow et al. (2003)
et les références qui y
sont citées.*

Pahlow et al. (2003).

Durant la fermentation primaire en conditions anaérobies (*cf.* chapitre suivant), les entérobactéries dépendent de glucides fermentescibles pour se développer, produisant différents acides (dont acétique et formique) et alcools. De manière générale, une suppression rapide des entérobactéries est désirable dans un ensilage, afin de limiter la fermentation des sucres en acide acétique, ainsi que la fermentation des acides aminés en ammoniac[→].

McDonald (1981).

f. Le monoxyde d'azote, pouvant causer de graves oxydations des voies respiratoires lorsqu'il est inhalé, s'oxyde rapidement en présence d'oxygène en dioxyde d'azote (NO_2) et en oxydes supérieurs (N_2O_3 , N_2O_4), produisant des fumées ocre et brunâtres. La présence de ces fumées est alors un signe de danger pour quiconque s'approche du silo.

2.2.1.3 *Clostridia*

Des bactéries du genre *Clostridium* sont fréquemment rencontrées dans les sols, dont les espèces *Clostridium tetani* (responsable du tétanos) et *Clostridium botulinum* (responsable du botulisme). Si elles sont présentes lors de la manipulation de matières ensilées ou dans des ensilages destinés à l'alimentation animale, elles peuvent présenter des problèmes sanitaires sévères. Préférant les pH neutres, la présence de *Clostridia* lors d'une fermentation réussie est cependant anecdotique[→]. Les facteurs limitant leur développement dans un ensilage comprennent des valeurs basses du pH (suite à la fermentation par les bactéries lactiques) et la présence de nitrites et de monoxyde d'azote (suite à la fermentation par les entérobactéries). Malgré tout, dans un silo contenant peu de sucres fermentescibles et en l'absence de facteur limitant, il peut arriver que les *Clostridia* se développent[→]. *Pahlow et al. (2003)*. *Rooke et Hatfield (2003)*.

Les *Clostridia* sont anaérobies strictes, obtenant leur énergie de la fermentation de sucres et de protéines. La fermentation des protéines et des acides aminés mène à une forte production d'ammoniac (augmentant le pouvoir tampon), ainsi que d'amines et de CO₂. Ainsi, lorsque leur population n'est pas inhibée, une grande part de la production d'ammoniac dans l'ensilage peut leur être imputée[→]. *Pahlow et al. (2003)*.

Clostridium tyrobutyricum, connu pour sa résistance aux pH bas et sa dégradation de fromages à pâtes dures, est capable de fermenter deux moles d'acide lactique en une mole d'acide butyrique (C₄H₈O₂; pK_a de 4,81, cf. **table 1** page 16), avec production de deux moles de dihydrogène (H₂) et deux de CO₂, le tout en présence d'acide acétique (2 C₃H₆O₃ + C₂H₄O₂ → C₂H₄O₂ + C₄H₈O₂ + 2 CO₂ + 2 H₂)[→]. Cette fermentation mène à une augmentation du pH, puisque deux moles d'acide lactique sont remplacées par une mole d'acide butyrique, plus faible. Cependant, ne contenant normalement pas d'acide lactique ni de sucres, le fumier ne semble pas être un milieu adéquat à la multiplication de *C. tyrobutyricum*, laquelle, si présente, ne peut provenir que du lactosérum. *Pahlow et al. (2003)*.

2.2.1.4 Archées méthanogènes

Le règne des archées est divisé en plusieurs phylums et l'ensemble des méthanogènes fait partie de l'embranchement des *Euryarchaeota* (regroupant également des classes halophiles et hyperthermophiles). Quatre à cinq ordres d'archées méthanogènes existent dans cet embranchement, se développant dans des conditions variées (certaines prospérant au-dessus de 80°C ou encore jusqu'à des concentrations de 24% en sel) [→].

Cavicchioli (2007).

De nombreuses espèces retrouvées dans les intestins de divers animaux ou dans les bioréacteurs présentent des températures optimales entre 30 et 45°C et des valeurs de pH autour de 6 à 8 [→]. Même les archées dont les températures optimales sont autour de 55 à 65°C des ordres *Methanothermobacter*, *Methanomicrobiales* ou *Methanosaarcinales* se développent très bien aux températures de 30 à 40°C maintenues dans les bioréacteurs à méthane mésophiles [→].

Cavicchioli (2007).

Voir par exemple Bonin et Boone (2006) et Kletzin (2007) et les références qui y sont citées.

Les archées méthanogènes ne dépendent généralement pas des mêmes substrats que les bactéries hétérotrophes (*i.e.* sucres, acides aminés...) et se contentent le plus souvent d'hydrogène et de dioxyde de carbone ou d'acide acétique. Certaines sont totalement autotrophes, étant également capables de fixer le diazote, d'autres dépendent de composés organiques plus complexes dans leur développement. La production de méthane est le résultat de leur métabolisme énergétique : cette production a lieu soit par fermentation de l'acide acétique ($C_2H_4O_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$), soit par réduction du dioxyde de carbone en présence d'hydrogène ($CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$) [→].

Ferry et Kastread

(2007).

Acide acétique, hydrogène et CO_2 sont produits durant la fermentation secondaire par les *Clostridia*, les entérobactéries et / ou les bactéries lactiques hétérofermentaires et les archées méthanogènes dépendent donc de leur développement. Si le pH baisse suffisamment durant la fermentation primaire, même si les archées pourraient théoriquement survivre aux conditions acides, l'inhibition des bactéries garantit l'arrêt de production de méthane aux pH en dessous de 5 [→].

Ferry et Kastread

(2007).

2.2.2 CHAMPIGNONS, MOISISSURES ET LEVURES

Parmi les eucaryotes, le règne des *Fungi* est à peu près le seul d'importance dans le processus d'ensilage. De nombreux autres organismes décomposeurs unicellulaires et pluricellulaires participent activement à la décomposition de la matière organique dans les sols, mais leur présence est anecdotique dans un tas de compost ou un silo placé hors sol.

De nombreuses levures (*fungi* unicellulaires) peuvent fermenter des glucides en anaérobiose (les boulangers et brasseurs en profitent chaque jour), produisant principalement de l'éthanol et du CO_2 , mais également d'autres acides. L'acide lactique peut également être dégradé en anaérobiose par certaines levures. La plupart des levures sont acidophiles, avec des préférences pour les pH autour de 5. Cependant, les conditions des silos de fourrage réussissent leur généralement défavorables, les acides gras volatils leur étant néfastes en anaérobiose[→]

Les moisissures (*fungi* pluricellulaires) et les champignons (macromycètes) font partie des décomposeurs les plus versatiles, s'accommodant de matière organique considérée récalcitrante pour le reste de la pédoflore, dont les polysaccharides structuraux (hémicellulose, cellulose, lignine...). Leur nombre et leur activité dominent souvent dans les écosystèmes les moins perturbés, d'autant plus que ces derniers comportent des végétaux ligneux. Cependant, ils résistent mal à l'anaérobiose et ne jouent pas de rôle important tant que l'étanchéité du silo est maintenue[→].

Voir par exemple McDonald (1981) et Pahlöw et al. (2003) et les références qui y sont citées.

Pahlöw et al. (2003).

2.3 BIOCHIMIE DES ENSILAGES

2.3.1 RESPIRATION ET FERMENTATION

La respiration aérobie, oxydant complètement le glucose en dioxyde de carbone et en eau ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$) libère environ 2900 kJ d'énergie par mole de glucose oxydé. Un peu plus de la moitié de cette énergie est stockée

durant la respiration sous la forme de 38 moles d'ATP par mole de glucose, le reste étant dissipé sous forme de chaleur (cf. [table 2](#))[→].

Baron (1996).

Bien moins efficiente, la fermentation homofermentative n'oxyde que partiellement le glucose en acide lactique ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_3H_6O_3$) et ne libère qu'environ 240 kJ d'énergie par mole de glucose fermenté. Seul un gros tiers de cette énergie est stockée durant la fermentation sous forme de 2 moles d'ATP par mole de glucose, le reste étant dissipé sous forme de chaleur (cf. [table 2](#))[→].

Baron (1996).

Ce moindre dégagement d'énergie totale par la fermentation s'explique par le fait que l'oxydation n'est pas complète. Elle ne mène pas à la production de CO_2 (forme la plus oxydée possible du carbone), mais à un produit intermédiaire (l'acide lactique), qui contient encore de l'énergie (et qui peut éventuellement être utilisé comme substrat ultérieur par certains microorganismes). Ainsi, au final, la fermentation d'une mole de glucose dégage plus de huit fois moins de chaleur que la respiration.

	ATP	CHALEUR	TOTAL
Respiration	1600 kJ	1300 kJ	2900 kJ
Fermentation (homo.)	84 kJ	155 kJ	239 kJ

TABLE 2 – *Énergie libérée et rendement énergétique de la respiration aérobie et de la fermentation homofermentaire anaérobiose d'une mole de glucose; données issues de Baron (1996).*

2.3.2 DIFFÉRENTES PHASES DE L'ENSILAGE

2.3.2.1 Phase aérobie initiale

La première phase du processus d'ensilage est une phase aérobie initiale, durant laquelle l'oxygène atmosphérique piégé dans le silo est consommé par les microorganismes aérobies présents dans la matière. Les enzymes présentes dans la matière ensilée continuent leur travail tant que les conditions de température et de pH ne les dégradent ou n'inhibent leur fonctionnement[→]. La chaleur dégagée par la respiration est piégée au sein du silo, d'autant mieux que celui-ci est tassé et que l'étanchéité de celui-ci est efficace (empêchant tout transport gazeux de la chaleur), menant à un échauffement initial. La respiration de l'oxygène mène

McDonald (1981).

à la production de CO_2 , qui se dissout généralement dans l'ensilage s'il n'est pas produit en trop grande quantité. Lorsqu'un substrat sucré est présent en abondance, cette phase de respiration est rapide et l'oxygène vient vite à manquer, limitant après quelques heures le développement des microorganismes aérobies et stoppant la montée en température liée à la respiration[→].

Pahlow et al. (2003).

2.3.2.2 Fermentation primaire

Au sens strict de sa définition, la fermentation primaire démarre lorsque l'entièreté de l'oxygène piégé a été consommé[→]. L'étanchéité de la bâche installée, et en particulier l'interface bâche / sol, est dès lors de première importance[→]. Cependant, lorsque la matière n'est pas homogène, des poches d'oxygène peuvent se maintenir à certains endroits alors que la fermentation démarre déjà en d'autres. Un taux d'humidité suffisant, correspondant à des taux de matière sèche inférieure à 30%, permet également d'occuper les interstices dans la matière et de chasser l'oxygène[→]. Lorsque l'étanchéité n'est pas parfaite, un flux d'air peut se mettre en place dans le silo, réintroduisant de l'oxygène au sein de la matière (cf. section *Étanchéité et stabilité aérobie*, page 25). La fermentation primaire dure généralement entre une semaine et un mois, suivant les propriétés de la matière ensilée[→]. Les signes extérieurs indiquant la phase de fermentation primaire sont la production éventuelle de gaz (principalement H_2 et CO_2 , éventuellement CH_4) et de lixiviats (suite au relâchement d'eau par destruction des parois cellulaires et par oxydation des sucres), avec une relative diminution du volume du silo. Ces productions de gaz et d'écoulements diminuent au fur et à mesure de la phase de fermentation primaire. La matière se tassant également sous son propre poids, il est parfois conseillé de retendre la bâche après quelques jours[→]. La fermentation dégageant moins de chaleur que la respiration, la température tend à se stabiliser au sein du silo[→].

McDonald (1981).

Savoie et Jofriet (2003).

Shahardeen et Seran (2013) et Teixeira Franco, Buffière et al. (2018a).

Rooke et Hatfield (2003).

Savoie et Jofriet (2003).

McDonald (1981).

Avec la disparition de l'oxygène à la fin de la phase aérobie initiale, les microorganismes aérobies meurent (ou entrent en dormance) alors que les anaérobies obligatoires commencent à se développer, entrant en compétition avec les anaérobies facultatifs déjà présents. En décomposant les sucres, les bactéries lactiques

produisent de l'acide lactique qui baisse le pH[→]. Dans un ensilage bien mené, une acidification rapide permet de contrôler les populations des autres microorganismes par inhibition de leur développement. Elle vise en particulier limiter la prolifération des entérobactéries et des *Clostridia*, dont le nombre diminue habituellement fortement durant les premières semaines[→]. *Rooke et Hatfield (2003).*

La rapidité de cette domination par les bactéries lactiques, liée au taux de production d'acide lactique, est directement influencée par la disponibilité en sucres fermentescibles, mais aussi par la composition totale de la matière ensilée (impactant l'effet tampon du silo) tout comme par sa texture et par la taille des morceaux végétaux ensilés et le taux de protéines[→]. Si l'acidification n'est pas suffisante (ou pas assez rapide), d'autres microorganismes peuvent prendre le relais des bactéries lactiques et entamer une fermentation secondaire, menant à une augmentation du pH par catabolisme de l'acide lactique en acides plus faibles (cf. section suivante). *Ambye-Jensen et al. (2013) et Rooke et Hatfield (2003).*

Dans le cas d'une matière ensilée solide, les nutriments contenus dans le silo ne sont pas répartis de manière homogène, menant à des poches de développement des bactéries lactiques suivant leur distribution initiale et la distribution des ressources. L'homogénéisation de la matière, aussi bien pour répartir la disponibilité en nutriments que pour disperser les populations de bactéries lactiques dans l'entièreté de la matière ensilée, est dès lors une étape importante de l'ensilage pour obtenir une acidification rapide[→]. Cependant, cette phase d'homogénéisation mène également à une introduction d'oxygène dans la matière, obligeant un bon tassemement du silo par après, ce qui n'est pas réalisable sans le matériel adéquat. *Pahlow et al. (2003).*

2.3.2.3 Stabilisation

Si le pH atteint un niveau assez bas avant que l'entièreté des sucres soient consommés (*i.e.* de sorte que le développement des bactéries lactiques soit lui-même stoppé par l'acidité plutôt que par le manque de substrat) et que le silo est étanche à l'air, la matière entre ensuite dans une phase stabilisée où le pH bas inhibe tout développement microbien (à l'exception d'éventuelles levures acidophiles). Quelques enzymes tolérantes au pH bas (préservées par l'absence de

forte montée en température) continuent leurs activités, dégradant les hydrates de carbones par hydrolyse acide, reconstituant un stock de sucres simples.

Durant cette phase de stabilisation, la population de bactéries lactiques diminue généralement d'un facteur mille, leur développement étant inhibé par le pH bas et les autres déchets de leur fermentation des sucres. Les champignons, archées et bactéries qui survivent sont en état de dormance. Si le pH reste assez bas, l'état atteint durant cette phase peut théoriquement rester stable indéfiniment, permettant de préserver la matière ensilée dans un état relativement peu décomposé[→]. *McDonald (1981)*. Dans tous les cas, des pertes totales (par volatilisation et / ou écoulements) de l'ordre de 15% de la matière sèche sont habituelles[→]. *McGechan (1990)*.

2.3.2.4 Fermentation secondaire

Si l'utilisation des glucides fermentescibles ne permet pas une baisse rapide du pH (suite à une mauvaise étanchéité du silo par exemple) ou que la matière ensilée n'en contient pas assez, une seconde phase de fermentation peut se mettre en place, se substituant à la première. Dans le cas d'un silo mal scellé, notons que le terme de *fermentation secondaire* n'est dès lors plus adéquat, les fermentations se déroulant en anaérobiose[→]. D'autres microorganismes (entérobactéries, *Clostridia*...) utilisent les sucres non encore fermentés ainsi que l'acide lactique produit comme substrat de fermentation, pour produire des acides plus faibles qui induisent une hausse du pH[→]. De même, cette seconde fermentation induit un plus grand catabolisme des acides aminés en amines et en ammoniac (NH₃) par les entérobactéries et les *Clostridia*. En remontant le pH et en produisant CO₂ et H₂, elle permet également le développement d'archées méthanogènes. *Woolford (1990)*.

Voir par exemple
Dewar et al. (1963),
Pahlöw et al. (2003)
et Cooke et Hatfield (2003) et les références qui y sont citées.

2.3.2.5 Phase aérobie finale

Lorsque le silo est ouvert, l'oxygène pénètre petit à petit dans la matière, modifiant les conditions anaérobies. Les levures et moisissures sont généralement les premières à sortir de leur dormance ou à coloniser la matière depuis l'extérieur, appréciant particulièrement l'interface aérobie / anaérobie, suivies des bactéries acétiques[→]. La multiplication des microorganismes aérobies mène à un nouveau *Pahlöw et al. (2003)*.

dégagement de chaleur et induit des modifications majeures dans l'ensilage. En particulier l'oxydation de l'acide lactique peut entraîner une forte augmentation du pH, rendant les conditions internes du silo à nouveau favorables au développement de nombreux microorganismes. Ainsi, la face ouverte d'un silo, en contact avec l'oxygène et de pH plus élevé, peut atteindre en un jour des pertes de matière sèche de l'ordre de 3 à 5%[→].

Pahlow et al. (2003).

2.3.3 ÉTANCHÉITÉ ET STABILITÉ AÉROBIE

Dans un silo parfaitement étanche (*i.e.* en laboratoire), suite à la consommation de l'oxygène (O₂) par respiration lors de la phase aérobie initiale, les gaz dominants deviennent rapidement le dioxyde de carbone (CO₂) et le diazote (N₂). Le niveau de concentration en CO₂ influence les processus microbiens au sein de la matière et joue sur le développement de la microflore[→]. Le CO₂ étant plus lourd que l'oxygène ou l'azote, il tend à s'accumuler dans le bas du silo, cette circulation dépendant entre autres de la porosité de la matière ensilée, de sa compaction et de son taux de matière sèche. Cette production de CO₂ crée un gradient de pression qui induit un transport convectif des gaz dans le tas[→].

Pahlow et al. (2003).

Pahlow et al. (2003).

Dans un silo en situation réelle (*i.e.* en ferme), l'interface bâche / sol n'étant jamais parfaitement étanche, ce déplacement gazeux induit des échanges avec l'atmosphère extérieure. Ainsi, lorsque du CO₂ s'échappe du silo, cela mène par appel d'air à une entrée d'oxygène dans le silo, renforçant la convection[→]. L'entrée d'oxygène ne se fait pas nécessairement par les interstices de la bâche, mais peut également se faire par diffusion à travers celle-ci, le type de plastique et son épaisseur jouant sur l'intensité de la diffusion gazeuse[→]. Il en est de même pour une éventuelle production de CH₄ par des archées méthanogènes, gaz plus lourd que l'oxygène participant au transport convectif initié par le CO₂.

McGechan (1990).

Savoie et Jofriet (2003).

Ainsi, les échanges gazeux sont réduits par le bâchage, mais ne sont pas complètement stoppés. Cet appel d'air mène également à une adhésion de la bâche à la matière ensilée, ce qui n'est dès lors pas le signe d'une bonne étanchéité, mais bien celui d'une fuite gazeuse. L'apparition d'un gonflement, en revanche,

est le signe de la production de gaz dans une bâche très hermétique, empêchant que les gaz produits de s'échappent.

Ces perturbations des conditions anaérobies mènent à une “fermentation” secondaire et une oxydation de la matière allant à l'encontre de la conservation par fermentation lactique. Suite à une décomposition plus avancée de la matière, elle induit généralement une meilleure stabilité aérobie de la matière ensilée (cf. la stabilité d'un compost mûr, après décomposition avancée), mais à de plus grandes pertes énergétiques, en matière sèche ou encore en matière organique[→]. *Pahlow et al. (2003)*. En revanche un ensilage réussi, c'est-à-dire qui préserve au mieux la matière ensilé dans sa composition initiale, est généralement peu stable face à une exposition à l'air libre.

2.3.4 CONDITIONS NÉCESSAIRES POUR UNE BONNE FERMENTATION

En résumant les sections précédentes, il apparaît que les deux conditions primordiales à une bonne préservation anaérobie sont :

1. l'atteinte rapide et le maintien de l'anaérobie ;
2. ainsi que la chute rapide du pH sous la valeur de 5.

La première condition implique un tassage de la matière pour chasser le plus d'oxygène possible et un taux de matière sèche entre 20 et 30%[→], ainsi qu'une étanchéité suffisante tout au long de la fermentation. L'interface bâche / sol est généralement le point faible et il convient de veiller à sa bonne mise en place[→].

Sauf dans le cas de l'utilisation d'acide fort en intrant pour acidifier directement la matière sans fermentation, la seconde condition est synonyme d'une fermentation lactique réussie. Celle-ci demande, en plus des conditions anaérobies, la présence d'une quantité suffisante de sucres simples (la quantité exacte dépendant du pH initial, du taux de matière sèche, du pouvoir tampon de la matière ensilée, de l'homogénéité, de la densité et de la taille des particules ensilées, des populations microbiennes initiales, etc.). Le fumier n'en contient pas et l'ordre de grandeur de la quantité de sucre à apporter pour une lactofermentation réussie est estimé entre 5 et 10% de la masse fraîche ensilée[→].

Voir par exemple McDonald (1981), Shahardeen et Seran (2013) et

Teixeira Franco (2017) et les références qui y sont citées.

Voir par exemple Savoie et Jofriet (2003) pour différentes techniques de bâchage plastique.

Voir par exemple Igúzquez-Covarrubias et al. (1990) et Teixeira Franco, Buffière et al.

(2018a) et les références qui y sont citées.

2.3.5 EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

Lorsqu'elle se produit en anaérobiose stricte et en présence de substrat adéquat, la fermentation homolactique ne conduit au dégagement d'aucun gaz. Par rapport à un compostage classique ou à un fumier composté-fermenté, cela correspond à une suppression des productions des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 ou encore N_2O). Lorsque le fumier n'est pas bâché, ces pertes se font principalement par volatilisation, et ce d'autant plus que la température du fumier monte[→]. La plupart de ces pertes sont concentrées durant les premières semaines de stockage et diminuent rapidement[→]. Si le tas est abrité de la pluie, le volume des écoulements présente une même diminution rapide durant les premières semaines, corrélée à l'évolution de la température qui indique le degré d'activité microbienne au sein du tas. La concentration de ces écoulements diminue en même temps que leurs volumes. Cependant, lorsque le fumier est exposé à la pluie, les écoulements continuent tant que le tas prend l'eau, lixiviant petit à petit les nutriments[→]. *Dewes (1995), Petersen, Lind et al. (1998).*

Pour être complète, une analyse des émissions des gaz à effet de serre doit prendre en compte l'ensemble des étapes de la gestion du fumier, de la sortie de la chèvrerie à l'assimilation des nutriments par les plantes. Ainsi, avant la fermentation proprement dite, les consommations de carburant lors de l'humidification (tout comme de lubrifiant et usure des pièces de machinerie), de l'éventuelle homogénéisation et de la mise en tas devraient également être calculées. Au cours de la fermentation, il convient également de prendre en compte le cycle de vie de la bâche plastique (et de se questionner sur d'éventuelles alternatives durables). Après la fermentation, il faut inclure l'épandage d'une matière dont la masse est plus importante qu'après un compostage. Il faut également déduire les émissions évitées en ne souillant pas l'eau de pluie (qui s'écoule sous forme de lixiviats du tas de compostage et doit être ensuite épandue). De même pour l'épandage au champ évité du lactosérum (si on compare à un compostage plus classique sans humidification). Enfin, il est indispensable de comparer les émissions après l'épandage du fumier fermenté au champ, une fois la matière mise au contact à la

fois de l'air libre et des microorganismes édaphiques, question rarement abordée dans la littérature.

Au vu de l'aperçu microbiologique ci-avant, nous comprenons que les conditions de gestion du fumier peuvent énormément influencer les émissions de gaz à effet de serre. Même au sein des expériences d'ensilage de fumier, la composition du fumier, la présence de sucre ou encore la qualité du bâchage ont un impact majeur sur les émissions. Ainsi Dewes (1995) déconseille explicitement la couverture de tas de fumier avec des bâches en plastique, ses expériences (sans apport de sucre) démontrant une émission d'ammoniac accrue par cette pratique. Pour Chadwick (2005) en revanche, le bâchage (sans ajout de sucre) permet de limiter les émissions d'ammoniac et d'oxyde nitreux (et dès lors de préserver plus d'azote au sein du fumier fermenté), mais n'influence pas sur émission de CH_4 . Pour Berg et Pazsiczki (2006), la réduction de production de méthane par bâchage est réelle, mais n'est efficace que lorsque l'on arrive à baisser le pH sous une valeur de 6.

Durant la phase en tas, Amon *et al.* (2001) concluent qu'un fumier fermenté émet 4,5 fois moins d'équivalent CO_2 qu'un fumier composté-fermenté sous bâche. Mais en comparant au compostage, au total (en incluant les émissions au champ) leur fumier fermenté (sans ajout de sucre) produit près de 50% de gaz à effet de serre en plus (en équivalent CO_2). Ils montrent également que les différentes émissions et pertes gazeuses varient fortement avec la saisonnalité, les pertes en ammoniac tout comme les productions de méthane étant plus importante lorsque les températures sont plus élevées.

Peu d'études s'intéresse aux émissions après l'ouverture du silo, lors de l'épannage, de l'incorporation et de la dégradation par la pédoncule et la microflore édaphique. Bosch *et al.* (2016) et Hitman *et al.* (2013) (produisant du bokashi de tontes d'herbe) n'en parlent tout simplement pas dans leur calcul d'empreinte écologique, négligeant complètement les émissions une fois la bâche ôtée.

Webb *et al.* (2004), étudient les émissions d'un fumier fermenté sous bâche (sans sucre) en comparaison à une compostage statique (sans retournement) et ce après épandage en surface et après incorporation à différentes profondeur (en

faisant également varier le temps d'attente avant incorporation). En totalisant les pertes durant la fermentation et après épandage, ils concluent que dans le cas d'un épandage en surface sans incorporation le fumier fermenté sous bâche ne volatilise ni plus ni moins d'ammoniac ou de N_2O que le fumier composté. Les émissions après épandage étant concentrées durant les premières heures et décroissant rapidement, ils recommandent une incorporation rapide, mais pas nécessairement profonde, pour limiter les pertes par volatilisation au champ. Ainsi, en termes de cycle internes de l'azote (sans aucune autre considération, au regard des émissions de CH_4 par exemple), ils concluent que le bâchage du fumier avec incorporation rapide présente l'avantage de perdre moins d'azote que le compostage[→].

Webb et al. (2004).

Petersen, Blanchard *et al.* (2013) résument la situation : le compostage avec bonne aération permet de réduire les émissions de méthane, mais augmente les émissions d'ammoniaque ; le fumier composté-fermenté (sans retournement ni bâche) produit plus d'oxyde nitreux et de méthane ; le bâchage du fumier bien tassé semble diminuer les émissions à la fois de méthane et d'oxyde nitreux et ne mène pas à une plus grande perte d'ammoniac que dans le cas du fumier composté-fermenté.

Remarquons que aucune de ces études n'ajoute de sucre au fumier ensilée, réduisant les possibilités d'une fermentation lactique optimale. Teixeira Franco, Buffière *et al.* (2018b) étudient l'ensilage de fumier de différentes teneurs en matières sèches avec différents pourcentage d'ajout de sucre. Ils concluent que l'apport de glucose de 10% de la masse fraîche dans un fumier d'au moins 15 à 25% de matière sèche mène à une acidification par les bactéries lactiques efficace, alors qu'un apport de 4% en sucre est insuffisant. Teixeira Franco (2017) fait remarquer cependant que le niveau exact de sucre nécessaire varie en fonction de la teneur initiale, de la provenance du fumier, de sa composition, de ses populations microbiennes, etc.

2.4 BOKASHI, MÉTHODE ALTERNATIVE DE COMPOSTAGE ?

Compostage et fermentation ne sont pas comparables. Les processus biochimiques qui s'y déroulent, en conditions aérobies ou anaérobies, sont totalement différents. Ainsi, la fermentation ne peut être une alternative *de* compostage, mais tout au plus une alternative *au* compostage.

Le but des techniques de lactofermentation — dont la choucroute ou l'ensilage de fourrage sont des exemples — est la conservation de la matière fermentée dans un état le plus proche possible de l'état initial, aussi peu prédigéré que possible. L'optique est tout autre dans le cadre d'un compostage avec aération active par retournement, où une oxydation rapide et intense est visée. Les deux techniques mènent dès lors à des produits finis complètement différents et certains préconisent même de composter le fumier fermenté avant de l'épandre[→]. Ainsi, le choix final d'un mode de gestion du fumier ne se base pas uniquement sur une comparaison des pertes en nutriments de l'une ou l'autre technique, il prend également en compte le contexte plus large de la gestion de la fertilité au sein d'une ferme et de la vie des sols, qui dépasse le cadre de notre recherche.

Ce que la fermentation, lorsqu'elle est bien menée, apporte par rapport au compostage, est une réduction des pertes durant le stockage. La technique est d'ailleurs utilisée pour préserver le potentiel de méthanisation des effluents d'élevage avant digestion en bioréacteur[→]. Ainsi la fermentation du fumier permet d'assurer une source de fumier "frais" utilisable au moment opportun, pour être épandu tel quel ou, par exemple, brièvement composté — pour assurer un assainissement par augmentation de la température, corriger le rapport C/N, accélérer la minéralisation, etc.

Lorsque la fermentation ne se fait pas dans des conditions optimales, l'effet protecteur de la bâche tend à s'estomper. Le fumier fermenté ressemble alors à un fumier composté-fermenté, simplement entassé. Les pertes sont alors plus

Voir par exemple la conférence de Herody (2015).

Voir par exemple l'ensemble des travaux de Teixeira Franco (2016 à 2019) et les références qui y sont citées.

importantes suite à une oxydation d'une partie de la matière et, suite à un échec de l'acidification, la production de méthane est inévitable. Dans ce cas de figure, nous pensons que le compostage aérobie et le stockage à l'abris des intempéries est préférable, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

EXPÉRIENCES DE TERRAIN

3

« Les simulations montrent que pour la plupart des projets et cadres d'études, il est plus probable qu'une affirmation de recherche soit fausse que vraie. De plus, dans de nombreux domaines scientifiques actuels, les résultats de recherche revendiqués peuvent souvent n'être simplement que des mesures précises du biais dominant. »^a

Ioannidis, 2005

Cette partie est divisée en deux grands chapitres. Le premier détaille notre méthodologie, le dispositif expérimental mis en place et les analyses réalisées. Le second détaille nos résultats et les discute.

3.1 MÉTHODOLOGIE

La plupart de la littérature fait référence à des études en laboratoire, avec des essais de fermentation dans des volumes dépassant très rarement les quatre litres, certaines se contentant de 100 grammes de matière initiale[→], très loin des conditions réelles en ferme. Notre démarche partant de l'expérimentation de Vincent Delobel, nous avons voulu étudier le potentiel de la fermentation lactique du fumier dans des conditions en ferme aussi proches que possible de l'itinéraire technique qu'il étudie à la Chèvrerie de la Croix de la Grise. Ainsi, la partie expérimentale de notre recherche se base sur une comparaison entre le compostage et la fermentation de tas de $5,00 \pm 0,33 \text{ m}^3$ de fumier pailleux humidifié avec du lactosérum dilué. Cependant, afin d'établir également une

Voir par exemple
Ambye-Jensen et al.
(2013).

a. Citation originale : « Simulations show that for most study designs and settings, it is more likely for a research claim to be false than true. Moreover, for many current scientific fields, claimed research findings may often be simply accurate measures of the prevailing bias. »

évaluation de l'impact de l'humidification du fumier par ajout de lactosérum dilué, pur, stérilisé, d'eau ou de mélange de microorganismes EM®, nous avons mis en place parallèlement une batterie de tests à plus petite échelle, en fûts de 50 ℥ en plastique.

La décision de Vincent Delobel d'utiliser du fumier humidifié — que nous avons suivie dans notre recherche — est triple. Premièrement, le fumier pailleux de chèvre est très sec, compostant difficilement avec un taux de matière sèche aux alentours de 30% de la matière fraîche : en humidifiant le fumier, le développement microbien est facilité. Deuxièmement, l'humidification permet lors de la mise en tas de chasser l'oxygène présent dans les interstices de la matière et de faciliter la mise en place de l'anaérobiose pour la fermentation. Troisièmement, l'utilisation du lactosérum (résidu liquide après coagulation du lait lors de la production de fromage, généralement traité comme un déchet) permet de valoriser ce liquide autrement destiné à être épandu à grands frais pour une valeur fertilisante faible. Le lactosérum est utilisé dilué suite à l'organisation pratique de la Chèvrerie de la Croix de la Grise : le lactosérum pur de la fromagerie est récolté avec les eaux de pluie du parcours extérieur bétonné et les jus s'écoulant de la compostière de la ferme dans la même citerne enterrée. Dans la suite, nous appellerons simplement ce liquide *lactosérum dilué*.

3.1.1 ESSAIS EN SITUATION RÉELLE (TAS)

Les essais en situation réelle sont composés de deux tas distincts de fumier humidifié de $5,00 \pm 0,33 \text{ m}^3$ chacun, soit $1900 \pm 26 \text{ kg}$ de fumier humidifié, homogénéisé et aéré (par passage au composteur) pour l'essai de compostage à l'air libre et $3010 \pm 23 \text{ kg}$ de fumier humidifié, tassé (avec la pelle du chargeur compact et au pied) et bâché pour l'essai de fermentation anaérobiose. Au total, $4314 \pm 60 \text{ kg}$ de fumier sec ont été humidifiés avec $596 \pm 49 \text{ kg}$ de lactosérum dilué, pour donner un total de $4910 \pm 35 \text{ kg}$ de fumier humidifié. Ces données sont reprises à la [table 3](#) (page suivante). Une structure en bois de 2,5 m de largeur et 2 m de profondeur a été construite pour maintenir les deux tas expérimentaux en place sur une hauteur initiale de 1 m. Ces tas ont été posés sur des fonds légèrement

	FUMIER SEC	LACTOSÉRUM	FUMIER HUMIDIFIÉ
Massé initiale (kg)	4314 ± 60	596 ± 49	4910 ± 35

TABLE 3 – *Massé initiale de fumier sec et de lactosérum dilué épandu sur celui-ci, utilisés pour les essais de compostage et de fermentation ; le détail du calcul et la détermination des incertitudes est exposé au chapitre Résultats et discussion, à la section Masse.*

inclinés, récoltant les jus dans des gouttières connectées à des bidons distincts, permettant une mesure des volumes écoulés et un échantillonnage de ces jus (cf. *Photos* en *Annexes*).

3.1.1.1 Mesure du poids des tas

Par manque de place — et pour laisser un peu de temps au fumier pour absorber le lactosérum —, l’humidification du fumier pailleux a été faite dans la chèvrerie, par épandage du lactosérum directement sur le fumier. Il nous a dès lors été impossible de peser le fumier sec avant humidification (entrant l’impossibilité de calibrer les échantillons correspondants). Avec le matériel et le temps disponible pour la mise en place des tas, le volume de lactosérum épandu n’a pas pu être mesuré de manière précise non plus. Il a été estimé, grossièrement, à 60 ℓ par mètre cube de fumier. Avec une approximation de la masse volumique du fumier pailleux de 500 kg par mètre cube, cette estimation correspond à un ajout de lactosérum au fumier sec de l’ordre de 12% en masse.

Après humidification, la matière destinée au compostage a été passée au composteur, afin d’homogénéiser le fumier et d’apporter de l’oxygène de manière uniforme. La fermentation se déroulant en anaérobiose, la matière vouée à être bâchée n’a pas subi ce traitement d’homogénéisation au composteur : le tas ensilé présente dès lors des poches hétérogènes (cf. *Photos* en *Annexes*). La décision de ne pas passer le fumier à fermenter au composteur est double. Premièrement cela permet d’éviter une lourde opération de retassement de la matière dans le silo, irréalisable de manière efficace en situation réelle avec le matériel agricole disponible à la ferme. Deuxièmement cette homogénéisation demande un temps de travail pour la mise en silo dédoublé par le passage par le composteur, lequel demande également entretien, graissage et carburant pour fonctionner. Notre

obtejctif étant d'évaluer l'itinéraire technique mis en place par Vincent Delobel, nous avons dès lors maintenu ce choix. Cependant, remarquons que cela rend la comparaison entre le compostage et la fermentation plus difficile à justifier scientifiquement, les conditions de départ étant différentes.

Le pont-balance mis à disposition par le Centre de Michamps est constitué de deux plots ne pouvant peser, ensemble, que deux roues à la fois (cf. *Photos* en *Annexes*) : chaque chargement a donc nécessité deux mesures, une première pour les roues avant et une seconde pour les roues arrière (en veillant à maintenir fixe la position de la pelle de chargement afin de ne pas modifier l'équilibre du chargeur), auquel il a fallu soustraire la tare (*i.e.* le poids du chargeur à vide, pris également en deux mesures). À ces multiples mesures, sont associées des incertitudes dues au pont-balance utilisé, n'affichant les résultats que par pas de 20 kg. Des erreurs sont également associées aux mesures (chute d'une partie du chargement entre la pesée et la mise en tas, bourrasques de vent modifiant l'équilibre du chargeur, variation de la tare par combustion du diesel...), supposées inférieures à l'incertitude due à l'affichage de mesure. Enfin, nous ne sommes jamais à l'abri d'erreurs systématiques. Dans le cadre d'une étude de la variation de masse des tas, cela n'a pas d'influence globale si ces erreurs systématiques sont équivalentes d'une pesée à l'autre et aucune anomalie n'a été détectée au cours des pesées aux jours 0 et 47 (diverses mesures de la tare produisant des données identiques). Cependant, la pesée après 126 jours a malheureusement donné des résultats inutilisables suite à un défaut du pont-balance, affichant des mesures instables même sans chargement.

La mise en tas a été effectuée à la Chèvrerie de la Croix de la Grise le 15 janvier 2020 (ci-après dénommé *jour 0*), après une pesée initiale (cf. *Photos* en *Annexes*). Une durée de six semaines étant généralement recommandée pour le compostage de fumier ainsi que pour une bonne fermentation anaérobie[→], les tas ont ensuite été laissés en place jusqu'au 26 février 2020, soit pour une durée initiale de 47 jours. Durant cette période, des relevés réguliers de température ont été effectués à l'aide d'un thermomètre électronique avec sonde d'un mètre, glisée sour la bâche (pour ne pas la trouer) jusqu'à atteindre le cœur du tas. Après ces près de

*Bosch et al. (2016),
Hitman et al. (2013)
et Teixeira Franco,
Buffière et al.
(2018a).*

sept semaines de compostage / fermentation, les deux tas ont à nouveau été pesés et des échantillons des deux tas ont été prélevés. Les échantillons solides et de lixiviats des tas ont été apportés au laboratoire du Centre de Michamps pour faire analyser leur composition ainsi que leur cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote. Les échantillons de lactosérum (pur et dilué) ont été apportés au Centre pour l'Agronomie et l'Agro-industrie de la Province du Hainaut (CARAH) pour analyse des taux de sucre. Nous avons ensuite remis les tas en place jusqu'au 20 mai 2020, pour une période additionnelle (étendue par le confinement du printemps 2020 dû à la crise sanitaire du COVID-19) de 79 jours — soit un total de 126 jours depuis la mise en tas initiale — avant d'être pesés à nouveau et qu'une dernière prise d'échantillons soit réalisée.

3.1.1.2 *Prise d'échantillons*

Les prises d'échantillons ont été réalisées en suivant, autant que possible, la procédure recommandée par le Centre de Michamps[→]. Des prélèvements élémentaires de fumier sec ont été réalisés au jour 0 dans la chèvrerie en différentes zones (mangeoire, abreuvoir, dortoir) et à différentes profondeurs. Ils ont ensuite été mis en commun et fractionnés jusqu'à obtenir un échantillon de 5 kg. L'opération (prélèvements élémentaires, rassemblement des prélèvements, fractionnage) a été répétée de façon à obtenir trois échantillons indépendants. *Lambert et Cugnon (2015).*

En comparant les résultats bruts d'analyse de ces échantillons (*cf. table 13* page *xiv* en *Annexes*) aux échantillons préliminaires pris plus tôt au mois de décembre (*cf. table 12* page *xiii*), on observe une très forte diminution de la teneur en azote ammoniacal du fumier sec, passant de 21,1 à 1,1% de l'azote total. Notre compréhension de ce phénomène est que la procédure recommandée (suivie au jour 0, mais pas en décembre), en menant à une exposition à l'air libre relativement longue de la matière échantillonnée et à une aération lors du fractionnement des prélèvements élémentaires, conduit à une grande volatilisation de l'azote ammoniacal[→]. Avec un pH du fumier sec de $9,39 \pm 0,01$, cette hypothèse est appuyée par le fait qu'en solution basique, l'équilibre ammoniac / ammonium favorise la forme ammoniacale facilement volatilisable. *Charles (2020).*

Suite à cette observation, nous avons veillé à minimiser les possibilités de volatilisation de l'azote lors des prises d'échantillons. Ainsi, les échantillons dans les tas ont été réalisés par prélèvements élémentaires pris au fur et à mesure des pesées des tas, en évitant une aération additionnelle de la matière. La technique, permettant d'accéder facilement à différentes profondeurs du tas, s'apparente à une prise d'échantillon à la tarière : nous avons dès lors construit nos échantillons par triplicat de 6 prélèvements élémentaires (1 dans le bas, 2 dans la couche intermédiaire et 3 dans la couche supérieure du tas) conformément aux recommandations correspondantes[→], afin d'obtenir un échantillon de 5 kg sans besoin de fractionnement additionnel. *Lambert et Cugnon (2015).*

Au total, nous avons prélevé au jour 0 trois échantillons de fumier sec, quatre échantillons du fumier humidifié, trois de lactosérum pur et trois de lactosérum dilué. Trois échantillons de la matière compostée et trois échantillons de la matière fermentée ont été prélevés au jour 47, ainsi que des échantillons des jus d'écoulement des deux tas. Des échantillons ont à nouveau été prélevés au jour 126.

3.1.2 TESTS À PETITE ÉCHELLE (FÛTS)

En parallèle, des tests à petite échelle ont été menés dans des fûts en plastique de 50 ℥ déclinant cinq versions de l'essai de fermentation anaérobiose :

1. fumier humidifié avec du lactosérum dilué (L.D.);
2. fumier humidifié avec de l'eau de distribution;
3. fumier humidifié avec du lactosérum pur cru (L.C.);
4. fumier humidifié avec du lactosérum pur stérilisé (L.S.);
5. fumier humidifié avec un inoculant de microorganismes EM® commercial;

chacun de ces tests étant tripliqué (*cf. Photos en Annexes*). Les fûts contiennent en moyenne $46,1 \pm 3,5$ kg de fumier, humidifié avec un volume de $5,00 \pm 0,05$ ℥ du liquide en question. Le test L.D. est une réplication en fût du tas bâché ; le lactosérum pur cru provient directement de la fromagerie sans dilution, sa version stérilisée est portée à ébullition durant au moins cinq minutes. Ces fûts ont été maintenus fermés hermétiquement durant toute la durée du test.

Nous avions prévu de laisser ces fûts fermenter pour la même durée que les essais en tas. Suite à des circonstances d'ordre logistique, puis au confinement, nous avons dû attendre dix semaines supplémentaires avant de les ouvrir. Après 126 jours, les fûts ont finalement été ouverts et leur contenu vidé. Une observation qualitative de leur odeur, couleur, texture, ainsi que des jus et gaz produits a été réalisée pour apprécier leur fermentation. Des échantillons ont été prélevés pour analyses.

Enfin, pour tester la stabilité de l'azote ammoniacal après fermentation, des échantillons ont été prélevés après aération à la fourche du contenu de fûts pour des durées allant jusqu'à environ 3 h après leur ouverture. Suite à des contraintes logistiques, seule la stabilité des fûts L.C. a été testée.

3.1.2.1 *Microorganismes efficaces Microferm®*

De nombreuses études sur le bokashi utilisent des EM® commerciaux — Effective Microorganisms, des « microorganismes efficaces » brevetés[→] — comme inoculant pour la fermentation (et ces études sont souvent subsidiées par les producteurs d'EM®)[→]. Pour tester la nécessité d'une telle inoculation par intrant dans la fermentation, nous avons fait un test sur base du mélange *Microferm* de la firme Agriton, dilué à 2% comme recommandé sur la notice du produit pour la production de bokashi. Cette préparation contient des bactéries lactiques, des actinomycètes, des bactéries photosynthétiques, des levures et des moisissures, dont les espèces *Streptomyces albus albus*, *Rhodopseudomonas sphaeroides*, *Lactobacillus plantarum*, *Propionibacterium freudenreichii*, *Streptococcus lactis*, *Streptococcus faecalis*, *Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*, *Saccharomyces cerevisiae* et *Candida utilis* ont été relevées par Hitman *et al.* (2013). *Higa (1997)*
Voir par exemple
Bosch et al. (2016) et
Hitman et al. (2013)

3.1.3 MATÉRIEL

Pour les essais en tas, les mesures ont été réalisées avec :

- un pont-balance mobile pour peser les deux tas (Centre de Michamps);
- une balance électronique pour mesurer le poids des jus des deux tas (Agra-Ost);

- un thermomètre électronique avec sonde d'un mètre pour mesurer la température au cœur des tas (Agra-Ost).

Pour les tests à petite échelle, les mesures ont été réalisées avec :

- une balance électronique pour peser les contenus mis à fermenter (Agra-Ost) ;
- des seaux et cruches graduées pour mesurer les volumes de liquide ajoutés (Chèvrerie de la Croix de la Grise).

Le reste du matériel utilisé a inclus un chargeur compact, un composteur, une bâche plastique, des sacs de graviers, des fourches, des fûts, des panneaux de bois "marin", des poutres, vis, visseuses, foreuses, scies, gouttières, des tuyaux plastique, du silicone...

3.1.4 CALIBRATION DES ÉCHANTILLONS

Comme le soulignent plusieurs auteurs[→], la prise d'échantillons est une opération délicate, source d'erreurs d'autant plus importantes que la matière à échantillonner est non homogène et que le matériel disponible pour le faire est peu efficace. Notre travail n'a pas échappé à cette règle. Ainsi, sans calibration des différents échantillons, les résultats d'analyses bruts (*cf. Annexes*) indiquent une augmentation de la quantité absolue des éléments minéraux dans le tas de compostage après 47 jours (totalisant une augmentation de 14% de la teneur en sodium, 15% en magnésium et 16% en calcium), ce qui est bien évidemment impossible. Une explication probable de ce résultat est la suivante. Malgré notre volonté de suivre le protocole de prise d'échantillon du Centre de Michamps[→], notre prise d'échantillon se faisant de manière simultanée à la pesée du tas, les différentes couches de celui-ci ont pu être mélangées, menant à une sur-représentation de matière provenant des couches inférieures du tas par rapport à la méthode conseillée, où les éléments minéraux se concentrent par lixiviation[→].

Voir par exemple Amon et al. (2001), Chadwick (2005), Petersen, Lind et al. (1998) et Webb et al. (2004).

Lambert et Cugnon (2015).

Petersen, Lind et al. (1998).

Afin de pouvoir comparer entre eux les différents échantillons solides prélevés à des périodes successives, nous les avons calibrés sur base de leur contenu en cendres insolubles, comme proposé dans Rollé *et al.* (1970)[→]. Le fumier humidifié initial présentant la prise d'échantillons la plus précise — constituée d'échan-

Voir Dewes et Ahrens (1989) et Rollé et al. (1970) et les références qui y sont citées.

tillons indépendants construits sur base du plus grand nombre de prélèvements élémentaires tout en minimisant la volatilisation d'azote, basée sur de la matière homogénéisée non stratifiée et affichant des résultats d'analyses avec des écarts types relativement petits —, il nous a servi d'étalon pour corriger les autres échantillons de matières solides. Ainsi, sur base de la mesure du poids total des tas, en calibrant la quantité absolue de cendres insolubles au sein d'un tas de fumier pour qu'elle reste constante au cours du compostage et de la fermentation, nous avons pu corriger les compositions des échantillons solides des tas après 47 jours.

Comme le mentionnent Dewes et Ahrens (1989), remarquons que les jus d'écoulement issus des deux tas (*cf. table 8* page 55) présentent cependant des niveaux de cendres insolubles non nuls. La méthode de calibration décrite n'est donc pas parfaite. Pour estimer l'erreur introduite, nous devons calculer la quantité absolue totale de cendres insolubles lessivées par les jus et, pour cela, calibrer les échantillons liquides. Une autre méthode de calibration retrouvée dans la littérature[→] se base sur le contenu en potassium (K_2O), élément non volatil. Cette méthode néglige cependant les pertes par lixiviation, qui peuvent être non négligeables (nous observons des pertes de l'ordre de 30% du contenu en potassium à 47 jours, après calibration sur base des cendres insolubles, *cf. table 5* page 53). Néanmoins, cette méthode nous permet de calibrer les compositions des jus d'écoulement des deux tas, de manière à ce que la quantité de potassium retrouvée dans les écoulements corresponde à la quantité lessivée manquant dans les tas.

*Voir par exemple
Chadwick (2005) et
Petersen, Lind et al.
(1998).*

Remarquons également que cette seconde calibration élargit les incertitudes déjà associées à la première calibration : les résultats obtenus doivent être traités avec précaution. Remarquons également que cette calibration des jus est grossière puisque la composition des jus varie avec le temps (*cf. sous-section Écoulements*, page 59). Ainsi, pour être pertinente, cette calibration devrait être basée sur des analyses régulières des jus au fur et à mesure du compostage ou de la fermentation, jointes à des mesures précises et répétées des volumes écoulés.

Malheureusement, notre système expérimental présente plusieurs défauts. Premièrement, le fond en bois des tas, jointoyé au silicium, n'était pas suffisamment

étanche, menant à des pertes le long des bords des tas et le long des joints du fond. Deuxièmement, l'une des gouttières récoltant les jus était trop courte, laissant s'écouler une partie des lixiviats sans passer par le système de récupération. Troisièmement, l'un des tuyaux connectant les gouttières aux bidons collecteurs s'est bouché, menant à un débordement des écoulements au niveau de la gouttière. Quatrièmement, le relevé des jus n'a pas été réalisé suffisamment fréquemment, menant à un débordement des bidons collecteurs. Finalement, aucune prise d'échantillon intermédiaire des lixiviats n'a été faite avant le jour 47, nous empêchant de déterminer l'évolution de la composition de ces jus. Ainsi, il nous est impossible de déterminer les volumes totaux de jus écoulés et les quantités absolues de potassium perdues. Ces données étant nécessaires pour la calibration des jus et pour l'estimation des erreurs associées à la calibration des échantillons solides, nous sommes dès lors dans l'impossibilité de mener à bien ces deux opérations.

L'impossibilité de détermination de la masse des tas après 126 jours (*cf. section Mesure du poids des tas, page 34*) nous a empêché d'utiliser la méthode de calibration des échantillons. Ainsi, l'analyse des données relatives aux échantillons pris au jour 126 a dû être abandonnée. De même, l'impossibilité logistique de mesurer la masse du fumier sec avant humidification avec le lactosérum dilué nous empêche de calibrer les échantillons correspondants. Ainsi, les données utilisées pour le fumier sec et pour le lactosérum dans le reste de ce qui suit sont les données brutes d'analyse.

Pour résumé, nous avons gardé les données calibrées pour les échantillons de fumier composté et fermenté, bien que nous ne puissions déduire les erreurs induites par cette calibration. Les échantillons liquides et de fumier sec initial n'ont pas été calibrés.

3.1.5 PROTOCOLES DES ANALYSES EN LABORATOIRE

3.1.5.1 *Analyses classiques*

Les analyses réalisées au Centre de Michamps ont suivi les protocoles suivants :

- détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau par séchage jusqu'à masse constante à 105°C : protocole **s-I-3v3** du Compendium Wallon des Méthodes d'Échantillonnage et d'Analyse (CWEA) [→], basé sur la norme **ISO 11465:1993/COR.1:1994** ;
- détermination de la matière organique par perte au feu : norme **NF EN 13039:2000-02** ;
- détermination de la teneur en cendres totales et cendres insolubles et détermination de la teneur en potassium (K), sodium (Na), calcium (Ca) et magnésium (Mg) par spectrométrie d'absorption atomique dans une flamme d'acétylène aux longueurs d'ondes respectives de 404,4, 589,6, 422,7 et 285,2 nm : protocole interne du Centre de Michamps, basé sur la norme **ISO 6869:2000** avec remplacement de l'acide chlorhydrique par de l'acide nitrique (solution d'HNO₃ à 7,5%) et par combustion à 450°C pendant une nuit (plutôt qu'à 550°C) avec correction pour la perte de solides volatils perdus durant la combustion ;
- détermination de l'azote total après combustion sèche à 900°C dans un flux de gaz oxygéné, par mesure de la teneur finale en diazote (N₂) par conductibilité thermique : protocole **s-II-9.1v2** du CWEA, basé sur la norme **ISO 13878:1998** ;
- détermination de l'azote ammoniacal (provenant de l'ammoniac libre, des composés minéraux ammoniacaux et des composés organiques azotés transformés en sulfate d'ammonium au cours d'une minéralisation catalysée au cuivre en présence d'acide sulfurique) : protocole **s-II-9.3v2** du CWEA, basé sur la norme **NBN EN 13342:2000** ;
- détermination de la teneur en phosphore (P) par spectrophotométrie de l'absorbance en solution avec du nitro-vanado molybdate d'ammonium : protocole interne du Centre de Michamps, basé sur la norme **ISO 6491:1998**, avec remplacement de la solution acide par de l'acide nitrique (HNO₃ à 3,5%).

Les normes du CWEA sont libre d'accès et disponibles sur le site internet de l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) (2014).

Les analyses réalisées au CARAH ont suivi les protocoles suivants :

- détermination des taux de fructose, glucose, lactose, maltose et saccharose par chromatographie liquide : protocole basé sur les normes **AOAC 980.13-1980** et **AOAC 982.14-1983**.

3.1.5.2 Cinétique de minéralisation

En complément à ces analyses de composition classiques, des analyses de cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote ont été réalisées au Centre de Michamps. Cette détermination du potentiel de minéralisation du carbone a été réalisé par mesure de la production de dioxyde de carbone (piégé par de l'hydroxyde de sodium et titré à l'acide chloridrique) et de l'azote par production de d'ammonium et / ou d'ammoniac (extrait à l'aide d'une solution de chlorure de potassium) après mélange des échantillons avec un sol témoin et incubation à 28°C durant 91 jours : norme **XP U44-163**.

La détermination du potentiel de minéralisation du fumier suite aux différentes modalités de gestion (frais, composté, fermenté) permet de déterminer la proportion de carbone et d'azote susceptible d'être minéralisée dans les deux ans suivant un épandage au champ et une incorporation peu profonde, en stimulant de manière supposée optimale l'activité microbienne d'un échantillon de matière mélangé à un sol de référence. Ce sol de référence est un sol agricole[→] :

*norme XP U44-163,
AFNOR (2009).*

- de teneur en argile entre 100 et 250 g/kg_{MS};
- de pH entre 6,0 et 7,3;
- d'humidité équivalente à la capacité de rétention en eau à pF 2,5^b;
- de teneur en calcaire total inférieure à 2 g/kg_{MS};
- de teneur en azote minéral inférieure à 35 mg/kg_{MS};
- de teneur en carbone organique total entre 5 et 10 g/kg_{MS};

étalonné par une mesure de la minéralisation d'albumine d'œuf après 91 jours.

Suite à l'incubation de mélange d'échantillons de matière organique avec le sol de référence en étuve contrôlée à 28°C durant 91 jours, la détermination de

b. Le contenu en humidité d'un sol est corrélé à la tension capillaire dans celui-ci. On note « pF » le *potentiel de force* (cf. la notion de pH) d'un sol, défini par $pF = \log_{10} h$, où h représente la hauteur à laquelle l'humidité remonte dans ce sol par tension capillaire à partir d'une source d'eau. Un pF de 2 représente dès lors un sol dont la tension capillaire fait remonter l'eau d'une nappe de un mètre (ou encore dont la tension capillaire est de 100 g/cm²). Les valeurs du potentiel de force varient de zéro (sol complètement desséché) à 7 (sol complètement saturé).

la quantité de carbone minéralisé est réalisée par mesure du CO_2 absorbé par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH à $0,5 \text{ mol/l}$). La détermination de la quantité d'azote minéralisé sous forme d' NH_4^+ et d' NO_3^- se fait par extraction de ces composés via une solution de chlorure de potassium (KCl à 1 mol/l).

Les résultats de l'analyse sont donnés sous forme de coefficients de minéralisation (CM) à 91 jours, donnés en pourcentage de carbone et d'azote organique initial minéralisé ou immobilisé. Pour l'azote (N) :

- un CM-N négatif (immobilisation) entraîne un risque de faim d'azote d'autant plus grand que l'immobilisation est importante ;
- un CM-N proche de zéro n'a aucun impact sur les besoins en azote des plantes et n'entraîne aucune contrainte quant à la période d'épandage ;
- un CM-N positif (minéralisation) apporte de l'azote aux plantes et nécessite une vigilance quant aux risques de lessivage (et donc de pollution des eaux).

On considère dans le cas d'un coefficient positif →

- de 0% à 15%, que la matière organique est très stable et a un fort potentiel humifère (influence positivement la structure du sol, sa capacité d'échange cationique CEC, ses réserves utiles en eau...);
- de 15% à 30%, que la matière organique est relativement stable avec un bon potentiel humifère : elle agit principalement en tant qu'amendement du sol ;
- de 30% à 50%, que la matière organique n'est que modérément stabilisée, stimulant l'activité microbienne du sol ;
- au-delà de 50%, que la matière organique n'est pas stabilisée, ayant peu d'effet structurant à long terme, mais stimulant fortement l'activité microbienne (avec des risques de lixiviation si l'épandage n'est pas synchronisé avec des absorptions végétales) : elle agit principalement en tant qu'engrais.

Notons que les coefficients de minéralisation sont déterminés dans les conditions contrôlées du laboratoire et ne peuvent être directement transposés aux conditions au champ →. Cependant, les comparaisons entre les différentes modalités de gestion du fumier restent pertinentes.

*Chambre Régionale
d'Agriculture du
Languedoc-
Roussillon
(2011).*

*Lashermes et al.
(2009).*

Suite à la fermeture partielle du Centre de Michamps durant le confinement, puis à l'épuisement de leur stock de sol de référence et enfin au malfonctionnement de leur analyseur à flux, les incubations n'ont pu être lancées que les 26 et 28 mai 2020. Elles arriveront à terme le 27 aout et les résultats finaux (dont les données d'étalonnage de l'albumine d'oeuf) ne seront pas disponibles avant la première semaine de septembre, une quinzaine de jours après la remise de ce mémoire. Ainsi, les résultats finaux à 91 jours, indispensables pour calculer les coefficients de minéralisation corrigés ne pourront qu'être approchés, sur base des résultats intermédiaires. Pour les mêmes raisons, l'ensemble des échantillons n'ont pas pu être analysés : seul le coefficient de minéralisation pour le fumier fermenté a pu être réellement triplié — et c'est le seul coefficient pour lequel nous donnerons un intervalle d'incertitude, *cf.* section *Cinétique de minéralisation* au chapitre suivant, page 65. Les autres analyses ne se basent que sur un seul échantillon et doivent dès lors être traitées avec précaution.

3.1.6 INCERTITUDES ET CALCULS DE SIGNIFICATIVITÉ STATISTIQUE

La méthode générale de propagation des erreurs est rappelée en *Annexes*. Le cas particulier de la détermination de l'incertitude sur la masse des tas de compostage et de fermentation y est détaillé.

Les calculs de valeurs-*p* (donnant la probabilité pour le modèle statistique choisi sous l'hypothèse nulle d'obtenir la même valeur ou une valeur encore plus extrême que celle observée) sont faits via le *logiciel libre R* (versio 4.0.0) par tests de Student, avec l'hypothèse que les échantillons suivent une distribution de loi normale lorsqu'il s'agit de comparaison de données d'analyses des échantillons avec leurs incertitudes associées. Le code *R* utilisé pour les calculs est détaillé en *Annexes*. Le cas particulier de la significativité des variations de masse suite au compostage et à la fermentation est également détaillé en *Annexes*.

3.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre détaille les résultats des différents essais, tests et analyses. Nous commencerons par étudier l'évolution de la température au sein des tas de compostage et de fermentation, avant de nous intéresser à l'évolution de leur masse. Nous passerons ensuite à une étude plus détaillée des variations de composition des deux tas (après calibration des échantillons) et commenterons leurs lixiviats. Nous continuerons avec une analyse qualitative de la fermentation des différents tests en fûts en commentant l'influence du lactosérum sur la fermentation. Nous ferons enfin une brève remarque sur le potentiel d'assainissement de la fermentation et conclurons avec une discussion sur la cinétique de minéralisation des deux modes de gestion du fumier. Au sein de chaque section, nous discuterons les résultats obtenus après présentation des données.

L'ensemble des données brutes et leurs incertitudes, certains calculs intermédiaires et leurs erreurs associées, la méthode de propagation des incertitudes ainsi que certains calculs de significativité statistique sont repris en *Annexes*.

3.2.1 TEMPÉRATURE

La [figure 1](#) (page suivante) reprend les mesures de températures au cœur des tas de compostage à l'air libre et de fermentation anaérobiose sous bâche durant les sept premières semaines, ainsi que la température extérieure et la pluviométrie mesurées à la station météorologique d'Esplechin du réseau *Pameseb*, située à 12 km à vol d'oiseau de la Chèvrerie de la Croix de la Grise.

Le tas de compostage présente une évolution de température interne typique, avec une augmentation rapide de la température, atteignant 70°C en 48 h suite à la stimulation de la respiration microbienne par oxygénéation et humidification du fumier pailleux, suivie d'une diminution progressive. Cette chute de température dès le milieu de la première semaine, liée à la porosité du tas aéré — qui influence à la fois le renouvellement de l'oxygène au sein de la matière et l'évacuation de

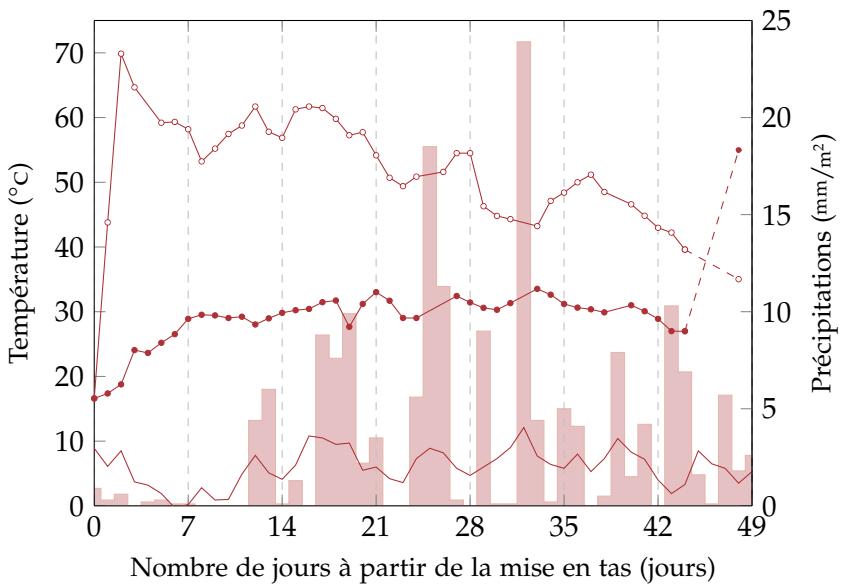


FIGURE 1 – Variation des températures au sein du tas de compostage (—○—) et du tas de fermentation (—●—) durant sept semaines (moyenne journalière de triplicats de mesures); température extérieure moyenne (—) et précipitations (■) mesurées à la station météorologique d’Esplechin (source : CRA-W/Réseau Pameseb).

la chaleur produite par l’activité microbienne —, indique que la minéralisation ralentit rapidement suite à l’épuisement des ressources en sucres simples. Cette chute de température est également liée à la pluviométrie et à la température extérieure : on remarque effectivement que le tas de compostage, non couvert, a été régulièrement refroidi par exposition à une pluie fraîche et un peu de neige fondante, alors que le tas de fermentation, bâché, a conservé une température relativement stable. En occupant une surface de 5 m^2 , ce sont approximativement 840 litres d’eau de pluie à une température moyenne ^c de 8°C qui se sont mélangés à la matière compostée sur un total de 47 jours ^d.

c. La température moyenne globale de l’eau de pluie tombée durant les 47 premiers jours est calculée sur base de la conservation de la quantité de chaleur de cette eau, en considérant que la température journalière moyenne de l’eau de pluie est identique à la température journalière moyenne de l’air ambiant et en négligeant le refroidissement additionnel dû à la fonte de la neige à la fin de la première semaine : $\bar{T} = (\sum_i m_i T_i) / (\sum_i m_i)$ (i allant de 1 à 47), où \bar{T} ($^\circ\text{C}$) est la température moyenne de l’eau de pluie, m_i (kg) la pluviométrie journalière et T_i ($^\circ\text{C}$) la température journalière moyenne ambiante.

d. La valeur précise de 837,5 ℓ correspond à la pluviométrie sur une surface de 5 m^2 telle que mesurée à Esplechin, à 12 km de la Chèvrerie de la Croix de la Grise. Outre la variation des précipitations sur cette distance, il faudrait considérer le fait que le tas de compost est placé dans un coffrage en bois dont les parois le protègent partiellement des intempéries (suivant la force et la direction du vent). Étant dans l’impossibilité d’estimer de manière un tant soit peu sérieuse l’ampleur des incertitudes et erreurs en découlant, nous conserverons la valeur arrondie de 840 ℓ telle quelle, non sans avertir le lecteur que seul son ordre de grandeur devrait être pris en considération.

Le tas en fermentation — oxygéné malgré nous lors de la mise en place par pelletées successives — présente un échauffement initial bien moindre, plafonnant un peu au dessus de 30°C après consommation de l’oxygène piégé au sein du tas. L’évolution de la température au cours des semaines qui suivent correspond à la progression générale rapportée par Chadwick (2005) pour ses essais de fumiers bovins bâchés et tassés (sans ajout de lactosérum) : elle se maintient sur un plateau durant les semaines de mesures quotidiennes. Cette stabilisation de la température est probablement la résultante du faible échauffement produit par la fermentation anaérobie et d’un refroidissement ralenti par la protection aux intempéries qu’offre la bâche — l’eau de pluie froide s’écoulant directement sur le béton environnant sans pénétrer le tas^e —, par la présence d’un plus faible gradient de température avec l’extérieur et par la limitation de l’évacuation de la chaleur par compaction et bâchage du silo freinant la circulation d’air.

Après avoir été pesés une première fois lors de la mise en place (jour 0), les deux tas ont été repesés au jour 47. Cette manipulation a mené à une oxygénation de la matière jusqu’au cœur des deux tas de fumier durant la septième semaine. Un triplicat de mesure de la température au jour 48 donne des résultats intéressants (repris en pointillés à la [figure 1](#))^f. Dans le cas du tas de compost, la température a continué à chuter sans différence notable avec l’évolution de la semaine précédente, semblant indiquer que l’oxydation opérée durant la première phase de compostage est bien terminée après six semaines (et ce malgré l’absence de retournement intermédiaire du tas). Dans le cas de la fermentation en revanche, l’oxygénation de la matière lors de la pesée après 47 jours, stimulant une reprise de la respiration aérobie, a mené à une forte augmentation de la température, atteignant au minimum 55°C après 24 h. Ce réchauffement, analogue à celui du tas de compost en début d’expérience, semble indiquer que l’ensilage du fumier permet une relative préservation de celui-ci, limitant fortement l’oxydation tant que le tas reste bâché, mais ne stabilise pas la matière face à une exposition à

e. Remarquons cependant que la bâche était glissée entre le fumier ensilé et la paroi du silo sur deux côtés du tas, permettant à une faible quantité d’eau de s’infilttrer dans le tas le long des parois.

f. Suite à des circonstances indépendantes de notre volonté, la prise de température a dû être interrompue par la suite et nous n’avons pas d’autres données pour la période suivant la septième semaine.

l'air libre (pas après une période de sept semaines tout du moins). Il confirme également que de nombreux microorganismes aérobies ne meurent pas lors de la phase anaérobie, mais entrent en dormance jusqu'à un retour de l'oxygène.

3.2.2 MASSE

Sur base de la mesure de la masse totale de fumier humidifié (somme des masses initiales des deux tas, voir [table 4](#) à la de la présente page) et à partir des données d'analyses (voir ci-après, à la section [Composition](#)) une estimation plus précise de la masse initiale de fumier sec et de lactosérum dilué épandu sur celui-ci a pu être réalisée (le détail du calcul est donné en [Annexes](#)). Les résultats sont donnés à la [table 3](#) (page [34](#)) et indiquent un apport de lactosérum au fumier sec de $13,8 \pm 1,2\%$ en masse, du même ordre de grandeur que l'approximation donnée plus haut (cf. [Essais en situation réelle \(tas\)](#)).

Finalement, le fumier humidifié a été mis en tas à l'aide d'un petit chargeur par pelletées successives, pesées les unes après les autres. Par propagation de l'incertitude sur les mesures de poids des différentes pelletées formant les tas aux jours 0 et sur celles réalisées 47 jours après la mise en tas initiale, nous obtenons les résultats présentés à la [table 4](#). Ces données permettent d'observer de manière très significative une diminution en masse des deux tas ($p < 10^{-36}$), de l'ordre de 10 à 20% après 47 jours, sans retournement ni aération intermédiaire. Remarquons, de plus, que la fermentation montre une variation de masse très significativement plus faible que celle du compostage ($p = 0,002$). Ces résultats

	FERMENTATION	COMPOSTAGE
Masse initiale (kg)	3010 ± 23	1900 ± 26
Masse après 47 jours (kg)	2620 ± 31	1560 ± 26
Différence de masse (kg)	-390 ± 38	-340 ± 37
Réduction de la masse (%)	$13,0 \pm 1,3$	$17,9 \pm 1,9$
Significativité statistique	$p < 10^{-43}$	$p < 10^{-36}$

TABLE 4 – *Masses aux jours 0 et 47 (n = 1) et variations correspondantes des masses, avec leurs incertitudes et valeurs-p associées (cf. calculs en Annexes).*

sont comparables à ceux de Chadwick (2005), de Hitman *et al.* (2013) ou encore de G. M. Shah, G. A. Shah *et al.* (2015).

En addition à cette variation de masse, rappelons que 840ℓ de pluie sont tombés sur le tas de compostage, alors que l'infiltration de pluie dans le tas de fermentation est limitée par la bâche. En comptant cette masse d'eau additionnelle, le tas de compostage a perdu 43% de sa masse (*cf. figure 3* à la page suivante). Enfin, parallèlement à la variation de masse, les deux tas ont également réduit de volume. La *figure 2* reprend l'estimation du volume des deux tas aux jours 0, 47 et 126 (*cf. Photos en Annexes*).

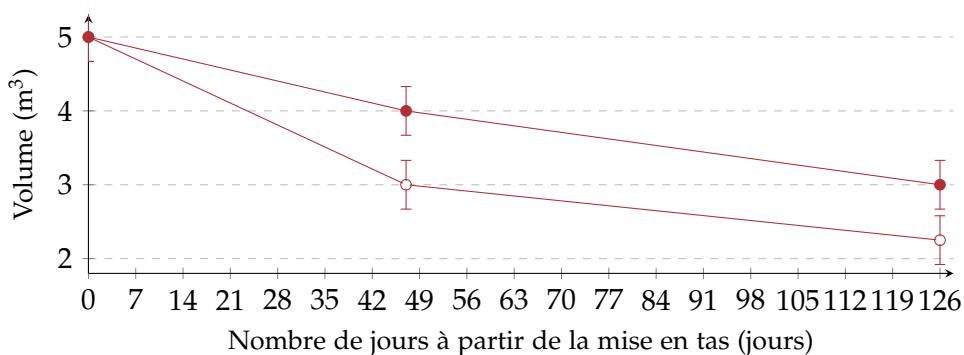


FIGURE 2 – Variation du volume du tas de compostage (---○---) et du tas de fermentation (—●—).

3.2.3 COMPOSITION

La *figure 3* (page suivante) illustre la variation de composition générale des tas en eau et matière sèche entre les jours 0 et 47. La *table 5* (page 53) reprend le détail des compositions absolues des tas et leurs variations après cette période. Elle montre également les valeurs-*p* associées (avec l'hypothèse alternative que ces différences sont strictement négatives)^g. La *figure 4* (page suivante) illustre les variations relatives en carbone (C), azote (N), phosphore (P) et potassium (K) par rapport au fumier humidifié. La *table 6* (page 54) reprend le détail des compositions relatives du fumier sec, du lactosérum dilué, du fumier humidifié au jour 0, ainsi que celles des tas de compostage et de fermentation et les différences entre ces deux tas au jour 47. Elle montre également les valeurs-*p* associées^g. La *table 7* (page 55) reprend les pH, taux de matière sèche et de sucres présents dans

g. L'interprétation de ces valeurs-*p* et le code R utilisé pour les calculer sont donnés en *Annexes*

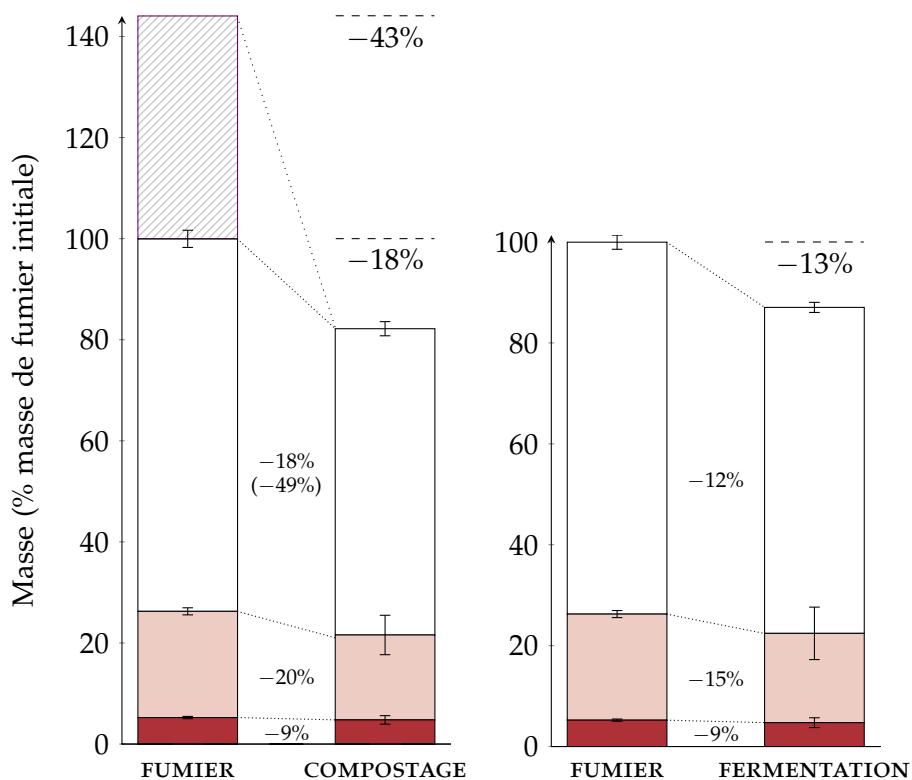


FIGURE 3 – Composition relative de la matière fraîche des tas aux jours 0 (fumier humidifié) et 47 (compostage et fermentation), après calibration des données ; les incertitudes ont été déterminées par propagation de l'écart type.

■ : cendres totales ; □ : matière sèche (moins les cendres) ; □ : eau (□ : pluie).

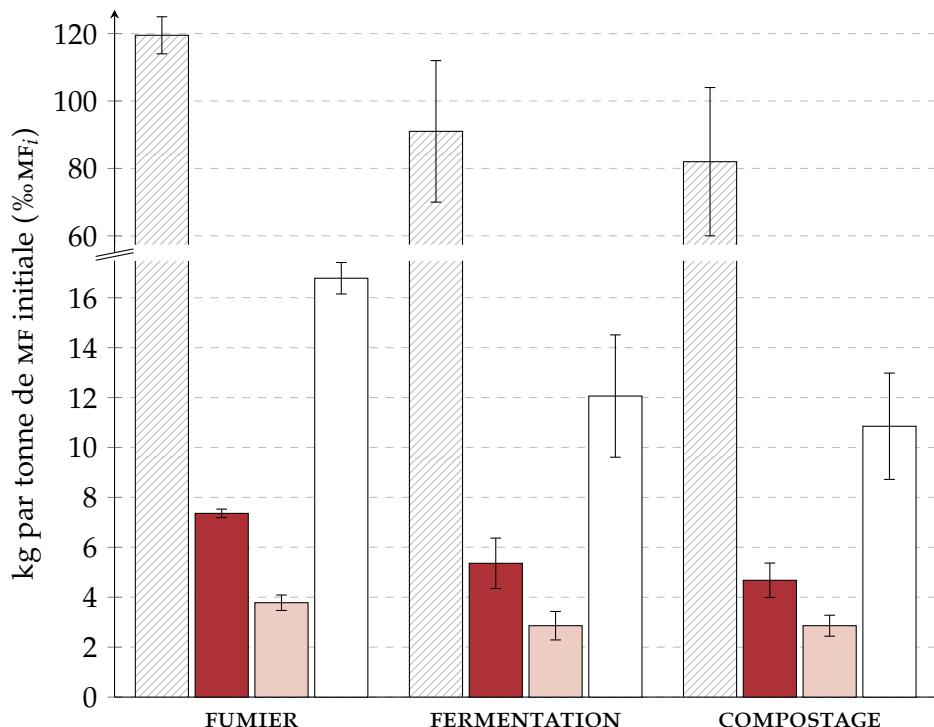


FIGURE 4 – Composition en C organique, N, P et K par tonne de matière fraîche initiale des tas aux jours 0 (fumier humidifié) et 47 (fermentation et compostage), après calibration des données ; les incertitudes ont été déterminées par propagation de l'écart type.

■ : carbone organique ; ■ : azote total ; □ : phosphore (P_2O_5) ; □ : potassium (K_2O).

le lactosérum pur et dilué. Enfin, la [table 8](#) (page 55) reprend les compositions moyennes (brutes) des écoulements de chacun des tas aux jours 47 et 126.

3.2.4 DISCUSSION INTERMÉDIAIRE

3.2.4.1 Hétérogénéité, réplications et incertitudes

Le fumier destiné à la fermentation n'ayant pas été homogénéisé, des poches de compositions variables se sont formées dans le tas (*cf. Photos en Annexes*). Ainsi, nous avons pu observer des zones riches en matières fécales, qui ont chauffé plus fort que les autres. Dans la matière échantillonée début décembre 2019, ces poches étaient encore chaudes à l'ouverture du silo, alors qu'il avait été bâché au 15 juillet (soit 140 jours auparavant). Au dessus de ces poches concentrées en matières fécales (*i.e.* peu pailleuses), se trouvaient généralement des poches contenant plus de paille et dès lors plus d'oxygène entre les brins libres. Sur cette paille, au chaud et en présence d'un peu plus d'oxygène, se sont développées des moisissures.

L'hétérogénéité a ajouté à la difficulté d'obtenir des échantillons représentatifs. Cette difficulté, déjà visible sur les données brutes (*cf. les écarts types pour la matière sèche du compostage à la table 14, page xv en Annexes*), est exacerbée par la calibration. Ainsi, on voit à la [table 5](#) que les incertitudes vont jusqu'environ 25% des valeurs moyennes pour les teneurs en carbone organique. Les incertitudes finales, associées aux prises d'échantillons et élargies par la calibration, dépassent largement les erreurs de mesures intrinsèques aux analyses menées aux laboratoires du Centre de Michamps et du CARAH^h et constituent dès lors la source principale d'incertitudes sur les mesures et calculs qui en découlent.

Considérant que l'évaluation quantitative des erreurs induites par les calibrations est impossible à mener de manière précise (*cf. section Calibration des échantillons, page 39*), nous invitons une fois de plus le lecteur à aborder nos données avec précaution. En ce qui concerne le calcul des valeurs-*p*, notons qu'il a été réalisé en supposant que les échantillons suivent une loi normale de déviation à la composition vraie des tas. Si la prise d'échantillon est réalisée correctement

h. Les erreurs de mesures communiquées par Michamps et le CARAH sont reprises en *Annexes*.

	COMPOSTAGE			FERMENTATION			valeur-p	
	jour 0	jour 47	variation (%)	valeur-p	jour 0	jour 47	variation (%)	
MF de référence (kg)	1 900 ± 26	1 560 ± 26	-17,9 ± 1,9	< 10 ⁻⁴³	3 010 ± 23	2 620 ± 31	-13,0 ± 1,3	< 10 ⁻³⁶
pH	9,29 ± 0,01	9,25 ± 0,08	-0,5 ± 0,6	0,2230	9,29 ± 0,01	8,98 ± 0,09	-3,3 ± 0,7	0,0121
C/N	16,24 ± 0,89	17,5 ± 5,4	+8 ± 37	0,3845	16,24 ± 0,85	17,0 ± 5,0	+5 ± 24	0,4130
MS (kg)	499 ± 15	409 ± 75	-18 ± 19	0,1674	791 ± 22	680 ± 160	-15 ± 15	0,1654
MO (kg)	408 ± 12	280 ± 49	-31 ± 15	0,0793	647 ± 18	490 ± 110	-24 ± 13	0,0646
c organique (kg)	227 ± 11	156 ± 42	-31 ± 19	0,0984	360 ± 17	274 ± 63	-24 ± 13	0,0673
cendres tot. (kg)	99,5 ± 4,4	91 ± 16	-9 ± 20	0,2885	157,7 ± 6,8	143 ± 29	-10 ± 14	0,2350
cendres ins. (kg)	27,1 ± 1,3	27,1 ± 1,3	—	—	43,0 ± 1,9	43,0 ± 1,9	—	—
N total (kg)	13,98 ± 0,37	8,9 ± 1,3	-36 ± 12	0,0497	22,15 ± 0,53	16,1 ± 3,0	-27 ± 10	0,0359
N - NH ₃ (kg)	3,13 ± 0,86	1,55 ± 0,70	-50 ± 26	0,0544	5,0 ± 1,4	4,2 ± 1,1	-15 ± 21	0,2278
N - NH ₃ (%N tot.)	22,4 ± 6,2	17,4 ± 8,2	-22 ± 42	0,2773	22,4 ± 6,2	26,1 ± 8,2	+17 ± 31	0,2815
K ₂ O (kg)	31,9 ± 1,3	20,6 ± 4,0	-35 ± 16	0,0717	50,5 ± 1,9	36,3 ± 7,4	-28 ± 11	0,0362
P ₂ O ₅ (kg)	7,17 ± 0,61	5,41 ± 0,80	-25 ± 13	0,0698	11,36 ± 0,95	8,6 ± 1,7	-24 ± 12	0,0452
Na ₂ O (kg)	2,26 ± 0,05	1,89 ± 0,27	-16 ± 16	0,1515	3,57 ± 0,07	2,67 ± 0,54	-25 ± 11	0,0492
MgO (kg)	2,55 ± 0,09	2,13 ± 0,32	-16 ± 16	0,1525	4,03 ± 0,13	3,17 ± 0,60	-21 ± 11	0,0617
CaO (kg)	8,60 ± 0,56	7,3 ± 1,2	-15 ± 16	0,1687	13,62 ± 0,87	11,2 ± 2,3	-18 ± 13	0,0978

TABLE 5 – Compositions en quantités absolues des tas de fermentation et de compostage aux jours 0 (n = 4) et 47 (n_{compostage} = 2, n_{fermentation} = 3) après calibrations des données, variations associées et significativité statistique des variations (variations, incertitudes et valeurs-p calculées par test de Student (avec l'hypothèse alternative que ces variations sont strictement négatives, en supposant que les échantillons suivent une loi de distribution normale).

	JOUR 0			JOUR 47			valeur-p
	fumier sec	lacto. dilué	f. humidifié	fermentation	compostage	différence (%)	
pH	9,39 ± 0,01	3,58 ± 0,01	9,29 ± 0,01	8,98 ± 0,09	9,25 ± 0,08	+2,97 ± 0,86	0,0174
c/N	15,44 ± 0,32	.	16,24 ± 0,19	17,0 ± 5,0	17,5 ± 4,6	+3 ± 32	0,9146
MS (%MF)	29,57 ± 0,70	2,33 ± 0,15	26,26 ± 0,70	25,8 ± 6,0	26,2 ± 4,8	+2 ± 23	0,9309
MO (%MF)	23,80 ± 0,75	.	21,49 ± 0,59	18,8 ± 4,1	17,9 ± 3,1	-5 ± 21	0,8065
c organique (%MF)	13,22 ± 0,42	.	11,95 ± 0,55	10,5 ± 2,4	10,0 ± 2,2	-5 ± 25	0,8307
cendres tot. (%MF)	6,27 ± 0,14	.	5,24 ± 0,22	5,4 ± 1,1	5,8 ± 1,0	+7 ± 22	0,7328
cendres ins. (%MF)	2,03 ± 0,32	.	1,43 ± 0,06	1,64 ± 0,08	1,74 ± 0,09	+6,0 ± 6,0	0,3156
MO (%MS)	80,49 ± 0,61	.	81,83 ± 0,39	73 ± 23	68 ± 17	-6 ± 30	0,8169
c organique (%MS)	44,70 ± 0,35	.	45,5 ± 1,7	41 ± 17	38 ± 15	-6 ± 41	0,8668
cendres tot. (%MS)	21,22 ± 0,83	.	19,95 ± 0,65	21,1 ± 6,5	22,2 ± 5,6	+5 ± 32	0,8630
cendres ins. (%MS)	6,31 ± 0,26	.	5,44 ± 0,19	6,4 ± 1,5	6,6 ± 1,3	+4 ± 24	0,8463
N total (kg/t _{MF})	8,56 ± 0,26	0,43	7,36 ± 0,17	6,2 ± 1,2	5,70 ± 0,83	-7 ± 17	0,6460
N - NH ₃ (kg/t _{MF})	—	.	1,65 ± 0,45	1,61 ± 0,40	0,99 ± 0,45	-38 ± 32	0,2541
N - NH ₃ (%N tot.)	—	.	22,4 ± 6,2	26,1 ± 8,2	17,4 ± 8,2	-33 ± 37	0,3547
K ₂ O (kg/t _{MF})	19,22 ± 0,67	0,58	16,78 ± 0,63	13,9 ± 2,8	13,2 ± 2,6	-5 ± 21	0,8145
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	4,65 ± 0,02	0,29	3,78 ± 0,31	3,29 ± 0,66	3,47 ± 0,51	+6 ± 19	0,7539
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,32 ± 0,04	0,27	1,19 ± 0,02	1,02 ± 0,20	1,21 ± 0,17	+19 ± 21	0,3576
MgO (kg/t _{MF})	1,66 ± 0,03	0,08	1,34 ± 0,04	1,21 ± 0,23	1,37 ± 0,20	+13 ± 20	0,4846
cao (kg/t _{MF})	5,46 ± 0,13	0,51	4,53 ± 0,29	4,27 ± 0,86	4,68 ± 0,73	+21 ± 68	0,6126

TABLE 6 – Compositions relatives moyennes (et écarts types propagés le cas échéant) du fumier sec (non calibré; $n = 3$) et du lactosérum (non calibré; $n = 2$ pour le pH et la MS, $n = 1$ pour le reste), ainsi que du fumier humidifié au jour 0 ($n = 4$) et du fumier composté ($n = 2$) et fermenté ($n = 3$) à 47 jours (après calibration des données); variations associées et significativité statistique des variations (variations, incertitudes et valeurs-p calculées par test de Student, en supposant que les échantillons suivent une loi de distribution normale);
: analyses non réalisées;
— : données aberrantes écartées, cf. discussion à la section Prise d'échantillons (page 36) et la table 13 (page xiv en Annexes).

	LACTOSÉRUM PUR	LACTOSÉRUM DILUÉ
pH	4,50 ± 0,21	3,58 ± 0,01
MS (%MF)	7,50 ± 0,36	2,33 ± 0,15
fructose (%MF)	< 0,1	< 0,1
glucose (%MF)	< 0,1	< 0,1
saccharose (%MF)	< 0,1	< 0,1
lactose (%MF)	3,53 ± 0,06	0,17 ± 0,06
maltose (%MF)	< 0,1	< 0,1
total des sucres (%MF)	3,53 ± 0,06	0,17 ± 0,06

TABLE 7 – Valeurs du pH, de la composition en matières sèches et des taux de sucres simples du lactosérum pur (directement à la sortie de la fromagerie; $n = 3$) et dilué (provenant de la citerne de la ferme, mélangé avec les eaux du parcours extérieur et des écoulements de la compostière; $n = 3$).

	COMPOSTAGE		FERMENTATION	
	jour 47	jour 126	jour 47	jour 126
pH	8,55 ± 0,24	9,04	8,30 ± 0,06	9,2
C/N	3,76 ± 0,36	6,12	5,4 ± 3,1	6,6
MS (%MF)	3,25 ± 0,16	7,02	4,27 ± 0,14	7,57
MO (%MF)	1,01 ± 0,18	2,23	1,16 ± —	2,29
cendres tot. (%MF)	2,64 ± 0,18	5,37	3,36 ± 0,41	6,02
cendres ins. (%MF)	0,05 ± 0,01	0,09	0,07 ± 0,04	0,14
MO (%MS)	30,9 ± 5,3	31,8	27,1 ± —	30,2
cendres tot. (%MS)	81,0 ± 2,7	76,4	78,6 ± 7,0	79,5
cendres ins. (%MS)	1,55 ± 0,42	1,33	1,7 ± 1,1	1,75
N total (kg/t _{MF})	1,48 ± 0,03	2,03	2,49 ± 0,60	1,91
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,51 ± 0,06	0,20	1,02 ± 0,35	0,19
N – NH ₃ (%N total)	34,1 ± 4,3	9,9	41 ± 17	9,9
K ₂ O (kg/t _{MF})	11,17 ± 0,60	21,34	15,7 ± 2,0	25,4
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	0,43 ± 0,01	0,88	0,63 ± 0,30	0,94
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,16 ± 0,17	2,03	1,02 ± 0,13	2,11
MgO (kg/t _{MF})	0,02 ± 0,00	0,06	0,14 ± 0,11	0,12
cao (kg/t _{MF})	0,11 ± 0,01	0,38	0,56 ± 0,42	0,41

TABLE 8 – Composition des jus s'écoulant des deux tas, récoltés aux jour 47 ($n = 2$) et 126 ($n = 1$).

et que les échantillons constitués sont effectivement représentatifs de la matière contenue dans les tas, cette hypothèse est raisonnable. Afin de pouvoir estimer

notre aptitude à prendre des échantillons représentatifs, il aurait été intéressant de tester cette hypothèse de normalité et d'ainsi pouvoir quantifier les erreurs liées à la prise d'échantillons. Malheureusement, le faible nombre d'échantillons analysés, ainsi que la non réplication des expériences — nous n'avons mis en place qu'un seul tas de compostage et un seul tas de fermentation, dans une seule ferme — ne nous permet pas de faire un tel test (les tests de Kolmogorov-Smirnov ou de Shapiro-Wilk, par exemple, permettant de tester cette normalité, ne commencent à être concluant qu'à partir de $n > 5^{\rightarrow}$). Les valeurs indiquées sont donc des estimations optimistes tirées de nos résultats. De plus, suite à l'unique répétition du compostage et de la fermentation, la reproductibilité de nos résultats est incertaine. Ainsi, seuls les ordres de grandeurs, associés à des calculs de significativité statistique, devraient être pris en compte. Un plus grand nombre d'échantillons et une répétition des expériences seraient indispensables pour confirmer les tendances que l'on pourrait dégager de nos données.

[Wikipedia contributors \(2020a\)](#).

3.2.4.2 Variations du pH

Une première observation que nous pouvons tirer de la [table 5](#) est la faible diminution du pH du fumier fermenté, passant d'une valeur de $9,39 \pm 0,01$ au jour 0 à $8,98 \pm 0,09$ au jour 47 (le fumier composté restant autour d'une valeur relativement stable en finissant à un pH de $9,25 \pm 0,08$). Bien que faible (le pH final est toujours basique), cette baisse est très significative ($p = 0,0121$). Cependant, le pH obtenu est loin de la valeur de 5 supposée être atteinte par la fermentation lactique pour mener à une préservation de la matière dans un ensilage. Il est dès lors clair que cette fermentation lactique n'a pas eu lieu de manière suffisante et, n'abaissant que légèrement le pH de la matière bâchée, qu'elle a laissé place à une fermentation secondaire menée par des microorganismes neutrophiles.

Les entérobactéries, pouvant profiter d'une meilleure résistance aux conditions aérobies dans un silo peu hermétique et se trouvant dans leur optimum de température, ont probablement pris le dessus, en produisant des acides plus faibles que l'acide lactique. Il est fort probable que les archées méthanogènes — en conditions optimales de développement dans un environnement tiède en

relative anaérobie au cœur du tas et proche d'un pH neutre, cf. section *Archées méthanogènes* page 19 — se soient également développées au sein du tas de fermentation (cf. chapitre *Bokashi, méthode alternative de compostage ?*, page 30).

Cette fermentation secondaire produit donc CO_2 , CH_4 , N_2O et autres gaz participant à la volatilisation de la matière ainsi qu'à des pollutions atmosphériques et à l'effet de serre global (cf. chapitres *Microbiologie des ensilages*, page 14, et *Biochimie des ensilages*, page 20). Rappelons-le (cf. section *Étanchéité et stabilité aérobie*, page 25), la présence d'une bâche n'empêche pas la production et la volatilisation de ces gaz qui, plus lourds que l'oxygène, s'échappent du tas par le bas lorsque l'étanchéité n'est pas suffisante (accentuant le phénomène de convection gazeuse au sein du tas). Notre protocole expérimental ne s'étant pas intéressé aux volatilisations, nous ne pouvons néanmoins pas tirer de conclusions plus avancées sur ces productions gazeuses.

Cet échec de la fermentation lactique est dû en partie à une mauvaise étanchéité de la bâche (autour du système de récolte des écoulements notamment) et en partie à la faible quantité de sucres simples présente dans la matière ensilée, apportée de manière anecdotique par le lactosérum dilué. En effet, en se rappelant que le volume total de lactosérum épandu sur le fumier sec était de $596 \pm 49 \text{ l}$ (cf. [table 3](#), dont $365 \pm 30 \text{ l}$ pour le test de fermentation) avec un taux de $0,017 \pm 0,006 \text{ g}$ de sucre par litre de lactosérum (cf. [table 7](#)), on arrive à une masse de $202 \pm 72 \text{ g}$ de sucre par tonne de fumier humidifié. En humidifiant le fumier directement avec du lactosérum pur, avec un taux de $0,353 \pm 0,006 \text{ g}$ de sucre par litre, l'apport de sucre pourrait atteindre $6,99 \pm 0,60 \text{ kg}$ de sucre par tonne de fumier humidifié. Bien que cela représente une augmentation de près de 3500% de la quantité de sucre ajoutée au fumier, cela n'équivaut toujours qu'à un apport de $(0,43 \pm 0,04)\%$ en masse du fumier humidifié, alors qu'on en recommande entre 6 et 10%[→]. Dès lors, cet apport de sucre est probablement toujours trop faible pour une acidification rapide et suffisante permettant d'atteindre un pH sous la barre de 5. Nous y reviendrons à la section suivante, où nous analysons les résultats des tests en fûts.

Voir
Iñiguez-Covarrubias et al. (1990) et
Teixeira Franco (2017) et les
références qui y sont citées.

Notons cependant que le taux de matière sèche du fumier initial est encore supérieur à la moyenne de $24,27 \pm 7,32\%$ MF pour les échantillons de fumier sec de bovin analysés dans les laboratoires du réseau Requasud[→], et encore largement supérieur à celui du fumier mou du bovin, d'une moyenne de $18,85 \pm 3,76\%$ MF (cf. [table 17](#) page [xviii](#) en *Annexes*). Un essai de fermentation en humidifiant avec un volume de lactosérum pur plus conséquent permettrait à la fois d'obtenir de meilleures conditions anaérobies (en chassant l'oxygène de la matière) et d'apporter une quantité de sucre totale plus importante. Il convient cependant de veiller à ne pas apporter un volume trop grand de lactosérum, qui risquerait en s'écoulant du tas de lixivier les nutriments qu'il contient.

Cette absence de baisse du pH est similaire à celle décrite (pour les publications reprenant des mesures de pH) dans la littérature concernant des études de gestion du fumier par bâchage ou par tassemement à l'air libre (fumier composté-fermenté) sans apport de sucre[→]. Ainsi, Teixeira Franco, Buffière *et al.* ([2018a](#)) observent que l'acide prépondérant dans leurs essais de fermentation sans apport de sucre est l'acide acétique, plus faible que l'acide lactique, conduisant dès lors à un pH final plus haut.

3.2.4.3 Variations de composition des tas

Une deuxième observation que l'on peut tirer de la [table 5](#) est que, après 47 jours, la variation du rapport C/N n'est pas significative. Son augmentation étant généralement un critère de détermination d'un fumier mûr, il est raisonnable de penser que la durée de notre expérimentation est trop courte pour atteindre des résultats globalement significatifs. Ainsi, si une bonne partie des variations de composition des tas après 47 jours sont (au moins faiblement) significatives (cf. [table 5](#)), la comparaison des compositions des tas après 47 jours ne donne aucune différence significative hormis celle du pH (cf. [table 6](#)). À ce stade, nous ne pouvons donc pas conclure que les différentes modalités de gestion du fumier mènent à des différences de compositions finales statistiquement significatives.

Cette absence de significativité statistique peut soit être un reflet de la réalité — ce dont nous doutons, simplement au vu du fait que le compost est soumis à

Requasud (2020).

Voir par exemple

Amon et al. (2001),

Chadwick (2005),

G. M. Shah, Groot et al. (2012),

Teixeira Franco,

Buffière et al.

(2018a),

Teixeira Franco,

Coarita et al. (2019),

etc.

une lixiviation par les eaux de pluies —, soit venir d'une insuffisance provenant de nos données. Ce deuxième aspect peut avoir deux causes : premièrement le faible nombre d'échantillons analysés et l'absence de réplication de nos expériences (que nous avons déjà abordée ci-dessus), deuxièmement la courte durée de l'expérience. À titre de comparaison, les études citées ci-dessus se basent sur des périodes de stockage du fumier allant de 90 à 180 jours (*i.e.* de trois à six mois). Notre recherche étant restreinte par la courte durée d'un mémoire et par les restrictions engendrées par la mise en place d'expériences de terrain en ferme, et nos données à 126 jours n'étant pas exploitables, nous avons dû nous baser sur des résultats à 47 jours (*i.e.* un mois et demi). Au vu de nos résultats, il est probable que cette durée soit trop courte pour pouvoir obtenir des résultats significatifs. Cette hypothèse est corroborée par le fait que G. M. Shah, Groot *et al.* (2012) observent des pertes très significativement inférieures dans un fumier bovin bâché après 130 jours en termes de matière sèche, de carbone et d'azote, par rapport à un compostage (avec quatre retournements) et à un fumier composté-fermenté (ni retourné, ni bâché), alors même que ces tas sont placés à l'abri de la pluie sous un toit.

Notons également qu'une meilleure étanchéité et un apport plus important de sucre permettent également de réduire les pertes lors de la fermentation. En particulier, Teixeira Franco, Buffière *et al.*, 2018a rapportent des pertes de polysaccharides structuraux allant jusqu'à environ 20% pour la cellulose et l'hemicellulose après 30 jours et de 30 à 40% après 120 jours dans un fumier ensilé sans apport de sucre. En comparaison, l'apport de 10% en masse de sucre leur a permis de réduire en dessous de 15% les pertes de polysaccharides structuraux après 120 jours[→].

Teixeira Franco,
Buffière et al.
(2018a).

3.2.4.4 Variations de composition des écoulements

Après calibration des données, on obtient sur base des taux de matière sèche une perte en eau de $280 \pm 460 \ell$ (pour une perte en masse de $390 \pm 38 \text{ kg}$) dans le tas de fermentation et de $250 \pm 220 \ell$ (pour une perte en masse de $340 \pm 37 \text{ kg}$) dans le tas de compostage (ou d'environ mille litres si on prend en compte l'eau

de pluie). L'eau perdue provient à la fois de l'eau présente lors de la mise en tas (principalement via le lactosérum n'ayant pas pu être absorbé par le fumier pailleux), ainsi que par la production d'eau par respiration aérobie — Dewes (1995) estime à environ 50 ℓ par tonne de fumier la production d'eau par respiration aérobie suite à la mise en tas —, ainsi que du contenu cytoplasmique des cellules mortes au sein de la matière et au cours du développement des populations microbiennes. Dans le cas du compostage, une partie importante de cette eau est volatilisée suite au réchauffement de la matière. Dans le cas de la fermentation, cette volatilisation est largement limitée par la bâche et les températures atteintes bien plus basses.

L'azote est généralement — après le carbone — l'élément qui est le plus modifié durant le stockage et le traitement du fumier, que ce soit par minéralisation, immobilisation, nitrification, dénitrification, lixiviation, écoulement ou volatilisation. Il est largement admis que les pertes se font majoritairement durant les premières semaines suivant la mise en tas, la concentration des jus diminuant fortement dès la deuxième semaine[→]. La quantité des écoulements diminue également drastiquement au cours des six premières semaines pour du fumier bâché ou protégé de la pluie, mais peut être conséquente à tout moment du stockage s'il est fait à l'air libre[→]. Dans Petersen, Lind *et al.* (1998), on observe clairement une lixiviation des nutriments de la surface des tas non couverts vers leur fond suite à l'action de la pluie. Enfin, McGechan (1990) note que les écoulements produits par pression interne de la matière, sont réduits en diminuant la hauteur des tas.

Ainsi, les échantillons de jus écoulés que nous avons prélevés au jour 47 sont largement dilués par rapport aux pertes des premières semaines et les échantillons pris au jour 126 sont supposés l'être encore plus. Cependant, les données reprises à la [table 8](#) semblent indiquer une augmentation des concentrations en matière sèche et en la plupart des éléments minéraux. Cette concentration des jus collectés au jour 126 est due au fait qu'ils ont stagné à l'extérieur durant l'entièreté du confinement, période durant laquelle la sécheresse a participé à l'évaporation d'une partie de l'eau de ces jus. Les échantillons au jour 126 en sont dès lors inutilisables. Sans avoir eu accès à un relevé volumétrique et une prise

*Voir par exemple
Chadwick (2005),
Dewes (1995) et
Petersen, Lind *et al.*
(1998).*

Dewes (1995).

d'échantillon régulière, il est impossible de tirer de plus amples conclusions sur les écoulements des deux méthodes de gestion du fumier.

3.2.4.5 *Données au jour 126*

Remarquons également que l'oxygénation lors du double retournement du tas au cours de la pesée au jour 47 et la montée en température qui s'en est suivi (*cf. figure 1*, page 47) indiquent que le tas de fumier en fermentation a été fortement perturbé par l'opération. Ainsi, si nous avions pu traiter les données des échantillons au jour 126, il est fortement probable que les différences avec le compostage auraient été minimes (et d'autant moins significatives que les données au jour 47). Une observation qualitative au jour 126 donne une description des matières relativement semblables entre compostage et fermentation, alors que les fûts scellés hermétiquement (et non perturbés durant ces 126 jours) contenant la même matière initiale présentent une décomposition moins avancée, une structure des pailles plus persistante, une couleur moins foncée et une odeur douce moins inerte (*cf. section Influence du lactosérum*, ci après). L'impossibilité de calibrer les échantillons au jour 126 (*cf. section Mesure du poids des tas*, page 34) ne nous semble dès lors pas représenter une perte fondamentale de données.

3.2.5 INFLUENCE DU LACTOSÉRUM

La *figure 5* illustre les valeurs du pH des différentes matières, en tas (fumier, compostage et fermentation) et en fûts en plastique : humidifiées avec la préparation de EM®, avec de l'eau, avec du lactosérum dilué (L.D.), du lactosérum pur crû (L.C.) ou du lactosérum pur stérilisé (L.S.).

Remarquons que le pH du tas de fumier fermenté sous bâche remonte de $8,98 \pm 0,09$ au jour 47 à $9,26 \pm 0,15$ au jour 126, confirmant la forte perturbation suite à la pesée au jour 47 et la présence d'une fermentation secondaire. Il aurait été intéressant malgré tout d'avoir une mesure régulière du pH dans le tas de fermentation (similaire à celle de la prise de température). En effet, elle aurait

i. Le fût L.D.#1, présentant une fort gonflement suite à la production de gaz et affichant une valeur du pH sensiblement plus élevée, a été écarté.

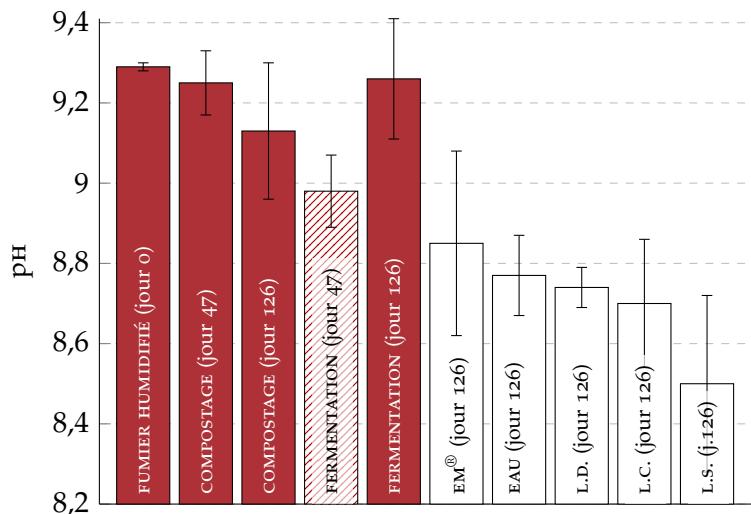


FIGURE 5 – Valeurs du pH des essais en tas et des tests de fumier humidifiés avec différents liquides ($n = 3$, sauf pour le fumier humidifié où $n = 4$ et pour le L.D. où $n = 2$).
L.D. : lactosérum dilué ; L.C. : lactosérum pur crû ; L.S. : lactosérum pur stérilisé.
■ : valeurs du pH ne présentant pas de différence significative avec celle du fumier au jour 0 ; □ : valeurs du pH ne présentant pas de différence significative avec celle des fûts humidifiés avec du lactosérum pur (crû et stérilisé) au jour 126 ; ▨ : valeur du pH significativement différente à la fois de celle du fumier au jour 0 et de celles des fûts humidifiés avec du lactosérum pur au jour 126.

permis de confirmer que cette remontée du pH (et donc l'occurrence de cette fermentation secondaire) a été amorcée par l'oxygénation malencontreuse lors de la pesée. Une hypothèse alternative également plausible est que, en conséquence de la quantité extrêmement limitée de sucres disponibles, la fermentation secondaire a débuté avant le jour 47 (et, dès lors, que la valeur du pH à ce jour est déjà plus élevée que la valeur minimale, inconnue, atteinte au cours de la fermentation primaire).

Remarquons également que les fûts de fumier humidifiés aux microorganismes EM® tout comme ceux humidifiés à l'eau (ne comportant aucun ajout de sucres) ont des pH finaux significativement plus bas que celui de la fermentation en tas. Cela illustre l'importance d'une bonne étanchéité du tas pour favoriser la fermentation lactique. Le point faible de l'étanchéité est généralement à l'interface sol / bâche, où les gaz lourds (CO_2 , CH_4 ...) produits au sein de la matière bâchée peuvent s'échapper (cf. section *Étanchéité et stabilité aérobie*, page 25).

Qualitativement, nous avons comparé les couleurs, textures, odeurs, les jus s'écoulant après retournement des fûts à l'ouverture et les gaz produits durant

COULEUR	TEXTURE	ODEUR	JUS	GAZ	pH
L.C. (<i>lactosérum</i> <i>pur crû</i>)	café au lait, homogène, semblable au fumier frais;	pailles rigides, similaires au fumier frais;	rappelant celle du fumier, adoucie par le lactosérum, agréable;	—	fût L.C.#3 gonflé, sans différence d'odeur;
L.S. (<i>lactosérum</i> <i>pur stérilisé</i>)	café au lait, homogène, semblable au fumier frais;	pailles rigides, similaires au fumier frais;	rappelant celle du fumier, adoucie par le lactosérum, mais un peu plastique;	—	fût L.S.#1 gonflé, sans différence d'odeur;
L.D. (<i>lactosérum</i> <i>dilué</i>)	moka, homogène;	pailles se défont relativement facile- ment sous les doigts;	comparable à celle du tas de fermenta- tion, agréable; fût L.D.#2 : odeur de lactosérum ayant tourné;	—	fût L.D.#1 gonflé, sans différence d'odeur; 8,74±0,05 pour les 2 autres);
E.M. (<i>microorga- nismes efficaces</i>)	chocolat, homogène;	décomposition avancée des pailles, proche de celle du tas de fermenta- tion;	mélange entre odeur douce de lactosérum et de plastique renfermé; à l'ouverture;	1 ℥ de jus s'est écoulé du fût E.M.#2 après retournement	—
EAU	hétérogène : café au lait, moka, chocolat;	pailles globalement rigides, semblable au fumier frais;	fumier renfermé et plastique, un peu âcre;	—	—

TABLE 9 – Comparaison qualitative / quantitative après 126 jours des triplcats de matières fermentées en fût suivant le liquide utilisé pour l'humidification du fumier, sur base de leur couleur, texture, odeur, des jus s'écoulant après retournement à l'ouverture et de la production de gaz;
— : rien à signaler.

la fermentation de 126 jours. Nos observations sont reprises à la **table 9** (page précédente). Des cinq déclinaisons des tests en fûts, le triplicat de fermentation du fumier humidifié avec du lactosérum pur cru est celui qui présente une matière la plus proche du fumier initial en termes de couleur et de texture, et qui dégage l'odeur la plus agréable. Les fûts humidifiés avec du lactosérum pur stérilisé suivent, avec une odeur un peu plus plastique. Ces tests basés sur l'ajout de lactosérum pur sont les seuls ayant eu un apport en sucre supérieur à celui du lactosérum dilué utilisé pour les essais en tas. Ainsi, cet apport de lactose additionnel semble bénéfique à la conservation du fumier. Cependant, le pH final est encore loin de la valeur de 5 à atteindre pour un ensilage bien préservé. Sans avoir opéré de mesures intermédiaires du pH dans les fûts, il nous est impossible de déterminer si celui-ci est remonté suite à une fermentation secondaire ou s'il n'est jamais descendu plus bas.

L'inoculation de microorganismes EM® semble avoir mené à une dégradation du fumier plus avancée, la matière finale présentant une couleur plus sombre et une texture plus proche des essais en tas que du fumier initial. Sans apport de sucre, la fermentation lactique (supposée préserver l'ensilage), ne semble cependant pas améliorée par ces microorganismes dits *efficaces*, les tests ne présentant pas des valeurs de pH significativement différentes.

Si l'humidification au lactosérum pur permet d'apporter plus de sucre, remarquons que nos tests ont été faits sur base de lactosérum pur frais (sortant directement de la fromagerie) et de lactosérum dilué conservé en citerne durant plusieurs mois. Or nous pouvons observer (*cf. table 7*, page 55) que le pH du lactosérum dilué (d'une valeur de $3,58 \pm 0,01$) est plus bas que celui du lactosérum pur ($4,50 \pm 0,21$) malgré la dilution. Ainsi, il est clair que la diminution du taux de sucre (de $3,53 \pm 0,06$ g/ℓ dans le lactosérum pur à $0,17 \pm 0,06$ g/ℓ dans le lactosérum dilué) n'est pas uniquement dû à la dilution, mais qu'une partie du lactose présent dans le lactosérum au départ de sa conservation est consommée par fermentation lactique, laquelle baisse le pH jusqu'à inhibition de tout développement microbien subséquent. Dès lors, même en utilisant du lactosérum pur (conservé) pour l'humidification du fumier, le taux de sucre sera

plus bas que celui mesuré pour le lactosérum pur frais utilisé dans nos tests en fûts.

3.2.6 CINÉTIQUE DE MINÉRALISATION

Les résultats auxquels nous avons eu accès en date de la remise de ce mémoire sont repris à la [figure 6](#). Nous ne manquerons pas de compléter ces résultats — pour la défense orale du mémoire et pour la transmission de notre analyse à Vincent Delobel et à l'équipe d'Agra-Ost — dès que nous recevrons les compléments de données en provenance du laboratoire du Centre de Michamps.

Nous observons immédiatement que les incertitudes engendrées par la prise d'échantillons dominent toute variation entre les différents traitements du fumier. De plus, la majeure partie de ces données étant basées sur l'analyse d'un seul

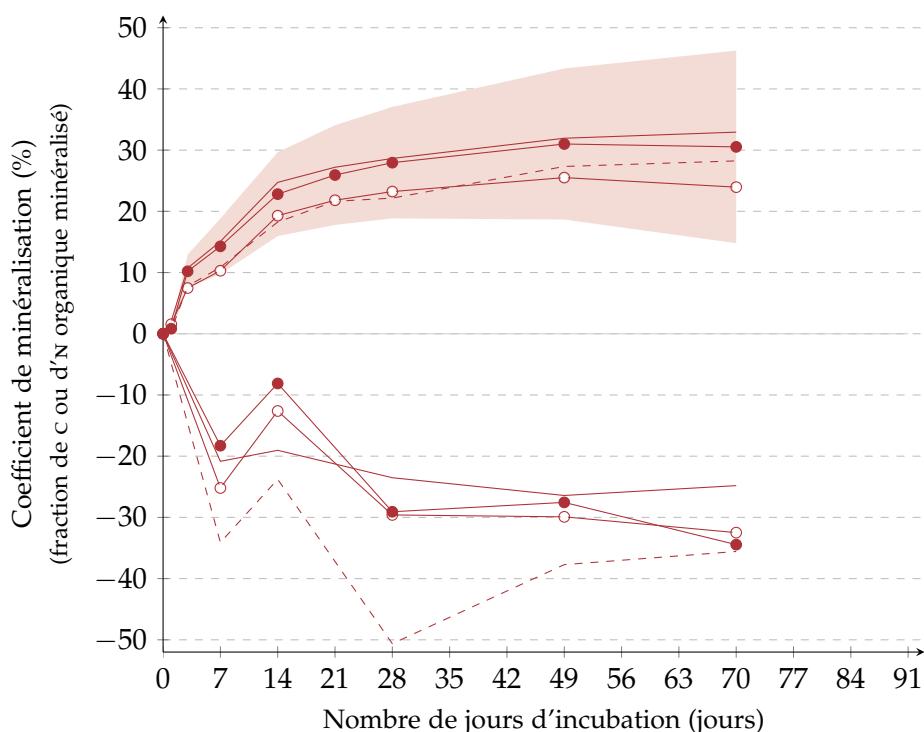


FIGURE 6 – Coefficients de minéralisation du carbone (valeurs positives) et de l'azote (valeurs négatives) du fumier sec initial (—), du compostage après 47 jours (—○—), de la fermentation après 47 jours (—●—) et de la fermentation après 140 jours (— - -); moyennes de triplicats d'analyses sur base d'un seul échantillon pour toutes les séries, sauf pour le coefficient de minéralisation du carbone pour la fermentation après 47 jours qui est basé sur trois échantillons tripliqués (soit neuf analyses au total); ■ : incertitudes liées à la prise d'échantillons et à l'hétérogénéité de la matière pour le coefficient de minéralisation du carbone de la fermentation après 47 jours.

échantillon de matière, il est impossible de tirer des conclusions significatives entre les différents traitements.

L'allure globale des courbes correspond aux analyses de matières types[→]. *Charles (2020)*. Ainsi, on observe que la minéralisation du carbone se fait par dégagement progressif de CO_2 , alors que l'évolution de l'azote est moins stable. La remontée des coefficients de minéralisation de l'azote au jour 14 est probablement un artéfact dû à la correction de l'humidité au sein de l'étuve réalisée ce jour-là. Le reste de l'évolution est due à l'immobilisation puis à la libération d'azote par la microflore présente dans le sol de référence (et la matière organique) mise en étuve. L'évolution des coefficients de minéralisation de l'azote indiquent une faim d'azote (avec une immobilisation de l'ordre de 30% de l'azote) après l'épandage lors du développement des populations microbienne, qui se résorbe habituellement autour du jour 70, une fois que l'azote circule à nouveau une fois la microflore à l'équilibre. Nous devons dès lors attendre les résultats finaux (jour 91) pour pouvoir tirer des conclusions sur les disponibilités (ou les immobilisations) en azote.

Les coefficients finaux de minéralisation du carbone semblent tendre vers 30%, correspondant à une matière organique modérément stabilisée, présentant un certain potentiel humifère tout en stimulant l'activité microbienne du sol.

La fermentation à 140 jours à la correspond à la prise d'échantillon préliminaire que nous avions réalisée en décembre 2019 sur la matière ensilée le 15 juillet 2019. N'ayant aucun échantillon des matières initiales pour cette fermentation, nous n'avons pas utilisé cet échantillon pour le reste de nos analyses, mais il nous semble pertinent de l'inclure ici pour étudier l'effet d'un ensilage du fumier sur une plus longue durée (en supposant toutes choses égales par ailleurs). La courbe de minéralisation de l'azote correspond (en la lissant) à l'allure générale de digestat, présentant une faim d'azote de l'ordre de 40%[→]. *Charles (2020)*.

L'ensemble des coefficients de minéralisation étant relativement proches, il apparaît que l'utilisation de fumier fermenté n'entraîne pas plus de faim d'azote que n'importe quel autre traitement du fumier (sauf après un long stockage). Les valeurs similaires du rapport C/N pour le compostage et la fermentation

(cf. [table 6](#), page [54](#)) appuie cette observation. La croissance et le rendement obtenus sur les parcelles fertilisées avec du fumier fermenté à l'automne passé à la Chèvrerie de la Croix de la Grise confirment tendance : aucun signe de faim d'azote accru n'a été observé et — dans les limites de l'impact climatique des sécheresses à répétition de ces dernières années — les rendements 2020 semblent équivalents à ceux des années précédentes[→].

*Delobel (2020),
communication
privée.*

Remarquons finalement que les interprétations tirées de ce tableau ne correspondent pas à ce qui se passerai réellement au champ, les traitements en laboratoire (séchage, découpe...) rendant le carbone plus accessible (et surestimant la minéralisation) alors qu'une partie de l'azote ammoniacal a pu être volatilisé[→]. Néanmoins, les comparaisons entre les courbes restent porteuses de sens. Remarquons également que les coefficients de minéralisation finaux (déterminés sur base des données après 91 jours d'incubation), doivent être étalonnés sur base de la minéralisation d'albumine d'œuf. Cet étalonnage n'étant réalisable qu'avec les données au jour 91, nous n'avons pas pu corriger les données reprises à la [figure 6](#).

Charles (2020).

CONCLUSION

4

« *Ces tas d'ordures au coin des bornes, ces tombereaux de boue cahotés [...] , savez-vous ce que c'est ? C'est de la prairie en fleur, c'est de l'herbe verte, c'est du serpolet et du thym et de la sauge, c'est du gibier, c'est du bétail, c'est le mugissement satisfait des grands bœufs le soir, c'est du foin parfumé, c'est du blé doré, c'est du pain sur votre table, c'est du sang chaud dans vos veines, c'est de la santé, c'est de la joie, c'est de la vie.* »

Hugo, 1862

Dans ce travail de fin d'étude, nous avons cherché à vérifier si la fermentation anaérobiose du fumier est une pratique agroécologique apportant à la fois des externalités positives (en nous intéressant à la réduction d'émission de gaz à effets de serre principalement) tout en renforçant l'autonomie paysanne en fertilité par rapport au compostage classique du fumier. Notre recherche se base sur une étude de l'état de l'art dans la littérature, ainsi que sur les expériences de terrain à la Chèvrerie de la Croix de la Grise (Havrinnes).

4.1 NOS RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

En conséquence du peu de nombre d'échantillons analysés, de l'hétérogénéité de la matière échantillonnée, de l'absence de réplication de nos expériences, les seuls résultats statistiquement significatifs que nous ayons pu obtenir sont les suivants.

1. La fermentation anaérobiose se fait en conditions mésophiles, à une température moyenne de l'ordre de 30°C tant que les conditions anaérobies sont maintenues ;

2. La perte de masse du fumier fermenté sous bâche est très significativement inférieure à celle du tas de compost après 47 jours de fermentation, malgré le fait qu'il ait plu sur ce deuxième près de 840 ℓ de pluie ;
3. La diminution globale du pH du fumier — avant de remonter suite à la mise en place non désirée d'une fermentation secondaire — est significativement plus importante dans le fumier fermenté sous bâche après 47 jours que dans le fumier composté ; la variation du pH du fumier composté n'est pas significative (ni après 47 jours, ni après 126 jours) ;
4. La mise en place de conditions anaérobies stricte en fûts plastiques permet une acidification significativement plus importante que la fermentation sous bâche, même sans l'apport de sucre.

L'évolution des autres paramètres expérimentaux étudiés (principalement les teneurs en MS, MO, C, N, P, K, etc. et les coefficients de minéralisation) ne nous permettent pas de tirer de conclusion plus avancées sur la comparaison des deux modes de gestion du fumier pailleux de chèvre. Une étude basée sur un nombre d'échantillons plus grand et des répétitions des expériences — en prenant soin d'homogénéiser la matière devant être analysée — et se déroulant sur une plus longue durée, devrait permettre d'obtenir des résultats plus significatifs.

4.2 ANALYSE RÉFLEXIVE

Si la technicité se situait à un autre niveau, notre réalisation antérieure d'un mémoire en physique théorique mathématique[→] a probablement eu un cours plus tranquille que ne l'a eu ce travail. D'une question de recherche prérédigée à la résolution d'équations non linéaires en géométrie différentielle, l'implication personnelle de l'étudiant et sa curiosité transdisciplinaire y ont été reléguées à un arrière-plan lointain. En réaction, notre volonté de réorientation en entreprenant ce Master en Agroécologie, couplée à un attrait pour le travail de terrain, nous a probablement conduit à une recherche trop ambitieuse.

Vandevoorde (2016).

La décision de faire des expériences en ferme, dans les conditions du terrain, et en collaboration avec différents acteurs, aussi enrichissante quelle soit, mène à

de nombreuses complications, impactant généralement la précision des données récoltées et, dès lors, la pertinence de la recherche dans son ensemble[→]. De plus, la position de l'étudiant mémorant face à des acteurs de terrain plus expérimentés, est peu aisée. Oscillant entre volonté de pouvoir prendre tout à fait les choses en main et envie de recherche co-pensée, notre responsabilité dans la situation est pleine et entière — sans être uniquement nôtre. Ainsi nous pouvons citer la décision de ne pas passer au composteur le fumier voué à la fermentation (cf. sous-section *Mesure du poids des tas*, page 34), menant à des prises d'échantillons peu représentatives de la matière hétérogène et à l'augmentation des incertitudes sur nos données. De même, la décision de ne pas faire de réplication des expériences en tas (ni à la Chèvrerie de la Croix de la Grise, ni dans une autre ferme), a à nouveau réduit la significativité statistique générale des résultats obtenus. Enfin, l'exemple de la mise en place des coffrages pour la mise en tas (cf. *Photos* en *Annexes*) réalisée par l'équipe d'Agra-Ost durant notre session d'examen, faite en des dimensions presque deux fois plus petites que ce qui avait été discuté quelques semaines plus tôt, illustre de l'ensemble de consentements qui ont été fait lors de la mise en pratique de notre recherche, dont le cadre et l'encadrement n'ont jamais été clairement mis sur papier. Comme nous le mentionnions dans l'*Introduction* (page 5), cette position d'étudiant mémorant est difficile à assumer et ne permet pas une réflexion poussée entre balance financière (à laquelle nous n'avons jamais eu accès) et qualité des résultats de la recherche.

Les mésaventures de débordement des jus (au niveau de la gouttière, mais aussi des bidons collecteurs) auraient probablement pu être évitées si nous avions été présent lors de la construction des coffrages et si, par la suite, nous étions venu plus régulièrement sur le terrain (ce qui aurait également permis de prendre des échantillons plus régulièrement). Cependant, chaque visite à la Chèvrerie de la Croix de la Grise nous a coûté plus de 30€ en fais de déplacement (généralement irréalisable en transport en commun aux heures prévues et avec le matériel à transporter). Sans financement, une visite hebdomadaire à la ferme nous était dès lors impossible. De plus — avant le confinement — nous avions encore des cours quatre jours par semaine, répartis entre Bruxelles en Gembloux, rendent

Van Dam et Visser (2019).

difficilement compatible heures de cours, travaux de groupes, visites de fermes pour dans le cadre des cours et visites de terrain pour notre mémoire (d'autant plus lorsqu'il fallait coordonner nos venues avec celles de l'équipe d'Agra-Ost).

À cheval entre une tentative de mode opératoire classique (avec la triplication de cinq déclinaisons de la fermentation en futs, mais ne menant finalement qu'à une prise d'échantillons restreintes) et une approche non-interventioniste d'étude de l'itinéraire technique développé par Vincent Delobel, notre recherche n'a pu finalement se concentrer ni sur l'un ni sur l'autre. En cherchant à répondre à de trop nombreuses questions, la simplification des protocoles pour pouvoir les inscrire dans notre quotidien et celui de nos partenaires a mené à une collection de données peu fiables et finalement peu porteuse d'enseignement. À partir du stade initial du questionnement de Vincent Delobel au commencement de notre travail, il aurait peut-être été plus intéressant de nous contenter d'un premier travail approfondi de la littérature plutôt que d'avoir voulu nous lancer directement sur le terrain. Cela est d'autant plus vrai pour une recherche dans le cadre d'un mémoire, dont le temps imparti est très court comparé à la lente succession des saisons qui rythme le temps agricole. Notre volonté d'aller sur le terrain est dès lors largement en cause ici.

Étonnamment pour nous, l'étude bibliographique s'est révélée plus ardue qu'imaginée. En particulier, la sémantique utilisée pour qualifier la lactofermentation du fumier est à la fois vaste et spécifique à chaque groupe de chercheur ou époque de recherche. Les mots-clés autour du bokashi et des microorganismes efficaces mènent rapidement à de grands débats sur leur réelle efficacité, mais peu sur des mises en pratique concrètes et indépendantes de l'industrie d'EM®. De son côté, le terme de lactofermentation est largement réservé à l'alimentation humaine et celui de fermentation anaérobiose à la production de biométhane. Ce n'est finalement que sous la dénomination de « fumier de différente densité » ou de « fumier couvert »[→] que nous avons découvert des protocoles expérimentaux similaires à celui que nous avions déjà mis en place. Ainsi notre prise de connaissance d'articles clés de la thématique concernée s'est révélée trop tardive que pour pouvoir mettre à profit les expériences détaillées dans la littérature (et

Voir les papiers de Chadwick (2005) et Webb et al. (2004).

ne pas répéter les erreurs ayant déjà été rapportées par d'autres). Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, les débordements d'écoulements auraient pu être évités si nous avions étudié l'évolution théorique de ces jus en amont.

Sur le plan administratif, l'étape étonnamment la plus hardue a été de trouver un laboratoire acceptant de bien vouloir analyser le lactosérum dilué pour ses taux de sucres. En effet, ces analyses sont généralement restreintes aux sections vouées à l'alimentation humaine des laboratoires, où nos échantillons souillés par les eaux du parcours et les écoulements de la compostière n'étaient pas les bienvenus. Ainsi nous n'avons pu connaître les spécificités de composition du lactosérum qu'au mois de juillet, six mois après la mise en route de nos expériences.

N'ayant jamais réalisé d'expérience de terrain en agronomie, n'ayant jamais pris ni calibré d'échantillons, nous avons pris sur le tas — et un peu tard — les erreurs à ne pas commettre. Le manque d'encadrement du côté des instances académiques comme du côté de nos partenaires de recherches, couplés à notre ignorance et notre manque de savoir pratique, ne nous ont pas permis de surmonter les difficultés de l'expérimentation en ferme.

Enfin, le confinement mis en place en réaction à la crise sanitaire du COVID-19 a porté un coup dur à notre recherche. Premièrement en déstabilisant notre mode de vie, nous avons pris du retard sur le planning de travail que nous nous étions fixé. Ensuite avec la fermeture d'une partie du laboratoire du Centre de Michamps, nous avons dû *de facto* reporter la remise de notre mémoire à la seconde session. Ces deux éléments nous ont largement impacté, mettant à mal notre et reportant notre mise au travail sérieux avec la fausse bonne excuse d'« attendre les résultats de Michamps ».

Dans tout cela, le confinement et la distanciation physique imposée par le COVID-19 nous aura peut-être aidé en un point, par allègement du travail en abandonnant l'approche sociologique que nous avions envisagée au début de la recherche. Aussi passionnante qu'elle soit, avec un peu de recul il est clair que nous n'aurions jamais eu l'occasion de mener à bien ce volet additionnel en parallèle de tout le reste (même sans confinement).

4.3 CONCLUSION DE LA LITTÉRATURE

Petersen, Blanchard *et al.*, 2013 résument clairement la littérature concernant l'ensilage de fumier sans apport de sucre :

- le compostage (avec retournement) réduit les émissions de CH_4 , mais augmente les émissions de CO_2 et de NH_3 par rapport à l'ensilage ;
- le fumier composté-fermenté (sans retournement ni bâchage) produit plus d' N_2O et de CH_4 que l'ensilage ;
- l'ensilage (tassé sans apport de sucre) diminue à la fois les émissions de CH_4 et de N_2O par rapport au fumier composté-fermenté et mène (en comptabilisant les émissions au champ après incorporation rapide) à des pertes moindre en NH_3 par rapport au compostage.

L'apport de sucre au fumier permet de mettre en place une réelle lactofermentation par domination de la microflore par les bactéries lactiques lorsque l'ensilage présente :

- un taux de matière sèche entre 20 et 30%MF ;
- un taux de sucre entre 5 et 10%MF ;
- une température entre 15 et 40°C ;
- un pH inférieur à 6 pour réduire la production de méthane ; inférieur à 5 pour inhiber complètement *Clostridia* et entérobactéries ;

le tout en anaérobiose.

La question de l'assainissement (destruction de graines d'adventices et inhibition de microorganismes pathogènes) — amorcée dans les années 1970 et 80 lors de recherche sur le potentiel fourrager des effluents d'élevage[→] — doit encore faire l'objet d'une recherche plus avancée.

La [figure 7](#) (page suivante) reprend une analyse SWOT basée sur notre dispositif expérimental et le potentiel de la lactofermentation décrit dans la littérature.

Voir par exemple les travaux de Fontenot (1979), Fontenot et Jurubescu (1980) ou encore Hrubant (1975) et les références qui y sont citées.

FORCES (Strengths)	FAIBLESSES (Weaknesses)
<p>Aspects positifs de l'état actuel :</p> <ul style="list-style-type: none"> — valorisation du lactosérum; — moins de jus dilué de la citerne à faire épandre; — évite de souiller de l'eau de pluie. 	<p>Aspects négatifs de l'état actuel :</p> <ul style="list-style-type: none"> — émission probable de CH_4 et de N_2O; — utilisation de bâche plastique; — doit être fait par lot; — (plus de matière à épandre).
OPPORTUNITÉS (Opportunities)	MENACES (Threats)
<p>Aspect positifs dans le cas d'une fermentation réussie :</p> <ul style="list-style-type: none"> — moins de pertes (<i>i.e.</i> plus grands apports de MS, MO, C, N...); — fumier fermenté "frais" à disposition à la demande (stocké de manière stable sous la bâche). 	<p>Aspects négatifs potentiels :</p> <ul style="list-style-type: none"> — besoin d'intrant sucré; — restriction quant à l'épandage (<i>cf.</i> PGDA en cours de révision, Charles (2020)); — applicabilité faible dans d'autres fermes (fumier suffisamment sec pour pouvoir l'humidifier avec du lactosérum produit sur place); — le potentiel d'assainissement microbiologique nécessite une recherche plus avancées.

FIGURE 7 – Analyse SWOT de la lactofermentation du fumier pailleux, en comparaison à un compostage statique.

4.4 OUVERTURE

4.4.1 AMÉLIORATIONS DES EXPÉRIENCES

Si nous devions refaire ce mémoire, avec nos connaissances théoriques et empiriques que nous possédons aujourd'hui, nous inclurions par exemple :

- plus de répétition au sein de la ferme et plus de prises d'échantillons;

- une mesure précise la quantité de lactosérum épandu et une estimation plus précise de la masse de fumier sec, afin de pouvoir calibrer les échantillons correspondants ;
- une homogénéisation de l'ensemble de la matière (également pour la fermentation), pour permettre une prise d'échantillons plus aisées et plus représentative ;
- un meilleur tasement de l'ensilage ;
- une mesure régulière du pH des tas et / ou de leurs écoulements, pour avoir une idée de l'évolution de la fermentation (première, seconde), du manque de sucre, d'une mauvaise étanchéité... ;
- une mesure régulière du volume des écoulements, accompagnées d'analyses de composition, afin de déterminer les pertes par lixiviation ;
- un essais en tas avec du lactosérum pur ;
- un essais de compost à l'abris de la pluie ;
- un essais de compostage avec retournements ;
- un test en fût avec ajout de sucre ;
- une mesure de la masse par balances fixes placées sous le coffrage, pour éviter les perturbations (oxygénéation) en cours de traitement et avoir des mesures plus régulières et plus précises.

4.4.2 UN PAS PLUS LOIN

Si nous avions accès à un réel financement et à des durées d'expérimentation plus longue, nous recommanderions :

- une chercher d'alternative durable au bâchage plastique ;
- une répétition intra- et inter-annuelle, pour étudier les variations saisonnières (température, pluviométrie...);
- une répétition dans différentes fermes, avec différents types de fumier ;
- une étude plus poussée de l'empreinte écologique (cycle de vie de la bâche, combustion de carburant durant la manipulation, épandage du lactosérum s'il n'est pas valorisé, minéralisation au champ...).

4.4.3 MANQUEMENTS PLUS LARGES

Dans le cadre d'une recherche plus large, il serait intéressant d'apporter des éléments de réponse plus poussés concernant :

- une mesure des gaz produits, afin de déterminer les pertes par volatilisation et l'impact en terme de gaz à effet de serre ;
- des analyses microbiologiques et biochimiques (quantité initiale et évolution des sucres et des acides, analyse des populations microbiennes et de leur évolution) ;
- une étude du potentiel d'assainissement de la lactofermentation ;
- une étude des impacts au champs : émissions, vie du sol, minéralisation / faim d'azote, impact sur les cultures, épandage / enfouissement, compostage rapide après fermentation...

4.4.4 RECOMMANDATIONS

Suite au conclusions de ce travail, nous proposons les recommandations suivantes à Vincent Delobel.

- Nous recommandons l'utilisation de lactosérum pur, pour apporter une plus grande quantité de lactose. Si l'acidification n'est toujours pas suffisante avec du lactosérum pur, nous recommandons l'ajout de substrat sucré ou le passage au compostage avec aération, afin d'éviter la production de méthane. Cependant, si la seule autre alternative est le fumier composté-fermenté, la fermentation (même peu aboutie) devrait permettre de réduire les pertes globales, notamment en carbone et azote organique ;
- Nous recommandons l'humidification du fumier dans la chèvrerie suffisamment longtemps avant la mise en tas pour que le fumier ai pu absorber le lactosérum ;
- Nous recommandons un passage au composteur pour homogénéiser la matière et faciliter une fermentation uniforme, même si cela nécessite une opération de tassage du tas ;

- Nous recommandons de porter une attention particulière à la pose de la bâche (qui peut être éventuellement retendue après quelques jours) et à ne pas perturber le fumier jusqu'au moment de l'ouverture du silo — où l'entièreté de la matière doit être rapidement utilisée ;
- Nous recommandons un suivi régulier du pH de la matière (par sonde ou par analyse des écoulements) pour faire le suivi de la fermentation ;
- Si des risques sanitaires (graines d'adventices et pathogènes microbiens) étaient à craindre, nous conseillons un compostage thermophile rapide de la matière fermentée avant épandage (maximum deux semaines, avec retournement à mi-parcours) ;
- Dans tous les cas de figures, nous recommandons une protection contre les intempéries du fumier, qui soit composté, composté-fermenté ou fermenté

4.5 CONCLUSION GÉNÉRALE

Bien que nos données expérimentales soient principalement inconclusives, l'étude de la littérature nous permet, à l'issue de ce mémoire, de répondre à la question « la fermentation anaérobique du fumier est-elle une pratique agroécologique intéressante pour la gestion paysanne de la fertilité ? ». Elle l'est (en minimisant les pertes en carbone et en azote) dès lors que la lactofémentation est assurée de manière optimale (notamment par l'apport d'un substrat sucré). Lorsque la fermentation ne permet pas une baisse suffisante du pH, un compostage avec retournement émettra moins de méthane. Comparé à un fumier simplement entassé sans retournement, l'ensilage semble bénéfique dans tous les cas.

Si cette recherche de terrain, avec, pour et à l'initiative de paysans nous donne a apporté un sentiment gratifiant durant le travail de recherche, ce type de configuration (partenariat multiple) dans le cadre d'un mémoire (*i.e.* recherche de très courte durée et sans financement) mène régulièrement étudiants mémorants et promoteurs dans des situations inconfortables. Les décisions prises sur le terrain,

relevant du consentement plutôt que du consensus, finissent par compromis à produire un résultat de valeur inférieur pour l'ensemble des parties prenantes. La situation est connue de la recherche collective / participative / paysanne[→] et nous n'y avons pas fait exception. En ce sens, ce mémoire a été pour nous un autre grand enseignement de terrain.

*Voir par exemple
Baltazar et al.
(2019), Louah et al.
(2015) et Van Dam
et Visser (2019).*

BIBLIOGRAPHIE

5

AFNOR, déc. 2009. *Norme française XP U44-163. Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote*. AFNOR, Paris, France. [URL : <https://www.boutique.afnor.org/norme/xp-u44-163/amendements-organiques-et-supports-de-culture-caracterisation-de-la-matiere-organique-par-la-mineralisation-potentielle-du-carbo/article/624087/fa165406>].

Ambye-Jensen, M., K. S. Johansen, T. Didion, Z. Kádár, J. E. Schmidt et A. S. Meyer, nov. 2013. Ensiling as biological pretreatment of grass (*Festulolium Hykor*) : The effect of composition, dry matter, and inocula on cellulose convertibility. *Biomass & Bioenergy* 58, 303-312. [DOI : [10.1016/j.biombioe.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.015)].

Amon, B., T. Amon, J. Boxberger et C. Alt, juil. 2001. Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60 (1/3), 103-113. [DOI : [10.1023/a:1012649028772](https://doi.org/10.1023/a:1012649028772)].

Baltazar, S., R. Boutsen, L. Delanote, V. Delobel, K. Dewaele, W. Stoop et M. Visser, oct. 2019. Questioning Seeding Rates and its Influence on Phenotypic Expression of Wheat Populations for Participatory Plant Breeding—First Findings from Field Research across Organic Farms in Belgium and the Netherlands. *Organic Farming* 5 (1), 37-51. [DOI : [10.12924/of2019.05010037](https://doi.org/10.12924/of2019.05010037)].

Baron, S., éd., 1996. *Medical microbiology*. University of Texas, Galveston, États-Unis. [ISBN : 0963117211].

Berg, W., et I. Pazsiczki, juil. 2006. Mitigation of methane emissions during manure storage. *International Congress Series* 1293, 213-216. [DOI : [10.1016/j.ics.2006.02.050](https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.02.050)].

Bonin, A. S., et D. R. Boone, 2006. The Order Methanobacteriales. In *The Prokaryotes, A Handbook on the Biology of Bacteria. Volume 3 : Archaea; Bacteria : Firmicutes, Actinomycetes*. Sous la dir. de M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.-H. Schleifer et E. Stackebrandt. 3^e éd. Springer, New York, États-Unis, 231-243. [DOI : [10.1007/0-387-30743-5_11](https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_11)].

Bosch, M., A. Hitman et J. F. Hoekstra, 2016. Fermentation (Bokashi) versus Composting of Organic Waste Materials : Consequences for Nutrient Losses and CO₂-footprint. *Non plublié*. [URL : https://www.bokashi.nl/wp-content/uploads/2018/05/Bosch_short_paper_for_UV2016-0827.pdf].

Cavicchioli, R., éd., 2007. *Archaea. Molecular and cellular biology*. American Society for Microbiology, Washington, États-Unis. [ISBN : 9781555813918].

- Chadwick, D., fév. 2005. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps : effect of compaction and covering. *Atmospheric Environment* 39 (4), 787-799. [DOI : [10.1016/j.atmosenv.2004.10.012](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.012)].
- Chambre Régionale d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, jan. 2011. Les critères analytiques des produits organiques. In *Guide des produits organiques utilisables en Languedoc-Roussillon - Tome 1 [Chapitre 5]*. Sous la dir. de G. Giva. Agricultures et Territoires, Chambre d'Agriculture Occitanie, Auzeville-Tolosane, France. [URL : https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/GuidePO_Tome1_chapitre_5.pdf].
- Charles, M., 2020. *Détermination des cinétiques de minéralisation d'engrais organiques*. Mémoire de fin d'étude en Sciences agronomiques, Université Catholique de Louvain, Belgique.
- Chromec, F. W., et F. Magdoff, août 1984. Alternative methods for using organic materials composting vs. adding directly to soil. *Journal of Environmental Science & Health. Part A : Environmental Science & Engineering* 19 (6), 697-711. [DOI : [10.1080/10934528409375188](https://doi.org/10.1080/10934528409375188)].
- De Angelis, M., et M. Gobbetti, 2016. *Lactobacillus spp. : General Characteristics*. In *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Sous la dir. de J. W. Fuquay. 2^e éd. Elsevier, Londres, Royaume-Uni, 78-90. [DOI : [10.1016/b978-0-08-100596-5.00851-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.00851-9)].
- Delobel, V., 2019. Chaîne humaine pour le Climat, Bruxelles, Belgique. [URL : <https://www.facebook.com/vincdelobel/posts/10157474992774279>].
- Dewar, W. A., P. McDonald et R. Whittenbury, juin 1963. The hydrolysis of grass hemicelluloses during ensilage. *Journal of the Science of Food & Agriculture* 14 (6), 411-417. [DOI : [10.1002/jsfa.2740140610](https://doi.org/10.1002/jsfa.2740140610)].
- Dewes, T., jan. 1995. Nitrogen Losses from Manure Heaps. *Biological Agriculture & Horticulture* 11 (1-4), 309-317. [DOI : [10.1080/01448765.1995.9754715](https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754715)].
- Dewes, T., et E. Ahrens, jan. 1989. Einfluß der Berechnungsbasis auf die Interpretation von Daten zum C_{org}- und N_t-Umsatz bei Rotteprozessen unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Zuschlagstoffen. *Zeitschrift für Pflanzernährung & Bodenkunde* 152 (1), 1-6. [DOI : [10.1002/jpln.19891520101](https://doi.org/10.1002/jpln.19891520101)].
- Eghball, B., J. F. Power, J. E. Gilley et J. W. Doran, jan. 1997. Nutrient, Carbon, and Mass Loss during Composting of Beef Cattle Feedlot Manure. *Journal of Environmental Quality* 26 (1), 189-193. [DOI : [10.2134/jeq1997.00472425002600010027x](https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600010027x)].
- Ferry, J. G., et K. A. Kastread, 2007. Methanogenesis. In *Archaea. Molecular and cellular biology [Chapitre 13]*. American Society for Microbiology, Washington, États-Unis, 288-314. [ISBN : 9781555813918].
- Fontenot, J. P., jan. 1979. Alternatives in Animal Waste Utilization – Introductory Comments. *Journal of Animal Science* 48 (1), 111-112. [DOI : [10.2527/jas1979.481111x](https://doi.org/10.2527/jas1979.481111x)].
- Fontenot, J. P., et V. Jurubescu, sept. 1980. Processing of animal waste by feeding to ruminants. In *Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants*. Sous la dir. d'Y. Ruckebusch et P. Thivend. Springer, Dordrecht, Pays-Bas, 641-662. [DOI : [10.1007/978-94-011-8067-2_31](https://doi.org/10.1007/978-94-011-8067-2_31)].

- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz et R. Van Dorland, 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et H. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, Royaumes Unis, 129-234. [URL : <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>].
- Herody, Y., 2015. *Les Matières Organiques des sols cultivés*. Conférence à la Greenotec, Glin, Belgique. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : <http://www.greenotec.be/pages/vulgarisation/pages-activites-passees/activites-passees/ag-2015-03-10-herody-y-1.html>].
- Higa, T., 1997. *US. Patent US5591634 : Microbiological method for disposing of organic waste materials*. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : https://patentscope.wipo.int/beta/fr/detail.jsf?docId=US38656763%5C&%5C_cid=B26-K4CKDX-04679-2].
- Hitman, A., K. Bos, M. Bosch et A. Van der Kolk, 2013. Fermentation versus composting. *Non publié*. [URL : https://provinos.nl/images/Fermentation_versus_composting.pdf].
- Hrubant, G. R., juil. 1975. Changes in Microbial Population During Fermentation of Feedlot Waste with Corn. *Applied & Environmental Microbiology* 30 (1), 113-119. [URL : <https://aem.asm.org/content/30/1/113>].
- Hugo, V., 1862. *Les Misérables*. A. Lacroix, Verboeckhoven & Cie, Bruxelles, Belgique.
- Iñiguez-Covarrubias, G., M. de la Torre-Martinez, J. Cuarón-Ibargüengoitia, P. Pérez-Gavilán et I. Magaña-Plaza, jan. 1990. Fermentation characteristics of swine waste ensiled with wheat straw and cane molasses. *Biological Wastes* 34 (3), 227-239. [DOI : [10.1016/0269-7483\(90\)90024-m](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90024-m)].
- Institut Scientifique de Service Public (ISSeP), 2014. *Table des matières : Analyses des sols (y compris les sédiments), des matières utilisées sur ou dans les sols et des déchets (S)*. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : <https://www.issep.be/cwea-table-des-matieres-2/>].
- Ioannidis, J. P. A., août 2005. Why Most Published Research Findings Are False. *PLoS Medicine* 2 (8), e124. [DOI : [10.1371/journal.pmed.0020124](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124)].
- Kletzin, A., 2007. General characteristics and important model organisms. In *Archaea. Molecular and cellular biology [Chapitre 2]*. American Society for Microbiology, Washington, États-Unis, 14-92. [ISBN : 9781555813918].
- Lambert, R., et T. Cugnon, jan. 2015. *Comment faire un bon échantillon ?* Centre de Michamps. [URL : http://www.agreau.be/uploads/documents/36//analyse_engrais_ferme_comment_realiser_un_bon_echantillon_v4.pdf].
- Lashermes, G., B. Nicolardot, V. Parnaudeau, L. Thuriès, R. Chaussod, M. L. Guillotin, M. Linères, B. Mary, L. Metzger, T. Morvan, A. Tricaud, C. Villette et S. Houot, mar. 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science* 60 (2), 297-310. [DOI : [10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x)].

- Louah, L., M. Visser, S. Baltazar et V. Delobel, août 2015. Changements de postures du chercheur, de l'agriculteur et de l'enseignant pour l'innovation agroécologique paysanne. *Pour* 226 (2), 5-10. [DOI : [10.3917/pour.226.0005](https://doi.org/10.3917/pour.226.0005)].
- Mazoyer, M., et L. Roudart, 2002. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Le Seuil, Paris, France. [ISBN : 9782020530613].
- McDonald, P., 1981. *The Biochemistry of Silage*. John Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni. [ISBN : 0047127965x].
- mai 1982. Silage fermentation. *Trends in Biochemical Sciences* 7 (5), 164-166. [DOI : [10.1016/0968-0004\(82\)90127-x](https://doi.org/10.1016/0968-0004(82)90127-x)].
- McDonald, P., A. R. Henderson et S. J. E. Heron, 1991. *The Biochemistry of Silage*. 2^e éd. Chalcombe Publications, Marlow, Royaume-Uni. [ISBN : 0948617225].
- McGechan, M., jan. 1990. A review of losses arising during conservation of grass forage : Part 2, storage losses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 45, 1-30. [DOI : [10.1016/s0021-8634\(05\)80135-0](https://doi.org/10.1016/s0021-8634(05)80135-0)].
- Neal, H. D. S. C., et J. H. M. Thorneley, juin 1983. A model of the anaerobic phase of ensiling. *Grass & Forage Science* 38 (2), 121-134. [DOI : [10.1111/j.1365-2494.1983.tb01630.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1983.tb01630.x)].
- Nishibuchi, Y., Y. Sano, J. Matsumoto, K. Nagamine et S. Pongdit, 2011. *Kyusei Nature Farming and EM technology guidelines for practical use*. Sous la dir. de R. Sangakkara. International Nature Farming Research Center, Atami, Japon. [URL : <http://apnan.org/APNAN%20manual%20table%20of%20contents.pdf>].
- Nishio, M., oct. 1996. *Microbial fertilizers in Japan*. Food & Fertilizer Technology Center Japan, Taipei City, Taiwan. [URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/5ee3/eec8617b22e2a77597c6f6a97ce8e44d79b6.pdf>].
- Pahlöw, G., R. E. Muck, F. Driehuis, S. J. W. H. O. Elferink et S. F. Spoelstra, jan. 2003. Microbiology of Ensiling. In *Silage Science and Technology [Chapter 2]*. Sous la dir. de D. R. Buxton, R. E. Muck et J. H. Harrison. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, États-Unis, 31-93. [DOI : [10.2134/agronmonogr42.c2](https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c2)].
- Pavarotti, V., éd., avr. 2018. *Les principes de l'agroécologie ; Vers des systèmes alimentaires socialement équitables, résilients et durables*. Coopération Internationale pour le Développement et la Solidarité. CIDSE, Bruxelles, Belgique. [URL : https://www.cidse.org/wp-content/uploads/2018/04/FR_Les_Principles_de_lAgroecologie_CIDSE_2018.pdf].
- Petersen, S. O., M. Blanchard, D. Chadwick, A. D. Prado, N. Edouard, J. Mosquera et S. G. Sommer, juin 2013. Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal* 7 (s2), 266-282. [DOI : [10.1017/s1751731113000736](https://doi.org/10.1017/s1751731113000736)].
- Petersen, S. O., A.-M. Lind et S. G. Sommer, fév. 1998. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *The Journal of Agricultural Science* 130 (1), 69-79. [DOI : [10.1017/s002185969700508x](https://doi.org/10.1017/s002185969700508x)].
- Pratchett, T., I. Stewart et J. Cohen, 1999. *The Science of Discworld*. Ebury Press, Croydon, Royaume-Uni. [ISBN : 9780091886578].
- Requasud, 2020. *Base de données*. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : <http://www.requasud.be/base-de-donnees/>].

- Rollé, G., B. Oršanić, W. Obrist et B. Aerne, 1970. *Methoden zur Untersuchung von Abfallstoffen*. 2^e éd. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) Abteilung Müllforschung, Dübendorf, Allemagne. [URL : https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A10843/dastream/PDF/Roll%C3%A9-1970-Methoden_zur_Untersuchung_von_Abfallstoffen-%28published_version%29.pdf].
- Rooke, J. A., et R. D. Hatfield, jan. 2003. Biochemistry of Ensiling. In *Silage Science and Technology [Chapter 3]*. Sous la dir. de D. R. Buxton, R. E. Muck et J. H. Harrison. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, États-Unis, 95-139. [DOI : [10.2134/agronmonogr42.c3](https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c3)].
- Savoie, P., et J. C. Jofriet, jan. 2003. Silage Storage. In *Silage Science and Technology [Chapter 9]*. Sous la dir. de D. R. Buxton, R. E. Muck et J. H. Harrison. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, États-Unis, 405-467. [DOI : [10.2134/agronmonogr42.c9](https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c9)].
- Seiter, S., et W. R. Horwath, 2004. Strategies for Managing Soil Organic Matter to Supply Plant Nutrients. In *Soil organic matter in sustainable agriculture [Chapter 9]*. Sous la dir. de R. Weil et F. Magdoff. CRC Press, Boca Raton, États-Unis, 269-293. [ISBN : [0849312949](https://doi.org/10.1201/9781420051294)].
- Service publique de Wallonie, juin 2014. Arrêté du Gouvernement wallon 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. *Moniteur belge*. [URL : <https://protecteau.be/resources/shared/publications/legislatif/PGDAIII.pdf>].
- Shah, G. M., J. C. J. Groot, O. Oenema et E. A. Lantinga, nov. 2012. Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 94 (2-3), 299-312. [DOI : [10.1007/s10705-012-9543-8](https://doi.org/10.1007/s10705-012-9543-8)].
- Shah, G. M., G. A. Shah, J. C. J. Groot, O. Oenema, A. S. Raza et E. A. Lantinga, jan. 2015. Effect of storage conditions on losses and crop utilization of nitrogen from solid cattle manure. *The Journal of Agricultural Science* 154 (1), 58-71. [DOI : [10.1017/s0021859614001348](https://doi.org/10.1017/s0021859614001348)].
- Shahardeen, R., et T. Seran, juin 2013. Impact of animal manure EM-bokashi on seed yield and quality of vegetable cowpea (*Vigna unguiculata L.*). *Bangladesh Journal of Scientific & Industrial Research* 48 (1), 33-38. [DOI : [10.3329/bjsir.v48i1.15411](https://doi.org/10.3329/bjsir.v48i1.15411)].
- Stassart, P. M., P. Baret, J.-C. Grégoire, T. Hance, M. Mormont, D. Reheul, D. Stilmant, G. Vanloqueren et M. Visscher, 2012. L'agroécologie : trajectoire et potentiel pour une transition vers des systèmes alimentaires durables. In *Agroécologie, entre pratiques et sciences sociales*. Sous la dir. de D. Van Dam. Educagri Editions, Dijon, France, 25-51. [URL : <http://hdl.handle.net/2268/130063>].
- Teixeira Franco, R., 2017. Optimisation des pratiques de gestion des déchets agricoles en lien avec leur valorisation par méthanisation. Thèse de doct. en Sciences agricoles, Université de Lyon, France. [URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01692751v2/document>].

- Teixeira Franco, R., P. Buffière et R. Bayard, juin 2016. Optimizing agricultural wastes storage before anaerobic digestion : impact of ensiling on methane potential of lignocellulosic biomass. In *4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. Limassol, Chypre. [URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01692814>].
- mar. 2018a. Effects of Storage Conditions, Total Solids Content and Silage Additives on Fermentation Profiles and Methane Preservation of Cattle Manure Before Anaerobic Digestion. *Waste & Biomass Valorization* 9 (12), 2307-2317. [DOI : [10.1007/s12649-018-0255-4](https://doi.org/10.1007/s12649-018-0255-4)].
 - juin 2018b. Co-ensiling of cattle manure before biogas production : Effects of fermentation stimulants and inhibitors on biomass and methane preservation. *Renewable Energy* 121, 315-323. [DOI : [10.1016/j.renene.2018.01.035](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.035)].
- Teixeira Franco, R., H. Coarita, R. Bayard et P. Buffière, juin 2019. An improved procedure to assess the organic biodegradability and the biomethane potential of organic wastes for anaerobic digestion. *Waste Management & Research* 37 (7), 746-754. [DOI : [10.1177/0734242x19851201](https://doi.org/10.1177/0734242x19851201)].
- Termorshuizen, A., S. Moolenaar, A. Veeken et W. Blok, déc. 2004. The value of compost. *Reviews in Environmental Science & Bio/Technology* 3 (4), 343-347. [DOI : [10.1007/s11157-004-2333-2](https://doi.org/10.1007/s11157-004-2333-2)].
- Van Dam, D., et M. Visser, mai 2019. Recherche et collectifs agro-alimentaires : vulnérabilité et tensions. *Pour* 234-235 (2), 163-170. [DOI : [10.3917/pour.234.0163](https://doi.org/10.3917/pour.234.0163)].
- van der Ploeg, J. D., 2014. *Les paysans du XXIe siècle. Mouvement de repaysanisation dans l'Europe d'aujourd'hui*. Charles Léopold Mayer, Paris, France. [ISBN : 9782843771835].
- Vandevorde, N., mai 2016. *Trous-moirs en rotation dans un champ magnétique*. Mémoire de fin d'étude en Physique théorique mathématique, Université Libre de Bruxelles, Belgique.
- Virtanen, A. I., 1947. Silage by the AIV method. *Economic Proc. of the Royal Dublin Society* 3, 311-343.
- Wakui, Y., 2009. *Organic farming technology in Japan*.
- Webb, J., D. Chadwick et S. Ellis, sept. 2004. Emissions of ammonia and nitrous oxide following incorporation into the soil of farmyard manures stored at different densities. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70 (1), 67-76. [DOI : [10.1023/b:fres.0000045985.32440.27](https://doi.org/10.1023/b:fres.0000045985.32440.27)].
- Weil, R., et F. Magdoff, 2004. Soil Organic Matter Management Strategies. In *Soil organic matter in sustainable agriculture [Chapter 2]*. Sous la dir. de R. Weil et F. Magdoff. CRC Press, Boca Raton, États-Unis, 45-65. [ISBN : 0849312949].
- Weil, R., et N. Brady, 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15^e éd. Pearson, Harlow, Royaume-Uni. [ISBN : 9781292162232].
- Wikipedia contributors, juin 2020a. *Kolmogorov-Smirnov test*, Wikipedia, The Free Encyclopedia. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolmogorov%20%93Smirnov_test&oldid=964433785].

- Wikipedia contributors, 2020b. *Loi d'Irwin-Hall*, Wikipédia, l'encyclopédie libre. En ligne, consulté le 16 aout 2020. [URL : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_d%27Irwin-Hall&oldid=168445380].
- Woolford, M. K., fév. 1990. The detrimental effects of air on silage. *Journal of Applied Bacteriology* 68 (2), 101-116. [DOI : [10.1111/j.1365-2672.1990.tb02554.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1990.tb02554.x)].
- Woolford, M. K., et G. Pahlow, 1998. The silage fermentation. In *Microbiology of Fermented Foods*. Sous la dir. de B. J. B. Wood. Springer, Boston, États-Unis, 73-102. [DOI : [10.1007/978-1-4613-0309-1_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0309-1_3)].

ANNEXES

6

« Les universités sont de véritables entrepôts de connaissances : les étudiants arrivent de l'école convaincus de presque tout savoir, et ils repartent cinq ans plus tard avec la certitude de ne rien savoir ou presque. Où sont passées les connaissances entre-temps ?

À l'université, bien sûr, où il est séché et stocké. »^a *Pratchett et al., 1999*

6.1	DONNÉES BRUTES	viii
6.2	ERREURS DE MESURE ET INCERTITUDES	xxiii
6.2.1	<i>Propagation des incertitudes</i>	xxiii
6.2.2	<i>Calcul des masses de fumier sec, de lactosérum dilué épandu et de lactose apporté</i>	xxiii
6.3	SIGNIFICATIVITÉ STATISTIQUE	xxv
6.3.1	<i>Cas de la masse après 47 jours</i>	xxv
6.3.1.1	<i>Code R</i>	xxvii
6.3.2	<i>Tests de Student sur base d'écart types propagés</i>	xxix
6.3.2.1	<i>Code R</i>	xxix
6.4	PHOTOS	xxx
	DÉCLARATION SUR L'HONNEUR CONTRE LE PLAGIAT	xxxii

6.1 DONNÉES BRUTES

La **table 10** (page x et page xi) reprend les mesures de température et la pluviométrie de la station d'Esplechin illustrées à la **figure 1** (page 47).

La **table 11** (page xii) détaille les mesures brutes de poids des tas de compostage et de fermentation aux jours 0 et 47 — sur lesquels se basent les calculs des sections 6.2.2 et 6.2.3 ci après —, servant de base aux données reprises à la **table 4** (page 49).

Les **table 12** (page xiii), **table 13** (page xiv) et **table 14** (page xv) reprennent les données brutes d'analyses effectuées au laboratoire du Centre de Michamps.

a. Citation originale : « Universities are truly storehouses for knowledge : students arrive from school confident they know nearly everything, and they leave five years later certain that they know practically nothing. Where did the knowledge go in the meantime ? In the university, of course, where it is dried and stored. »

La **table 18** (page xix à page xxi) reprend les données brutes de titre pour la détermination des coefficients de minéralisation du carbone et de l'azote sur base de la norme **XP U44-163**⁷.

AFNOR (2009).

La **table 16** (page xvii) reprend les données d'analyses du lactosérum pur et dilué effectuées au Centre pour l'Agronomie et l'Agro-industrie de la Province du Hainaut (CARAH).

La **table 17** (page xviii) reprend les valeurs moyennes des compositions de fumier bovin mou, sec et composté analysés au sein des laboratoires du réseau Requasud, 2020.

La **table 19** (page xxii) reprend les erreurs de mesures associées aux différentes analyses du Centre de Michamps et du CARAH qui nous ont été communiquées.

jour	TEMPÉRATURE (°C)			PLUVIOMÉTRIE (mm/m ²)	
	compostage	fermentation	extérieure	journalière	cumulée
0	16,6	16,6	8,9	0,9	0,9
1	43,8 ± 8,2	17,4 ± 0,8	6,1	0,3	1,2
2	69,9 ± 1,8	18,8 ± 2,6	8,5	0,6	1,8
3	64,7 ± 2,9	24,1 ± 6,3	3,7	0,0	
4	.	23,6 ± 5,8	3,2	0,2	2,0
5	59,2 ± 5,2	25,2 ± 0,4	1,9	0,3	2,3
6	59,3 ± 2,1	26,5 ± 0,7	-0,3	0,1	2,4
7	58,2 ± 3,7	28,9 ± 1,8	0,2	0,1	2,5
8	53,2 ± 1,0	29,5 ± 1,4	2,8	0,0	
9	55,2 ± 1,9	29,4 ± 1,6	0,9	0,0	
10	57,5 ± 2,7	29,0 ± 1,8	1,0	0,0	
11	58,8 ± 2,4	29,2 ± 3,7	4,9	0,0	
12	61,7 ± 0,3	28,0 ± 2,8	7,8	4,4	6,9
13	57,8 ± 0,5	29,0 ± 1,7	5,1	6,0	12,9
14	56,9 ± 4,3	29,8 ± 1,8	4,1	0,1	13,0
15	61,3 ± 1,3	30,2 ± 1,4	6,3	1,3	14,3
16	61,7 ± 1,4	30,4 ± 1,8	10,8	0,0	
17	61,5 ± 1,7	31,5 ± 0,6	10,5	8,8	23,1
18	59,8 ± 5,4	31,7 ± 0,5	9,5	7,6	30,7
19	57,3 ± 5,0	27,7 ± 0,8	9,7	9,9	40,6
20	57,7 ± 3,7	31,2 ± 1,0	5,5	2,2	42,8
21	54,2 ± 1,9	33,0 ± 1,8	6,0	3,5	46,3
22	50,7 ± 1,5	31,7 ± 1,2	4,2	0,0	
23	49,4 ± 3,3	29,0 ± 1,9	3,6	0,0	
24	50,9 ± 1,5	29,0 ± 0,5	7,3	5,6	51,9
25	.	.	8,9	18,5	70,4
26	51,6 ± 0,9	.	8,2	11,3	81,7
27	54,5 ± 4,1	32,4 ± 3,1	5,8	0,3	82,0
28	54,5 ± 4,1	31,4 ± 3,0	4,7	0,0	
29	46,3 ± 6,1	30,6 ± 1,9	6,0	9,0	91,0
30	44,8 ± 1,5	30,3 ± 1,5	7,3	0,1	91,1
31	44,3 ± 1,5	31,3 ± 1,3	9,0	0,1	91,2

TABLE 10 – Triplicat de prise de température au sein des tas de compostage et de fermentation (sauf aux jours 0 et 48, où $n = 1$) ; température extérieure et pluviométrie journalière provenant de la station météorologique d’Esplechin (source : CRA-W/Pameseb) ; ensemble de données utilisées à la [figure 1](#). Suite de la table à la page xi.

jour	TEMPÉRATURE (°C)			PLUVIOMÉTRIE (mm/m ²)	
	compostage	fermentation	extérieure	journalière	cumulée
32	.	.	12,1	23,9	115,1
33	43,2 ± 2,8	33,5 ± 1,6	7,7	4,4	119,5
34	47,1 ± 2,2	32,6 ± 2,2	6,4	0,2	119,7
35	48,4 ± 5,8	31,2 ± 1,8	5,8	5,0	124,7
36	50,0 ± 4,1	30,6 ± 1,2	8,0	4,1	128,8
37	51,2 ± 2,8	30,4 ± 1,9	5,3	0,0	
38	48,5 ± 5,9	29,9 ± 3,0	7,3	0,5	129,3
39	.	.	10,4	7,9	137,2
40	46,6 ± 3,4	31,0 ± 4,0	8,3	1,5	138,7
41	44,8 ± 1,6	30,1 ± 2,6	7,2	4,2	142,9
42	43,0 ± 3,4	28,9 ± 1,6	4,0	0,0	
43	42,2 ± 2,0	27,0 ± 1,1	1,9	10,3	153,2
44	39,6 ± 1,6	27,0 ± 1,9	3,3	6,9	160,1
45	.	.	8,5	1,6	161,7
46	.	.	6,5	0,1	161,8
47	.	.	5,8	5,7	167,5
48	35,0	54,9	3,5	1,8	169,3

TABLE 10 – *Tripletat de prise de température au sein des tas de compostage et de fermentation (sauf aux jours 0 et 48, où n = 1); température extérieure et pluviométrie journalière provenant de la station météorologique d’Esplechin (source : CRA-W/Pameseb); ensemble de données utilisées à la [figure 1](#). continuation de la table de la page [x](#).*

<i>pelletée</i>	<i>avant (kg)</i>	<i>arrière (kg)</i>	<i>tare (kg)</i>	<i>total (kg)</i>
COMPOSTAGE (jour 0)				
1	2100	1000	2660	440
2	2000	1080	2660	420
3	1500	1360	2660	200
4	2180	1040	2660	560
5	1640	1300	2660	280
<i>masse totale du tas (kg)</i>				1900
FERMENTATION (jour 0)				
1	2600	800	2660	740
2	3300	350	2660	990
3	2000	1140	2660	480
4	3020	440	2660	800
<i>masse totale du tas (kg)</i>				3010
COMPOSTAGE (jour 47)				
1	1860	1160	2660	360
2	1640	1320	2660	300
3	1560	1300	2660	200
4	1800	1220	2660	360
5	1840	1160	2660	340
<i>masse totale du tas (kg)</i>				1560
FERMENTATION (jour 47)				
1	2280	920	2660	540
2	2080	1040	2660	460
3	2140	1000	2660	480
4	2100	1000	2660	440
5	1880	1120	2660	340
6	1560	1240	2660	140
7	1460	1420	2660	220
<i>masse totale du tas (kg)</i>				2620

TABLE 11 – Mesures brutes des poids des tas de compostage et fermentation aux jours 0 et 47 (les incertitudes sont calculés à la section 6.2.2 ci après); ensemble de données utilisées à la section 6.2.2 ci dessous et à la 4.

	FUMIER SEC	FERMENTATION
C/N	16,22	12,98
MS (%MF)	40,794	25,927
MO (%MF)	25,07	18,89
cendres tot. (%MF)	15,84	7,06
cendres ins. (%MF)	9,33	2,05
MO (%MS)	61,46	72,84
cendres tot. (%MS)	38,83	27,21
cendres ins. (%MS)	22,86	7,9
N total (kg/t _{MF})	8,59	8,08
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	1,82	2,03
N – NH ₃ (%N tot.)	21,1	25,2
K ₂ O (kg/t _{MF})	24,05	22,80
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	5,00	5,06
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,51	0,94
MgO (kg/t _{MF})	2,51	2,00
cao (kg/t _{MF})	10,77	5,99
Référence Michamps	1904846	1904847

TABLE 12 – Données brutes d'analyses des échantillons prélevés le 2 décembre 2019 de fumier provenant directement de la chèvrerie et de fumier fermenté ayant été ensilé au mois de juillet 2019 et conservé sous bâche 140 jours.

	FUMIER SEC			FUMIER HUMIDIFIÉ			LACTOSÉRUM		
	# 1	# 2	# 3	moyenne	# 1	# 2	# 3	# 4	moyenne
pH	9,40	9,40	9,38	9,39 ± 0,01	9,28	9,29	9,31	9,29	9,29 ± 0,01
C/N	15,61	15,65	15,07	15,44 ± 0,32	16,08	—	16,45	16,18	16,24 ± 0,19
MS (%MF)	29,023	30,361	29,320	29,57 ± 0,70	25,447	26,037	27,122	26,446	26,26 ± 0,70
MO (%MS)	23,26	24,65	23,50	23,80 ± 0,74	20,79	21,41	22,25	21,51	21,49 ± 0,60
cendres tot. (%MF)	6,21	6,17	6,43	6,27 ± 0,14	5,26	5,10	5,22	5,37	5,24 ± 0,11
cendres ins. (%MF)	1,91	1,84	1,84	1,86 ± 0,04	1,32	1,45	1,52	1,43	1,43 ± 0,08
MO (%MS)	80,13	81,19	80,14	80,49 ± 0,61	81,69	82,24	82,03	81,35	81,83 ± 0,39
cendres tot. (%MS)	21,40	20,31	21,94	21,22 ± 0,83	20,66	19,59	19,23	20,31	19,95 ± 0,65
cendres ins. (%MS)	6,58	6,07	6,27	6,31 ± 0,26	5,19	5,57	5,61	5,39	5,44 ± 0,19
N total (kg/t _{MF})	8,27	8,75	8,66	8,56 ± 0,26	7,18	—	7,51	7,39	7,36 ± 0,17
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,08	0,10	0,09	0,09 ± 0,01	1,85	1,48	1,18	2,07	1,65 ± 0,39
N – NH ₃ (%N tot.)	0,97	1,14	1,04	1,05 ± 0,12	25,8	—	15,7	28,0	22,4 ± 6,5
K ₂ O (kg/t _{MF})	18,54	19,24	19,87	19,22 ± 0,67	17,31	16,16	16,31	17,34	16,78 ± 0,63
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	4,65	4,67	4,63	4,65 ± 0,02	3,79	3,78	4,15	3,38	3,78 ± 0,31
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,31	1,28	1,36	1,32 ± 0,04	1,21	1,18	1,16	1,20	1,19 ± 0,02
MgO (kg/t _{MF})	1,66	1,63	1,68	1,66 ± 0,03	1,30	1,34	1,40	1,32	1,34 ± 0,04
cao (kg/t _{MF})	5,51	5,31	5,56	5,46 ± 0,13	4,45	4,52	4,91	4,22	4,53 ± 0,29
Référence Michamps	2000225	2000226	2000227		2000220	2000221	2000222	2000223	

TABLE 13 – Données brutes d’analyses d’échantillons prélevés le 15 janvier 2020 (jour 0) : triplicat de fumier provenant directement de la chèvrerie et quadruplicat de fumier humidifié préparé pour les tests de compostage et de fermentation ; analyses de lactosérum pur provenant directement de la fromagerie et de lactosérum dilué provenant de la citerne de la ferme. Les erreurs données sur les moyennes sont les écarts types des différents échantillons ; : analyses non réalisées ; — : données aberrantes écartées.^a

a. Les données aberrantes ont été écartées des calculs de moyenne puisque celle-ci n'est pas un indicateur statistique robuste.

	COMPOSTAGE ^a			FERMENTATION			ÉCOULEMENTS	
	# 1	# 2	moyenne	# 1	# 2	# 3	moyenne	comp.
pH	9,30	9,16	9,25 ± 0,08	9,08	8,96	8,91	8,98 ± 0,09	8,72
C/N	14,75	12,94	15,2 ± 2,5	14,20	14,29	14,04	14,18 ± 0,13	3,50
MS (%MF)	27,295	25,179	28,4 ± 4,0	24,800	26,583	25,952	25,78 ± 0,50	3,386
MO (%MF)	20,41	18,46	21,3 ± 3,4	19,29	20,38	19,85	19,84 ± 0,59	0,92
cendres tot. (%MF)	7,44	7,32	7,70 ± 0,56	6,37	6,87	6,42	6,55 ± 0,28	2,81
cendres ins. (%MF)	2,26	2,48	2,32 ± 0,14	1,87	2,56	1,80	2,08 ± 0,42	0,04
MO (%MS)	74,79	73,32	74,9 ± 1,6	77,78	76,67	76,50	76,98 ± 0,70	27,12
cendres tot. (%MS)	27,25	29,06	27,2 ± 1,8	25,67	25,83	24,74	25,41 ± 0,59	82,90
cendres ins. (%MS)	8,29	9,86	8,3 ± 1,5	7,53	9,65	6,94	8,0 ± 1,4	1,25
N total (kg/t _{MF})	7,69	7,92	7,81 ± 0,12	7,55	7,92	7,86	7,78 ± 0,20	1,46
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,95	1,77	1,22 ± 0,48	2,42	1,85	1,82	2,03 ± 0,34	0,46
N – NH ₃ (%N tot.)	12,4	22,3	15,6 ± 6,1	32,1	23,4	23,2	26,1 ± 5,1	31,5
K ₂ O (kg/t _{MF})	19,77	16,41	19,8 ± 3,5	16,47	16,95	19,07	17,5 ± 1,4	11,59
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	4,85	4,64	4,99 ± 0,44	3,87	4,12	4,46	4,15 ± 0,30	0,44
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,67	1,64	2,05 ± 0,68	1,27	1,20	1,39	1,29 ± 0,10	1,28
MgO (kg/t _{MF})	1,91	1,83	1,94 ± 0,13	1,54	1,49	1,55	1,53 ± 0,03	0,02
cao (kg/t _{MF})	6,12	6,69	6,45 ± 0,30	4,96	5,80	5,41	5,39 ± 0,49	0,10
Référence Michamps	2000447	2000448		2000450	2000451	2000452	2000453	2000454

TABLE 14 – Données brutes d’analyses d’échantillons prélevés le 3 mars 2020 (jour 47) : triplicat de fumier composté et triplicat de fumier fermenté; analyses des jus d’écoulement des deux tas de fumier ($n = 1$).

a. Le troisième échantillon (référence 2000449), présentant des aberrations par rapport aux deux autres (trop pailleux, pas assez azoté, etc.) a été écarté du calcul de la moyenne.

	COMPOSTAGE			FERMENTATION			ÉCOULEMENTS		
	# 1	# 2	# 3	moyenne	# 1	# 2	# 3	moyenne	comp. ferm.
pH	8,95	9,18	9,27	9,13 ± 0,17	9,17	9,18	9,44	9,26 ± 0,15	9,04
C/N	12,20	13,23	13,50	12,98 ± 0,69	13,00	9,90	14,72	12,5 ± 2,4	6,12
MS (%MF)	22,434	22,645	22,397	22,49 ± 0,13	20,942	20,33	21,252	20,84 ± 0,47	7,0179
MO (%MS)	15,46	15,63	15,51	15,53 ± 0,09	15,06	14,53	15,49	15,03 ± 0,48	2,23
cendres tot. (%MF)	7,37	7,44	6,83	7,21 ± 0,34	6,22	6,21	8,23	6,9 ± 1,2	2,29
cendres ins. (%MF)	1,58	2,49	2,22	2,10 ± 0,47	2,35	2,92	2,08	1,78 ± 0,39	6,02
MO (%MS)	68,91	69,05	69,24	69,07 ± 0,17	71,93	71,45	72,88	72,09 ± 0,73	0,09
cendres tot. (%MS)	32,86	32,88	30,48	32,1 ± 1,4	29,72	30,53	38,74	33,0 ± 5,0	0,14
cendres ins. (%MS)	10,92	10,99	9,92	10,61 ± 0,60	9,18	9,45	9,80	9,48 ± 0,31	79,49
N total (kg/t _{MF})	7,04	6,56	6,38	6,66 ± 0,34	6,44	8,15	5,85	6,8 ± 1,2	1,75
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,43	0,54	0,56	0,51 ± 0,07	0,99	0,81	0,48	0,76 ± 0,26	30,21
N – NH ₃ (%oN tot.)	6,1	8,2	8,8	7,7 ± 1,4	15,4	9,9	8,2	11,2 ± 3,7	0,19
K ₂ O (kg/t _{MF})	21,64	21,20	19,57	20,8 ± 1,1	17,53	18,56	16,27	16,90 ± 0,89	9,9
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	5,26	5,32	4,87	5,15 ± 0,24	4,68	4,87	4,62	4,72 ± 0,13	25,40
Na ₂ O (kg/t _{MF})	1,85	1,87	1,85	1,86 ± 0,01	1,22	1,40	1,09	1,80 ± 0,17	0,88
MgO (kg/t _{MF})	1,96	1,87	1,85	1,86 ± 0,01	1,99	1,75	1,66	1,80 ± 0,17	0,94
CaO (kg/t _{MF})	6,31	6,68	6,04	6,34 ± 0,32	6,24	5,69	5,82	5,92 ± 0,29	2,11
Référence Michamps	2001379	2001380	2001381		2001376	2001377	2001378	2001370	2001368

TABLE 15 – Données brutes d'analyses d'échantillons prélevés le 20 mai 2020 (jour 126) : tripliquat de fumier composté et tripliquat de fumier fermenté; analyses des jus d'écoulement des deux tas de fumier (n = 1).

	LACTOSÉRUM PUR						LACTOSÉRUM DILUÉ		
	# 1	# 2	# 3	moyenne		# 1	# 2	# 3	moyenne
	pH	4,73	4,28	4,27	4,50 ± 0,21	9,17	9,18	9,44	3,58 ± 0,01
MS (%MF)	7,2	7,9	7,4	7,50 ± 0,36	2,2	2,3	2,5	2,33 ± 0,15	
N total (kg/t _{MF})	2,38	1,60	2,36	2,11 ± 0,44	0,43	0,81	1,01	0,75 ± 0,29	
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,10	0,15	0,11	0,12 ± 0,03	0,21	0,13	0,13	0,13 ± 0,01	
N – NH ₃ (%N tot.)	4,2	9,4	4,7	5,7 ± 1,7	48,8	16,0	12,9	20,9 ± 8,2	
K ₂ O (kg/t _{MF})	2,03	2,31	2,31	2,22 ± 0,16	0,58	1,33	1,33	1,08 ± 0,43	
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	2,06	1,23	1,24	1,51 ± 0,48	0,29	0,61	0,60	0,50 ± 0,18	
Na ₂ O (kg/t _{MF})	0,90	0,48	0,55	0,64 ± 0,23	0,27	0,39	0,43	0,36 ± 0,08	
MgO (kg/t _{MF})	0,33	0,19	0,19	0,24 ± 0,08	0,08	0,14	0,15	0,12 ± 0,04	
cao (kg/t _{MF})	1,94	1,32	1,30	1,52 ± 0,36	0,51	1,06	1,06	0,88 ± 0,32	
fructose (%MF)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
glucose (%MF)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
saccharose (%MF)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
lactose (%MF)	7,37	7,44	6,83	3,53 ± 0,06	6,22	6,21	8,23	0,17 ± 0,06	
maltose (%MF)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
total des sucres (%MF)	7,37	7,44	6,83	3,53 ± 0,06	6,22	6,21	8,23	0,17 ± 0,06	
Référence Michamps	2001371	2001372	2001373		2000455	2001374	2001375		
Référence CARAH	200629-04811	200629-04812	200629-04813		200629-04814	200629-04815	200629-04816		

TABLE 16 – Données brutes d'analyses des taux de matière sèche et de sucres du lactosérum pur et dilué; ensemble de données utilisées à la table 7.

	FUMIER SEC		FUMIER MOU		FUMIER COMPOSTÉ	
	<i>moyenne</i>	<i>effectif</i>	<i>moyenne</i>	<i>effectif</i>	<i>moyenne</i>	<i>effectif</i>
MS (%MF)	24,3 ± 7,3	<i>n</i> = 342	18,9 ± 3,8	<i>n</i> = 59	24,0 ± 7,3	<i>n</i> = 148
MO (%MF)	16,2 ± 5,3	<i>n</i> = 302	14,3 ± 2,4	<i>n</i> = 32	15,6 ± 3,7	<i>n</i> = 99
N total (kg/t _{MF})	6,4 ± 2,9	<i>n</i> = 342	5,3 ± 1,6	<i>n</i> = 59	5,9 ± 1,6	<i>n</i> = 148
N – NH ₃ (kg/t _{MF})	0,5 ± 0,8	<i>n</i> = 339	0,8 ± 1,5	<i>n</i> = 54	0,3 ± 0,4	<i>n</i> = 145
K ₂ O (kg/t _{MF})	9,5 ± 4,3	<i>n</i> = 319	6,8 ± 2,8	<i>n</i> = 48	8,7 ± 5,0	<i>n</i> = 135
P ₂ O ₅ (kg/t _{MF})	3,9 ± 2,2	<i>n</i> = 319	2,6 ± 1,2	<i>n</i> = 48	4,1 ± 3,1	<i>n</i> = 135
MgO (kg/t _{MF})	2,2 ± 1,2	<i>n</i> = 305	1,4 ± 0,4	<i>n</i> = 40	2,1 ± 1,1	<i>n</i> = 122
cao (kg/t _{MF})	6,3 ± 4,0	<i>n</i> = 305	4,0 ± 3,7	<i>n</i> = 42	8,7 ± 8,4	<i>n</i> = 122

TABLE 17 – *Moyennes de données d'analyses de fumiers bovins sur la période 2007 — 2016*
 (source : Requasud, 2020).

		CARBONE (mℓ d'HCl)			AZOTE			NO ₃ (mg/ℓ)			
		# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3	
BLANC	J1	49,2	46,8	46,9	.	.	.	.	.	.
	J3	46,3	47,3	47,0	.	.	.	.	.	.
	J7	45,9	46,1	46,0	.	.	.	.	.	.
	J14	46,9	46,7	46,5	.	.	.	.	.	.
	J21	46,7	46,5	47,7	.	.	.	.	.	.
	J28	47,3	46,2	46,7	.	.	.	.	.	.
	J49	42,0	41,7	43,9	.	.	.	.	.	.
	J70	40,6	40,9	43,9	.	.	.	.	.	.
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
SOL (témoin)	JO	.	.	.	1,04	1,11	1,03	6,04	6,21	6,38	
	J1	44,3	44,0	42,7	.	.	.	.	.	.
	J3	44,3	44,7	44,1	.	.	.	.	.	.
	J7	45,3	45,3	45,1	2,02	1,72	1,72	7,58	7,97	8,17	
	J14	45,0	44,5	43,8	1,20	1,08	1,11	8,30	8,80	8,62	
	J21	45,0	46,1	44,5	.	.	.	.	.	.
	J28	45,7	46,1	44,5	1,20	1,08	1,11	8,30	8,80	8,62	
	J49	39,7	41,0	38,4	1,20	1,08	1,11	8,30	8,80	8,62	
	J70	39,1	40,3	37,0	1,20	1,08	1,11	8,30	8,80	8,62	
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
FUMIER (sec)	JO	.	.	.	1,05	1,19	1,10	6,22	6,39	6,32	
	J1	41,9	41,3	43,0	.	.	.	.	.	.
	J3	37,7	37,5	38,0	.	.	.	.	.	.
	J7	41,7	42,0	42,0	0,60	0,63	0,61	5,52	5,27	5,41	
	Michamps 2000227)	J14	36,4	37,1	37,6	1,21	1,29	1,79	5,44	4,16	5,10
	J21	42,2	43,5	44,2	.	.	.	.	.	.
	J28	43,8	44,0	44,8	0,66	0,71	0,68	6,09	5,65	5,40	
	J49	34,9	37,0	39,6	1,25	1,42	1,30	6,92	6,36	7,11	
	J70	37,6	36,8	39,7	0,98	1,16	.	7,03	8,35	.	
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.

TABLE 18 – Données brutes d'analyses de la cinétique de minéralisation du carbone (mℓ d'HCl pour la titration du CO₂) et de l'azote (concentrations en mg d'azote par litre); triplicat d'analyse sur base d'un seul échantillon, cf. norme XP U44-163 (· : analyse non réalisée) : ensemble de données utilisé à la figure 6. Suite de la table à la page xx.

			CARBONE			AZOTE					
			(ml d'HCl)			NH ₃ (mg/ℓ)			NO ₃ (mg/ℓ)		
			# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3
FUMIER (humidifié)	JO	.	.	.	.	1,19	1,37	1,22	6,39	6,54	6,44
	J1	41,8	43,2	45,3	.	.	.	.	.	.	.
	J3	37,5	37,4	31,0	.	.	.	.	.	.	.
	J7	38,8	41,8	36,2	0,85	0,97	0,89	3,80	4,84	4,89	
	Michamps 2000223)	J14	37,7	36,9	32,5	2,39	2,32	1,76	4,23	3,96	5,05
	J21	43,0	43,2	42,3	.	.	.	.	.	.	.
	J28	46,3	44,7	45,8	0,98	0,83	0,91	4,23	4,09	4,46	
	J49	38,8	37,8	36,6	1,38	.	.	6,50	.	.	
	J70	41,3	42,0	41,2	1,21	.	.	8,60	.	.	
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
COMPOSTAGE (47 jours)	JO	.	.	.	.	1,55	1,38	1,35	6,24	6,08	6,22
	J1	42,3	42,4	42,7	.	.	.	.	.	.	.
	J3	39,9	39,6	40,0	.	.	.	.	.	.	.
	J7	42,4	43,5	45,3	0,67	0,49	0,79	6,03	5,39	5,82	
	Michamps 2000447)	J14	38,7	36,9	37,0	1,80	1,83	2,08	5,76	5,59	6,56
	J21	43,7	43,3	42,8	.	.	.	.	.	.	.
	J28	44,5	44,0	44,1	0,85	0,30	1,20	6,33	5,55	5,66	
	J49	.	39,4	36,5	1,38	1,07	1,76	6,87	8,13	7,35	
	J70	40,3	40,5	39,2	1,16	1,13	.	8,60	7,41	.	
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
FERMENTATION (140 jours)	JO	.	.	.	.	1,82	1,74	1,87	6,38	6,29	6,58
	J1	44,7	44,0	44,1	.	.	.	.	.	.	.
	J3	41,9	41,9	40,2	.	.	.	.	.	.	.
	J7	43,4	44,2	43,6	0,73	0,89	1,09	6,18	6,46	6,24	
	Michamps 1904847)	J14	39,0	39,7	38,2	2,39	0,87	2,28	6,08	6,08	6,98
	J21	42,0	43,8	42,7	.	.	.	.	.	.	.
	J28	42,8	45,5	43,8	1,30	1,21	0,93	5,50	5,02	5,18	
	J49	37,3	40,8	40,4	1,26	1,21	1,27	8,52	9,44	8,21	
	J70	39,7	43,2	42,8	1,10	1,16	1,54	9,30	9,16	9,32	
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.

TABLE 18 – Données brutes d'analyses de la cinétique de minéralisation du carbone (ml d'HCl pour la titration du CO₂) et de l'azote (concentrations en mg d'azote par litre); triplicat d'analyse sur base d'un seul échantillon, cf. norme [XP U44-163](#) (- : analyse non réalisée) : ensemble de données utilisé à la [figure 6](#). Continuation de la table de la page [xix](#);

Suite de la table à la page [xxi](#).

		CARBONE			AZOTE					
		(ml d'HCl)			NH ₃ (mg/ℓ)			NO ₃ (mg/ℓ)		
		# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3
FERMENTATION	JO	.	.	.	.	.	.	.	.	.
(47 jours)	J1	41,9	42,4	42,7	.	.	.	.	.	.
	J3	36,0	35,3	35,0	.	.	.	.	.	.
(Référence	J7	40,8	41,3	41,0	.	.	.	.	.	.
Michamps	J14	38,0	37,7	35,6	.	.	.	.	.	.
2000450)	J21	43,9	43,3	43,0	.	.	.	.	.	.
	J28	47,0	44,0	40,6	.	.	.	.	.	.
	J49	40,2	36,7	34,0	.	.	.	.	.	.
	J70	42,2	39,3	39,8	.	.	.	.	.	.
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
FERMENTATION	JO	.	.	.	.	.	.	.	.	.
(47 jours)	J1	42,4	42,6	.	.	.	.	.	.	.
	J3	32,9	35,5	35,9	.	.	.	.	.	.
(Référence	J7	41,2	41,6	41,8	.	.	.	.	.	.
Michamps	J14	36,2	38,4	38,2	.	.	.	.	.	.
2000451)	J21	41,0	42,9	42,7	.	.	.	.	.	.
	J28	42,3	43,8	43,9	.	.	.	.	.	.
	J49	32,5	37,7	36,7	.	.	.	.	.	.
	J70	31,4	38,0	36,0	.	.	.	.	.	.
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.
FERMENTATION	JO	.	.	.	1,07	1,01	0,92	6,31	6,28	6,38
(47 jours)	J1	44,7	44,0	44,1	.	.	.	.	.	.
	J3	41,9	41,9	40,2	.	.	.	.	.	.
(Référence	J7	43,4	44,2	43,6	0,85	0,76	0,81	6,71	6,62	6,95
Michamps	J14	39,0	39,7	38,2	2,36	2,33	2,25	5,96	6,68	6,75
2000452)	J21	42,0	43,8	42,7	.	.	.	.	.	.
	J28	42,8	45,5	43,8	1,40	1,51	1,65	5,52	5,70	5,62
	J49	37,3	40,8	40,4	1,69	1,71	1,24	7,07	8,74	8,31
	J70	39,7	43,2	42,8	1,12	2,03	.	7,82	7,21	.
	J91	.	.	.	.	.	.	.	.	.

TABLE 18 – Données brutes d'analyses de la cinétique de minéralisation du carbone (ml d'HCl pour la titration du CO₂) et de l'azote (concentrations en mg d'azote par litre); triplicat d'analyse sur base d'un seul échantillon, cf. norme **XP U44-163** (· : analyse non réalisée) : ensemble de données utilisé à la **figure 6**. Continuation de la table de la page **xx**.

MS	±5%
MO	±6%
cendres	±10%
N total	±6%
N – NH ₃	±15%
K ₂ O	±10%
P ₂ O ₅	±10%
MgO	±10%
cao	±10%
fructose	31,2%
glucose	14,7%
saccharose	7,7%
lactose	18,0%
maltose	20,7%
total sucres	9,6%

TABLE 19 – *Erreurs de mesures, en pourcentage des valeurs mesurées, sur les données brutes associées aux analyses réalisées au Centre de Michamps et au CARAH; Source : Centre de Michamps et CARAH.*

6.2 ERREURS DE MESURE ET INCERTITUDES

6.2.1 PROPAGATION DES INCERTITUDES

Soit $f(x_1, \dots, x_n)$ une fonction \mathcal{C}^1 de n grandeurs x_i ($i = 1, \dots, n$) indépendantes, obtenues par moyenne statistique de plusieurs mesures répétées. Alors l'incertitude sur la fonction $f(x_1, \dots, x_n)$ est obtenue à partir des incertitudes σ_{x_i} sur les grandeurs x_i par la relation

$$\sigma_{f(x_1, \dots, x_n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\partial_{x_i} f(x_i) \cdot \sigma_{x_i} \right)^2}$$

6.2.2 CALCUL DES MASSES DE FUMIER SEC, DE LACTOSÉRUM DILUÉ ÉPANDU ET DE LACTOSE APPORTÉ

Le pont balance mis à disposition par le Centre de Michamps n'affichant la prise de mesure que par pas de 20 kg, l'incertitude sur les mesures de masse s'exprime sous forme d'une loi de probabilité de densité uniforme sur l'intervalle $[-10, 10]$. L'écart type associé à une loi de probabilité de densité uniforme $[a, b]$ étant donné par

$$\sigma = \frac{b - a}{2\sqrt{3}}$$

l'écart type associé à chaque mesure est alors donnée par

$$\sigma_{\text{mesure}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \simeq 6 \text{ kg}$$

et par propagation de l'incertitude, chaque pelletée (avant, arrière et tare) totalise une incertitude de

$$\sigma_{\text{pelletée}} = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{3}} \right)^2} \simeq \pm 12 \text{ kg}$$

À partir des données au jour o de la [table 11](#), on obtient alors les valeurs suivantes, par propagation de l'incertitude de chaque pelletée sur le tas total :

$$m_{\text{initiale compostage}} = (1900 \pm 26) \text{ kg}$$

$$m_{\text{initiale fermentation}} = (3010 \pm 23) \text{ kg}$$

et

$$\begin{aligned} m_{\text{fumier humidifié}} &= m_{\text{initiale compostage}} + m_{\text{initiale fermentation}} \\ &= (1900 \pm 26) \text{ kg} + (3010 \pm 23) \text{ kg} = (4910 \pm 35) \text{ kg} \end{aligned}$$

(où l'incertitude sur la masse totale est obtenue par la propagation $\sigma = \sqrt{26^2 + 23^2}$) et à partir des données d'analyses réalisées à Michamps et au CARAH

$$MS_{lactosérum \ dilué} = m_{lactosérum \ dilué} \cdot (2,33 \pm 0,15) \%$$

$$MS_{fumier \ sec} = m_{fumier \ sec} \cdot (29,57 \pm 0,70) \%$$

$$MS_{fumier \ humidifié} = (4910 \pm 35) \ kg \cdot (26,26 \pm 0,70) \% = (1290 \pm 36) \ kg$$

où l'incertitude sur la masse de matière sèche du fumier humidifié est obtenue par la propagation

$$\sigma_{MS} = MS \sqrt{\frac{\sigma_m^2}{m^2} + \frac{\sigma_{MS}^2}{MS^2}} = 1290 \sqrt{\frac{35^2}{4910^2} + \frac{0,70^2}{26,26^2}} = 36$$

on peut résoudre le système à deux équations linéaires du premier degré suivant

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{fumier \ humidifié} = m_{fumier \ sec} + m_{lactosérum \ dilué} \\ \quad = (4910 \pm 35) \ kg \\ MS_{fumier \ humidifié} = MS_{fumier \ sec} + MS_{lactosérum \ dilué} \\ \quad = m_{fumier \ sec} \cdot (29,57 \pm 0,70) \% \\ \quad + m_{lactosérum \ dilué} \cdot (2,33 \pm 0,15) \% \\ \quad = (1290 \pm 36) \ kg \end{array} \right.$$

Après résolution, on obtient ainsi

$$m_{fumier \ sec} = (4314 \pm 60) \ kg$$

$$m_{lactosérum \ dilué} = (596 \pm 49) \ kg$$

soit un ajout de lactosérum équivalant à $(13,8 \pm 1,2) \%$ de la masse du fumier sec.

Pour une concentration de $(0,17 \pm 0,06) \%$ en lactose dans le lactosérum dilué, l'humidification équivaut à un apport négligeable, de seulement $(0,99 \pm 0,35) \ kg$ de lactose pour les $(4314 \pm 60) \ kg$ de fumier sec... Si l'humidification avait été faite avec du lactosérum pur à $(3,53 \pm 0,06) \%$ en lactose, l'apport aurait été de $(21,1 \pm 1,8) \ kg$ de lactose soit $(0,49 \pm 0,04) \%$ de la masse du fumier sec.

6.3 SIGNIFICATIVITÉ STATISTIQUE

Un test statistique tente de déterminer si une relation observée entre des valeurs expérimentale est fortuite ou potentiellement réelle. On pose tout d'abord une hypothèse nulle, qui stipule qu'il n'y a pas de différence entre les valeurs comparées. Ainsi, sous cette hypothèse, les relations observées sont fortuites, dues à des phénomènes aléatoires, des erreurs d'échantillonages, des incertitudes et erreurs de mesures, etc., mais ne représentent pas un aspect réel du phénomène observé. On pose également une hypothèse alternative, qui stipule qu'il y a une différence, généralement considérée quelconque (mais qui peut être affermee, stipulant que la différence est soit positive, soit négative).

Il existe de nombreux tests permettant de déterminer laquelle de ces deux hypothèses est la plus vraisemblable, mais tous sont basés sur le même principe :

1. on suppose que l'hypothèse nulle est vraie : il n'y a pas de différence entre les valeurs comparées ;
2. on calcule la probabilité d'obtenir les valeurs observées avec cette hypothèse ;
3. si la probabilité est très basse, on rejette l'hypothèse nulle en faveur de l'hypothèse alternative : il y a une différence entre les valeurs comparées.

La probabilité calculée à la deuxième étape est appelée valeur- p . Elle correspond à la probabilité pour le modèle statistique du test, sous l'hypothèse nulle, d'observer les mêmes valeurs ou des valeurs plus extrêmes que celles observées.

Généralement, la valeur- p est interprétée comme suit :

- si $p \leq 0,01$: on a une très forte présomption contre l'hypothèse nulle ;
- si $0,01 < p \leq 0,05$: on a une forte présomption contre l'hypothèse nulle ;
- si $0,05 < p \leq 0,1$: on n'a qu'une faible présomption contre l'hypothèse nulle ;
- si $p > 0,1$: on n'a pas de présomption contre l'hypothèse nulle.

Notons que le fait de ne pas avoir de présomption contre l'hypothèse nulle ne suffit pas pour l'accepter comme vraie : il peut toujours y avoir une réelle différence entre les phénomènes étudiés. Simplement, les données disponibles ne permettent peut-être pas de le montrer.

Dans notre cas, nous utilisons des tests de Student pour déterminer, sous l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de différence, si les différences entre des données moyennes d'analyses montrent une différence probable ou si elles sont le résultat d'incertitudes sur nos données. Nous interprétons les valeurs- p comme suit :

- si $p \leq 0,01$: la différence observée est très significative ;
- si $0,01 < p \leq 0,05$: la différence observée est significative ;
- si $0,05 < p \leq 0,1$: la différence observée est faiblement significative ;
- si $p > 0,1$: la différence observée n'est pas significative.

6.3.1 CAS DE LA MASSE APRÈS 47 JOURS

Les essais en tas n'ont pas été répliqués : nous avons $n = 1$ pour le compostage ainsi que pour la fermentation. Dès lors, un test de Student comparant différentes réplications n'est pas réalisable. Cependant, la mesure du poids des tas (et les incertitudes associées) ayant été faite par pelletées successives, il est possible de

faire des tests sur base du poids moyen d'une pelletée, pour lequel nous avons un nombre de réplication élevé.

Le pont balance mis à disposition par le Centre de Michamps n'affichant la prise de mesure que par pas de 20 kg, l'incertitude sur les mesures de masse s'exprime sous forme d'une loi de probabilité de densité uniforme sur l'intervalle $[-10, 10]$. La somme de variables aléatoires uniformes suit une distribution dite de Irwin-Hall^b. En comparant avec le logiciel libre *R* (version 4.0.0)^b les quantiles à 2,5% et 97,5% de cette distribution

Wikipedia contributors (2020b).

$$q_{|0,025}^{\text{IH}} = \mp 35,62976$$

à ceux d'une distribution normale

$$q_{|0,025}^{\mathcal{N}} = \mp 35,78388$$

on peut vérifier que la distribution d'Irwing-Hall (IH) est proche de celle d'une loi normale (\mathcal{N}). Aucune librairie de *R* n'étant basée sur la distribution de Irwin-Hall, une partie des calculs ci-dessous sera basée sur l'approximation normale, en particulier dans le calcul des valeurs-*p*.

Dans l'analyse de la variation de masse des tas de compostage et de fermentation après 47 jours, le nombre total de prise de mesures pour chaque tas s'élève respectivement à 22 et 24^c. Pour la variation de masse $\Delta m_{\text{compostage}} = -340 \text{ kg}$ dans le tas de compostage, les quantiles de la distribution d'Irwin-Hall donnent (pour $n = 22$) un intervalle de confiance à 99% de probabilité de

$$\Delta m_{\text{compostage}}^{99\%} = (-340 \pm 82) \text{ kg} \quad \Leftrightarrow \quad -258 \text{ kg} \geq \Delta m_{\text{comp.}}^{99\%} \geq -422 \text{ kg}$$

Ainsi, on a une très forte présomption contre l'hypothèse nulle affirmant qu'il n'y a pas de différence significative de masse après 47 jours de compostage, puisque l'intervalle de confiance à 99% exclut clairement la valeur $\Delta m = 0 \text{ kg}$. Dans le cas de la distribution d'Irwin-Hall, cela correspond à une valeur-*p* exactement nulle, ce qui est confirmé par l'approximation normale pour laquelle $p = 1,86 \cdot 10^{-36}$.

Pour la variation de masse $\Delta m_{\text{fermentation}} = -390 \text{ kg}$ dans le tas de fermentation, les quantiles de la distribution d'Irwin-Hall donnent (pour $n = 24$) un intervalle de confiance à 99% de probabilité de

$$\Delta m_{\text{fermentation}}^{99\%} = (-390 \pm 86) \text{ kg} \quad \Leftrightarrow \quad -304 \text{ kg} \geq \Delta m_{\text{ferm.}}^{99\%} \geq -476 \text{ kg}$$

Ainsi, on a également une très forte présomption contre l'hypothèse nulle affirmant qu'il n'y a pas de différence significative de masse après 47 jours de fermentation, puisque l'intervalle de confiance à 99% exclut clairement la valeur $\Delta m = 0 \text{ kg}$. Dans le cas de la distribution d'Irwin-Hall, cela correspond à une valeur-*p* exactement nulle, ce qui est confirmé par l'approximation normale pour laquelle $p = 1,49 \cdot 10^{-43}$.

Reste enfin à vérifier la différence de variation de masse entre les deux tas. Les masses de matières fraîches initiales étant différentes, nous nous intéressons aux

b. Le code utilisé pour les calculs ci-dessous est détaillé plus bas.

c. Ce nombre reprend les mesures du poids pour les roues avant et les roues arrière des cinq (resp. quatre) pelletées de chargement (soit un sous-total de 10 mesures), puis des cinq (resp. sept) pelletées de déchargement 47 jours plus tard (deuxième sous-total de 10 mesures), complété par les mesures avant et arrière de la tare du chargeur, soit un total de 22 (resp. 24) mesures, cf. 11.

variations relatives de masse. Un calcul avec des intervalles de confiance à 95% nous donne des variations de $(-17,9 \pm 1,9)\%$ et $(-13,0 \pm 1,3)\%$ respectivement pour le compostage et la fermentation, soit une différence de variation de $-4,94\%$. En calculant l'écart type associé à cette différence sur base des écarts types du poids des différentes pelletées, on peut finalement calculer la valeur- p correspondante (en approximation normale). On obtient $p = 0,0019$, nous permettant d'affirmer que la différence de perte de masse entre compostage et fermentation est très significative.

6.3.1.1 Code R

```

##### INTRODUCTION #####
# La somme de n variables aleatoires uniformes [0,1] suit une distribution
# dite de Irwin-Hall (IH), cf. https://en.wikipedia.org/wiki/Irwin-Hall\_distribution. Aucune librairie R ne donne les quantiles de cette
# loi. Nous allons donc les calculer a la main et les comparer a une loi
# normale. On cherche tout d'abord la valeur de la fonction de repartition d'une IH(n) :
cdfirwin.hall<-function(x,n){
  upperlimit=floor(x)
  sum=0
  for(k in 0:upperlimit){
    sum=sum+(-1)^k*choose(n,k)*(x-k)^n
  }
  sum=sum/factorial(n)
  return(sum)
}
# Un test rapide de verification du codage nous confirme que la probabilité d'obtenir une valeur inferieur ou égale a 5 lorsque n=10 vaut bien un demi :
cdfirwin.hall(5,n=10)
>[1] 0.5
# Calculons les quantiles d'une loi IH(n) uniforme [0,1]
quantileIH<-function(alpha,n){
  f<-function(x) cdfirwin.hall(x,n)-alpha
  quantile=uniroot(f,interval=c(0,n))
  return(quantile$root)
}
# Pour passer a une loi uniforme [-10;10], il suffit de multiplier les
# quantiles par la longueur de l'intervalle (soit 20) et de soustraire n
# fois la moitié de cette longueur. Ainsi, les quantiles a 2,5% et 97,5%
# de la somme de n=10 lois uniformes [-10,10] sont données par :
alpha=0.05
n=10
lowquant<-function(alpha,n){
  20*quantileIH(alpha/2,n)-n*10
}
highquant<-function(alpha,n){
  20*quantileIH(1-(alpha/2),n)-n*10
}
print(c(lowquant(alpha,n),highquant(alpha,n)))
>[2] -35.62976 35.62976
# En calculant l'écart-type de n uniformes [-10;10] indépendantes ...
var1=20^2/12 # donne la variance
sd1=sqrt(var1) # donne l'écart-type correspondant
sdn<-function(n){ # donne l'écart-type de la somme
  varn=n*var1 # de n uniformes indépendantes
  return(sqrt(varn))
}
# ... on peut comparer ces quantiles a ceux d'une loi normale
lowquantn=qnorm(p=0.025, sd=sdn(n))
highquantn=qnorm(p=0.975, sd=sdn(n))
print(c(lowquantn,highquantn))
>[3] -35.78388 35.78388
# Ceci nous indique qu'une approximation normale est tout a fait raisonnable, ce qui nous permettra de calculer des valeurs-p plus bas.
#####

```

```

# Dans cette partie, on va tester l'hypothese nulle stipulant que la
# masse des tas n'a pas variee urant les 47 jours.
##### COMPOSTAGE #####
# On a un total de 20 mesures (avant+arriere), plus deux mesures pour la
# tare : n=22. La masse initiale est de 1900kg et la masse finale de
# 1560kg.
nC=22
mCi=1900
mCf=1560
diffCabs=mCf-mCi
print(diffCabs)
>[3] -340
# On va tester un intervalle de confiance a 99%, c'est-a-dire
# alpha/2=0.001 :
alpha=0.002
lowquantC=lowquant(alpha,nC)
highquantC=highquant(alpha,nC)
incertCabs=c(lowquantC,highquantC)
print(incertCabs)
>[4] -82.40674 82.40674
icCabs=c(diffCabs+lowquantC,diffCabs+highquantC)
print(icCabs)
>[5] -422.4067 -257.5933
# Dans le cas d'une loi normale, cela correspond a une valeur-p de :
pnorm(diffCabs,mean=0,sd=sdn(nC))
>[6] 1.858094e-36
# ou sdn est defini plus haut et donne l'ecart-type de la somme de n uni-
# formes independantes, avec nC=22.
##### FERMENTATION #####
# On a un total de 22 mesures (avant+arriere), plus deux mesures pour la
# tare : n=24. La masse initiale est de 3010kg et la masse finale de
# 2620kg.
nF=24
mFi=3010
mFf=2620
diffFabs=mFf-mFi
print(diffFabs)
>[7] -390
# On va tester un intervalle de confiance de 99%
lowquantF=lowquant(alpha,nF)
highquantF=highquant(alpha,nF)
incertFabs=c(lowquantF,highquantF)
print(incertFabs)
>[8] -86.18513 86.18515
icFabs=c(diffFabs+lowquantF,diffFabs+highquantF)
print(icFabs)
>[9] -476.1851 -303.8148
# Dans le cas d'une loi normale, cela correspond a une valeur-p de :
pnorm(diffFabs,mean=0,sd=sdn(nF))
>[10] 1.49285e-43
#####

##### DEUXIEME PARTIE #####
# Les variations relatives de masse des deux tas, avec des intervalles de
# confiance a 95% donnent :
alpha=0.025
# pour le compostage
diffCrel=diffCabs/mCi
print(diffCrel)
>[11]-0.1789474
lowquantC=lowquant(alpha,nC)
highquantC=highquant(alpha,nC)
incertCabs=c(lowquantC,highquantC)
icCabs=c(diffCabs+lowquantC,diffCabs+highquantC)
icCrel=icCabs/mCi
print(icCrel)
>[12]-0.2107440 -0.1471507
# pour la fermentation
diffFrel=diffFabs/mFi
print(diffFrel)
>[13]-0.1295681
lowquantF=lowquant(alpha,nF)
highquantF=highquant(alpha,nF)
incertFabs=c(lowquantF,highquantF)
icFabs=c(diffFabs+lowquantF,diffFabs+highquantF)

```

```

icFrel=icFabs/mFi
print(icFrel)
>[14]-0.1505399 -0.1085963
# Alors la difference de variation relative est de
diffCFrel=diffCrel-diffFrel
print(diffCFrel)
>[15]-0.04937926
# En calculant l'écart-type associe a cette difference, on peut enfin
# tester l'hypothese nulle stipulant que cette difference est nulle :
SDdiffCFrel=sqrt((sdn(n=nC)/mCi)^2+(sdn(n=nF)/mFi)^2)
pnorm(diffCFrel, sd=SDdiffCFrel)
>[16]0.001911042
#####

```

6.3.2 TESTS DE STUDENT SUR BASE D'ÉCARTS TYPES PROPAGÉS

Pour le reste de nos calculs de valeurs-*p*, nous avons utilisé le code repris ci dessous. Il nous permet, sur base des moyennes, des incertitudes associées et du nombre d'échantillons sur lesquels se basent ces analyses, de faire les calculs de significativité statistique après calibration des données.

6.3.2.1 Code R

```

#####
# Soient moy, sd et n respectivement la moyenne, l'incertitude sur cette
# moyenne (propagée à partir de l'écart type à travers la calibration des
# données). Le code suivant permet de calculer, par test de Student, la
# valeur-p pour une hypothèse alternative quelconque (différence des
# moyennes non nulle) et pour une hypothèse alternative stipulant que la
# différence des moyennes est strictement négative. Le code donne également
# la différence entre les moyennes et l'intervalle de confiance à
# 68.27% sur cette différence.
alpha=1-(1-0.6827)/2
t.function<-function(moy1,sd1,n1,moy2,sd2,n2){
  if(sd1^2/sd2^2<2 && sd1^2/sd2^2>1/2){## similar variances
    {sp=sqrt(((n1-1)*sd1^2+(n2-1)*sd2^2)/(n1+n2-2))
    test.stat=(moy1-moy2)/(sp*sqrt((1/n1)+(1/n2)))
    p.val=
      2*min(pt(test.stat,df=(n1+n2-2)),1-pt(test.stat,df=(n1+n2-2)))
  }
  if(sd1^2/sd2^2<2 || sd1^2/sd2^2>1/2){## different variances
    {test.stat=(moy1-moy2)/sqrt((sd1^2/n1)+(sd2^2/n2))
    nu1=(n1-1)
    nu2=(n2-1)
    df=test=
      ((sd1^2/n1)+(sd2^2/n2))^2/((sd1^4/(nu1*n1^2))+(sd2^4/(nu2*n2^2)))
    p.val=2*min(pt(test.stat,df=df),1-pt(test.stat,df=df))
    p.less=p.val/2
    quantiles=qt(alpha,df=df)
    IC=(quantiles*sqrt((sd1^2/n1)+(sd2^2/n2)))/moy1*100
    diff=(moy2-moy1)/moy1*100
    cat("p-valeur=",p.val, "\n")
    cat("p-val(less)=",p.less, "\n")
    cat("variation=",diff, "%\n")
    cat("incertitude=","+-",IC, "%\n")
    cat("confidence=", (1-2*(1-alpha))*100, "%\n")
  }
}
# Exemple pour les valeurs du pH du tas de compostage et de fermentation
# au jour 47 :
> t.function(008.9833333333330,000.087368949480541,3,
             009.250000000000000,000.078102496759067,3)
p-valeur      = 0.01735061
p-val (less)  = 0.008675307
variation      = 2.96846 %
incertitude   = +-0.8613521 %
confidence    = 68.27 %
#####

```

6.4 PHOTOS



FIGURE 8 – Dispositif expérimental pour les essais en tas : coffrage (à gauche) et gouttières pour la récupération des écoulements (à droite).



FIGURE 9 – Homogénéisation et oxygénation par passage au composteur pour le tas de compostage (à gauche). Dispositif expérimental pour les tests en fûts (à droite).



FIGURE 10 – *Mise en tas au jour 0 : compostage (à gauche) et fermentation (à droite).*



FIGURE 11 – *État des tas avant pesée au jour 47 (à gauche). Mesure du poids des tas à l'aide d'un chargeur compact et d'un pont-balance à deux plots (à droite).*



FIGURE 12 – *État du tas de fermentation avant pesée au jour 126 (à gauche). Différentes poches hétérogènes prélevées dans le tas de fermentation (à droite).*

DÉCLARATION SUR L'HONNEUR CONTRE LE PLAGIAT

Noé Vandevenoerde
rue du Pacifique 12
1180 Uccle

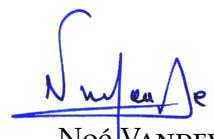
LACTO-FERMENTATION DE FUMIER PAILLEUX

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Agroécologie

Promotrice : Marjolein Visser

Je certifie qu'il s'agit d'un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie, de surcroît, que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets. Le non-respect de ces dispositions est possible de constituer un obstacle rédhibitoire à la validation de mon TFE et donc à l'obtention du diplôme convoité.

Bruxelles, le 15 aout 2020.



Noé VANDEVOORDE