

Évaluation des bioaérosols et des composés gazeux émis lors des compostages de résidus agroalimentaires et résidentiels

Geneviève Marchand
Laetitia Bonifait
Marc Veillette
Carole Pépin
Yves Beaudet
Éric Légaré
Jacques Lavoie
Caroline Duchaine
Yves Bernard
Yves Cloutier

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-960

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique InfoIRSST

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2017
ISBN : 978-2-89631-922-0
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
février 2017

Évaluation des bioaérosols et des composés gazeux émis lors des compostages de résidus agroalimentaires et résidentiels

Geneviève Marchand¹, Laetitia Bonifait², Marc Veillette²,
Carole Pépin¹, Yves Beaudet¹, Éric Légaré³, Jacques Lavoie¹,
Caroline Duchaine^{2, 4}, Yves Bernard³, Yves Cloutier¹

¹IRSST

²Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de
pneumologie de Québec

³Centre de recherche industrielle du Québec

⁴Département de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique,
Université Laval

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-960

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune
garantie relative à l'exacti-
tude, la fiabilité ou
le caractère exhaustif de
l'information contenue dans
ce document.

En aucun cas l'IRSST ne
saurait être tenu responsable
pour tout dommage corporel,
moral ou matériel résultant
de l'utilisation de cette
information.

Notez que les contenus des
documents sont protégés par
les législations canadiennes
applicables en matière de
propriété intellectuelle.

Cliquez recherche



Cette publication
est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

L'équipe tient à remercier MM. Francois Bécotte de la Ferme-école LAPOKITA et Alain Jutras de la Ferme Le porc Notre-Dame inc., qui, en acceptant de participer et en nous offrant leur soutien, ont autorisé les échantillonnages dans leur milieu de travail, ce qui a rendu possible la réalisation de ce projet. Les auteurs saluent et expriment leur considération aux équipes respectives des deux fermes, de même qu'aux membres du comité de suivi dont la contribution a permis de bonifier le projet.

Nous voulons aussi témoigner de notre gratitude envers M^{mes} Maude Talbot et Marie-Ève Dupuis pour leur participation au projet et leur aide technique sur le terrain et en laboratoire.

SOMMAIRE

Au cours des dernières années, la conscientisation écologique des populations a stimulé de façon importante l'intérêt qu'elles portent à la protection de l'environnement. Des comportements favorisant le développement durable et permettant la préservation à long terme de l'environnement comme le compostage sont maintenant répandus. De par sa nature, le compostage nécessite l'action des microorganismes. À chaque phase de compostage correspondent des populations de microorganismes caractéristiques et, par conséquent, des émissions de bioaérosols qui leur sont propres. Plusieurs gaz peuvent également être présents dans l'air ambiant lors des activités de compostage. Les travailleurs de ces milieux peuvent donc être exposés à des agents chimiques et biologiques.

L'objectif de cette étude était de comparer les concentrations des contaminants présents dans l'air ambiant de trois sites de compostage traitant des matières organiques différentes c.-à-d. des résidus organiques triés à la source provenant d'une collecte à trois voies, des fumiers provenant d'une ferme de bovins laitiers ainsi que des carcasses et des tissus animaux provenant d'une ferme porcine; et ce, afin d'en estimer les risques pour la santé.

Des différences sur le plan des concentrations et des types de contaminants ont été observées dans les centres étudiés, et ce, tant au regard des microorganismes que des composés gazeux. Ce projet a permis de montrer que le compost favorise l'activité biologique en produisant une augmentation significative des concentrations de microorganismes cultivables dans l'air ambiant des centres de compostage. La méthode de la réaction de polymérase en chaîne (PCR) a permis de démontrer la présence de *Legionella spp* et *pneumophila* dans l'air d'un des centres, celle de *Saccharopolyspora rectivirgula* lors de quelques interventions et la présence soutenue des *Mycobacterium spp* dans l'ensemble des centres de compostage. Ces résultats démontrent que les analyses de biologie moléculaire à l'aide de marqueurs spécifiques peuvent avoir un apport important en matière d'évaluation du risque microbien. L'utilisation de ces marqueurs pourrait permettre une évaluation rapide, spécifique et mieux ciblée du risque microbiologique des centres de compostage. L'évaluation de la biodiversité a permis d'établir l'existence d'une aérosolisation préférentielle du phylum *Actinobacteria* et du genre *Mycobacterium spp*. Cela signifie que bien qu'elles ne soient pas les bactéries les plus nombreuses dans la composition du compost, leur présence dans l'air par rapport aux autres groupes microbiens semble favorisée.

L'étude de la granulométrie des particules a permis de démontrer que les diamètres aérodynamiques des particules fluorescentes et totales étaient inférieurs à 10 µm. Ces deux types de particules ont donc la capacité de pénétrer profondément dans les poumons. Le pH et la teneur en eau sont les seuls paramètres permettant d'établir un lien avec les concentrations de contaminants microbiens.

L'exposition des travailleurs du compost aux microorganismes et aux gaz est démontrée. Bien que la durée de l'exposition soit limitée dans la majorité des cas, une protection respiratoire pourrait être souhaitable.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xv
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Le compostage	2
1.3 Types d'intrants pour le compostage	3
1.4 Les microorganismes et le compost.....	3
1.5 Risques pour la santé.....	4
1.5.1 Risques biologiques	4
1.5.2 Indicateur des risques biologiques	5
1.5.3 Risques chimiques	5
2. PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS.....	7
2.1 Problématique	7
2.2 Objectifs du projet de recherche	7
2.3 Hypothèses.....	7
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES	9
3.1 Centres de compostage	9

3.1.1	Résidus organiques triés à la source (CR)	11
3.1.2	Fumiers de bovin laitier (LP).....	12
3.1.3	Carcasses et tissus animaux (ND).....	12
3.2	Méthode d'échantillonnage.....	12
3.2.1	Postes d'échantillonnage.....	12
3.2.2	Compost	14
3.2.3	Bioaérosols cultivables	16
3.2.4	Biologie moléculaire et analyse génomique	17
3.2.5	Endotoxines.....	17
3.2.6	Poussières totales (PNCA).....	17
3.2.7	Poussières UV-APS	17
3.2.8	Composés gazeux et composés organiques volatils (COV)	18
3.3	Méthodes analytiques	19
3.3.1	Dosages des composés dans le compost	19
3.3.2	Bioaérosols cultivables	19
3.3.3	Biologie moléculaire et analyse génomique	19
3.3.4	Endotoxines.....	22
3.3.5	Poussières totales (PNCA).....	22
3.3.6	UV-APS	23
3.4	Analyses statistiques	23
4.	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	25
4.1	Compost	25
4.2	Bioaérosols.....	29
4.2.1	Résidus organiques triés à la source (CR)	29
4.2.2	Influence de la phase du compostage sur les concentrations de microorganismes.....	32
4.2.3	Fumiers de bovin laitier (LP).....	34
4.2.4	Compostage de carcasses et tissus animaux (ND).....	38

4.2.5	Résumé des données sur les bioaérosols.....	42
4.2.6	Comparaison des concentrations de microorganismes entre les trois sites.....	42
4.3	Biologie moléculaire - Marqueurs de risque	43
4.4	Analyse de la biodiversité microbienne.....	46
4.4.1	Courbes de raréfaction	46
4.4.2	Distribution des OTU dans l'air et dans le compost	47
4.4.3	Distribution des phylums en fonction des étapes de compostage.....	48
4.4.4	Distribution des genres d'Actinobacteria.....	50
4.4.5	Distribution des genres de Proteobacteria.....	51
4.4.6	Regroupements phylogénétiques	52
4.5	Endotoxines	54
4.6	Poussières totales (PNCA).....	55
4.7	Poussières UV-APS	55
4.7.1	Analyses granulométriques des poussières totales	55
4.7.2	Analyses granulométriques des particules fluorescentes.....	58
4.7.3	Analyses des poussières en nombre de particules.....	59
4.8	Composés gazeux et composés organiques volatils (COV)	62
5.	CONCLUSION	69
6.	LIMITES	71
7.	RETOMBÉES ET RECOMMANDATIONS.....	73
	BIBLIOGRAPHIE.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Particularités des trois centres de compostage.....	9
Tableau 2 : Poste d'échantillonnage pour les trois centres de compostage	14
Tableau 3 : Paramètres et méthode utilisée pour l'analyse du compostage.....	15
Tableau 4 : Opérations, température et taux d'humidité de l'air extérieur lors des journées d'échantillonnage, à chaque site de compostage	16
Tableau 5 : Valeur limite d'exposition des travailleurs selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail ⁽⁶⁰⁾ pour une période de 8 heures	18
Tableau 6 : Amorces, sondes et protocoles de la PCR utilisés pour les détections spécifiques des microorganismes recherchés.....	21
Tableau 7 : Résumé des paramètres de compostage mesurés dans les trois centres de compostage.....	25
Tableau 8 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de résidus organiques triés à la source.....	30
Tableau 9 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de fumiers de bovins laitiers	34
Tableau 10 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de carcasses et tissus animaux	39
Tableau 11: Résumé des facteurs d'influence des concentrations de microorganismes aux trois sites étudiés	42
Tableau 12 : Concentrations des contaminants gazeux mesurées aux sites de compostage.....	64
Tableau 13 : Coefficients de corrélation calculés entre les paramètres mesurés dans le compost et les concentrations de contaminants obtenues dans l'air ambiant. Niveau de signification à $p < 0,05$	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cellule de compostage du fumier (à gauche) et caniveaux d'aération (à droite) à la ferme de bovins laitiers (site LP).....	10
Figure 2 : Cellules de compostage des carcasses et tissus animaux (à gauche) et brassage au peigne du compost (à droite) dans une ferme porcine (site ND).....	10
Figure 3 : Suivi du contenu du compost en azote total (N _{tot}) et en azote ammoniacal (N-NH ₄) pour chaque site, lors de chaque visite.	26
Figure 4 : Suivi du rapport carbone/azote et du pH du compost pour chaque site lors de chaque visite.	27
Figure 5 : Suivi de la masse volumique apparente (MVA) du compost ainsi que de sa teneur en eau (TEE) pour chaque site, lors de chaque visite.....	28
Figure 6 : Suivi de la respirométrie (taux d'oxygénation) ainsi que de la matière organique totale (MOT) pour chaque site et chaque visite.	29
Figure 7 : Concentrations moyennes (UFC/m ³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les <i>Aspergillus fumigatus</i> (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des travailleurs aux postes de triage et broyeur (site CR).	32
Figure 8 : Concentrations en unités génomiques (UG/m ³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs aux postes de triage et à la sortie du tunnel avant le broyeur (site CR).....	34
Figure 9 : Concentrations moyennes (UFC/m ³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les <i>Aspergillus fumigatus</i> (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des activités effectuées par le travailleur sur le compost (site LP).....	36
Figure 10 : Concentrations en unités génomiques (UG/m ³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs (site LP).	38
Figure 11 : Concentrations moyennes (UFC/m ³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les <i>Aspergillus fumigatus</i> (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des activités sur le compost effectuées par le travailleur (site ND).	40
Figure 12 : Concentrations en unités génomiques (UG/m ³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs (site ND).....	41
Figure 13 : Moyennes géométriques des concentrations de microorganismes cultivables obtenues lors des activités réalisées aux trois sites de compostage durant les suivis effectués à chacune des étapes de compostage (n=3).	43
Figure 14 : Concentrations de microorganismes obtenues par amplification d'ADN lors des activités. Prélèvements réalisés aux trois sites de compostage durant le suivi effectué à chacune des étapes de compostages (n=1).	44

Figure 15 : Courbes de raréfaction des trois librairies de séquences obtenues pour les trois centres de compostage : a) résidus organiques (CR); b) fumiers de bovins laitiers (LP) et c) carcasses et tissus animaux (ND). Chaque courbe illustre le nombre d'OTU à une distance phylogénétique de 0,03.....	47
Figure 16 : Distribution taxonomique appartenant aux principaux phylums bactériens retrouvés dans l'ensemble des échantillons d'air et de compost.	48
Figure 17 : Distribution taxonomique des différents phylums retrouvés dans l'air et le compost des trois centres de compostage en fonction des étapes de transformation : a) CR, b) LP et c) ND.....	49
Figure 18 : Distribution taxonomique des genres bactériens appartenant au phylum des <i>Actinobacteria</i> dans les échantillons d'air et de compost pour les trois centres de compostage.....	50
Figure 19 : Distribution taxonomique des genres bactériens appartenant au phylum <i>Proteobacteria</i> dans les échantillons d'air et de compost pour les trois centres de compostage.....	52
Figure 20 : Arbre phylogénétique Bray-Curtis des librairies de séquences pour les échantillons de compost prélevés aux trois sites de compostage : A) CR, B) LP et C) ND.....	53
Figure 21 : Concentrations en endotoxines mesurées dans l'air ambiant des trois centres de compostage durant le travail des employés.....	54
Figure 22 : Quantité de poussières totales mesurée dans les trois centres de compostage durant le travail des employés.....	55
Figure 23 : Diamètre (aérodynamique pour l'UV-APS (NMAD) et optique pour le GRIMM (NMD) médian de la fraction non fluorescente des particules (particules totales) pour chacune des activités, aux trois sites de compostage.	56
Figure 24 : Diamètres médians optiques obtenus par le GRIMM (NMD) et diamètres aérodynamiques (NMAD) obtenus par l'UV-APS pour le site de compostage de carcasses et tissus animaux (site ND).	57
Figure 25 : Diamètre aérodynamique médian de la fraction fluorescente des particules microbiennes selon le site de compostage (sites CR et ND).....	58
Figure 26 : Concentrations numériques de la fraction non fluorescente des particules totales, selon le site de compostage (sites CR, ND et LP).	60
Figure 27 : Concentrations numériques de la fraction fluorescente des particules, selon le site de compostage (sites CR et ND).	61
Figure 28 : Comparaison des concentrations numériques (Grimm/UV-APS) pour le centre de compostage ND.	62
Figure 29 : Régression entre le pH mesuré dans le compost et les concentrations de moisissures cultivables (A) et d' <i>Aspergillus fumigatus</i> cultivables (B) dans	

l’air ambiant, sans égard au centre de compostage. La ligne représente la régression orthogonale de X et Y.....	66
Figure 30 : Régressions entre la teneur en eau (b.h.) mesurée dans le compost et a) les concentrations de poussières et b) les concentrations de moisissures détectées par biologie moléculaire dans l’air ambiant, sans égard au centre de compostage. La ligne sur le graphique représente la régression orthogonale de X et Y.	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADEME :	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie de la France
ADN :	Acide désoxyribonucléique
ANOVA :	Analyse de variance
ARN :	Acide ribonucléique
b.h. :	Base humide
b.s. :	Base sèche
CH ₄ :	Méthane
C/N :	Rapport carbone azote du compost
CO :	Monoxyde de carbone
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
Corr :	Coefficient de corrélation
COV :	Composés organiques volatils totaux
CR :	Centre de compostage de résidus organiques triés à la source
H ₂ S :	Sulfure d'hydrogène
HCN :	Health Council of the Netherlands
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LP :	Centre de compostage de fumiers de bovins laitiers
MDDELCC :	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MNT :	Mycobactéries non tuberculeuses
m.o./h :	Matière organique par heure
MOT :	Matière organique totale
MVA :	Masse volumique apparente

Mt :	Mégatonne
ND :	Centre de compostage de carcasses et tissus animaux
NH ₃ :	Ammoniaque
NMAD :	Diamètre médian aérodynamique en nombre
NMD :	Diamètre médian optique en nombre
N-NH ₄ :	Azote ammoniacal
NO :	Monoxyde d'azote
N ₂ O :	Protoxyde d'azote
NO ₂ :	Dioxyde d'azote
N _{tot} :	Azote total
OTU :	<i>Operational taxonomic unit</i> (unité taxonomique fonctionnelle)
PCR :	<i>Polymerase chain reaction</i> (réaction de la polymérase en chaîne)
PNCA :	Poussières non classifiées autrement
q-PCR :	<i>Quantitative polymerase chain reaction</i>
PVC :	Chlorure de polyvinyle
R ² :	Coefficient de régression
ROTS :	Résidus organiques triés à la source
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SOP :	<i>Standard operation procedure</i>
TEE :	Teneur en eau
UE :	Unité d'endotoxine
UFC :	Unité formatrice d'une colonie
UG :	Unité génomique
UV-	APS : <i>Ultra-violet aerodynamic particule sizer</i>

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Au cours des dernières années, la conscientisation écologique des populations a accru de façon importante l'intérêt envers la protection de l'environnement. Avec cette conscientisation apparaissent de nouveaux comportements favorisant le développement durable et permettant une préservation à long terme de l'environnement. Bien qu'inévitables, les déchets produits et non revalorisés par la société ont un impact néfaste sur le milieu et doivent absolument être mieux gérés. À titre d'exemple, la production de méthane, gaz à effet de serre incriminé dans les changements climatiques, représente un enjeu de taille au regard d'une meilleure gestion des déchets ⁽¹⁾. Le contrôle des émissions de méthane dans l'atmosphère va de pair avec une réduction de l'utilisation de sites d'enfouissement comme moyen de gestion des matières résiduelles organiques. Aux États-Unis, selon un rapport de l'Agence de protection de l'environnement (EPA), une hausse du taux de recyclage et de compostage des matières résiduelles municipales de 32,5 à 50 % entraînerait une réduction des émissions de gaz à effet de serre entre 70 et 80 Mt en équivalent CO₂ ⁽²⁾. La gestion rigoureuse et durable des matières résiduelles joue un rôle primordial dans la protection du climat et dans la réduction des changements climatiques.

Un des objectifs principaux de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles et du plan d'action qui l'accompagne est de bannir l'enfouissement des matières organiques d'ici 2020 ⁽³⁾. Cet objectif impose une gestion rigoureuse des déchets et exige des changements notables des habitudes et des façons de faire individuelles et collectives. Pour répondre à ces objectifs, le gouvernement québécois a instauré l'important Programme de traitement des matières organiques par la biométhanisation et le compostage ⁽³⁾.

En 2008, seulement 12 % des restes de table et des résidus verts générés par le secteur municipal ont été récupérés et valorisés ⁽³⁾. En 2010, on estimait qu'uniquement 5 % des ménages québécois avaient accès à un service de collecte des matières organiques incluant les résidus alimentaires ⁽¹⁾. La fraction restante des déchets étant en grande partie éliminée par enfouissement. Cette même année, 31 % des boues municipales et 26 % des boues des papetières étaient dirigées vers les sites d'enfouissement. Comme chaque individu doit changer ses habitudes d'élimination de ses déchets, les industries aux prises avec la production de résidus organiques doivent s'orienter vers de nouvelles solutions pour les éliminer ou les traiter. Selon le plan d'action 2011-2015 du gouvernement du Québec, le recyclage de la matière organique putrescible, soit par l'épandage sur le sol, le compostage ou la biométhanisation doit être privilégié par rapport à d'autres formes de valorisation ^(3,4). En plus de réduire la charge polluante des lieux d'enfouissement, le compostage des matières organiques produit du compost, un produit utile qui possède de nombreux avantages agronomiques dont une augmentation de la qualité des sols et une réduction de l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires ⁽¹⁾.

En 2010, au Québec, une quarantaine de sites de compostage municipaux ou industriels existait en plus d'une trentaine de lieux de compostage situés sur des fermes et destinés uniquement aux matières provenant de leurs activités agricoles ^(1,5). Les besoins en installation à moyen terme

risquent d'être plus importants. Selon le document Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), le compostage est appelé à se développer au cours des prochaines années ⁽⁴⁾. Avec le recours au compostage par les industries, le milieu agricole et les municipalités, le nombre de travailleurs qui seront appelés à œuvrer dans ce nouveau secteur d'activité augmentera au cours des prochaines années.

1.2 Le compostage

Le compostage est un mécanisme de biodégradation qui, par un processus de fermentation aérobie réalisé par les microorganismes, accélère la décomposition naturelle des résidus organiques et produit un humus stable ⁽⁶⁾. Les conditions de décomposition sont bien définies et leur respect est essentiel afin de garantir la qualité du compost produit. Une fois le compostage des résidus organiques terminé, le compost produit peut être étendu sur les sols en tant que fertilisant ⁽⁷⁾. Le compostage permet une réduction des volumes de la matière organique traitée de l'ordre de 60 à 70 % et une diminution de la demande en oxygène (ou charge polluante) de 90 % ⁽⁶⁾.

Les différentes étapes du compostage comprennent des phases contrôlées de dégradation et de maturation de la matière organique. En réalité, la succession de ces phases, les températures atteintes et la durée propre à chacune peuvent varier considérablement selon les intrants et les procédés utilisés. La phase de dégradation aérobie est à son tour composée de trois sous-phases, la phase mésophile au début du compostage (initiation), suivie de la phase thermophile (supérieure à 50 °C), puis finalement celle du refroidissement ⁽⁸⁾. Dans la phase mésophile, les microorganismes présents se développent en utilisant comme substrat les molécules simples. La dégradation de la cellulose est alors responsable de plus de 75 % de la perte de poids sec ⁽⁹⁾. Cette dégradation, reliée au développement des microorganismes, est responsable de la chaleur qui fait grimper la température du compost autour de 30 à 40 °C. Elle est suivie par la phase thermophile, où la température peut atteindre jusqu'à 80 °C. La chaleur alors dégagée détruit les pathogènes et les graines des herbacés nuisibles ^(6,7,10). À cette température, seulement les bactéries, les moisissures et les actinomycètes thermophiles subsisteront ⁽⁸⁾. Par la suite, un ralentissement de l'activité microbiologique est observé en raison du manque de substrat biodégradable : ce qui entraînera la diminution de la température du compost ^(8,9). Durant cette réduction de la température, une colonisation par les microorganismes mésophiles est observable, néanmoins ces derniers sont d'une nature différente de ceux qui sont présents lors de la phase d'initiation. Vient ensuite la phase de maturation dominée par une humidification du compost pouvant s'étaler sur plusieurs mois. La température du compost est alors inférieure à 30 °C. C'est durant cette étape que l'augmentation de la biomasse microbienne et l'arrivée des lombrics sont observées. À la toute fin, le compost stabilisé, constitué d'humus, peut être épandu pour enrichir la terre. La qualité du compostage dépend principalement d'un bon contrôle de la température et de l'humidité, d'un approvisionnement suffisant d'oxygène et de matières nutritives nécessaires à la survie des populations microbiennes responsables de la biodégradation de la matière organique ⁽¹⁰⁾.

La majorité des sites de compostage au Québec sont des systèmes en andain sur aire ouverte avec retournement mécanique ⁽¹⁾. Il existe quatre principales techniques de compostage : en andain, par aération forcée, en milieu fermé ou en version hybride combinant l'aération continue et des équipements automatisés pour le brassage. La principale différence entre ces diverses techniques réside dans la méthode d'aération des matériaux réalisée soit par l'agitation, soit par l'injection ou par les deux à la fois. L'agitation se fait par le retournement ou le brassage de la matière organique en compostage. L'injection d'air ou la ventilation forcée est réalisée en poussant (du bas vers le haut de l'empilement) ou en aspirant (du haut vers le bas) l'air à travers la masse en compostage. Les techniques de compostage en milieux « fermés » ou hybrides utilisent l'agitation ou l'injection ou la combinaison des deux techniques ⁽⁸⁾.

1.3 Types d'intrants pour le compostage

Les matières brutes pouvant servir au compostage comprennent la fraction putrescible des déchets domestiques, les biosolides, les rebuts de jardins et les feuilles mortes, les résidus des cultures agricoles, les fumiers d'animaux, les carcasses ou viscères d'animaux, les résidus de transformation des aliments, de produits forestiers ainsi que certains autres déchets biodégradables de l'industrie ⁽¹⁰⁾.

1.4 Les microorganismes et le compost

De par sa nature, le compostage nécessite l'action des microorganismes à chacune de ses phases de transformation, ce qui exige que diverses populations microbiennes se succèdent tout au long du processus. À chaque phase de compostage correspondent de ce fait des populations de microorganismes caractéristiques et, par conséquent, des émissions de bioaérosols, qui leur sont propres ^(11,12). Lors de la phase de décomposition thermophile, qui favorise certains microorganismes comme les *Aspergillus fumigatus*, les *Legionella spp* et les actinomycètes (*Saccharopolyspora rectivirgula* et *Thermoactinomyces vulgaris*), la température élevée peut aussi conduire à la libération d'endotoxines occasionnée par la lyse cellulaire des bactéries à Gram négatif ^(13,14). Dans une étude réalisée par Sykes et ses collègues en 2011, 27 % des échantillons prélevés avaient des concentrations en endotoxines supérieures à 200 UE/m³ d'air ⁽¹⁵⁾.

L'*Aspergillus fumigatus* est la moisissure responsable d'environ 80 % des aspergilloses humaines. Elle se retrouve fréquemment dans l'air des sites de compostage. *Saccharopolyspora rectivirgula* et *Thermoactinomyces vulgaris*, des actinomycètes thermophiles, sont aussi présents et peuvent provoquer des maladies respiratoires d'hypersensibilité ^(12,16-20). Les mycobactéries non tuberculeuses (MNT) ont été retrouvées dans certains composts ⁽²¹⁾ toutefois, leur présence récurrente n'est pas documentée. Les MNT sont à l'origine de problèmes de santé, comme les pneumonites d'hypersensibilité et les infections pulmonaires ⁽²²⁻²⁴⁾. Des maladies pulmonaires liées aux MNT ont été rapportées, entre autres dans des usines utilisant les fluides de coupe ⁽²⁵⁻²⁷⁾. La présence de bactéries du genre *Legionella* dans les composts a été documentée dans plusieurs pays ⁽²⁸⁻³²⁾. Plusieurs cas de maladies pulmonaires, particulièrement causées par des *Legionella* et transmises par des aérosols, ont été associés aux composts, aussi bien dans le domaine industriel que domestique ^(33,34).

Le compostage produit beaucoup de bioaérosols, en particulier lors du mouvement dynamique de la matière, par exemple lors de la réception des résidus organiques, du tri, du retournement des andains ou du déplacement du compost vers les lieux d'entreposage^(18,35-37). Au Québec, les premières études réalisées par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) sur des sites de compostage de déchets domestiques ont démontré que des concentrations élevées de microorganismes et de gaz pouvaient être émises lors des opérations de compostage^(38,39). Selon Wéry, il existait encore en 2014 un manque général d'informations concernant la dispersion des microorganismes dans l'air des usines de compostage et tout particulièrement en ce qui a trait à l'exposition des travailleurs⁽¹²⁾.

1.5 Risques pour la santé

1.5.1 Risques biologiques

Des microorganismes sont présents durant toutes les phases de transformation du compost. En plus des cellules microbiennes entières, plusieurs autres agents biologiques, par exemple les endotoxines (lipopolysaccharides membranaires des bactéries à Gram négatif), les composés de la paroi cellulaire (le glucane et le peptidoglycane des bactéries ou des champignons) et des mycotoxines sont présents et peuvent affecter la santé humaine^(12,15). Les travailleurs de ces milieux sont exposés à ces agents soit par contact ou sous la forme de bioaérosols.

Les bioaérosols sont définis comme des particules aéroportées contenant des organismes vivants, tels des virus, bactéries, moisissures et protozoaires et/ou des substances ou produits provenant de ces organismes (ex. : toxines, microorganismes morts ou fragments de microorganismes)⁽⁴⁰⁾. L'émission des bioaérosols est une préoccupation en raison des impacts sur la santé des travailleurs ou sur les personnes demeurant à proximité des usines^(36,41). Les risques reliés aux bioaérosols peuvent être d'ordre toxique, immunologique, irritatif ou inflammatoire^(41,42). Une exposition professionnelle aux bioaérosols peut être responsable de symptômes respiratoires^(16,41), de problèmes gastro-intestinaux⁽⁴³⁾ ou dermiques⁽⁴⁴⁾.

Les travailleurs des usines de compostage sont exposés à de grandes quantités de poussières, d'endotoxines et de moisissures comme l'*Aspergillus fumigatus*⁽³⁵⁾. Deacon a établi un lien entre les endotoxines et le glucane et des réponses non immunitaires aiguës et subchroniques chez des travailleurs des centres de compostage en Allemagne⁽⁴⁵⁾. Une importante association entre une exposition élevée aux bioaérosols et l'augmentation de la fréquence des pathologies respiratoires et cutanées chez les travailleurs d'usine de compostage a aussi été rapportée à plusieurs reprises^(17,44,46). Dès 1999, Kiriranta et ses collaborateurs recommandaient au minimum aux travailleurs d'usines de manutention des déchets et des sites d'enfouissement, l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI) au travail⁽⁴⁷⁾. Van Kampen *et al.*, mais aussi l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) de la France, ont souligné le fait qu'il y a une nécessité pour de meilleures évaluations des risques et des mesures de protection dans les centres de compostage afin de minimiser l'exposition des travailleurs⁽⁴⁸⁾.

En ce sens, l'IRSST propose depuis 1995 des valeurs limites d'exposition de 10^4 UFC/m³ d'air pour les bactéries totales et de 10^3 UFC/m³ d'air pour les bactéries à Gram négatif. En

s'appuyant sur les recommandations du Nordic Expert Group¹, l'IRSST proposait, en 2007, des limites de 10^4 spores/m³ d'air (équivalent théorique à 10^3 UFC/m³ d'air) de moisissures^(49,50). En ce qui a trait à l'*Aspergillus fumigatus*, dès que sa présence est détectée dans un milieu de travail, il est recommandé d'intervenir afin d'en réduire l'exposition. Pour les endotoxines, les Néerlandais proposent une limite d'exposition de 90 EU/m³ d'air. Une limite relative d'exposition correspondant à 10 fois le niveau de base pour les travailleurs symptomatiques et de 30 fois pour les autres travailleurs est également utilisée par plusieurs organismes^(38,51,52).

1.5.2 Indicateur des risques biologiques

L'évaluation exhaustive des risques biologiques présents dans un site de compostage constitue une tâche phénoménale. La recherche d'un ou de quelques indicateurs permettant une évaluation rapide des risques biologiques associés à ce milieu devient dès lors une stratégie d'évaluation qui aurait de nombreux avantages à être préconisée. L'utilisation des indicateurs de risque en microbiologie de l'eau est déjà très répandue⁽⁵³⁾. Avec des indicateurs microbiens, les risques biologiques pourraient être qualifiés facilement et rapidement par l'analyse ou par la détection de certains microorganismes ou composés plutôt que par une analyse complète de la flore microbienne. Plusieurs bioaérosols peuvent jouer ce rôle. L'*Aspergillus fumigatus*, pathogène opportuniste, serait un indicateur de risque de choix en raison des risques sur la santé humaine qu'il représente. Les endotoxines ont également été proposées comme étant un bon indicateur de l'exposition aux microorganismes pour les travailleurs exposés aux fluides de coupe⁽⁵⁴⁾. L'utilisation de l'actinomycète, *Saccharopolyspora rectivirgula*, comme indicateur spécifique de risque a aussi été proposée^(55,56).

Dans la présente étude, en raison de leur présence possible et de leur risque potentiel pour la santé, la détection des mycobactéries non tuberculeuses (MNT) et de la *Legionella* a été ajoutée aux analyses des autres marqueurs déjà proposés.

1.5.3 Risques chimiques

Les principaux gaz rencontrés lors du compostage sont le dioxyde d'azote (NO₂), le monoxyde de carbone (CO), le sulfure d'hydrogène (H₂S), le monoxyde d'azote (NO), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ammoniaque (NH₃), le dioxyde de carbone (CO₂) et les composés organiques volatils (COV) totaux^(48,57,58).

Il n'existe actuellement que peu de données sur les concentrations de contaminants microbiens et chimiques auxquelles sont exposés les travailleurs œuvrant dans le milieu du compost. La variation de l'exposition selon les intrants n'est pas non plus connue. Afin de bien comprendre l'exposition des travailleurs, et de bien évaluer les risques encourus dans le but de les contrôler, il est important d'étudier les émissions de tous ces contaminants pendant les opérations de compostage.

¹ <https://www.av.se/en/the-nordic-expert-group/>

2. PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS

2.1 Problématique

Une large variété de microorganismes pathogènes et de composés chimiques est retrouvée dans le matériel brut utilisé pour le compostage. Pendant les opérations de brassage des matières organiques à composter, des concentrations élevées de bioaérosols, de poussières et de gaz ont été rapportées dans la littérature.

2.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général est de comparer les concentrations des contaminants de l'air ambiant présent dans trois installations différentes de par le type de déchets traités et le type de procédé utilisé (type d'aération et durée des phases de compostage). Les installations étudiées traitent des résidus organiques triés à la source (ROTS) provenant d'une collecte à trois voies, des fumiers provenant d'une ferme de bovins laitiers, ainsi que des carcasses et des tissus animaux provenant d'une ferme porcine; et ce, afin d'en estimer les risques pour la santé. Les facteurs d'influence qui seront évalués sont l'impact des activités, de la période de compostage et du lot sur les concentrations mesurées.

Les objectifs spécifiques sont :

1. d'évaluer les concentrations de gaz et de bioaérosols dans l'air ambiant de trois installations ayant des type de déchets et des procédés de compostage différents;
2. de confirmer la présence de microorganismes pathogènes comme *Mycobacterium*, *Legionella* et *Aspergillus fumigatus*, et investiguer leur utilisation potentielle comme marqueurs de risques pour la santé humaine dans les usines de compostage au Québec;
3. de documenter les paramètres de compostage et les méthodes de travail entraînant des émissions de contaminants dans l'air ambiant plus faibles.

2.3 Hypothèses

H₁ : La flore microbienne aérosolisée sur les sites de compostage est influencée par le type d'intrant utilisé, les paramètres de compostage et les activités effectuées sur le compost.

H₂ : Des marqueurs microbiens spécifiques peuvent être utilisés lors de l'évaluation du risque pour la santé des travailleurs du compostage.

H₃ : Les concentrations des contaminants gazeux retrouvées dans l'air des centres de compostage sont influencées par le type d'intrant utilisé, les paramètres de compostage et les activités effectuées sur le compost.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Centres de compostage

Trois sites de compostage ont été suivis lors de ce projet. Les trois sites se distinguent par la matière différente qu'ils utilisent comme intrant dans leur compostage. Un centre effectue le compostage des résidus organiques triés à la source provenant d'une collecte à trois voies (CR), c'est-à-dire, le bac brun pour les résidus organiques, le bleu pour le recyclage en plus de la poubelle traditionnelle, le second centre s'affaire au compostage des fumiers d'une ferme de bovins laitiers (LP) et le troisième centre pratique le compostage de carcasses et de tissus animaux d'une ferme porcine (ND). Outre la matière compostée et les formulations utilisées, la manière d'aérer et de brasser l'andain pendant le compostage ainsi que les durées de compostage sont différentes entre ces sites. Le Tableau 1 présente quelques particularités des trois sites de compostage qui ont été suivis durant cette activité de recherche.

Tableau 1 : Particularités des trois centres de compostage

Type de matière compostée	Résidus organiques triés à la source (CR)	Fumiers de bovins laitiers (LP)	Carcasses et tissus animaux (ND)
Durée du compostage	3 semaines, avec retour d'une fraction du compost tamisé en tête du procédé de compostage	2 mois en cellules aérées, en plus d'une période d'entreposage variable du compost dans l'aire de maturation	7 mois en cellules statiques, convection de l'air produit par une aération naturelle du compost par l'apport d'un drain dans le plancher
Mode d'aération	En continu 24 h sur 24	En continu 24 h sur 24 et lors des brassages	Lors des brassages
Brassage	À la sortie du tunnel avant le tamisage	Pendant les déplacements entre les cellules	Avec la pelle du tracteur ou un peigne dans la cellule

Les Figures 1 et 2 présentent les sites de compostage LP et ND. Le site CR ayant refusé la prise de photo, celui-ci n'est pas représenté.



Figure 1 : Cellule de compostage du fumier (à gauche) et caniveaux d'aération (à droite) à la ferme de bovins laitiers (site LP).



Figure 2 : Cellules de compostage des carcasses et tissus animaux (à gauche) et brassage au peigne du compost (à droite) dans une ferme porcine (site ND).

3.1.1 Résidus organiques triés à la source (CR)

Les matières compostées dans ce centre viennent de la collecte de résidus organiques triés à la source provenant d'une collecte à trois voies dans un secteur résidentiel. Les matières putrescibles sont déposées à l'intérieur de bacs bruns par les citoyens. Ces matières sont ensuite collectées et transportées une fois par semaine au centre de compostage. Les citoyens peuvent aussi déposer d'autres résidus organiques dans des sacs.

Le procédé de compostage des résidus organiques triés à la source comporte quatre étapes effectuées dans les endroits suivants :

1. Aire de réception et d'accumulation des résidus organiques

Cette section n'a pas été échantillonnée, puisqu'il est difficile de connaître la durée de l'entreposage et que cette pratique d'entreposage n'est pas habituelle. C'est une aire ouverte sur l'extérieur et les matières organiques y sont entassées.

2. Salle de triage manuel

Une chargeuse prélève dans l'aire de réception les résidus organiques et les dépose dans la trémie qui sert à ouvrir les sacs s'il y en a. Cette machine déverse ensuite son contenu sur le convoyeur de la salle de triage manuel. Des employés placés devant le convoyeur effectuent alors un triage négatif qui consiste à retirer les sacs de plastique éventrés ainsi que toutes autres matières indésirables pour le compostage.

3. Tunnels (cellules) de compostage intérieur

Après le triage, les résidus organiques destinés au compostage sont acheminés vers l'entrée de deux tunnels. Ces deux tunnels de 16 m de longueur opèrent en parallèle et constituent la zone de compostage contrôlé. Le temps de séjour entre l'entrée et la sortie du tunnel est d'environ 21 jours. Les matières en compostage sont poussées dans ces tunnels par deux pistons appuyés sur un mur mobile (bélier) qui fait avancer la matière de près de 0,75 m par jour. Un réseau de distribution d'air alimentant le compost en oxygène est aménagé dans le plancher de chacun des tunnels. Il s'agit d'un surpresseur fonctionnant 24 h sur 24 et qui pousse l'air vers les cellules de compostage. L'oxygène traverse ainsi la masse de compost du bas vers le haut. Un effluent gazeux chaud s'échappe alors sur le dessus du compost et est évacué par le haut du tunnel.

4. Aire de maturation extérieure

Après avoir séjourné dans le tunnel, la matière compostée est broyée puis tamisée avant d'être entreposée dans une zone extérieure dite de maturation. Sur ce site, une partie du compost tamisé est retournée en tête des tunnels pour accélérer l'amorce du compostage.

3.1.2 Fumiers de bovin laitier (LP)

Le procédé de compostage du fumier de bovin à la ferme laitière s'effectue également en 4 étapes. Constitué d'un mélange de déjections animales (fèces et urines) et de litières (paille), utilisées pour la propreté des animaux, le fumier est évacué quotidiennement de l'étable par une chaîne d'écureurs qui le déplace vers une salle d'entreposage. Après un mois d'accumulation, le fumier est transporté de ce lieu d'entreposage intérieur vers la première cellule de compostage. Quatre semaines plus tard, le compost est à nouveau déplacé, donc brassé, vers une seconde cellule de compostage. Les cellules de compostage permettent une hauteur d'entreposage de 2,1 m. C'est par le biais d'un ventilateur de type cage d'écureuil et de caniveaux dans le plancher de chacune des cellules que l'air est distribué de façon continue et régulière, et ce, en tout temps. Cela permet l'apport en oxygène de la matière en compostage. Après 2 mois de compostage en cellule aérée et 2 brassages avec la chargeuse, le compost est déplacé vers une aire de maturation où il poursuivra sa transformation pendant 1 à 3 mois avant d'être épandu sur des terres agricoles.

3.1.3 Carcasses et tissus animaux (ND)

Le compostage des carcasses et des tissus animaux à la ferme porcine s'effectue en plusieurs étapes. La première consiste à étendre une couche de résidus carbonés de 30 à 40 cm d'épaisseur au fond d'une cellule de compostage. Le type de résidu varie; il peut s'agir de foin, de copeaux de bois ou d'un autre matériel, selon leur disponibilité. Un rang de carcasses, qui peut aussi contenir des placentas, est déposé sur cette couche de fond. Elle est ensuite recouverte d'une seconde couche de résidus carbonés puis d'une autre couche de carcasses et ainsi de suite. Une période d'un mois est nécessaire pour remplir une cellule. Le remplissage est donc constitué d'un assemblage non uniforme de carcasses et de résidus carbonés. Lorsque 3 ou 4 rangs de résidus carbonés et de carcasses ont été déposés, la cellule de compostage subit alors sa première agitation à l'aide d'une chargeuse équipée d'un peigne en acier. Cette toute première étape constitue l'initiation de la phase de compostage. Un mois plus tard, la matière en compostage dans la cellule est brassée à nouveau et déplacée de cette cellule vers une seconde cellule. Trois mois plus tard, le compost est à nouveau brassé. Après environ 7 mois de compostage, le compost est déplacé à l'extérieur des cellules et entreposé à une trentaine de mètres directement sur le sol pour sa phase de maturation. Dans l'ensemble de ce procédé de compostage, aucune aération mécanique (c.-à-d. avec un ventilateur) du compost n'est effectuée. Seule la convection naturelle produite par l'élévation de la chaleur provoque l'aération entre les brassages.

3.2 Méthode d'échantillonnage

3.2.1 Postes d'échantillonnage

Pour chacun des sites (CR, LP et ND), plusieurs campagnes de prélèvement ont été prévues afin de suivre la transformation de la matière organique en compost. Des échantillons d'air ont été prélevés lors des différentes activités d'opération. Lors de chaque visite, cinq séries d'échantillons ont été recueillies; une avant le début des activités servant de contrôle sans

activité, trois échantillons en série lors de la manutention de la matière compostée par les travailleurs, et une série pour les échantillons de l'air extérieur prélevés en amont des vents par rapport au centre de compostage.

Chaque poste de prélèvement a été localisé le plus près possible de la matière en compostage, mais de façon à ne pas interférer avec le travail en cours. Des compromis ont été faits de façon à ne pas nuire à la circulation des travailleurs ou de l'équipement lourd (chargeuse). Aucun échantillon personnel n'a été prélevé durant cette étude.

Les sites de compostage visités étaient constitués de zones extérieures, intérieures quasi ouvertes ou fermées. Des courants d'air instables et variables y circulaient la majorité du temps. Il a été impossible de localiser les postes d'échantillonnage dans les conditions d'écoulements d'air idéales. De façon générale, ils ont été placés en aval à angle par rapport à l'écoulement d'air. Le Tableau 2 présente un résumé des différents postes pour chacun des sites.

Au centre de compostage de résidus organiques triés à la source (CR), les échantillons ont été prélevés dans la salle de triage manuel, le seul poste dans un environnement fermé du projet. À ce poste, les prélèvements ont été faits à proximité du convoyeur duquel les travailleurs retiraient les matières non putrescibles avant l'acheminement des résidus organiques dans les tunnels. D'autres échantillons ont été prélevés à la sortie des tunnels dans une zone quasi ouverte au poste de transfert vers le broyeur. Aucun prélèvement n'a été fait dans l'aire de maturation de ce site en raison de l'exposition limitée des travailleurs dans ce secteur. Les prélèvements de l'air extérieur ont été effectués à plusieurs dizaines de mètres du site de compostage, en amont, dans la direction des vents du site.

Pour le fumier provenant de la ferme de bovins laitiers (LP), les postes d'échantillonnage ont été localisés dans la majorité des cas à l'intérieur même des cellules de compostage lorsque celles-ci n'étaient pas trop remplies. Ces cellules sont des rectangles ouverts sur l'extérieur dans leur partie supérieure. L'ensemble est recouvert d'une toiture de protection en bâtière. Un poste a été localisé dans un champ à proximité de la zone d'épandage. Les prélèvements de l'air extérieur ont été effectués en amont dans la direction des vents des cellules de compostage, à quelques dizaines de mètres, près des champs, mais éloigné de la ferme.

Le site de compostage des carcasses et tissus animaux (ND) comprend plusieurs cellules connexes rectangulaires séparées par des murs en béton et qui sont également ouvertes dans leur partie supérieure. L'ensemble des cellules est recouvert d'une toiture en bâtière. Les postes d'échantillonnage étaient situés à l'extérieur des cellules, vis-à-vis des murs de séparation entre les portes et donc à proximité de la zone de travail. Les prélèvements de l'air extérieur ont été effectués à une dizaine de mètres en amont du site de compostage par rapport au vent.

Tableau 2 : Poste d'échantillonnage pour les trois centres de compostage

Résidus organiques triés à la source (CR)	Fumiers de bovins laitiers (LP)	Carcasses et tissus animaux (ND)
• Salle de triage manuel • Sortie du tunnel de compostage	• Aire d'entreposage du fumier frais (initiation) • Cellule de compostage lors d'un brassage • Aire de maturation	• Aire d'accumulation des carcasses et tissus (initiation) • Cellule de compostage lors d'un brassage (1 et 3 mois) • Aire de maturation

3.2.2 Compost

De la matière en compostage a été prélevée au même moment, au même poste et à proximité des postes d'échantillonnage des gaz, des poussières et des bioaérosols. Seuls les résidus organiques entreposés dans l'aire de réception et d'accumulation du CR n'ont pas été échantillonnés puisque le processus de compostage n'y est pas amorcé. Par contre, les mesures de la température et de la teneur en oxygène y ont été effectuées comme pour les autres postes d'échantillonnage. Les mesures de température ont été prises en 5 points localisés à une profondeur d'environ un mètre et espacées de façon à couvrir le tas autant que possible.

L'ensemble des méthodes analytiques utilisées pour mesurer chacun des paramètres du compost est présenté au Tableau 3.

Tableau 3 : Paramètres et méthode utilisée pour l'analyse du compostage

Paramètre	Nom de la méthode normée ou de l'appareil de mesure	Commentaire
Teneur en eau (TEE) sur base humide	ASTM D2974	Méthode utilisée pour les analyses de compost en conformité avec les exigences de la norme BNQ 0413-200, 2005
Teneur en matière organique totale (MOT) sur base sèche	ASTM D2974	
Teneur en azote totale (N_{tot}) sur base sèche ou humide	AGDEX 533, CPVQ, méthode d'analyse des sols, fumiers et composts	
Rapport carbone organique sur azote total (C/N)	Calculé à partir des résultats d'analyse de la teneur en MOT et N_{tot} par la formule suivante : $C/N = MOT/2/N_{\text{tot}}$	
Masse volumique apparente (MVA)	Rapport de la masse sur le volume non compacté	Dans une chaudière de 20 L Moyenne du résultat de cinq mesures
Température dans le compost (°C)	Oméga modèle KQXL-14U (thermomètre à cadran) et Control Company modèle A-90205-00 (thermocouple numérique)	Prise en 5 points à environ 1 m de profondeur
Teneur en oxygène (O_2)	Sonde Advanced Instruments Inc. Modèle de la série GPR-20	Mesures d' O_2 dans les interstices du compost
Vitesse (V) de l'air dans la conduite d'aération (m/s)	TSI, modèle VelociCalc Plus 9565-P	Anémomètre à fil chaud
Débit d'aération (Q) (m^3 d'air/h)	Calculé à partir de la vitesse de l'air et de la surface de la conduite : $Q = V \times A$	
Taux d'assimilation en oxygène	Respiromètre Arthur No. 026-201 (Respirometry Plus LLC)	Mesure de la maturité d'un compost

La température et le taux d'humidité de l'air extérieur pour chaque poste de prélèvement ont aussi été mesurés à l'aide d'un psychromètre (Psychro-Dyne, Industrial Instruments & Supplies, PA, États-Unis). Le Tableau 4 présente les températures et les taux d'humidité de l'air extérieur mesurés lors de chaque campagne de prélèvement dans les trois sites.

Tableau 4 : Opérations, température et taux d'humidité de l'air extérieur lors des journées d'échantillonnage, à chaque site de compostage

Visite	Site	Lot	Opération	Température sèche (°C)	Humidité (%)
1	CR	1	Triage	7	34
2		1	Tunnel de compostage (sortie)	10	IM
3		2	Triage	19	42
4		2	Tunnel de compostage (sortie)	19	73
1	LP	1	Initiation : remplissage avec du fumier de l'étable	20	37
2		1	Brassage 1 : transfert de cellule	24	48
		2	Initiation : remplissage avec du fumier de l'étable	24	56
3		1	Brassage 2 : transfert vers la cellule de maturation	24	64
		2	Brassage 1 : transfert de cellule	29	47
4		1	Épandage au champ	35	45
		2	Brassage 2 : transfert vers la cellule de maturation	29	57
5		2	Épandage au champ	15	65
1	ND	1	Initiation montage de l'andain	28	40
2		1	Brassage 1 : transfert de cellule	27	54
3		1	Brassage 2 : transfert de cellule	22	90
		2	Initiation montage de l'andain	21	90
4		2	Brassage 1 : transfert de cellule	1	64
5		2	Brassage 2 : transfert de cellule	5	71
		IM	Transfert vers la cellule de maturation	5	71

CR : Centre de compostage de résidus organiques

LP : Ferme laitière (fumier de bovins)

ND : Ferme porcine (carcasses et tissus animaux)

IM : information manquante

3.2.3 Bioaérosols cultivables

Les échantillons d'air pour le prélèvement des bioaérosols cultivables ont été effectués avec des impacteurs de marque Andersen (Tisch Environmental, OH, États-Unis), soit dans la version N-6 pour les mycobactéries non tuberculeuses (MNT) et les bactéries à Gram négatif ou dans la version à six étages pour les moisissures et bactéries mésophiles, les *Aspergillus fumigatus* et les actinomycètes thermophiles. La durée de chaque prélèvement était de 2 min. Les pompes à haut débit (Gast Manufacturing Inc., Benton Harbor, MI, États-Unis) ont été préalablement ajustées à un débit de 28,3 L/min avec un débitmètre massique série 4000 modèle 4043 (TSI Inc.,

Shoreview, MN, États-Unis) avant chaque série de prélèvements. Par la suite, les échantillonneurs étaient chargés avec des boîtes de Pétri contenant 35 mL de gélose. L'extrait de malt (MEA; Difco; Becton, Dickinson and Company, NJ, États-Unis) additionné de 50 µg/mL de chloramphénicol a été utilisé pour l'analyse des moisissures mésophiles et des *Aspergillus fumigatus*, les bactéries mésophiles et les actinomycètes thermophiles étaient prélevés sur un milieu de gélose trypticase soja (TSA, Difco) avec de l'amphotéricine B (5 µg/mL; Sigma-Aldrich) alors que pour la détection des bactéries à Gram négatif, un milieu à gélose MacConkey (MCK; Difco) était utilisé.

3.2.4 Biologie moléculaire et analyse génomique

Le prélèvement des échantillons pour analyse par biologie moléculaire a été effectué à très haut débit en utilisant un échantillonneur Coriolis µ[®] (Bertin Technologies, Montigny-le-Bretonneux, France). Le liquide de collection était un tampon phosphate stérile ayant une concentration de 50 mM (PBS) avec un pH de 7,4. Le débit pour chaque prélèvement était de 200 L/min et durait 10 minutes.

3.2.5 Endotoxines

Les prélèvements pour les endotoxines ont été réalisés avec des cassettes Button de 25 mm (SKC Inc., Eighty Four, PA, États-Unis) à trois sections et munies d'une membrane en fibre de verre, prétraitée à la chaleur, avec une porosité de 1 µm et une efficacité de 99,98 % pour les particules plus grandes que 0,3 µm (A/E n° 61652, PALL, Mississauga, Ontario). La durée des échantillonnages a varié entre 60 et 120 minutes selon le prélèvement. Le débit des pompes à haut débit Leland Legacy (SKC Inc., Eighty Four, PA, États-Unis) a été ajusté à 9 L/min.

3.2.6 Poussières totales (PNCA)

Les poussières ont été prélevées à l'aide de cassettes à deux sections munies d'enceintes Accu-CAP[®] (SKC Inc., Eighty Four, PA, États-Unis) chargées d'un filtre CPV prépesé (chlorure de polyvinyle, 0,8 µm). Le débit a été ajusté à l'aide d'un débitmètre massique série 4100 modèle 4146 (TSI Inc., Shoreview, MN, États-Unis) à 2 L/min, selon les recommandations du Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air de l'IRSST⁽⁵⁹⁾. La durée de chaque prélèvement était de 120 minutes.

3.2.7 Poussières UV-APS

Les concentrations et les granulométries des aérosols émis lors des activités ont été mesurées en temps réel, en poste fixe, à l'aide d'un granulomètre aérodynamique à fluorescence UV-APS Model 3314 (TSI Inc., Shoreview, MN, États-Unis). Ce granulomètre mesure le diamètre aérodynamique et l'intensité de la lumière diffuse ainsi que celle de la fluorescence de chaque particule aérogène. Il mesure les propriétés de fluorescence ultraviolette, émise entre 420 et 575 nm, pour chacune de ces particules à partir d'une longueur d'onde d'excitation à 355 nm. La fluorescence émise à ces longueurs d'onde est considérée par le fabricant comme propre aux microorganismes. Cet appareil permet le suivi en continu du nombre de particules présentes

dans l'air et une discrimination entre celles d'origine biologique et les autres. La structure fine ou la granulométrie d'un aérosol ambiant est aussi mesurée, pour les particules dont le diamètre aérodynamique se situe entre 0,5 et 15 µm. Cet instrument est indispensable à la réalisation d'un projet qui s'intéresse aux impacts des types d'opérations sur le compost. Une évaluation instantanée ne peut, en effet, être effectuée avec les méthodes conventionnelles par culture ou par biologie moléculaire.

3.2.8 Composés gazeux et composés organiques volatils (COV)

Le dioxyde d'azote (NO₂), le monoxyde de carbone (CO), le sulfure d'hydrogène (H₂S), le monoxyde d'azote (NO) et les composés organiques volatils (COV) ont été analysés à l'aide d'instruments à lecture directe utilisant des piles électrochimiques (MX6 iBrid, Industrial Scientific, Pittsburg, PA, États-Unis). Le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ammoniaque (NH₃) ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre vibroacoustique (Brüel & Kjaer, modèle 1302, Nærum, Danemark). Le dioxyde de carbone (CO₂) a été analysé par spectrophotométrie infrarouge (MX6 iBrid, Industrial Scientific, Pittsburg, PA, États-Unis). Les concentrations de gaz mesurées ont été comparées aux normes, alors que les COV totaux ont été comparés aux valeurs rapportées dans la littérature scientifique (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeur limite d'exposition des travailleurs selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail ⁽⁶⁰⁾ pour une période de 8 heures

Composé gazeux	Valeur limite d'exposition
H ₂ S	10 ppm
CO	35 ppm
CH ₄	1,25 %
CO ₂	5000 ppm
NH ₃	25 ppm
NO	25 ppm
NO ₂	3 ppm
N ₂ O	50 ppm
COV	Éthanol 1000 ppm

3.3 Méthodes analytiques

3.3.1 Dosages des composés dans le compost

Pour chacun des postes de prélèvement de la matière solide (résidus organiques, fumiers, carcasses et tissus animaux, etc.), un mode commun d'échantillonnage a été utilisé pour tous les centres. Pour chacune des campagnes de prélèvement, trois échantillons de matière solide étaient recueillis durant la même période que celle de l'échantillonnage de l'air. Puisque cette période durait environ vingt minutes, la constitution des échantillons de la matière solide a été effectuée par séquence toutes les 2 minutes, cela a permis d'obtenir 10 sous-échantillons. Les échantillons ont été prélevés dans la pelle de la chargeuse avant, dans l'andain ou sur le convoyeur. Une fois complété, le contenu de la chaudière était brassé afin de bien l'homogénéiser. Avant d'être analysés en laboratoire, les échantillons étaient conservés dans des chaudières de 10 litres. Au fur et à mesure que l'échantillon était constitué, la température de la matière solide était mesurée. Chacun des prélèvements a été analysé en duplicata. Lorsque la variabilité du résultat dépassait 2 %, une troisième analyse était alors effectuée. La mesure de la masse volumique apparente (MVA) a été effectuée directement aux centres. Pour ce faire, le compost était placé dans une chaudière graduée pour le volume et le tout était pesé avec une balance à ressort.

3.3.2 Bioaérosols cultivables

Après échantillonnage, les boîtes de Pétri ont été incubées pendant 48 à 72 heures, à 25 °C pour les moisissures mésophiles et à 45 °C pour les *Aspergillus fumigatus*. Les boîtes de Pétri pour les bactéries mésophiles et les bactéries à Gram négatif ont été incubées pendant 24 à 48 heures à 25 °C alors que ceux pour les actinomycètes thermophiles l'ont été à 52 °C. Les colonies présentes sur les boîtes de Pétri ont été dénombrées après 24 et 48 heures pour les bactéries et après 48 et 72 heures pour les moisissures. Le dénombrement a été réalisé selon la méthode des trous positifs^(61,62). Avant d'en faire le dénombrement, les *Aspergillus fumigatus* ont été caractérisés morphologiquement grâce aux critères microscopiques et macroscopiques décrits dans la littérature. Les concentrations en microorganismes cultivables ont été exprimées en unités formant des colonies par mètre cube d'air (UFC/m³ d'air).

3.3.3 Biologie moléculaire et analyse génomique

3.3.3.1 Extraction d'ADN – analyses de biologie moléculaire

3.3.3.1.1 Échantillons d'air

Une quantité de 1,5 mL du liquide collecteur des échantillons d'air fait avec le Coriolis a été centrifugée (10 min à 14 000 x g) et les culots ont été stockés à -20 °C, jusqu'à ce que l'extraction d'ADN puisse être réalisée. L'ADN génomique total a été extrait en utilisant le kit PowerLyser® Ultraclean® d'isolation d'ADN microbien (MO BIO Laboratories Inc., Carlsbad, CA, États-Unis) selon les instructions du fabricant. Lors de cette procédure d'extraction, l'homogénéisation du contenu en ADN a été effectuée avec un Mixer Mill MM301 (Retsch, Düsseldorf, Allemagne) à 20 mouvements par minute pendant 10 minutes. L'ADN total a été

élué dans 50 µL du tampon d'élution fourni. Les extraits d'ADN ont ensuite été conservés à -20 °C.

3.3.3.1.2 Échantillons solides

Les échantillons de compost ont été homogénéisés à l'aide d'un appareil Stomacher Mix 1 (AES Laboratoire (P) Ltée, Bruz, France). Pour ce faire, 25 g de chaque échantillon de compost recueillis ont été placés dans un sac FILTRA-BAG (Labplas Inc., Sainte-Julie, Québec) avec 200 mL de tampon phosphate salin contenant du Tween 20 à 0,05 % (Sigma-Aldrich, Oakville, Ontario). La suspension a été homogénéisée pendant 30 secondes avant d'en prélever une aliquote de 1,5 mL. Toutes les aliquotes ont ensuite été centrifugées avant d'être traitées à l'aide de la même procédure que celle utilisée pour les échantillons d'air.

3.3.3.2 Détection par PCR quantitative (q-PCR)

Différentes analyses plus spécifiques par q-PCR ont été réalisées sur les extraits d'ADN des échantillons. Ainsi, des tests de détection spécifiques ont été effectués pour les bactéries totales, les bactéries *Legionella spp*, *L. pneumophila* et *Saccharopolyspora rectivirgula*, ainsi que les moisissures de genre *Penicillium* et *Aspergillus* ainsi qu'*Aspergillus fumigatus* et *Neosartorya fischeri*. La spécificité des deux derniers systèmes ne permet pas de discriminer entre les *Aspergillus spp* et les *Penicillium spp*, ou entre *A. fumigatus* et *N. fischeri*, leur détection se fait simultanément par chaque système. Les amorces, les sondes ainsi que les programmes d'amplification de la q-PCR sont présentés au Tableau 6.

L'amplification de l'ADN a été réalisée avec le thermocycleur CFX384 de Bio-Rad (Bio-Rad Laboratories, Mississauga, Ontario). Les amorces et les sondes utilisées ont été achetées chez Integrated DNA Technologies (Coralville, IA, États-Unis). Le mélange PCR contenait 2 µL de l'extrait d'ADN à tester, 0,4 pmol/L de chacune des amorces, 0,08 pmol/L de la sonde, et 10 µL de master mix (2X, QuantiTect Probe PCR kit, Qiagen, Mississauga, Ontario) dans un mélange réactionnel final ajusté avec 20 µL d'eau PCR. Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel Bio-Rad CFX Manager version 3.0.1224.1015 (Bio-Rad Laboratories, Mississauga, Ontario). Une courbe standard, construite à l'aide d'un vecteur plasmidique comportant un fragment du gène cible sélectionné selon les systèmes de détections, a été utilisée pour réaliser la quantification.

Tableau 6 : Amorces, sondes et protocoles de la PCR utilisés pour les détections spécifiques des microorganismes recherchés

Microorganisme (gène)	Amorce et sonde	Protocole PCR
Bactéries totales (ADNr 16S) (63)	EUB (TaqMan [®]) EUBR : 5'-GACARCCATGCASCACCTG-3' EUBF : 5'-GGTAGTCYAYGCMSTAAACG-3' EUBP : 5'-FAM-TKCGCGTTGCDTCGAATTAAWCCAC-IBTMFQ-3'	Dénaturation : 95 °C (3 min) Hybridation : 95 °C (20 s) Élongation : 62 °C (60 s) Cycles : 40
Legionella spp (MIC) « totale » (64)	Leg (TaqMan [®]) Gène : LegR : 5'-GGCGATGACCTACTTTCG-3' LegF : 5'-CTAATTGGCTGATTGTCTTGAC-3' LegS : 5'-FAM-CGAACTCAGAAGTGAAAC-3'	Dénaturation : 95 °C (5 min) Hybridation : 95 °C (15 s) Élongation : 60 °C (60 s) Cycles : 45
L. pneumophila (MIC) (65)	LegMip (TaqMan [®]) Mip2-AR : 5'-GYT TTG CCA TCA AAT CTT TCT GAA-3' Mip1-AF : 5'-GCA TTG GTG CCG ATT TGG-3' MipS : 5'-FAM- CCA CTC ATA GCG TCT TGC ATG CCT TTA -3'	Dénaturation : 95 °C (5 min) Hybridation : 95 °C (15 s) Élongation : 57 °C (10 s) Cycles : 45
Mycobactérie (ADNr 16S) (66)	pMyc (SYBR [®] Green) pMyc7R : 5'-GGC CGG CTA CCC GTC GTC-3' pMyc14F : 5'-GRG RTA CTC GAG TGG CGA AC-3'	Dénaturation : 95 °C (3 min) Hybridation : 95 °C (10 s) Élongation : 65 °C (30 s) Cycles : 40
Penicillium, Aspergillus et Paecilomyces variotii (ADNr18S) (67)	PenAsp1mgb (TaqMan [®]) PenAspR1 : 5'-GCC CGC CGA AGC AAC-3' PenAspF1 : 5'-CGG AAG GAT CAT TAC TGA GTG-3' PenAspP1mgb : 5'-FAM-CCA ACC TCC CAC CCG TG-TAMRA-3'	Dénaturation : 94 °C (3 min) Hybridation : 94 °C (15 s) Élongation : 60 °C (60 s) Cycles : 40
A. fumigatus; Neosartorya fischeri (ADNr18S) (67)	Afumi (TaqMan [®]) AfumiR1 : 5'-CCGTTGTTGAAAGTTTAACTGATTAC-3' AfumiF1 : 5'-GCCCCGCCGTTTCGAC-3' AfumiP1 : 5'-CCCCGCCGAAGACCCCAACATG	Dénaturation : 94 °C (3 min) Hybridation : 94 °C (15 s) Élongation : 60 °C (60 s) Cycles : 40
S. rectivirgula (ADNr 16S) (68)	Sac (SYBR [®] Green) Sac-183R : 5'-ACCATGCGGCAGAATGTCCT-3' Sac-86f : 5'-TGTGGTGGGGTGGATGAGT-3'	Dénaturation : 98 °C (3 min) Hybridation : 98 °C (30 s) Élongation : 59,6 °C (35 s) Cycles : 40

3.3.3.3 Biodiversité

3.3.3.3.1 Pyroséquençage

Les préparations d'amplicons pour le pyroséquençage ont été réalisées par la plateforme d'analyses génomiques de l'Institut de biologie intégrative et des systèmes (IBIS², Université Laval) en utilisant des amorces de fusion pour les codes-barres ciblant la région codante de l'ARNr 16S des procaryotes. Un code-barres différent a été attribué pour chacun des échantillons. Le pyroséquençage a été réalisé avec la plateforme MiSeq (Illumina®, San Diego,

² <http://www.ibis.ulaval.ca/?pg=sequencage>

CA, États-Unis) en utilisant une approche de 2 fois 300 paires de base (2X300pb). Les séquences obtenues furent ensuite déposées dans le portail bio-informatique BaseSpace (Illumina®, San Diego, CA, États-Unis) qui permet la conservation et la gestion des séquences.

3.3.3.3.2 Analyse des séquences

Après la procédure standard d'assurance qualité effectuée sur tous les amplicons, les séquences résiduelles ont été traitées en utilisant l'outil bio-informatique *mothur* (Shloss, 2009). Un sous-échantillon de 50 000 séquences par échantillon a été analysé en suivant le protocole pour les amplicons issus de la plateforme MiSeq (MiSeq [SOP]) (Kozich, 2013). Après l'assemblage des régions contiguës, seules les séquences ayant une longueur comprise entre 436 et 441 paires de base ont été conservées. L'ensemble des séquences a ensuite été regroupé en unité taxonomique fonctionnelle (*operational taxonomic unit* ou OTU). Pour ce faire, le seuil d'identification minimum retenu a été de 0,03 %. Les identifications taxonomiques de chaque OTU ont alors été réalisées avec l'outil *Mothur* en comparant les séquences produites à celles de la base de données de références SILVA_119⁽⁶⁹⁻⁷¹⁾. Pour cette étape d'identification, un seuil de similarité de 99 % entre les séquences a été utilisé. Les similarités entre les différentes communautés microbiennes obtenues ont été représentées selon une échelle multidimensionnelle non métrique, en utilisant les dissemblances de Bray-Curtis, après une standardisation de type Hellinger⁽⁷²⁾. Les indices de Shannon et de richesses ont aussi été calculés à l'aide de l'outil *mothur*.

3.3.4 Endotoxines

Tous les échantillons d'endotoxine ont été analysés par la méthode chromogénique du LAL en utilisant le principe cinétique de détection selon la méthode IRSST-332⁽⁷³⁾. Le tampon de reconstitution utilisé pour ce projet possédait une spécificité accrue pour les endotoxines afin de réduire les risques d'interférence produites par le 3-1- β glucane ou d'autres produits. Une courbe standard dupliquée a été effectuée pour chaque plaque, son étendue allant de 1 à 0,01 UE/mL. Les duplicatas devaient avoir une variation de 4 % ou moins pour être acceptés. Tous les échantillons ont été analysés à l'aide d'un ajout dosé pour lequel un pourcentage minimal de récupération de 50 % devait être obtenu afin de considérer le résultat. Si une interférence était démontrée, l'échantillon devait être dilué par un facteur de 1/100 à 1/10 000, si les concentrations en endotoxines présentes dans l'échantillon le permettaient. Chaque plaque contenait également des contrôles positifs et négatifs. Tous les contrôles effectués ont permis d'obtenir des résultats fiables et de hautes qualités. La limite de détection pour les endotoxines dans ce projet est de 3 UE/m³ d'air pour un volume d'échantillonnage de 0,6 m³.

3.3.5 Poussières totales (PNCA)

Les analyses gravimétriques ont été effectuées à l'aide d'une balance micrométrique ayant une résolution de ± 1 μ g. Les filtres subissaient un traitement au dessiccateur avant d'être pesés après une période d'acclimatation aux conditions ambiantes de la chambre de pesée à humidité contrôlée. Les détails de la méthode analytique figurent dans la méthode IRSST 48-1^(59,74).

3.3.6 UV-APS

L'appareil UV-APS a été utilisé pour les deux premiers des quatre échantillonnages au centre de compostage de résidus organiques triés à la source provenant d'une collecte à trois voies (CR) et pour les trois derniers du site de compostage des carcasses. Le compteur de poussières GRIMM, modèle 1.108 (GRIMM Aerosol Technik GMBH & Co., Ainring, Allemagne) a été utilisé pour les autres campagnes de prélèvement. L'UV-APS effectuait des mesures en continu sur des périodes de 5 min tandis que le GRIMM les effectuait sur des périodes de 1 minute. Aucune analyse de densité ni de microscopie quant à la forme des particules n'a été faite.

Après échantillonnage, la médiane des granulométries obtenue pour chaque période avec un appareil a été calculée. Les médianes et ses quartiles à 0, 25, 75 et 100 % ont ensuite été calculés pour l'ensemble des médianes relatives à un poste d'échantillonnage. Selon le cas, les médianes ont ainsi été calculées à chaque poste d'échantillonnage pour toutes les particules au total et pour les fluorescentes à partir des données de l'UV-APS, ainsi que pour les particules au total à l'aide des données du GRIMM.

3.4 Analyses statistiques

La distribution des données a été vérifiée à l'aide de l'observation visuelle des graphiques des boîtes à moustaches et des tests de distribution de Martinez-Iglewicz. En raison de la distribution log-normale des données, les moyennes géométriques ont été utilisées. Trois facteurs ont été définis pour les besoins des analyses statistiques soient : activité, phase et lot. Le premier facteur concerne l'activité et permet de comparer les concentrations de contaminants mesurées dans l'air extérieur (seulement pour les microorganismes) ainsi que dans l'air ambiant à proximité des postes de travail avant et après le début de la manipulation du compost. Le deuxième facteur relatif à la phase de transformation du compost permet de comparer les concentrations selon l'état d'avancement du compostage. Le troisième facteur se réfère au numéro du lot suivi. En effet, pour chaque centre, deux lots distincts ont été suivis durant le compostage. Ce facteur visait à vérifier si une variation est notable, peu importe le lot, ou si la variation est dépendante de la matière organique initiale pour chaque centre. Les effets des trois facteurs sur les concentrations ont été estimés par des analyses de variance (ANOVA) sur les données transformées de façon logarithmique. Pour les facteurs « phase » et « lot », seulement les concentrations mesurées pendant le travail des employés ont été utilisées. Enfin, un test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer a été utilisé sur les facteurs significatifs afin d'établir les différences entre les groupes. Le niveau de signification utilisé pour les tests statistiques est de $p < 0,05$. Les coefficients de corrélation ont été déterminés pour l'ensemble des combinaisons possibles entre les données des paramètres du compost et les concentrations de contaminants dans l'air. Pour l'ensemble des combinaisons ayant démontré une corrélation significative, la régression orthogonale a été calculée et est rapportée graphiquement. Tous les tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel NCSS 10 dans sa version 10.0.06⁽⁷⁵⁾.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Compost

Les étendues des mesures calculées pour l'ensemble des paramètres de suivi du compost sont rapportées au Tableau 7 pour chacun des lots et des centres de compostage étudiés. L'ensemble de ces paramètres permet de suivre l'évolution du procédé de compostage ainsi que la qualité du compost produit.

Tableau 7 : Résumé des paramètres de compostage mesurés dans les trois centres de compostage

Paramètre		Valeur optimale	ND	LP	CR
Température	°C	50 à 60	L1* : 53 à 59 L2* : 43 à 64	~ 60	~ 60 Entreposage : 20 à 30
Teneur en O ₂	%	supérieur à 5	L1 : 10 à 15 L2 : ~ 15	~ 5	L1 : 13 L2 : 5
Masse volumique apparente base humide	kg/m ³	inférieur à 700	300 à 400	500 à 300	L1 : ~ 470 L2 : ~ 515
Teneur en eau base humide	%	40 à 60	~ 50	L1 : 65 à 75 L2 : ~ 70	L1 : ~ 50 L2 : ~ 45
Azote totale base sèche	%	aucune valeur spécifique	3 à 4,5	L1 : 1,5 à 3 L2 : 2 à 3	L1 : 1 à 2 L2 : 1,7 à 1,9
Rapport C/N		25 à 35	10 à 15	L1 : 15 à 25 L2 : 5 à 15	L1 : 14 à 25 L2 : 15 à 17
pH		6 à 8	L1 : 5,5 à 6 L2 : 6 à 7	L1 : 8 à 9 L2 : ~ 9	L1 : 7,4 L2 : 6,5
Taux d'assimilation en O ₂	(mg O ₂ /kg m.o./h)	Compost mature : inférieur à 400	L1 : ~ 2000 L2 : 1500 à 4700	L1 : B 800 à 1500 L2 : 500 à 1000	L1 : 3000 à 5000 L2 : 3500 à 4800

* L1 : lot 1 L2 : lot 2

Les mesures pour l'azote total, pour le rapport C/N et pour le taux d'assimilation en O₂ se retrouvent systématiquement en dehors des valeurs optimales rapportées. Celles de la température (1 cas sur 5), du pH (3 cas sur 6) et de la teneur en eau base humide (2 cas sur 5) se retrouvent à l'extérieur de ces valeurs à quelques reprises. Seules les mesures de la MVA se situent toujours à l'intérieur des valeurs optimales recommandées.

Le suivi des températures permet de remarquer que toutes les campagnes de prélèvement ont été effectuées durant la phase active du compostage. Effectivement, les températures optimales de compostage se situent entre 50 et 60 °C alors que la phase de maturation se fait à des températures inférieures soit autour de 40 °C. Toutes les mesures étaient supérieures à 40 °C, sauf pour un lot en entreposage au centre de compostage de résidus organiques (CR).

Les graphiques représentés aux Figure 53, 4, 5 et 6 permettent de suivre l'évolution dans le temps des mesures pour les paramètres suivis en cours de compostage dans les trois centres étudiés. La zone bleutée présente sur certains graphiques représente la zone optimale pour ce paramètre. La Figure 3 permet de constater que la teneur en azote total la plus élevée a été mesurée lors du compostage de carcasses et tissus animaux (ND) alors que la concentration la plus faible l'a été au centre de compostage de résidus organiques triés à la source provenant d'une collecte à trois voies (CR). Bien qu'il n'y ait pas de valeur optimale sur le plan de la teneur en azote, il est plausible de présumer que plus les concentrations en azote seront élevées, plus il y aura des concentrations élevées en ammoniac.

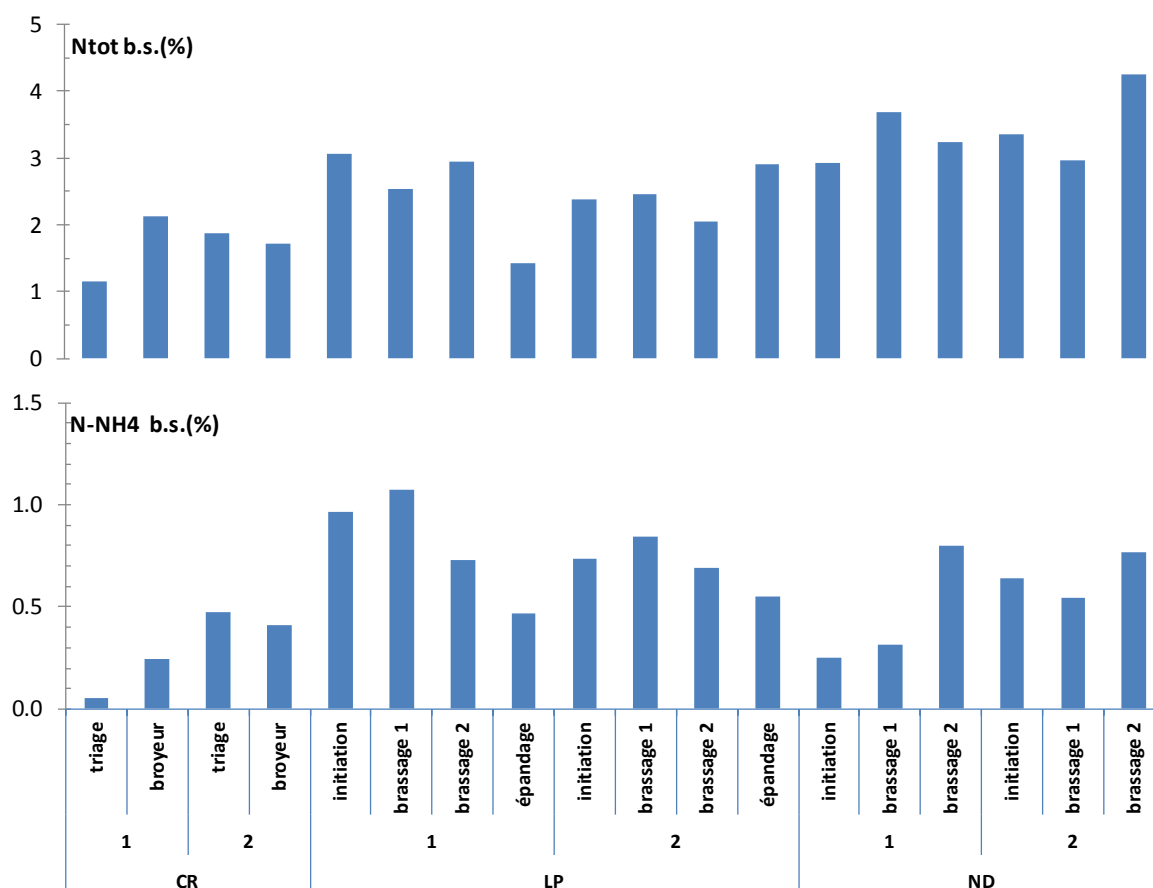


Figure 3 : Suivi du contenu du compost en azote total (Ntot) et en azote ammoniacal (N-NH4) pour chaque site, lors de chaque visite.

Le graphique de la Figure 4 montre que les rapports C/N mesurés n'atteignent pas les niveaux optimaux pour les mesures effectuées et cela, pour les trois centres de compostage. Le rapport C/N optimal recommandé doit être situé au démarrage du compostage, entre 25 et 30. Le compostage se produit même si le rapport C/N n'est pas dans cet intervalle puisqu'il y a tout de même de la matière organique (du carbone) et de l'azote disponibles pour les microorganismes. Par contre, un rapport C/N non optimal favorisera l'émission d'ammoniaque surtout si le pH est alcalin.

Un pH idéal doit se situer entre 6 et 8. Seuls les pH mesurés au site CR étaient neutres pour les deux lots et se situaient dans cette plage idéale. Les pH mesurés dans le compost au site ND étaient plutôt acides alors qu'ils étaient plutôt alcalins au centre de compostage LP.

En plus de ne pas avoir un rapport C/N optimal, le pH alcalin associé au centre de compostage de fumiers de bovins laitiers peut expliquer les concentrations élevées d'ammoniaque mesurées. L'exposition aux concentrations élevées d'ammoniaque est non souhaitable pour les travailleurs. Le contrôle du rapport C/N et de l'alcalinité du pH pourrait être utilisé afin de réduire l'exposition des travailleurs à l'ammoniaque. Le pH pourrait être abaissé en ajoutant un intrant carboné qui est moins alcalin au départ ou bien en chaulant la litière de l'étable. Toutefois, l'utilisation de plus grande quantité de litière (agent carboné) dans l'étable pour augmenter le rapport C/N du fumier aura un impact direct sur les frais d'exploitation.

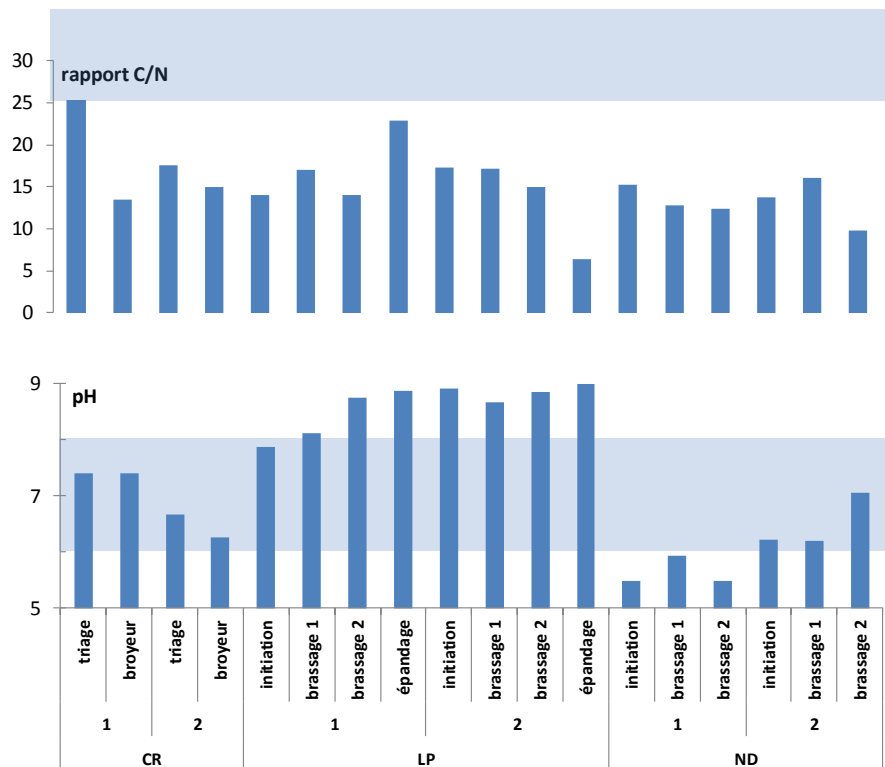


Figure 4 : Suivi du rapport carbone/azote et du pH du compost pour chaque site lors de chaque visite.

La teneur en eau (TEE) qui est présentée à la Figure 5 se trouve dans la plage optimale souhaitable pour les centres ND et CR, c'est-à-dire entre 40 et 60 %. La TEE mesurée au site LP est plus élevée. Une TEE trop élevée peut créer des zones moins bien aérées et donc déficientes en oxygène qui est l'élément essentiel à la flore microbienne responsable du compostage.

Un des graphiques de la Figure 5 montre également les mesures de la masse volumique apparente. L'ensemble des valeurs mesurées se situent à l'intérieur des valeurs cibles pour l'obtention d'un compostage de qualité. Cela démontre que les trois centres de compostage maîtrisent ce paramètre de façon adéquate.

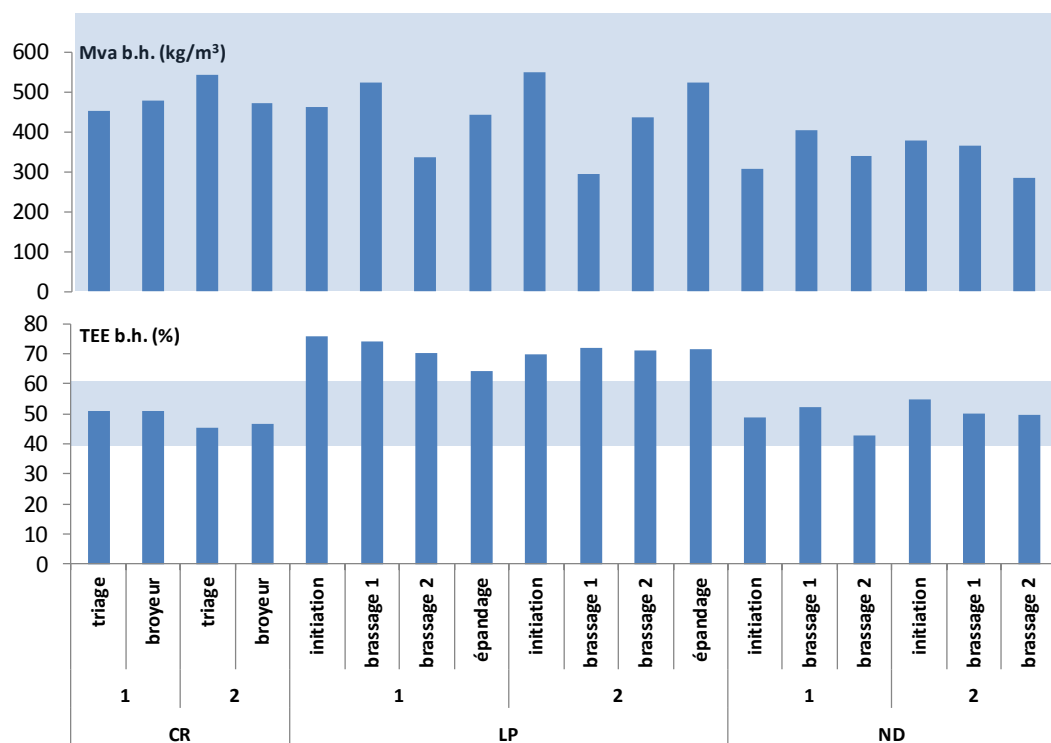


Figure 5 : Suivi de la masse volumique apparente (MVA) du compost ainsi que de sa teneur en eau (TEE) pour chaque site, lors de chaque visite.

Des mesures du taux d'assimilation en oxygène et de la matière organique totale sont présentées à la Figure 6. Comme pour la température, ces deux mesures peuvent être utilisées afin de déterminer si le compost est en voie d'être mature. La dégradation des carcasses de porcs peut être lente et se prolonger dans le temps étant donné la présence plus ou moins importante de matière grasse réputée être plus difficilement biodégradable. Le taux de gras dans le compost ou un de ses indicateurs n'a pas été évalué, car cette mesure est difficile à doser étant donné la nature hétérogène du mélange initial. Cette dégradation, qui dégage plus de chaleur lors de son compostage, pourrait affecter certains paramètres. Il est important de noter qu'aucun des lots de compost suivis durant le projet n'a atteint la phase de maturation.

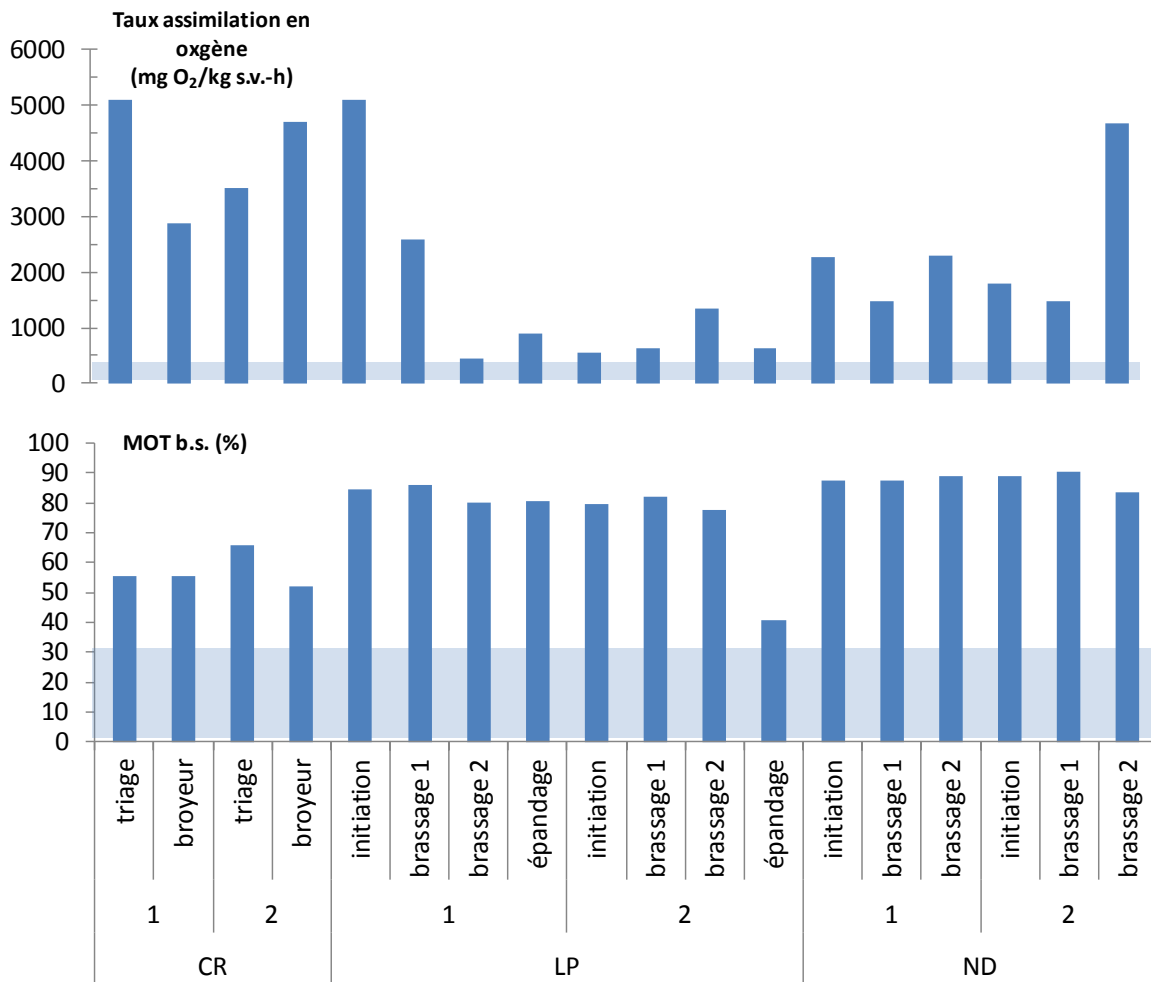


Figure 6 : Suivi de la respirométrie (taux d'oxygénation) ainsi que de la matière organique totale (MOT) pour chaque site et chaque visite.

4.2 Bioaérosols

4.2.1 Résidus organiques triés à la source (CR)

4.2.1.1 ANOVA et comparaisons multiples de Tukey-Kramer

Les résultats des ANOVA effectuées sur les concentrations de bioaérosols cultivables, transformées de façon logarithmique, pour trois facteurs (activité, phase, lot) sont présentés au Tableau 8. Ces tests montrent que les concentrations de microorganismes dans l'air ambiant sont affectées de façon significative par l'activité et la phase de transformation, et ce, pour les quatre groupes de microorganismes cultivables étudiés. Le lot est un facteur seulement pour les bactéries et les moisissures mésophiles cultivables. Les tests de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectués sur les facteurs significatifs ont permis de caractériser ces différences.

Tableau 8 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de résidus organiques triés à la source

Facteur	Activité		Phase		Lot	
	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité
Bactérie mésophile	31,74	0,000006*	14,90	0,003844*	5,42	0,044864*
Moisissure mésophile	27,02	0,000011*	44,69	0,000090*	14,13	0,004496*
Actinomycète thermophile	21,01	0,000025*	6,94	0,027140*	0,00	0,965294
<i>Aspergillus fumigatus</i>	4,24	0,046406*	119,12	0,000035*	0,00	0,994859

* Test de F significatif ($p < 0,05$)

4.2.1.2 Influence de l'activité sur les concentrations de microorganismes

Les résultats obtenus pour le facteur activité démontrent que la manipulation par les travailleurs de la matière putrescible au triage et du compost à la sortie du tunnel augmente de façon significative les concentrations de microorganismes mesurées dans l'air ambiant par rapport au bruit de fond et à celles qui sont mesurées dans l'air extérieur. La moyenne géométrique des concentrations de bactéries mésophiles calculée durant le travail des employés (99 000 UFC/m³ d'air) est 30 fois plus élevée que celle mesurée comme bruit de fond (3 500 UFC/m³ d'air) et 80 fois supérieure à celle mesurée dans l'air extérieur (1 200 UFC/m³ d'air). Ces concentrations sont les plus élevées parmi celles mesurées dans les trois centres. Les concentrations mesurées lors de l'activité des travailleurs sont comparables à celles rapportées dans la littérature ^(38,76).

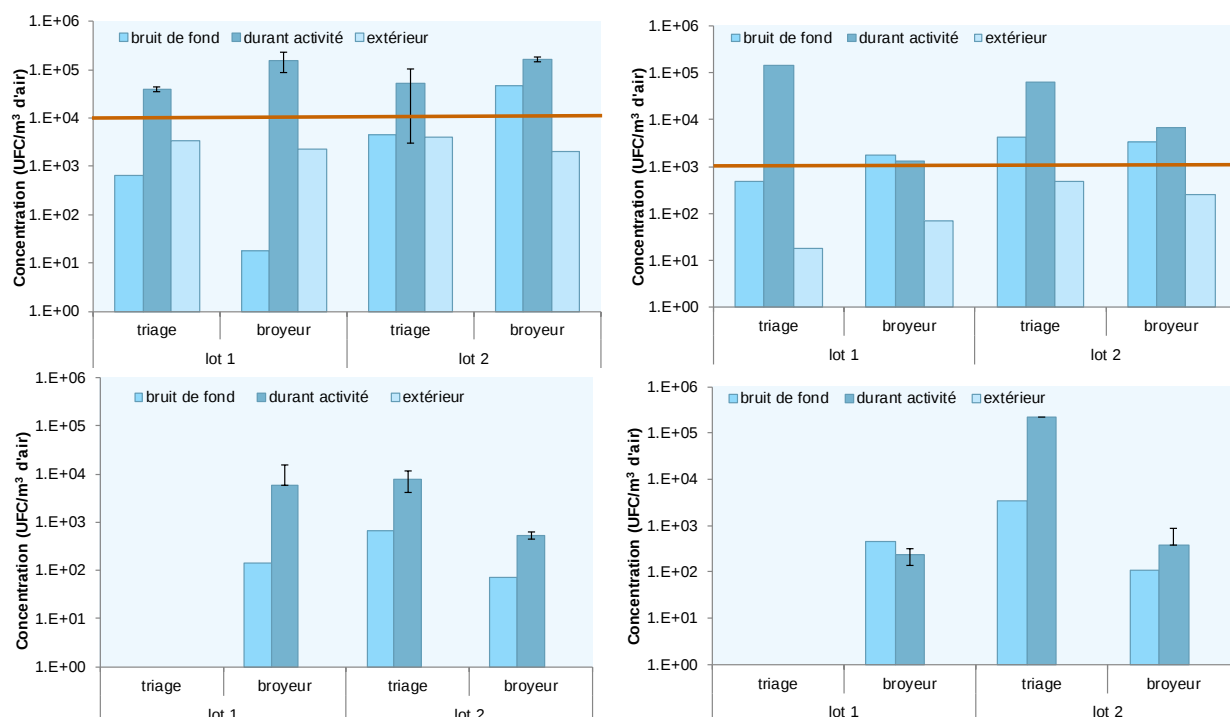
Ces concentrations demeurent inquiétantes puisqu'elles dépassent de 10 fois le niveau d'exposition maximale recommandée pour les bactéries mésophiles cultivables ^(38,77,78). Les concentrations mesurées dans l'air extérieur sont plus élevées que celles du niveau de base de 100 UFC/m³ d'air rapporté par O'Connor *et al.* en 2015. Ils sont toutefois du même ordre de grandeur que celles rapportées de 10³ UCF/m³ d'air par d'autres chercheurs ^(12,79). Selon l'environnement, le niveau d'activité ainsi que les conditions climatiques, une variation des niveaux de base doit être anticipée, ce qui rend réalistes et possibles des concentrations extérieures variant entre 10² et 10³ UCF/m³ d'air.

Pour les moisissures mésophiles, les concentrations moyennes mesurées sont de 100 UFC/m³ d'air dans l'air extérieur, de 1 900 UFC/m³ d'air comme bruit de fond et de 9 900 UFC/m³ d'air lorsque des activités sont réalisées par des travailleurs. Le niveau maximal recommandé pour ce groupe de microorganismes est dépassé d'environ 10 fois comme c'est le cas pour les bactéries

mésophiles. Bien que les concentrations obtenues à ce centre soient supérieures au niveau recommandé, elles ne représentent pas les concentrations les plus élevées mesurées durant cette étude. Les concentrations obtenues au centre de compostage de carcasses et tissus animaux sont en effet 8 fois supérieures à celles du centre de compostage CR.

Bien que moins importante, l'augmentation des concentrations observée lors des activités des travailleurs sur le compost demeure présente pour les deux autres groupes de microorganismes. Pour les actinomycètes, les concentrations sont de 14 UFC/m³ d'air dans l'air extérieur, de 210 UFC/m³ d'air durant la mesure du bruit de fond et de 1 900 UFC/m³ d'air lors des activités. Pour l'*Aspergillus fumigatus* elles sont de 25 UFC/m³ d'air dans l'air extérieur, de 200 UFC/m³ d'air lors de la mesure du bruit de fond et de 2 200 UFC/m³ d'air lors des activités. Aucune valeur maximale n'est recommandée pour ces deux groupes, mais l'exposition des travailleurs à l'*Aspergillus fumigatus* n'est pas souhaitable puisqu'elle est reconnue comme agent causal d'affections respiratoires ⁽⁸⁰⁾. Wéry, dans sa revue de littérature, rapporte des concentrations d'*Aspergillus fumigatus* inférieures à 80 UCF/m³ d'air à l'extérieur et variant de 10² à 10⁷ UFC/m³ d'air dans l'air ambiant de centres de compostage ⁽¹²⁾. Les concentrations observées au centre CR se situent donc au niveau inférieur des concentrations qu'elle rapporte. La Figure 7 présente, pour le compostage des résidus organiques triés à la source, les concentrations de la flore cultivable mesurées pour les quatre groupes de bioaérosols, selon le lot et l'activité.

L'accroissement des concentrations de microorganismes dans l'air lors de la manipulation du compost est bien documenté ^(12,48). Pearson et ses collègues rapportent dans leur revue de littérature que les activités comme le triage, le tamisage et le broyage sont celles pour lesquelles les concentrations les plus élevées sont mesurées ⁽⁸¹⁾. Dans le centre CR, particulièrement dans la salle de triage, cette augmentation a été observée et peut s'expliquer par la mise en suspension des particules microbiennes présentes sur le matériel mis dans les bacs bruns, et qui est secoué lors de son déplacement sur le convoyeur ou dans les équipements, et par l'agitation des matériaux par les employés lors du tri. De par sa nature, le matériel organique présent dans les bacs bruns lors de la collecte sélective favorise le développement microbien. Si le matériel putrescible s'accumule dans l'entrepôt préalablement au triage et qu'il demeure entreposé dans des conditions favorisant la prolifération microbienne, la charge microbienne des résidus peut augmenter considérablement puisque la matière nécessaire à son développement y abonde jusqu'à leur compostage. Une augmentation de la concentration ambiante a aussi été observée lors de la seconde phase de compostage évaluée à ce centre, c'est-à-dire à la sortie du tunnel. Le compost sortant du tunnel doit être ramassé et transporté quelques mètres plus loin afin d'être déversé dans un broyeur mécanique, étape nécessaire à l'amélioration de sa texture. Une aérosolisation importante des particules a été observée lors de la reprise du compost par la chargeuse et lors de son déversement dans le broyeur. De plus, une remise en suspension des particules présentes sur le sol s'ajoute à cela lors du déplacement de la chargeuse.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$.

La ligne rouge indique la concentration maximale recommandée par l'IRSST pour les bactéries et les moisissures cultivables, en considérant que la flore cultivable représente 10 % de la flore totale, selon les spores.

Figure 7 : Concentrations moyennes (UFC/m³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les *Aspergillus fumigatus* (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des travailleurs aux postes de triage et broyeur (site CR).

4.2.2 Influence de la phase du compostage sur les concentrations de microorganismes

Le second facteur ayant un impact significatif sur les concentrations de tous les groupes de bioaérosols cultivables mesurées est la phase de transformation du compost. Deux phases distinctes ont été étudiées au centre CR. La première, propre au triage, se situe à l'initiation du processus de compostage contrôlé et donc à l'entrée de la matière dans les tunnels de compostage. L'autre phase évaluée se situe à la sortie de ces tunnels lorsque le compost est dirigé vers le broyeur. Le broyage se fait avant que le compost soit entreposé à l'extérieur du centre pour maturation.

Les concentrations de microorganismes sont significativement supérieures lors de la phase du triage pour trois des quatre groupes microbiens, soit les moisissures mésophiles, les actinomycètes et les *Aspergillus fumigatus*, alors que pour les bactéries mésophiles, c'est à la sortie du tunnel que les concentrations moyennes les plus élevées sont observées (Figure 7). Les moyennes géométriques calculées sont de 63 000 UFC/m³ d'air au triage et de 150 000 UFC/m³ d'air au broyeur pour les bactéries mésophiles (moyenne des deux lots). Pour les moisissures mésophiles, elles sont de 35 000 et 2 800 UFC/m³ d'air au triage et à la sortie du tunnel

respectivement, de 5 100 et 700 UFC/m³ d'air pour les actinomycètes et de 218 000 et 220 UFC/m³ d'air pour l'*Aspergillus fumigatus*. Le compostage nécessite l'action dynamique de plusieurs microorganismes qui doivent se relayer pour aboutir à la décomposition de la matière organique ⁽⁸²⁾. La phase initiale du compostage serait composée principalement de bactéries, puis au cours du processus la flore mycologique augmenterait progressivement parce qu'elle serait favorisée, entre autres, par les diminutions du pH, de la température et de la teneur en eau ⁽⁸³⁾. Lorsque la source de nourriture est importante, les microorganismes ayant une croissance plus lente comme les actinomycètes ne sont pas favorisés. Par contre, après une augmentation de la température leur prolifération serait facilitée et plus importante ⁽⁸⁴⁾.

L'*Aspergillus fumigatus*, pour lequel les températures optimales de croissance sont entre 30 et 45 °C, serait favorisé lorsque les températures atteintes dans le compost ne sont pas suffisamment élevées. Les diminutions de concentrations observées pour les moisissures mésophiles, les actinomycètes thermophiles et les *Aspergillus fumigatus* dans ce centre concordent avec des observations réalisées en milieu contrôlé, où une diminution globale de la flore microbienne durant la phase thermophile de compostage a été observée ⁽⁸⁵⁾. Par contre, la présence élevée d'*Aspergillus fumigatus* au triage permet de soupçonner qu'un début de compostage avait lieu à l'entrepôt. Les ROTS pourraient dès leur récolte ou lors d'un séjour prolongé dans l'entrepôt amorcer une décomposition peu efficace avant d'être transférés à la salle de triage. Les conditions non optimales rencontrées à ce moment pourraient favoriser la croissance d'*Aspergillus fumigatus* et expliquer les concentrations mesurées. Lors du premier échantillonnage au triage, des concentrations de moisissures mésophiles inférieures aux concentrations d'*Aspergillus fumigatus* ont été mesurées. Cela est étonnant puisque ce dernier groupe est une sous-fraction du premier. Ce phénomène a également été rapporté par Ryckeboer *et al.* ^(38,76) et pourrait s'expliquer par les différentes conditions d'incubation ⁽⁸⁵⁾.

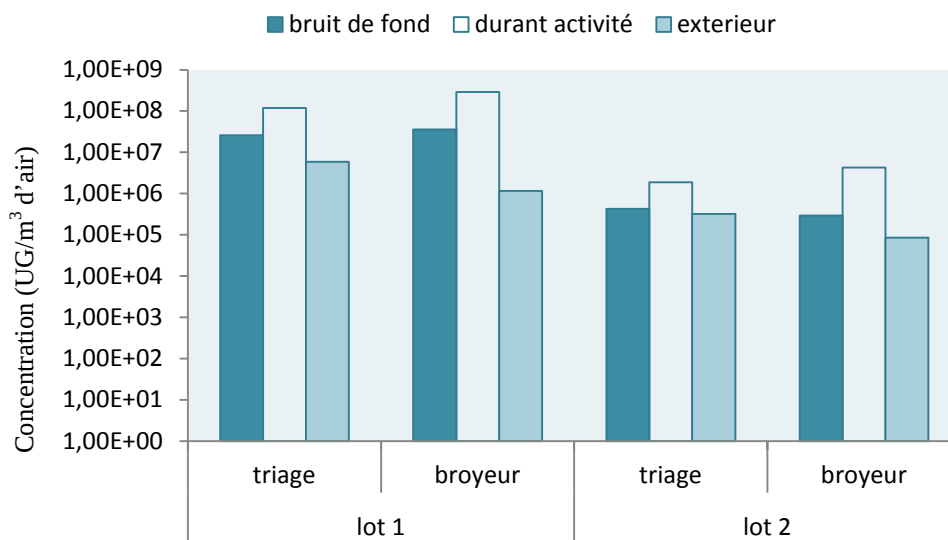
4.2.2.1 Influence du lot du compost sur les concentrations de microorganismes

L'influence produite par le lot est le troisième facteur évalué à l'aide de l'analyse de variance. Pour ce facteur, les concentrations de bactéries et de moisissures mésophiles sont significativement différentes selon le lot suivi. Pour les autres bioaérosols cultivables, le lot n'est pas identifié comme un facteur significatif. Le deuxième lot produit les concentrations les plus élevées de bactéries et de moisissures. Le paramètre lot inclus dans l'étude peut toutefois regrouper plusieurs variables. En effet, la durée de séjour de la matière dans le garage avant le triage, le type de matériel acheminé dans les bacs selon les saisons et les conditions météorologiques sont tous des facteurs qui peuvent influencer les concentrations de bioaérosols retrouvées et qui se confondraient dans le lot. L'évaluation de ce facteur confirme qu'une variation temporelle des concentrations est attendue.

4.2.2.2 Flore totale par amplification de l'ADN (PCR)

Les concentrations de bactéries totales obtenues par amplification de l'ADN sont présentées à la Figure 8. Lors des deux premières visites d'échantillonnage, la flore bactérienne totale a atteint des concentrations de 10⁸ UG/m³ d'air. Encore à ce jour, peu d'études réalisées dans les centres de compostage ont utilisé la q-PCR pour faire l'analyse de la flore totale; la majorité utilisant la méthode par culture bien qu'elle ne représente qu'une faible proportion de la flore réelle. Une

comparaison entre ces concentrations et celles de la flore cultivable permet de confirmer ce que d'autres chercheurs ont rapporté antérieurement, c'est-à-dire que la flore bactérienne cultivable ne représente qu'une faible proportion de la flore totale réelle d'un échantillon ⁽⁷⁹⁾. Dans ce centre, les concentrations de bactéries cultivables représentent à peine 2 % de la flore totale.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$.

Figure 8 : Concentrations en unités génomiques (UG/m³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs aux postes de triage et à la sortie du tunnel avant le broyeur (site CR).

4.2.3 Fumiers de bovin laitier (LP)

4.2.3.1 Analyse de variance (ANOVA) et de comparaisons multiples de Tukey-Kramer

Les résultats des ANOVA effectuées sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables pour les trois facteurs d'influence pour le compostage du fumier de la ferme laitière sont présentés au Tableau 9. L'analyse des résultats permet de constater qu'une différence significative des concentrations de bioaérosols cultivables mesurées dans l'air est remarquée selon les activités, la phase et le lot pour au moins un des groupes de bioaérosols évalués dans ce centre. Les concentrations de bactéries mésophiles et d'actinomycètes sont affectées significativement par l'activité. L'ANOVA a permis également d'établir que la phase de transformation produit un impact significatif uniquement sur les concentrations de bactéries mésophiles dans ce centre de compostage. Finalement, il existe un impact significatif du lot sur les concentrations de moisissures mésophiles et d'*Aspergillus fumigatus*. Le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectué sur les facteurs significatifs a permis de caractériser ces différences à partir des moyennes.

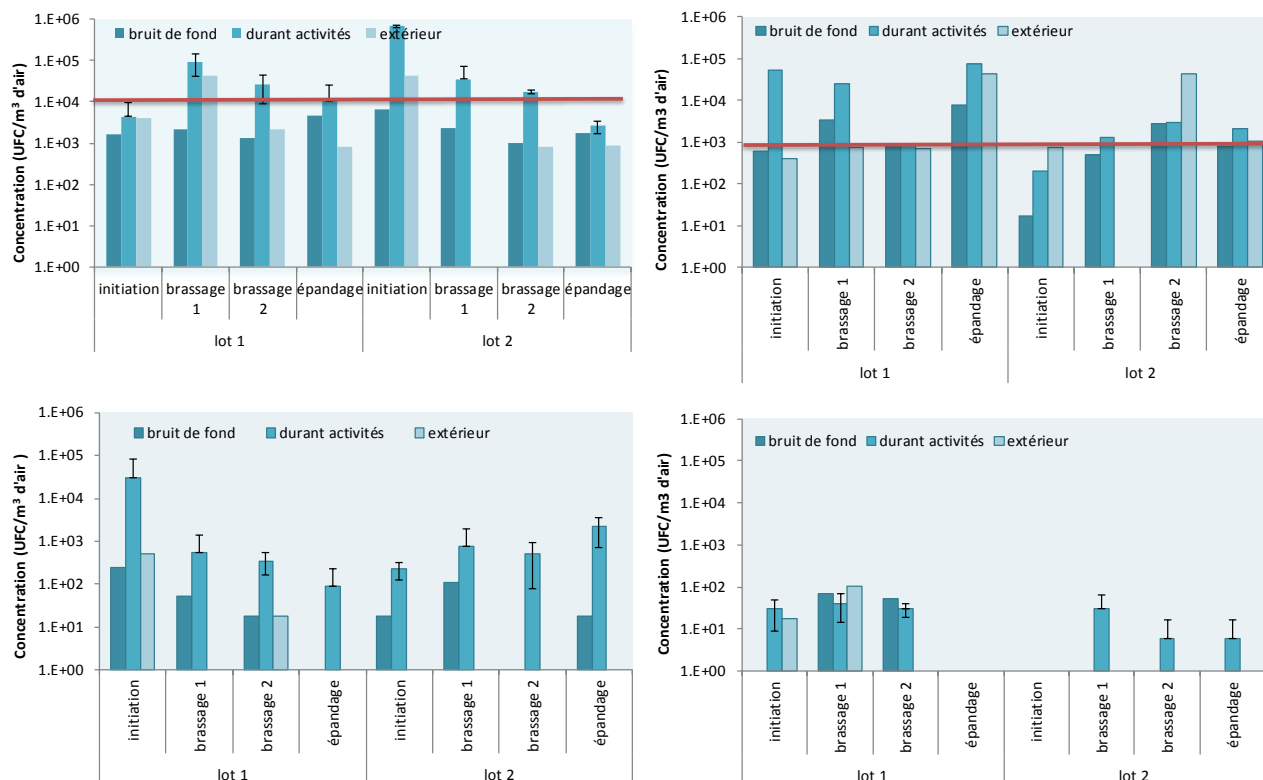
Tableau 9 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de fumiers de bovins laitiers

Facteur	Activité		Phase		Lot	
	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité
Bactérie mésophile	6,16	0,004923*	3,93	0,024337*	0,35	0,562530
Moisissure mésophile	2,30	0,114218	0,45	0,718491	18,95	0,000343*
Actinomycète thermophile	13,23	0,000046*	0,64	0,595868	1,71	0,206020
<i>Aspergillus fumigatus</i>	2,55	0,091956	1,44	0,262759	10,73	0,003975*

* Test de F significatif ($p < 0,05$)

4.2.3.2 Influence de l'activité sur les concentrations de microorganismes

Comme pour le centre de compostage CR et à l'instar de plusieurs autres études, les analyses sur le facteur activité démontrent que la manipulation du compost par le travailleur augmente les concentrations de microorganismes mesurées dans l'air par rapport au bruit de fond et à celles de l'air extérieur^(36,41,48,81). La Figure 9 présente les concentrations mesurées selon les activités pour chacune des interventions effectuées au centre de compostage LP. Les concentrations maximales sont obtenues pour le groupe des bactéries mésophiles, pour lequel les concentrations moyennes de l'ensemble des interventions mesurées lors du travail des employés atteignent 14 000 UFC/m³ d'air. Ces concentrations sont supérieures au niveau maximum recommandé de 10 000 UFC/m³ d'air^(38,77,78). Par contre, elles sont inférieures à celles mesurées dans l'air ambiant du centre de compostage CR.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$. La ligne rouge indique la concentration maximale recommandée par l'IRSST pour les bactéries et les moisissures cultivables, en considérant que la flore cultivable représente 10 % de la flore totale, selon les spores.

Figure 9 : Concentrations moyennes (UFC/m³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les *Aspergillus fumigatus* (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des activités effectuées par le travailleur sur le compost (site LP).

Pour les moisissures mésophiles, les concentrations moyennes calculées durant le travail de l'employé sont de 1 600 UFC/m³ d'air. Ces concentrations sont supérieures aux valeurs maximales recommandées^(49,50,78), mais toutefois encore inférieures à celles mesurées dans les deux autres centres. Les concentrations moyennes d'actinomycètes sont de 260 UFC/m³ d'air, alors que les celles de l'*Aspergillus fumigatus* dépassent à peine la limite de détection de la méthode.

Une aérosolisation importante des particules a été observée lors du remplissage de la cellule de compostage ainsi que lors du brassage du compost par l'opérateur. L'agitation de la matière par la chargeuse provoque la remise en suspension des particules et explique l'augmentation des concentrations observées dans l'air lorsque du travail est effectué. Une réduction du niveau d'aérosolisation est possible par une manipulation mieux contrôlée de la matière. À plusieurs reprises, la projection de particules a été observée par l'équipe de recherche, principalement

lorsque l'opérateur travaillait brusquement. Les concentrations de microorganismes cultivables mesurées sont les plus faibles obtenues durant ce projet sauf pour ce qui est des moisissures.

4.2.3.3 Influence de la phase du compostage sur les concentrations de microorganismes

L'ANOVA effectuée sur le facteur de la phase du compostage démontre qu'il y a une différence significative entre les concentrations moyennes mesurées en fonction de ce facteur uniquement pour le groupe des bactéries mésophiles. La concentration moyenne mesurée pour ce groupe de bactéries lors de l'initiation du processus, c'est-à-dire lorsque le fumier sort de l'étable et qu'il est transféré dans la cellule, est de 13 000 UFC/m³ d'air. Leur concentration moyenne lors du premier brassage, un mois après le début du processus de compostage, est de 45 000 UFC/m³ d'air et de 20 000 UFC/m³ d'air lors du deuxième brassage. La concentration moyenne de 3 500 UFC/m³ d'air mesurée lors de l'épandage est significativement plus faible que celles rapportées pour les deux phases de brassage, mais elle n'est pas significativement différente de celle mesurée lors de l'initiation. La distance entre les échantillonneurs et la zone de travail de l'ouvrier explique possiblement cette diminution de concentrations. Lors de l'échantillonnage pour l'épandage, il était impossible de se placer à proximité comme c'était le cas pour les autres phases. La distance était variable selon l'emplacement du tracteur dans le champ et variait entre dix mètres et près de 500 mètres. La distance entre l'épandeur de fumier dans le champ et le poste de prélèvement en périphérie entraîne une réduction des concentrations avant qu'elles ne soient échantillonnées. Des chercheuses du Health and Safety Executive (HSE) au Royaume-Uni ont rapporté une importante diminution des concentrations à partir d'une distance d'à peine 50 m⁽⁷⁶⁾. Les concentrations moyennes mesurées pour les autres groupes microbiens sont respectivement de 1200, 540 et 15 UFC/m³ d'air pour les moisissures mésophiles, les actinomycètes thermophiles et les *Aspergillus fumigatus*. Bien que cela puisse être une limite à l'étude pour l'exposition des travailleurs, cela confirme que les concentrations autour d'un centre de compostage diminuent rapidement avec la distance. À la distance où se retrouvaient les échantillonneurs, les concentrations de bactéries sont déjà réduites sous les niveaux recommandés dans la littérature^(49,50). La Figure 9 montre une diminution des concentrations de bactéries mésophiles dans le lot 2 et des actinomycètes thermophiles dans le lot 1. Très élevée au début de la phase de compostage, la charge bactérienne du fumier semble pouvoir être réduite progressivement, et cela, possiblement en raison des conditions de température atteintes.

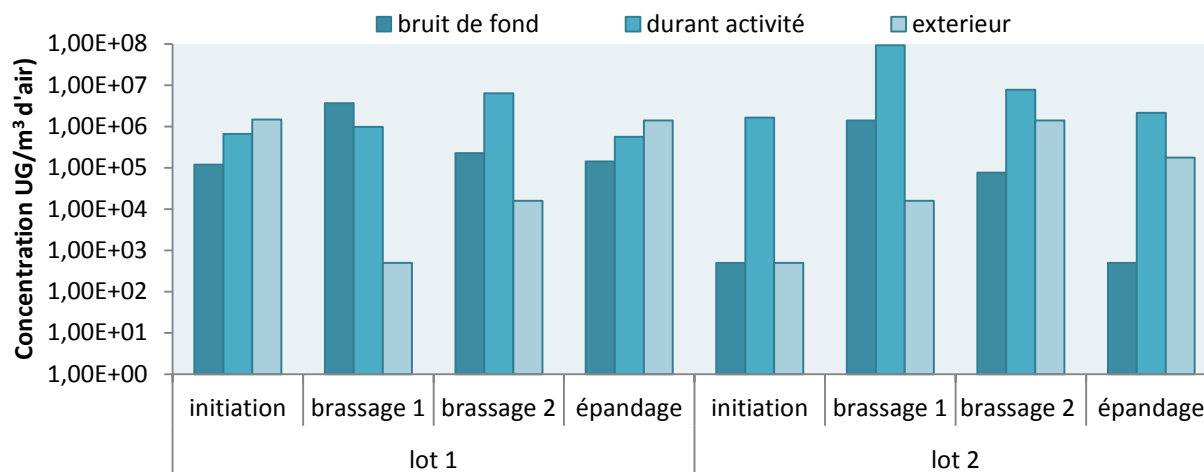
4.2.3.4 Influence du lot du compost sur les concentrations de microorganismes

Pour ce site, les concentrations de moisissures mésophiles obtenues pour le premier lot sont plus élevées que celles du second lot. Ces concentrations de moisissures semblent donc influencées par le lot suivi. Une variation dans le temps est également attendue pour ce centre.

4.2.3.5 Flore totale par amplification de l'ADN (PCR)

Les concentrations de bactéries totales mesurées au site de compostage de fumiers de bovins laitiers sont présentées à la Figure 10. Une concentration de plus de 1 x 10⁸ UG/m³ d'air est atteinte lors du brassage 1 du deuxième lot. Les concentrations moyennes lors des autres activités varient entre 5 x 10⁵ et 7 x 10⁶ UG/m³ d'air. Des concentrations plus faibles que celles mesurées

au centre CR sont observées. La méthode par culture a donné des résultats variant entre 1 800 et $4,3 \times 10^4$ UFC/m³ d'air. La flore cultivable représente, à ce centre, entre 0,1 et 40 % de la flore totale. Une proportion de 40 % est particulièrement étonnante. En effet, des proportions moyennes de 1 et 2 % sont rapportées aux deux autres centres et peu d'études rapportent des proportions supérieures à 10 %⁽⁴⁹⁾. Des problèmes analytiques en ce qui a trait au dénombrement et à la présence d'une variabilité élevée peuvent expliquer cette anomalie. Le dénombrement de la flore cultivable peut être ardu et des erreurs sont fréquentes, tandis que la variabilité des résultats est influencée par l'expertise des analystes. L'analyse par amplification de l'ADN n'est pas non plus sans risque. L'extraction de l'ADN peut être variable selon l'échantillon et le type de cellules microbiennes ciblé.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$.

Figure 10 : Concentrations en unités génomiques (UG/m³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs (site LP).

4.2.4 Compostage de carcasses et tissus animaux (ND)

4.2.4.1 Analyse de variance (ANOVA) et de comparaison multiple de Tukey-Kramer

Les ANOVA effectuées sur les concentrations de bioaérosols cultivables selon les trois mêmes facteurs sont présentées au Tableau 10 pour le compostage au site ND. L'analyse des résultats démontre une différence significative des concentrations de bioaérosols cultivables en fonction du facteur activité pour les quatre groupes de bioaérosols et pour le facteur phase seulement pour les actinomycètes thermophiles. Sauf pour les bactéries mésophiles, le facteur lot n'affecte pas de façon significative les concentrations moyennes sur ce site.

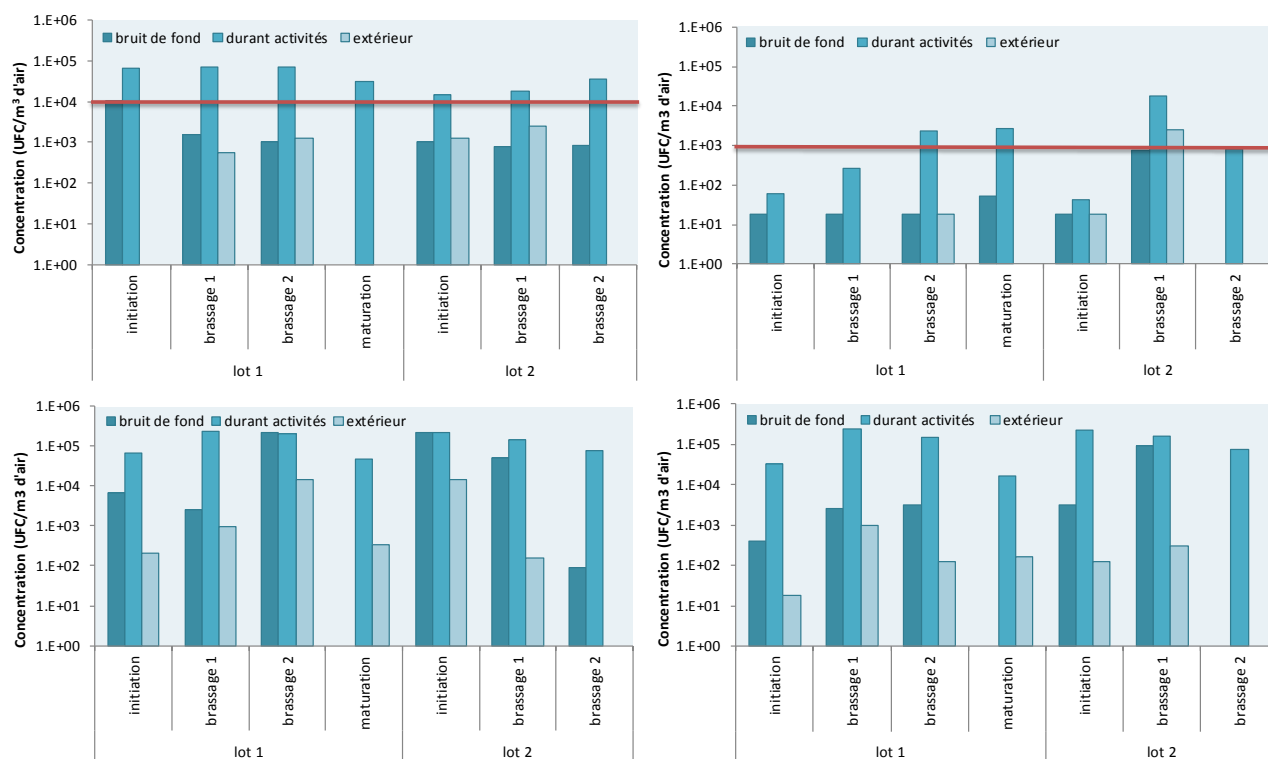
Tableau 10 : Test de F et niveau de probabilité des analyses de variance du modèle linéaire général fait sur les logarithmes des concentrations de bioaérosols cultivables au centre de compostage de carcasses et tissus animaux

Facteur	Activité		Phase		Lot	
	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité
Bactérie mésophile	6,52	0,004203*	1,56	0,241113	8,12	0,004076*
Moisissure mésophile	12,32	0,000158*	0,39	0,764467	0,44	0,652317
Actinomycète thermophile	16,10	0,000025*	4,64	0,017325*	0,00	0,999984
<i>Aspergillus fumigatus</i>	14,15	0,000063*	0,45	0,722972	0,00	0,999222

* Test de F significatif ($p < 0,05$).

4.2.4.2 Influence de l'activité sur les concentrations de microorganismes

Les analyses de Tukey-Kramer sur le facteur activité démontrent encore une fois que la manipulation du compost par les travailleurs augmente les concentrations de microorganismes mesurées dans l'air par rapport au bruit de fond ou à celles mesurées dans l'air extérieur. Les concentrations de bactéries et de moisissures mésophiles, d'actinomycètes thermophiles et d'*Aspergillus fumigatus* sont toutes supérieures lorsque la matière compostée est manipulée dans la cellule, que ce soit lors du montage de la cellule, des brassages ou du transfert vers la maturation. La Figure 11 montre les concentrations selon l'activité pour chacune des interventions effectuées au centre de compostage de carcasses et tissus animaux. Les concentrations maximales sont obtenues pour les moisissures mésophiles et l'*Aspergillus fumigatus* pour lesquelles les moyennes géométriques des concentrations mesurées lors du travail des employés atteignent 76 000 et 22 500 UFC/m³ d'air respectivement. Les concentrations de moisissures dépassent les concentrations maximales recommandées et sont les plus élevées des centres participants à l'étude. Pour les bactéries mésophiles, les moyennes géométriques des concentrations calculées durant les opérations sur le compost sont de 3 700 UFC/m³ d'air, ce qui est sous la concentration maximum recommandée et beaucoup plus faible que les concentrations mesurées aux autres centres. Dans ce centre, les moyennes géométriques des concentrations d'actinomycètes thermophiles sont seulement de 240 UFC/m³ d'air durant les activités et elles ne dépassent pas la limite de détection pour le bruit de fond et les mesures de l'air extérieur. L'augmentation des concentrations observées dans l'air de ce centre s'explique de la même façon que pour celle du centre LP. Lors du travail avec la chargeuse, une aérosolisation des particules se produit et crée une augmentation des concentrations dans l'air.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$.

La ligne rouge indique la concentration maximale recommandée par l'IRSST pour les bactéries et les moisissures cultivables, en considérant que la flore cultivable représente 10 % de la flore totale, selon les spores.

Figure 11 : Concentrations moyennes (UFC/m³ d'air) pour les bactéries mésophiles (A), les moisissures mésophiles (B), les actinomycètes thermophiles (C) et les *Aspergillus fumigatus* (D) cultivables mesurées dans l'air ambiant près des activités sur le compost effectuées par le travailleur (site ND).

4.2.4.3 Influence de la phase du compostage sur les concentrations de microorganismes

Pour ce site, uniquement les concentrations d'actinomycètes thermophiles sont affectées par la phase de transformation. La concentration moyenne mesurée lors du second brassage est plus élevée que celle mesurée lors du montage de la cellule (initiation). Les concentrations moyennes mesurées pour les autres phases ne sont pas significativement différentes les unes des autres selon le test de Tukey-Kramer. La Figure 11 montre une légère augmentation des concentrations au cours du processus de transformation pour le lot 1. Cela laisse supposer que les actinomycètes sont partiellement affectés par la phase de transformation sans pour autant produire de différences significatives d'une phase à l'autre.

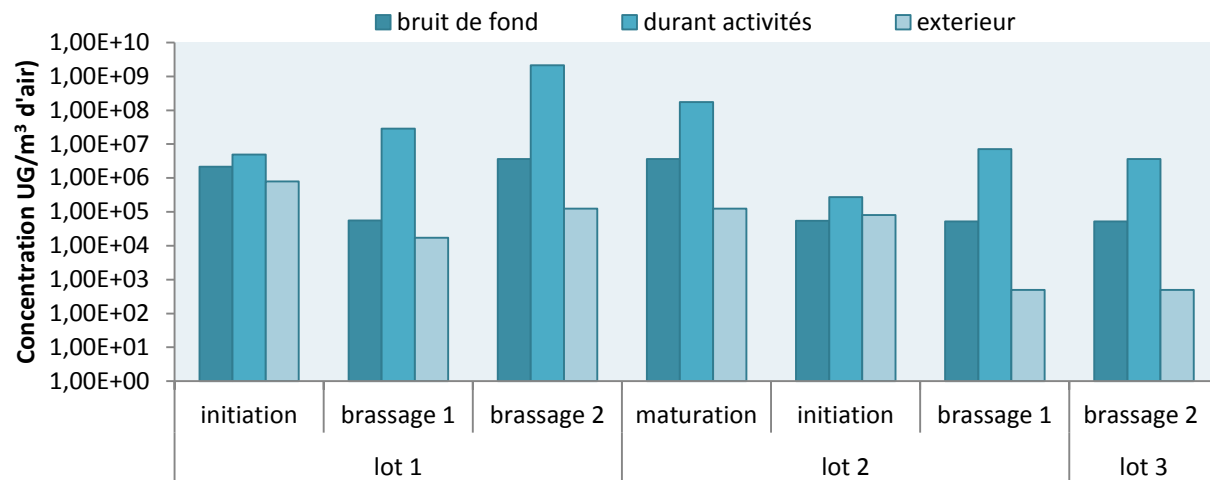
4.2.4.4 Influence du lot du compost sur les concentrations de microorganismes

Le lot est un facteur d'influence pour ce site, mais seulement en ce qui a trait aux bactéries mésophiles. Les concentrations mesurées dans les échantillons d'air pendant le travail sur le

premier lot sont significativement plus élevées que celles du second lot (Figure 11). Pour les autres groupes de microorganismes, des différences ne sont pas observables.

4.2.4.5 Flore totale par amplification de l'ADN (PCR)

Les concentrations de bactéries totales mesurées au centre de compostage ND sont présentées à la Figure 12 pour chacune des activités. La concentration de 10^9 UG/m³ d'air lors du deuxième brassage du lot 1 est la plus élevée parmi celles mesurées au cours de ce projet. Une concentration supérieure à 10^8 UG/m³ d'air a également été estimée lors de l'initiation du lot 2. Les concentrations mesurées lors des autres interventions demeurent du même ordre de grandeur que celles qui ont été mesurées dans les autres centres ainsi que dans d'autres milieux. En effet, des concentrations variant entre 1×10^5 et 1×10^8 UG/m³ d'air ont été rapportées tant dans les porcheries que dans les fermes laitières^(86,87). Pour ce site, la proportion de la flore cultivable observée est de 1 % de la flore totale.



La variation sur la moyenne est représentée par l'écart-type lorsque $n > 1$.

Figure 12 : Concentrations en unités génomiques (UG/m³ d'air) de bactéries totales présentes dans l'air ambiant près des travailleurs (site ND).

4.2.5 Résumé des données sur les bioaérosols

Le Tableau 11 présente un résumé des facteurs d'influence pour les quatre microorganismes, à chacun des centres évalués.

Tableau 11: Résumé des facteurs d'influence des concentrations de microorganismes aux trois sites étudiés

	Bactéries	Moisissures	Actinomycètes	<i>A. fumigatus</i>
CR	activité phase lot	activité phase lot	activité phase	activité phase
LP	activité phase	lot	activité	lot
ND	activité lot	activité	activité phase	activité

Les concentrations de bactéries et de moisissures dépassaient les niveaux maximums recommandés pour toutes les interventions aux centres CR et ND. Au site LP, les niveaux maximums ont été dépassés 4 fois sur 8 pour les bactéries et 5 fois sur 8 pour les moisissures. La proportion de la flore cultivable était de moins de 2% aux sites CR et ND, mais celle-ci a atteint 40% pour certains échantillons au centre ND.

4.2.6 Comparaison des concentrations de microorganismes entre les trois sites

La Figure 13 permet de visualiser les moyennes géométriques des concentrations mesurées pendant les activités sur les trois sites de compostage pour chacun des quatre groupes de microorganismes cultivables.

Les tests d'ANOVA et de Tukey-Kramer permettent de confirmer que les concentrations de moisissures mésophiles et d'*Aspergillus fumigatus* les plus faibles ont été mesurées au centre LP alors que les plus élevées sont atteintes au centre ND. Milner *et al.* ont rapporté que la température dans l'andain est un facteur qui influence considérablement la croissance de l'*Aspergillus fumigatus* ⁽⁸⁸⁾. Leur étude démontre que la présence des *Aspergillus fumigatus* est plus fréquente dans les zones de l'andain qui n'atteignent pas 60 °C. Dans notre étude, les températures mesurées dans les amoncellements du centre de compostage ND n'atteignaient pas 60 °C et étaient même parfois inférieures à 50 °C (voir Tableau 7). Lors du suivi du deuxième lot, des températures plus élevées ont été estimées dans la matière et des concentrations plus faibles d'*Aspergillus fumigatus* sont observables. La matière utilisée comme agent structurant pour le compostage des carcasses et tissus de porc peut aussi influencer les concentrations de moisissures retrouvées. Une matière à forte teneur en cellulose favorise la croissance mycologique ⁽⁸⁹⁾. La TEE plus faible mesurée au centre ND, par rapport à celles mesurées aux 2

autres centres de compostage, pourrait également être un paramètre favorisant la croissance mycologique comparativement à la croissance bactérienne.

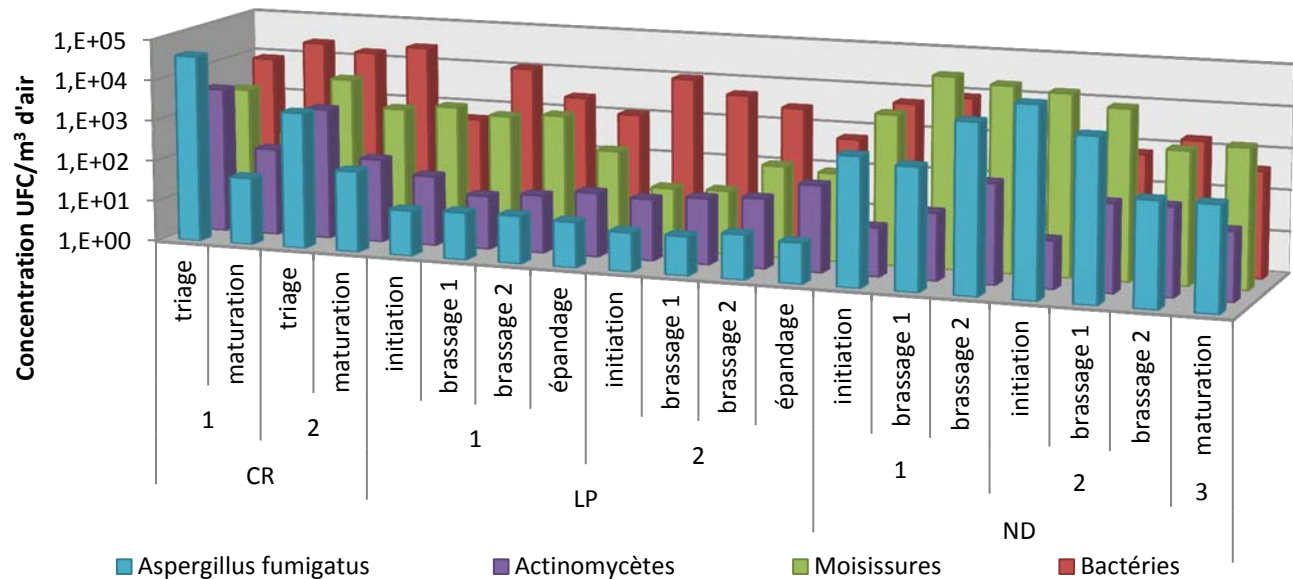


Figure 13 : Moyennes géométriques des concentrations de microorganismes cultivables obtenues lors des activités réalisées aux trois sites de compostage durant les suivis effectués à chacune des étapes de compostage (n=3).

Au regard des groupes de bactéries mésophiles et des actinomycètes thermophiles, les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans le centre CR, les concentrations les plus faibles l'ont été au centre ND pour le groupe des bactéries mésophiles, alors que pour les actinomycètes thermophiles, les sites LP et ND ne présentaient pas de différences significatives entre leurs concentrations. Les concentrations bactériennes atteintes au centre CR sont comparables à celles rapportées dans la littérature pour ce type de compostage^(38,76). Il est important de rappeler ici que ce centre est le seul pour lequel les activités se réalisent dans un endroit intérieur fermé pour le triage et mi-clos pour le transfert au broyeur. Des concentrations bactériennes plus élevées à ce centre comparativement au centre LP étonnent. En effet, puisque les fumiers contiennent des charges bactériennes initiales très élevées, les concentrations de bactéries retrouvées avec ce type d'intrant auraient pu être vraisemblablement supérieures à celles mesurées dans les autres centres.

4.3 Biologie moléculaire - Marqueurs de risque

Un des objectifs de ce projet était d'explorer l'utilisation de marqueurs microbiens afin d'évaluer le risque biologique présent dans les centres de compostage. Des marqueurs par culture et par PCR avaient été choisis au départ. Les premières campagnes de prélèvement ont permis de constater que l'analyse des bactéries à Gram négatif, des mycobactéries et des *Legionella spp* par culture était impossible en raison de la présence importante de flore interférente inhibant la croissance des marqueurs ciblés. Uniquement les analyses de l'*Aspergillus fumigatus* et des

actinomycètes thermophiles par culture ont été poursuivis pour la durée totale du projet. Les résultats ont été présentés à la sous-section 4.2.

Les résultats par amplification d'ADN obtenus pour les marqueurs ciblés sont présentés à la Figure 14. La présence de l'actinomycète *Saccharopolyspora rectivirgula* a été vérifiée dans la présente étude. *S. rectivirgula* a été détecté à 7 reprises, dont 4 fois au centre de compostage ND. Cela représente des fréquences de 37 % pour l'ensemble des sites et de 57 % pour le centre ND. Ces fréquences sont plus faibles que celles de 73 % rapportées par Schafer pour les 31 sites étudiés en Allemagne ⁽⁶⁸⁾. Les amorces moléculaires spécifiques à *S. rectivirgula* utilisées dans les deux études sont les mêmes. La différence de prévalence observée ne peut vraisemblablement pas y être attribuée. Toutefois, les méthodes de prélèvement sont différentes et pourraient être la cause de cet écart. Schafer a utilisé une méthode de captation par filtration sur membrane de polycarbonate alors que l'impaction en milieu liquide avec l'échantillonneur Coriolis a été utilisée dans la présente étude. La fréquence plus élevée de *S. rectivirgula* dans le centre de compostage ND pourrait s'expliquer par une capacité de croissance supérieure sur des arbres de types résineux utilisés comme matériel structurant.

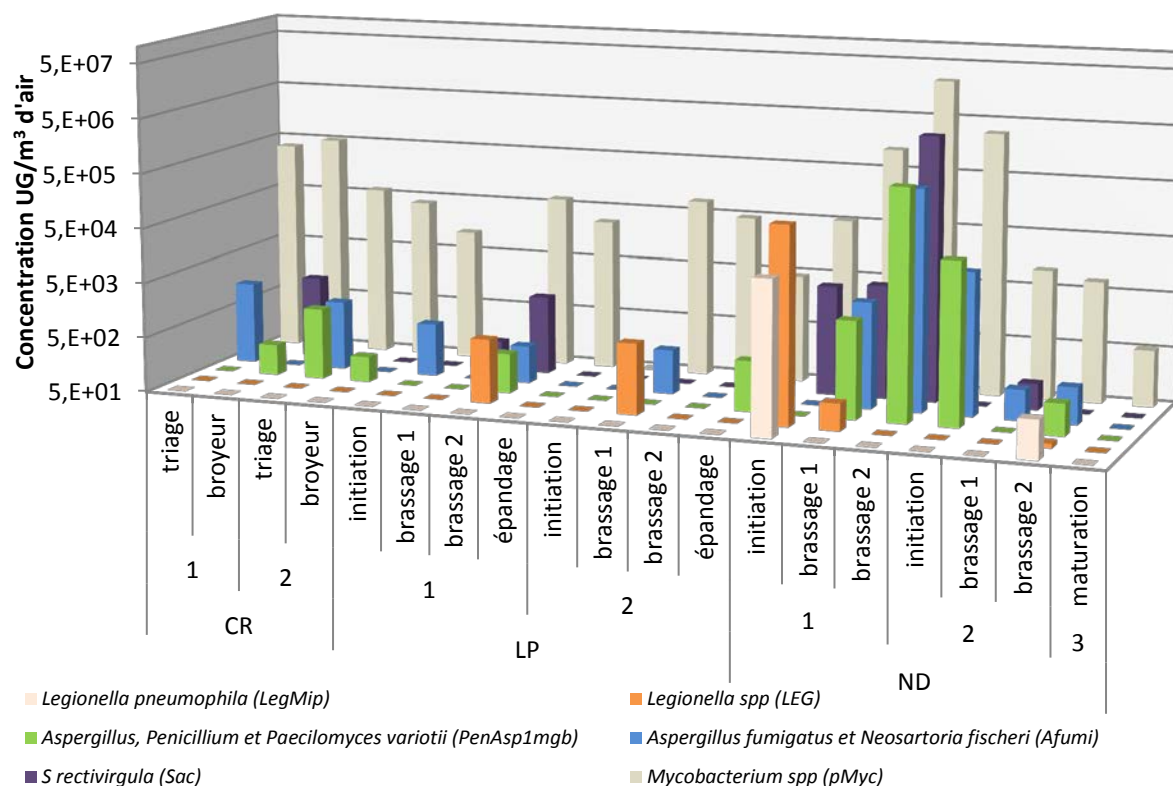


Figure 14 : Concentrations de microorganismes obtenues par amplification d'ADN lors des activités. Prélèvements réalisés aux trois sites de compostage durant le suivi effectué à chacune des étapes de compostages (n=1).

Le marqueur moléculaire basé sur l'*Aspergillus fumigatus* a permis de détecter cette moisissure dans 10 échantillons effectués lors d'autant d'interventions. Toutefois, contrairement aux analyses par culture qui ont démontré la présence de cette moisissure lors des quatre interventions au centre CR, la méthode par biologie moléculaire ne l'a détectée qu'à deux reprises dans ce centre. C'est sensiblement le même constat pour le centre ND dans lequel la méthode par culture rapporte des résultats positifs pour les 7 interventions alors que la biologie moléculaire en détecte lors de 5 interventions. En ce qui a trait au centre LP, la méthode par biologie moléculaire performe mieux et rapporte 3 résultats positifs pour l'*Aspergillus fumigatus* alors que la méthode par culture demeure au niveau de sa limite de détection. Théoriquement, l'*Aspergillus fumigatus* semble être un marqueur de risque intéressant, car cette moisissure est reconnue comme étant un pathogène opportuniste, par contre les deux méthodes d'analyse utilisées démontrent certaines variabilités sur le plan de leur capacité de détection. Dans certains cas, la culture produit des concentrations supérieures à celles obtenues par la PCR, alors que dans d'autres cas, l'inverse est observable. La confirmation de l'utilisation potentielle de ce marqueur dépendra de l'optimisation des méthodes d'analyse afin d'en augmenter les performances et d'arriver à une meilleure cohérence de détection entre les méthodes.

Le marqueur ciblant les *Aspergillus spp*, *Penicillium spp* et *Paecilomyces variotii* n'a pas donné les résultats attendus. À titre de marqueur général de la mycoflore, les échantillons positifs pour l'*Aspergillus fumigatus* devaient l'être avec ce marqueur et cela n'est pas le cas pour trois échantillons. Ce système de détection n'atteint pas les performances escomptées. Une optimisation est nécessaire, mais la validation du marqueur pour l'*Aspergillus fumigatus* semble de prime abord plus appropriée.

Les mycobactéries ont été détectées dans les trois centres de compostage, lors de 17 interventions. Il s'agit du groupe ayant la plus grande fréquence de détection observée dans cette étude soit pour 89 % des interventions. Les concentrations détectées ont varié entre 10^2 et 10^7 UG/m³ d'air. Les mycobactéries environnementales non tuberculeuses (MNT) sont très fréquentes dans l'eau et les sols ⁽⁹⁰⁾. Elles se rencontrent régulièrement dans les sols contaminés par des excréments d'animaux, entre autres ⁽⁹¹⁾. La présence de MNT a été rapportée dans des usines de mousse de tourbe ⁽⁹²⁾, ainsi que dans les porcheries ⁽⁹⁰⁾. Leur présence dans les centres de compostage n'a pas été rapportée, mais leur effet sur la santé ainsi que la haute prévalence rencontrée durant ce projet de recherche en font très certainement un marqueur intéressant à suivre.

Les deux marqueurs spécifiques à la *Legionella* ont permis de détecter sa présence dans l'air ambiant de deux des trois centres pour le marqueur multiespèce et uniquement dans le centre de compostage de carcasses et tissus animaux pour la *Legionella pneumophila*. La détection de cette bactérie dans l'air confirme un risque pour les travailleurs de ces milieux de travail au Québec. La présence de cette bactérie a été rapportée dans le compost dans des études australiennes et françaises, mais jamais encore au Québec ^(93,94). Ce projet a permis de démontrer la présence de *Legionella* dans l'air. Ce qui laisse supposer qu'une évaluation du risque dans les centres de compostage devrait inclure les marqueurs moléculaires pour la détection des *Legionella*.

4.4 Analyse de la biodiversité microbienne

Les étapes de compostage de la matière organique observées dans cette étude consistent principalement en trois phases : initiale, mésophile et thermophile. Pendant la phase mésophile, la décomposition est initiée par les microorganismes, cela ayant pour effet d'amorcer une augmentation de la température et ainsi de favoriser la croissance des microorganismes thermophiles qui mèneront à terme la décomposition de la matière organique. Outre le type de matière organique qui est compostée, la température jouera un rôle prédominant dans les variations de la biodiversité, ainsi la phase thermophile sera plus riche en matière de biodiversité que la phase mésophile^(95,96). Il est déjà décrit dans la littérature que les différentes étapes du compostage sont constituées principalement par des microorganismes appartenant aux phylum des *Bacteroidetes*, *Firmicutes*, *Proteobacteria* et *Actinobacteria*^(12,95).

4.4.1 Courbes de raréfaction

Les courbes de raréfaction (Figure 15) indiquent le nombre d'unités taxonomiques fonctionnelles (OTU) obtenu en fonction du nombre de séquences pour chacun des échantillons. Cette analyse permet, en utilisant un sous-groupe de seulement 5 000 séquences par échantillon, d'observer un plafonnement de toutes les courbes. Ce plafonnement indique l'efficacité et la capacité qu'a la méthode utilisée de couvrir l'ensemble des séquences disponibles dans l'échantillon. Cela permet de démontrer que l'ensemble de tous les séquençages envisageables pour un échantillon donné a été effectué. Sur ces graphiques, il est également possible d'observer que la diversité, représentée par le nombre d'OTU, est légèrement plus élevée dans les échantillons de compost provenant du centre de compostage CR. La diversité bactérienne y est donc plus élevée.

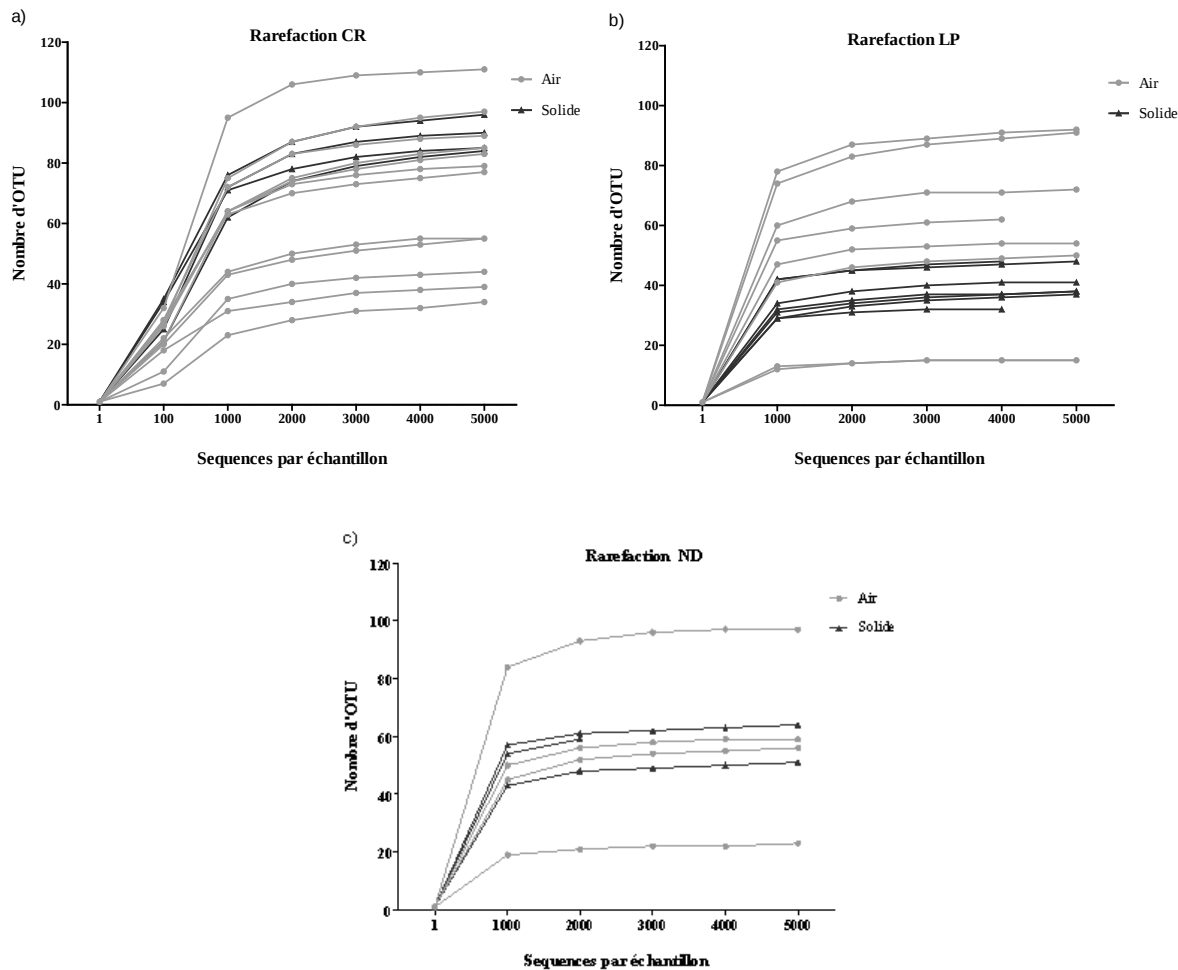


Figure 15 : Courbes de rarefaction des trois bibliothèques de séquences obtenues pour les trois centres de compostage : a) résidus organiques (CR); b) fumiers de bovins laitiers (LP) et c) carcasses et tissus animaux (ND). Chaque courbe illustre le nombre d'OTU à une distance phylogénétique de 0,03.

4.4.2 Distribution des OTU dans l'air et dans le compost

En utilisant le pourcentage d'abondance pour les principaux phylums retrouvés, quatre d'entre eux prédominent dans la diversité bactérienne tant pour les échantillons de compost que pour ceux de l'air (Figure 16). En effet, dans chaque échantillon, les bactéries des phylums *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Actinobacteria* et *Bacteroidetes* ont été retrouvées dans des proportions variables, dépendamment du type de compost et de la nature de l'échantillon (air ou compost). Les *Firmicutes* sont présentes dans une proportion variant entre 17 à 32 % des OTU totaux retrouvés alors que les *Bacteroidetes* et les *Proteobacteria* sont présentes respectivement dans des proportions allant de 17 à 33 % et de 17 à 44 %. Les *Actinobacteria* sont, quant à elles, le phylum pour lequel l'intervalle le plus grand a été observé, et elles sont présentes dans une proportion allant de 2 à 34 %.

Le phylum prédominant semble dépendre du type de compost et de la nature de l'échantillon. Dans le compost des résidus organiques, les bactéries provenant des phylums *Actinobacteria* et *Firmicutes* sont prédominantes alors que dans le compost des carcasses et tissus animaux, ce sont les bactéries *Bacteroidetes* qui sont les plus abondantes. Dans le compost de fumiers de bovins laitiers, la proportion la plus importante se retrouve chez les *Proteobacteria*. Les variations des proportions observées entre le compost et l'air suggèrent également que les *Actinobacteria* ont une plus grande facilité d'aérosolisation puisqu'elles deviennent un des phylums prédominants dans l'air, et ce, pour les trois centres. Cette étude permet de démontrer que certains phylums et genres bactériens participants au processus de compostage de la matière organique semblent avoir une aérosolisation préférentielle lors des activités réalisées sur le compost alors qu'au contraire certains autres phylums ou genres bactériens semblent moins favorisés par l'aérosolisation.

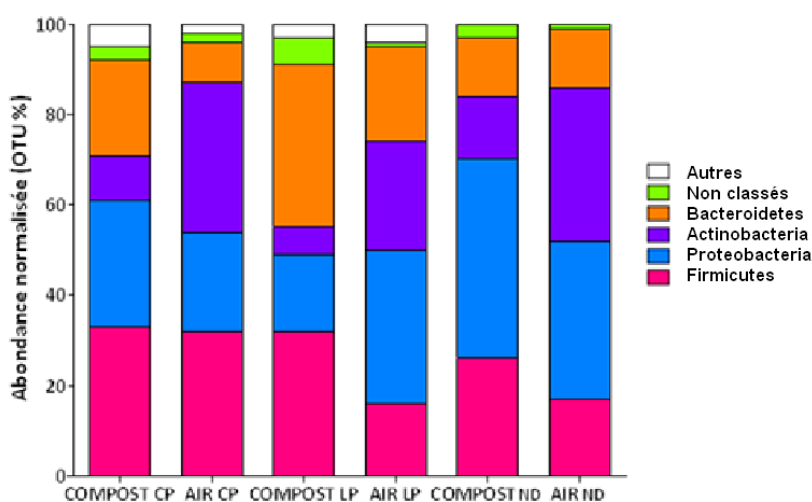


Figure 16 : Distribution taxonomique appartenant aux principaux phylums bactériens retrouvés dans l'ensemble des échantillons d'air et de compost.

4.4.3 Distribution des phylums en fonction des étapes de compostage

Contrairement au type de compost, l'étape de transformation semble avoir un effet limité sur l'abondance relative des différents phylums. En effet, peu de différences entre la représentation des différents phylums en fonction des étapes de compostage sont observables à la Figure 17. Au centre de compostage CR, les *Proteobacteria* sont moins présentes dans l'air lors de la sortie du compost du tunnel que lors du triage de la matière organique. L'inverse est observable pour les bactéries du phylum *Bacteroidetes*; elles sont moins présentes au début du processus dans les trois centres. Les *Firmicutes* sont plus présentes dans l'air après la phase d'initiation au centre du compostage de carcasses et tissus animaux. Ces résultats montrent que la flore microbienne varie non seulement selon le type de compost d'un centre à l'autre, mais aussi, dans une certaine proportion, selon la phase de transformation.

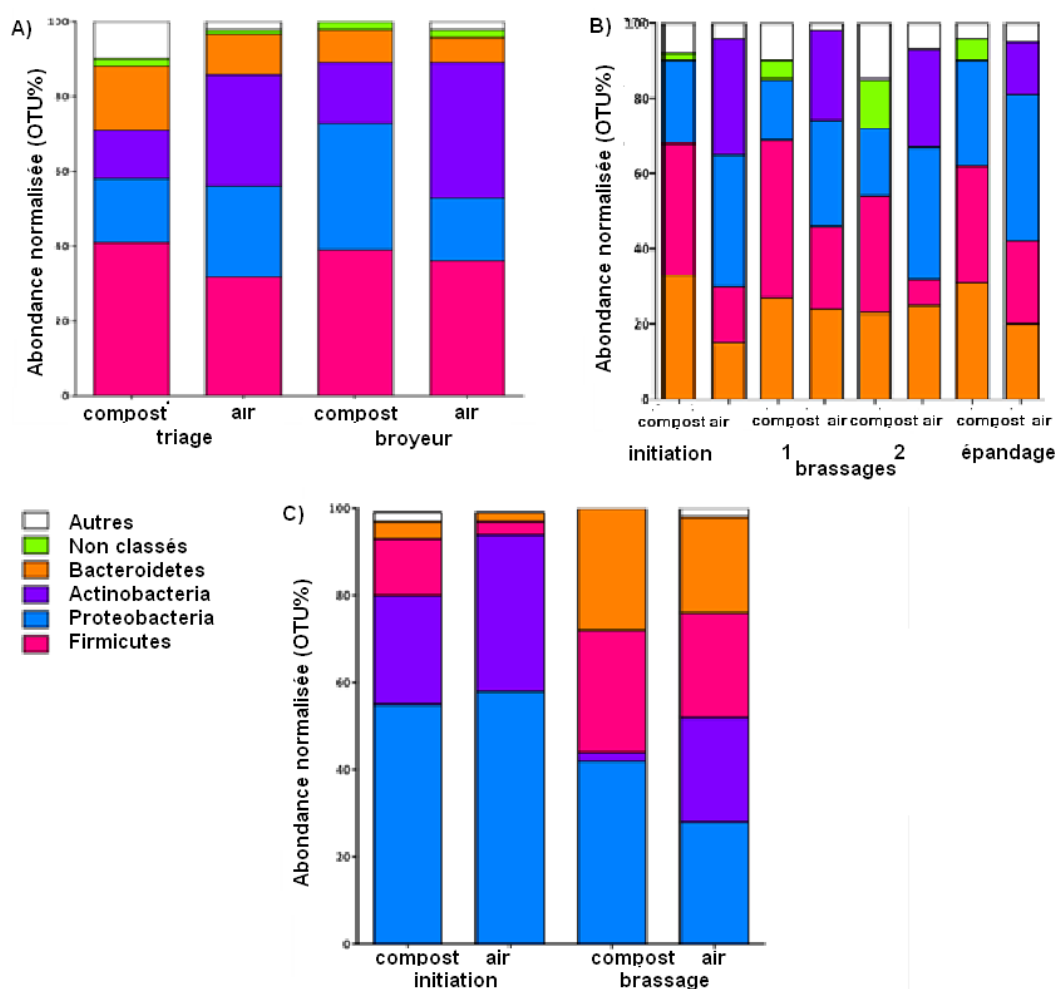


Figure 17 : Distribution taxonomique des différents phylums retrouvés dans l'air et le compost des trois centres de compostage en fonction des étapes de transformation : a) CR, b) LP et c) ND.

La représentation de certains phylums tend à varier en fonction de la nature de l'échantillon, air ou compost, et cela est particulièrement observable en ce qui a trait aux *Actinobacteria*. En effet, le pourcentage des *Actinobacteria* obtenu au centre CR passe de 13 % dans le compost à 30 % dans l'air au triage et de 16 à 36 % à la sortie du tunnel. Dans le centre de compostage de fumiers de bovins laitiers, le contraste est encore plus évident. Alors que les *Actinobacteria* ne font pas partie des phylums principaux du compost, leurs concentrations dans l'air atteignent 15 à 32 % dépendamment des étapes de transformation. Cette augmentation marquée coïncide avec une baisse équivalente des bactéries du phylum des *Firmicutes*. En effet, le pourcentage de ces bactéries diminue lors de l'initiation passant de 35 % dans le compost à 15 % dans l'air, même observation lors du premier brassage alors qu'elles baissent de 42 à 22 %, lors du deuxième brassage en passant de 31 à 7 % et pareillement lors de l'épandage où elles diminuent de 31 à 22 %. Un phénomène similaire est observé au centre de compostage de carcasses et tissus animaux; les données montrent une présence plus grande de bactéries du phylum des *Actinobacteria* dans les échantillons d'air que dans les échantillons de compost. C'est dans ce

type de compost que la différence entre les étapes est la plus marquée alors que la concentration de *Firmicutes* est supérieure pendant le brassage (28 et 22 %) que le remplissage, avec 13 et 3 % respectivement pour le compost et pour l'air.

4.4.4 Distribution des genres d'*Actinobacteria*

Cette étude, comme d'autres, a démontré la présence de plusieurs espèces d'*Actinobacteria* ^(56,96,97). La représentation des différents genres appartenant au phylum des *Actinobacteria* à la Figure 18, montre la présence de *Saccharopolyspora*, une bactérie thermophile, dans tous les échantillons d'air. Dans l'air du centre ND, la proportion atteint même 55 % des *Actinobacteria* totales. Les *Corynebacterium* sont retrouvés dans tous les centres, tant dans le compost que dans les échantillons d'air. La présence dominante de *Thermobifida* est observée dans les composts, mais sa proportion dans les échantillons d'air est beaucoup plus faible. Responsable de la dégradation cellulosique, cette bactérie est très fréquemment rencontrée dans les composts en raison de la température optimale de ce dernier, qui est à 55 °C ⁽⁹⁸⁾. Bien qu'on remarque une certaine variation entre les bactéries retrouvées dans l'air et celles du compost, ces résultats demeurent cohérents avec les résultats des travaux de Kaarakainen *et al.*, qui relatent qu'il existe une relation entre les microorganismes présents dans le matériel en compostage et ceux retrouvés dans les bioaérosols ⁽⁹⁹⁾. Toutefois, certains phylums ou genres semblent être en mesure d'être mis en suspension dans l'air plus facilement. Les *Actinobacteria* constituent un phylum prédominant dans les échantillons d'air, et ce, principalement pendant les phases thermophiles. Malgré que les sources de matières organiques soient différentes, les *Actinobacteria* sont présentes dans les bioaérosols de tous les types de compost.

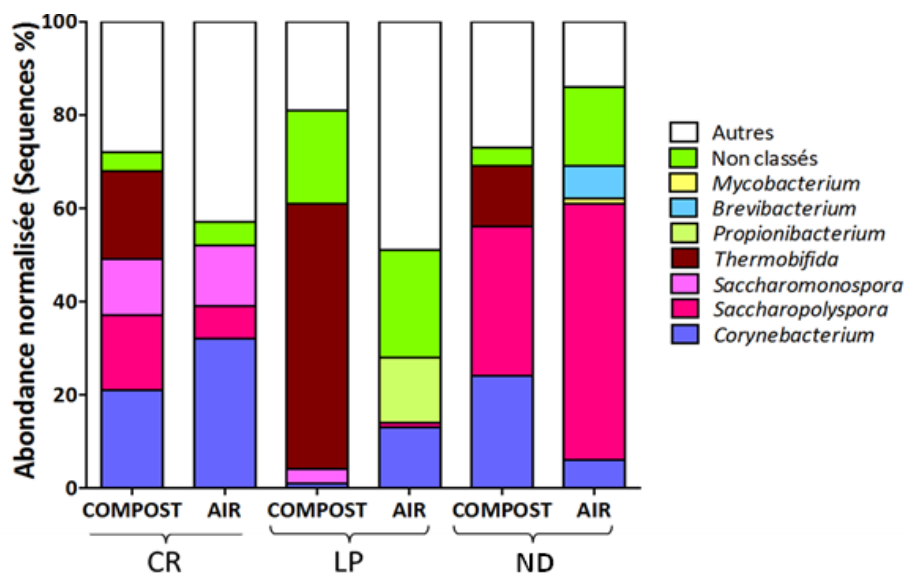


Figure 18 : Distribution taxonomique des genres bactériens appartenant au phylum des *Actinobacteria* dans les échantillons d'air et de compost pour les trois centres de compostage.

En utilisant le séquençage de nouvelle génération, soit le pyroséquençage, la présente étude met en lumière l'aérosolisation préférentielle des *Actinobacteria*. Cette caractéristique peut s'expliquer par la structure et l'arrangement cellulaires de ces espèces ⁽¹⁰⁰⁾ et confirme les données publiées par Bru-Adan *et al.* ⁽³³⁾.

Ces microorganismes représentent un irritant important du système respiratoire humain ⁽⁹⁷⁾, *S. rectivirgula* est reconnu comme un des agents principaux causant l'alvéolite allergique intrinsèque ⁽⁵⁶⁾. D'autres actinomycètes sont également identifiés comme étant des causes émergentes d'infections chez les humains et chez les animaux ⁽¹⁰¹⁾. Galès *et al.* ont récemment démontré la prédominance de cellules bactériennes uniques, non agglomérées, dans les bioaérosols issus des activités de compostage, rendant ces aérosols encore plus susceptibles d'atteindre les parties profondes de l'arbre respiratoire humain ⁽¹⁰²⁾.

4.4.5 Distribution des genres de *Proteobacteria*

Pour le phylum bactérien *Proteobacteria* (Figure 19), une proportion importante d'OTU appartenant au genre *Legionella spp.* a été détectée dans l'air du site de compostage de carcasses et tissus animaux. Ce résultat confirme non seulement ceux obtenus à l'aide des marqueurs de *Legionella spp.* et de *pneumophila*, mais démontre que leur présence, proportionnellement aux autres *Proteobacteria*, est considérable. Ce résultat appuie une fois de plus l'utilisation du marqueur *Legionella* et des autres marqueurs microbiens lors des prochaines évaluations de risque dans les centres de compostage. La présence de *Legionella* dans les sites de compostage de matières domestiques a déjà été décrite ⁽⁹³⁾. L'espèce *L. pneumophila* (séro groupe 1) est une espèce pathogène transmissible par l'inhalation de gouttelettes contaminées qui peuvent être retrouvées dans l'air et parcourir de grandes distances tout en conservant leurs potentiels infectieux. Bien que les raisons expliquant comment les bactéries associées au genre *Legionella* se transmettent par l'air ne soient pas évidentes, leur association avec des protozoaires pourrait expliquer leur survie lorsqu'elles sont transportées sur de longues distances ^(24,30). *L. longbeachae* est une autre espèce de *Legionella* pouvant être détectée dans le compost et causant des pneumonies atypiques. Cette espèce se transmet également par l'air ⁽³¹⁾ et a été retrouvée dans le sol de la région sud de Montréal à l'été 2015 lors d'une enquête sur deux travailleurs ayant contracté la légionellose ⁽¹⁰³⁾.

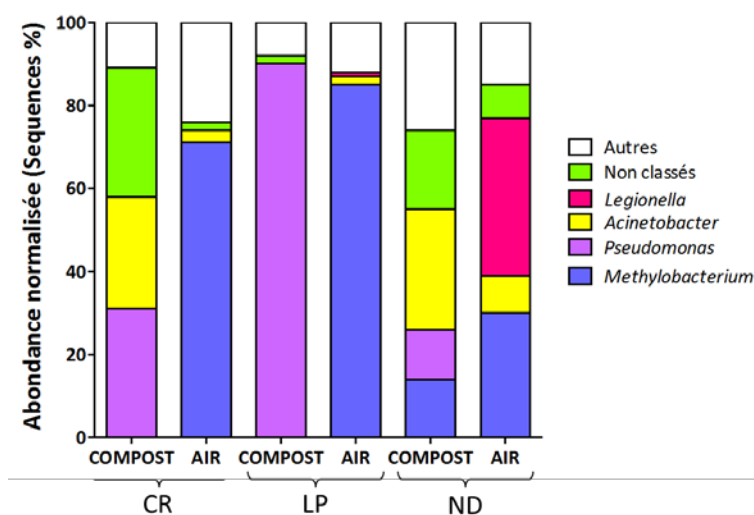
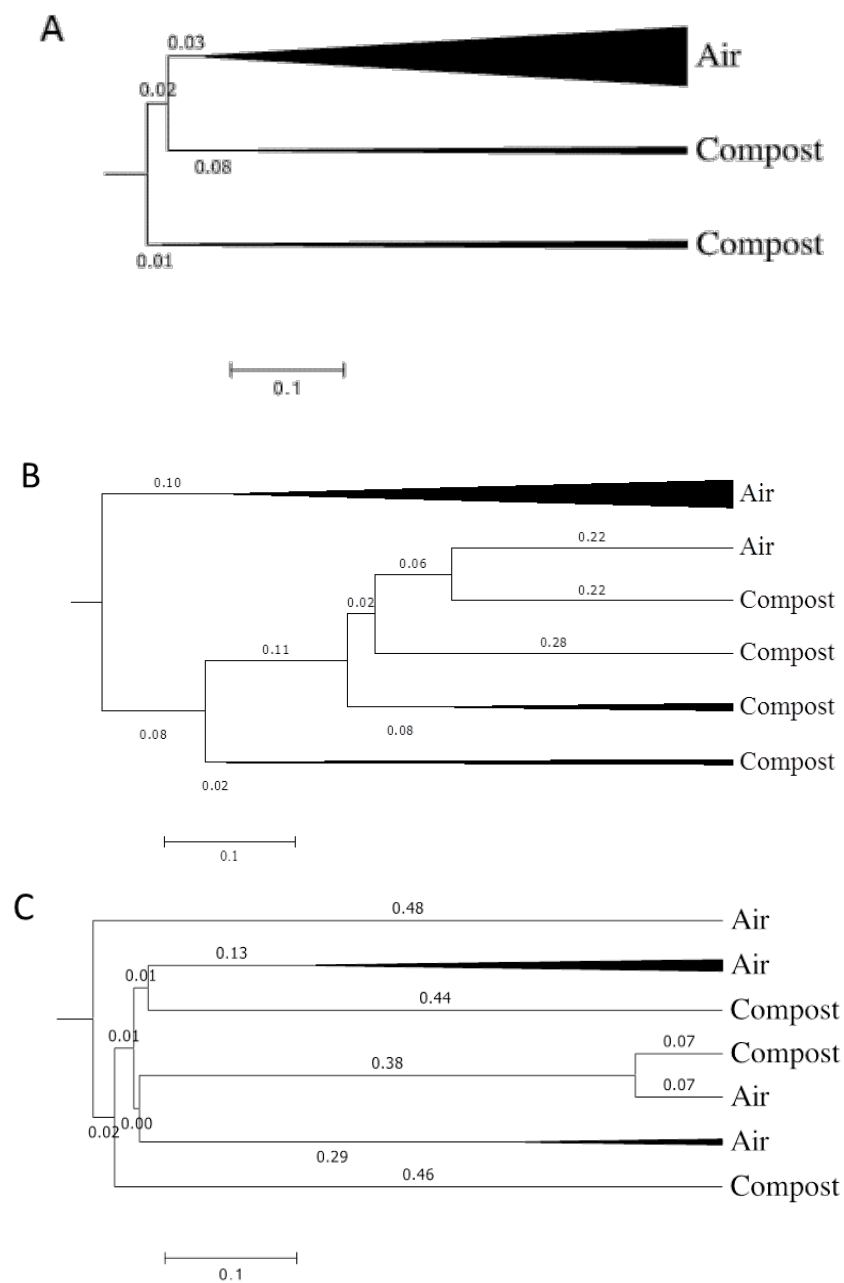


Figure 19 : Distribution taxonomique des genres bactériens appartenant au phylum Proteobacteria dans les échantillons d'air et de compost pour les trois centres de compostage.

De manière surprenante, des séquences appartenant au genre *Pseudomonas* ont seulement été détectées dans les échantillons de compost et aucun dans les échantillons d'air. Dans tous les types de compostage, une proportion importante des *Proteobacteria* appartiennent au genre *Methylobacterium*. La proportion d'OTU s'apparentant au genre *Mycobacterium* est trop faible ($\leq 0,5\%$) pour être représentée sur le graphique, mais elles ont également été retrouvées dans tous les échantillons d'air. Les genres bactériens potentiellement pathogènes, tels que les *Mycobacterium* et *Legionella*, retrouvés dans les bioaérosols pendant les opérations de brassage indiquent leurs habilités à être aérosolisés. Ces données sont fondées sur la transmission évidente de *Mycobacterium* par les aérosols ^(24,104). Sachant que les actinomycètes (*Actinobacteria*) sont de proches parents phylogéniques des *Mycobacterium* et que ces deux groupes partagent plusieurs caractéristiques phénotypiques microbiologiques ^(92,105), cela expliquerait possiblement cette tendance qu'ont les deux pour une aérosolisation préférentielle par rapport à d'autres genres. Bien que la quantité de *Mycobacterium* trouvée soit relativement faible, les doses infectieuses des MNT sont encore inconnues bien que certains genres puissent être responsables, tout comme *S. rectivirgula* d'alvéolite allergique extrinsèque ⁽¹⁰⁶⁾. Ainsi, la présence de ces espèces bactériennes doit être considérée dans l'évaluation du risque pour la santé des travailleurs.

4.4.6 Regroupements phylogénétiques

L'analyse de regroupement par arbres phylogénétiques de Bray-Curtis ⁽¹⁰⁷⁾ démontre qu'il existe d'importantes similarités entre les différents échantillons d'air, et ce, pour les trois centres de compostage (Figure 20). Il est possible de remarquer sur les nœuds des arbres phylogénétiques que les échantillons d'air sont regroupés en grappes ayant des distances phylogénétiques très basses. En effet, le centre de compostage CR a une distance de seulement 0,03; cette distance est de 0,10 pour le centre LP et de 0,13 pour le centre ND. Cela démontre une forte similarité de la flore retrouvée dans ces échantillons, et ce, peu importe la phase de compostage.

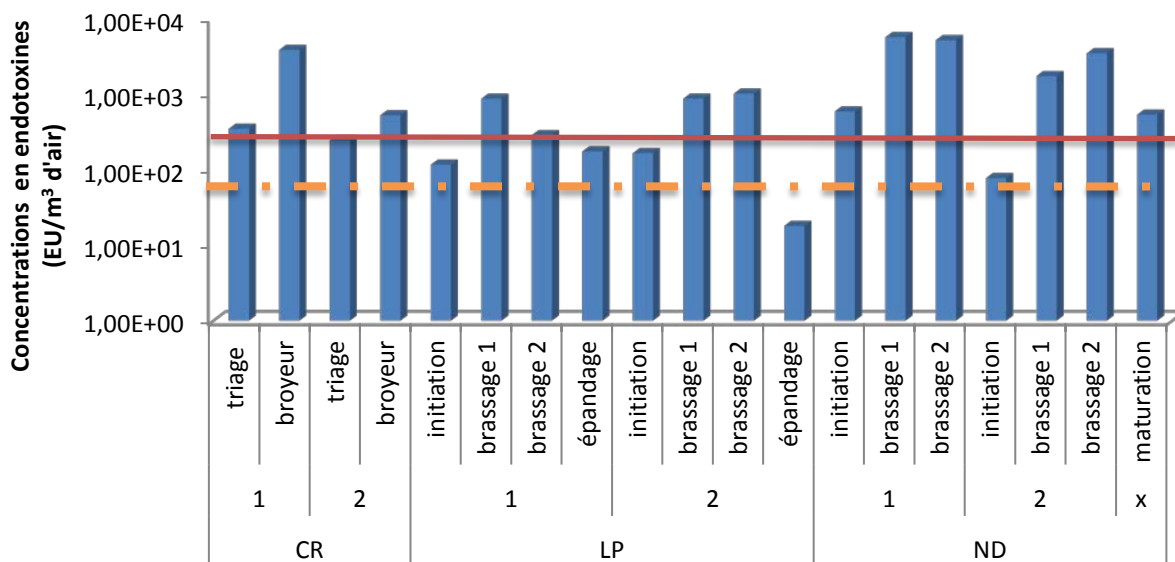


La distance entre les branches est indiquée aux différents nœuds.

Figure 20 : Arbre phylogénétique Bray-Curtis des librairies de séquences pour les échantillons de compost prélevés aux trois sites de compostage : A) CR, B) LP et C) ND.

4.5 Endotoxines

Les concentrations en endotoxines présentées à la Figure 21 montrent que la limite relative d'exposition de 300 UE/m³ d'air, calculée à partir des concentrations dans l'air extérieur durant cette étude, est dépassée à plusieurs reprises. La limite d'exposition de 90 EU/m³ d'air proposée par le Health Council of the Netherland (HCN) est évidemment aussi dépassée de plusieurs ordres de grandeur ⁽⁵¹⁾. Des concentrations supérieures à 5 000 UE/m³ d'air ont été mesurées au centre ND et elles dépassent la limite relative d'exposition lors de 6 des 7 interventions. Au centre CR, les concentrations atteignent 3 000 UE/m³ d'air et dépassent la limite relative d'exposition 50 % du temps. Au centre LP, bien que les niveaux soient dépassés à 3 reprises, les concentrations sont généralement moins élevées. Ce sont des concentrations très élevées qui se situent dans l'intervalle de 1 à 10⁴ UE/m³ d'air, déjà rapportées dans la littérature pour différents centres de compostage ⁽⁸¹⁾. En regard de ces résultats et en raison des effets sur la santé, la mesure des endotoxines dans le cadre d'une évaluation du risque doit être préconisée dans les centres de compostage.



La ligne rouge pleine représente le niveau recommandé par l'IRSST en considérant une limite relative d'exposition qui équivaut à 30 fois le niveau de base. Niveau extérieur moyen utilisé comme niveau de base = 10 EU/m³ d'air.

La ligne orangée pointillée représente le niveau recommandé de 90 EU/m³ d'air par le Health Council of the Netherland (HCN).

Figure 21 : Concentrations en endotoxines mesurées dans l'air ambiant des trois centres de compostage durant le travail des employés.

4.6 Poussières totales (PNCA)

Aucune concentration de poussières non classifiées autrement ne dépasse la norme de 10 mg/m^3 d'air ⁽⁶⁰⁾. La Figure 22 permet de voir que la concentration la plus élevée obtenue durant ce projet est de $1,7 \text{ mg/m}^3$ d'air et elle a été atteinte au centre CR. La majorité des concentrations est inférieure à 1 mg/m^3 d'air. Les concentrations mesurées dans la présente étude sont inférieures à la concentration moyenne de 3 mg/m^3 d'air, rapportée par Pearson et ses collaborateurs ⁽⁸¹⁾. La granulométrie des particules pourrait apporter une explication à la très faible masse de poussière observée, malgré le nombre important de particules. Les poussières sont très petites donc elles ne contribuent pas à produire un poids important. La sous-section suivante présente les résultats granulométriques des particules détectées dans les centres de compostage.

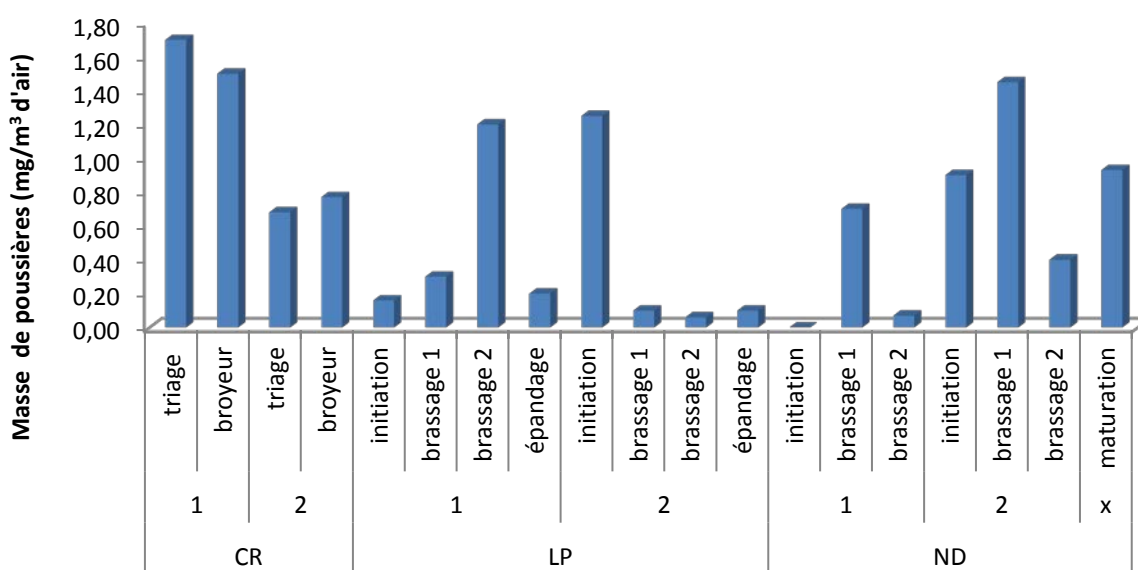


Figure 22 : Quantité de poussières totales mesurée dans les trois centres de compostage durant le travail des employés.

4.7 Poussières UV-APS

4.7.1 Analyses granulométriques des poussières totales

Les granulométries des particules non fluorescentes (totales) ont été obtenues par des appareils à lecture directe. L'UV-APS n'a pas été disponible pour toutes les interventions, il a dû être substitué par le Grimm pour 17 des 24 interventions. Toutefois, pour les prélèvements au centre de compostage ND, les deux appareils ont pu être utilisés simultanément, permettant ainsi une comparaison.

Pour l'ensemble des activités, les diamètres aérodynamiques médians (NMAD) mesurés avec l'UV-APS ont varié entre 0,4 et $1,95 \mu\text{m}$ alors que les diamètres optiques (NMD) mesurés par le GRIMM ont varié entre 0,35 et $0,69 \mu\text{m}$. La majorité des diamètres mesurés était inférieure à $1 \mu\text{m}$ (Figure 23). Les particules de ce diamètre aérodynamique sédimentent lentement et

demeurent par le fait même en suspension durant de longues périodes. Elles peuvent conséquemment se déplacer sur de grandes distances en raison des courants d'air ambiants.

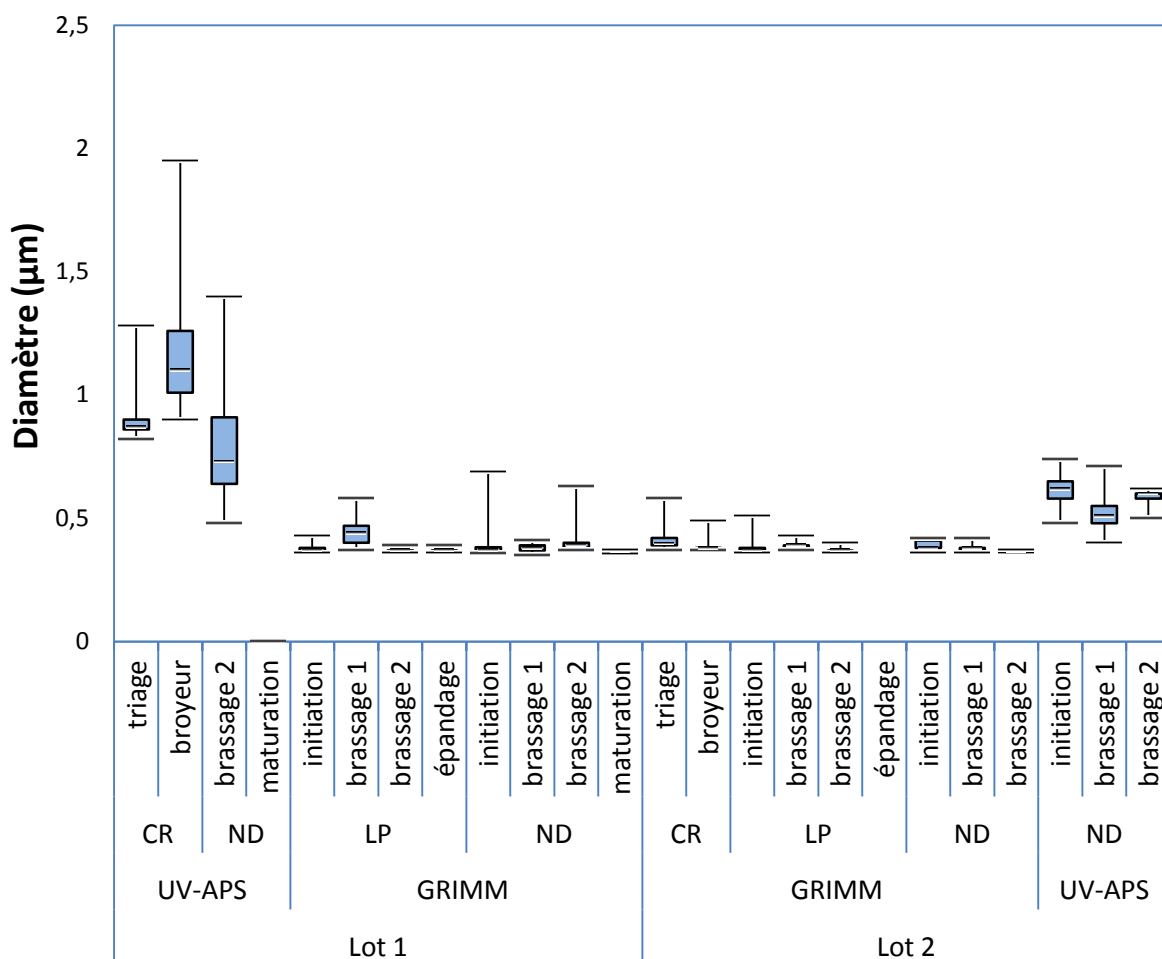


Figure 23 : Diamètre (aérodynamique pour l'UV-APS (NMAD) et optique pour le GRIMM (NMD) médian de la fraction non fluorescente des particules (particules totales) pour chacune des activités, aux trois sites de compostage.

Comme le montrent clairement les résultats rapportés à la Figure 24, l'appareil GRIMM, qui évalue les diamètres de façon optique, a rapporté des diamètres inférieurs à ceux évalués par l'appareil UV-APS. Les petits diamètres des particules présentes dans l'air des centres de compostage expliquent la masse très faible des PNCA. Malgré un nombre important de particules, la contribution massique n'est pas considérable.

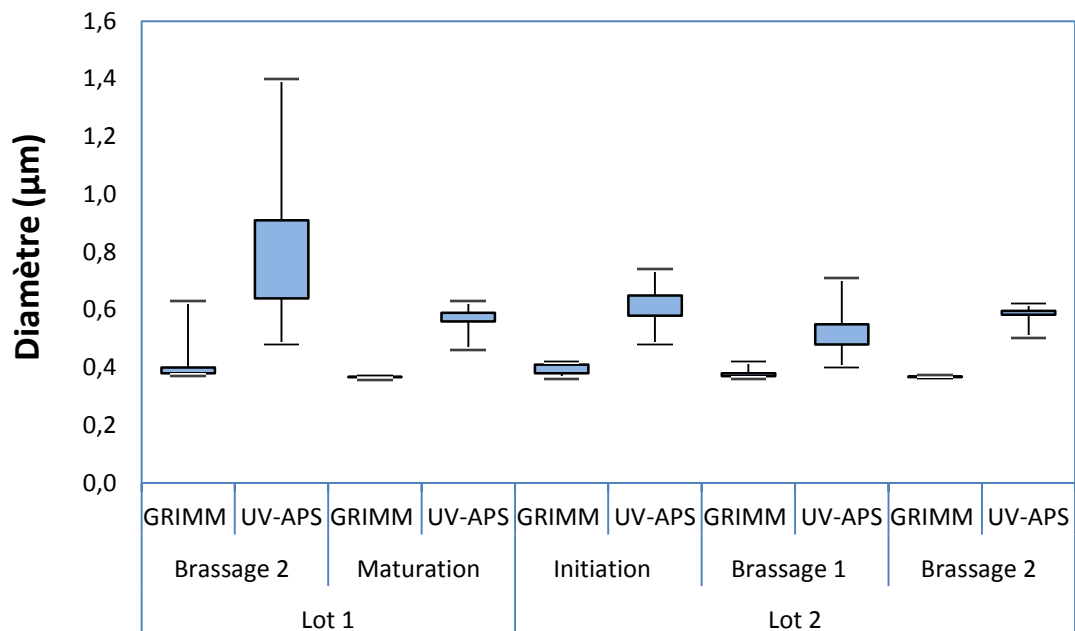


Figure 24 : Diamètres médians optiques obtenus par le GRIMM (NMD) et diamètres aérodynamiques (NMAD) obtenus par l'UV-APS pour le site de compostage de carcasses et tissus animaux (site ND).

L'appareil UV-APS mesure des diamètres aérodynamiques qui sont reliés aux diamètres des particules par la racine carrée de la densité et d'autres facteurs. Les densités moyennes des particules pour différents composts de fumier, de déchets domestiques ou de mélanges de biosolides avec des matériaux comme des feuilles, de la paille ou des copeaux de bois seraient semblables et varieraient entre 1,5 g/cm³ et 1,8 g/cm³ ⁽¹⁰⁸⁾. Weindorf et Wittie ont toutefois rapporté des valeurs moyennes de densité de 2,31 et 2,27 g/cm³ pour deux composts de fumier. Ces auteurs attribuent cette différence de densité à la présence dans le compost de carbonates et d'autres matériaux inorganiques comme de la terre ⁽¹⁰⁹⁾. En admettant que le compost ait une densité moyenne de 1,65 g/cm³, un facteur de 1,3 existerait alors entre les diamètres aérodynamiques et les diamètres des particules mesurés par le GRIMM. D'après les données de ce projet, ces facteurs varieraient entre 1,3 et 1,8. Les différences observées sont attribuables au fait que l'appareil GRIMM mesure des diamètres à l'aide d'une technique optique et n'apprécie donc pas directement le diamètre des particules. De plus, d'autres facteurs comme la forme des particules devraient aussi être considérés dans le calcul du facteur théorique. Nonobstant ces constats, des facteurs plus élevés que ceux théoriques sont attendus puisque le compost sur ce site peut facilement être contaminé par des particules inorganiques, de densité plus élevée, provenant notamment du sol gratté lors du montage de la cellule par la chargeuse.

4.7.2 Analyses granulométriques des particules fluorescentes

Dans ce projet, toutes les particules microbiennes (particules fluorescentes) ont des diamètres aérodynamiques médians inférieurs à 10 μm (Figure 25). Les diamètres aérodynamiques médians se situent autour de 3 μm au centre de compostage ND et autour de 7 μm au centre de compostage CR.

L'UV-APS analyse toutes les particules capables de produire de la fluorescence. Cette fluorescence peut ne pas provenir uniquement des microorganismes. En effet, d'autres matériaux vivants en suspension dans l'air peuvent produire de la fluorescence. Des diamètres aérodynamiques médians se situant entre 1 et 10 μm ont été rapportés dans la littérature pour les bioaérosols⁽¹¹⁰⁾. Les particules inférieures à 10 μm sont facilement respirables et peuvent se déposer dans les zones profondes des poumons.

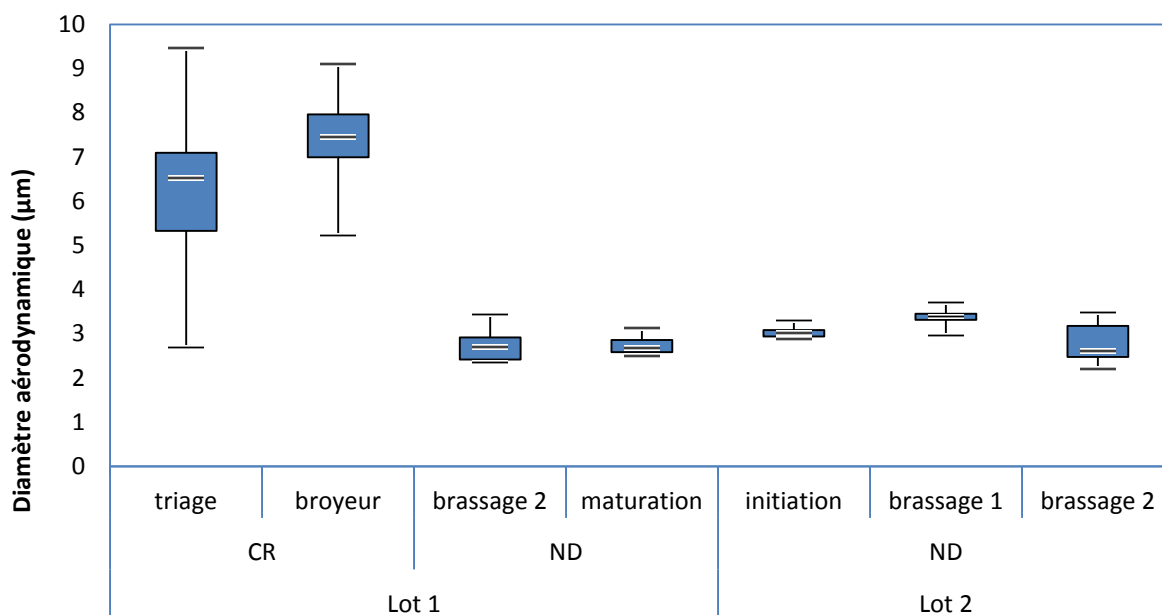


Figure 25 : Diamètre aérodynamique médian de la fraction fluorescente des particules microbiennes selon le site de compostage (sites CR et ND).

L'UV-APS n'analyse pas les particules dont les diamètres sont supérieurs à 15 μm . Les marqueurs microbiens étudiés durant ce projet ont tous des diamètres inférieurs à cette limite. Toutefois, certaines moisissures ayant des diamètres supérieurs à 15 μm peuvent ne pas avoir été comptées par l'UV-APS produisant une sous-estimation de la charge microbienne réelle. Cela constitue une limite de l'appareil si une flore microbienne de grande taille est suspectée. De plus, l'agglomération des microorganismes entre eux ou avec un substrat est également possible. Selon leur taille, ces particules seront comptées avec plus ou moins de fluorescence ou pas comptées du tout.

4.7.3 Analyses des poussières en nombre de particules

Les concentrations en nombre de particules totales non fluorescentes sont nettement plus élevées que celles des particules fluorescentes (Figure 26 et 27). Un rapport d'environ 550, établi à partir des données de l'UV-APS, est obtenu entre les particules totales et celles qui sont fluorescentes. Les médianes obtenues pour les concentrations de particules totales à l'aide du GRIMM au centre CR ont varié de 2×10^6 à $5,5 \times 10^8$ particules/m³ avec une médiane de $2,5 \times 10^7$ particules/m³, celles du centre de compostage de fumiers de bovins laitiers ont varié entre 6×10^6 et $1,67 \times 10^8$ particules/m³ avec une médiane à $3,8 \times 10^7$ particules/m³, et celles du centre de compostage de carcasses et tissus animaux ont varié entre 4×10^6 et $4,02 \times 10^8$ particules/m³ avec une médiane de $5,1 \times 10^7$ particules/m³. Les médianes pour les particules fluorescentes (Figure 27) ont varié entre 1×10^3 et $1,44 \times 10^5$ particules/m³ avec une médiane de 2×10^4 particules/cm³ pour le centre de compostage de résidus organiques et entre 1×10^4 et $5,5 \times 10^6$ particules/m³ avec une médiane de 7×10^4 particules/m³ pour le site de compostage de carcasses et tissus animaux. Fait surprenant, les concentrations en nombre de particules totales obtenues avec les appareils à lecture directe correspondent sensiblement aux concentrations de bactéries totales obtenues par la méthode du q-PCR, alors qu'il était attendu que ce soit les concentrations en particules fluorescentes qui auraient dû correspondre. La présence d'agrégats de cellules bactériennes pourrait expliquer en partie cette sous-estimation observée avec l'UV-APS. En effet, l'UV-APS ne peut faire la distinction entre une et plusieurs cellules alors que la méthode de la q-PCR, qui analyse l'ADN, n'a aucune influence attribuable aux agrégats. Nonobstant ce constat, le centre de compostage de carcasses et tissus animaux a été établi par les deux méthodes comme étant celui ayant les concentrations les plus élevées de cellules microbiennes ou bactériennes.

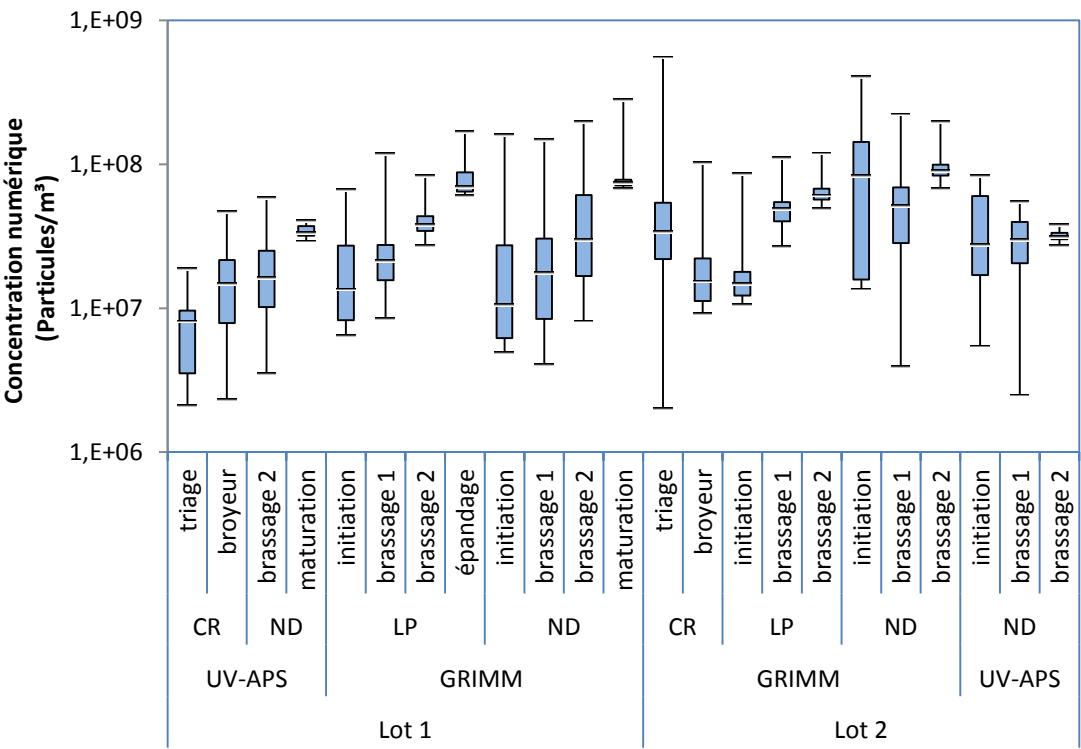


Figure 26 : Concentrations numériques de la fraction non fluorescente des particules totales, selon le site de compostage (sites CR, ND et LP).

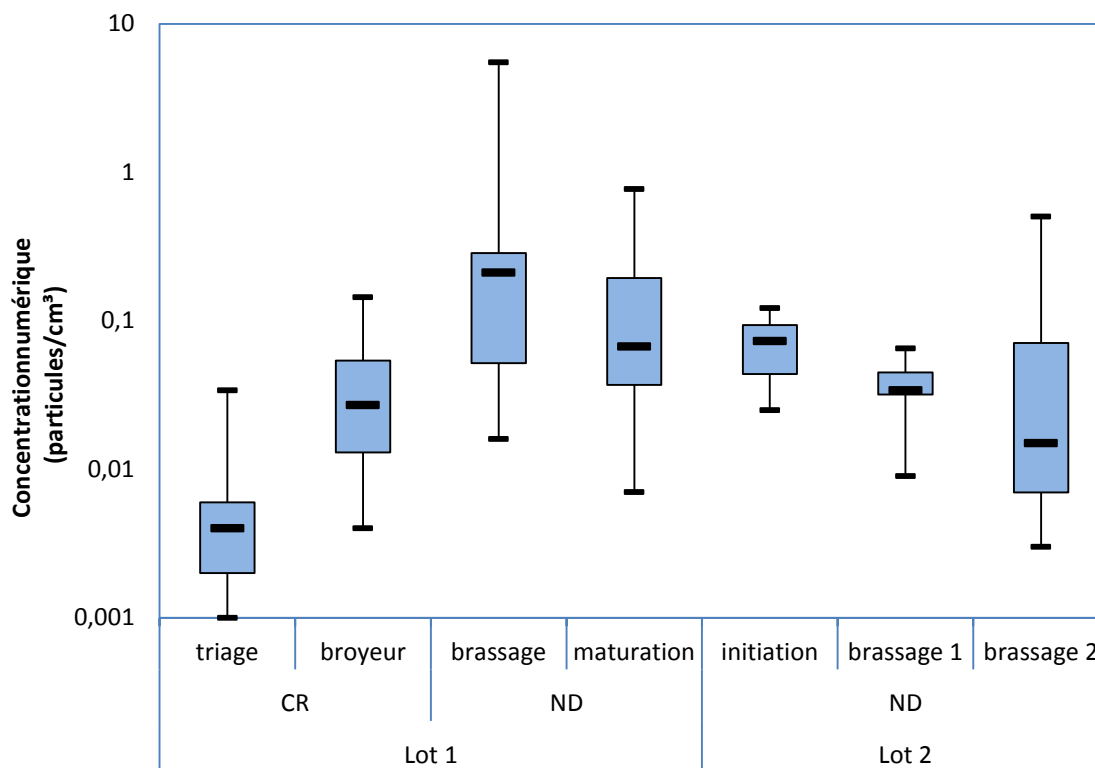


Figure 27 : Concentrations numériques de la fraction fluorescente des particules, selon le site de compostage (sites CR et ND).

Une comparaison des concentrations numériques (Figure 28) de particules relevées par le Grimm et par l'UV-APS pour le centre de compostage ND où les deux appareils ont été utilisés en parallèle permet de montrer que les concentrations évaluées par le Grimm sont supérieures à celles obtenues avec l'UV-APS. Cela est un résultat attendu puisque la gamme d'analyse couverte par le Grimm est plus étendue à $> 20 \mu\text{m}$ alors que celle de l'UV-APS se limite à $15 \mu\text{m}$.

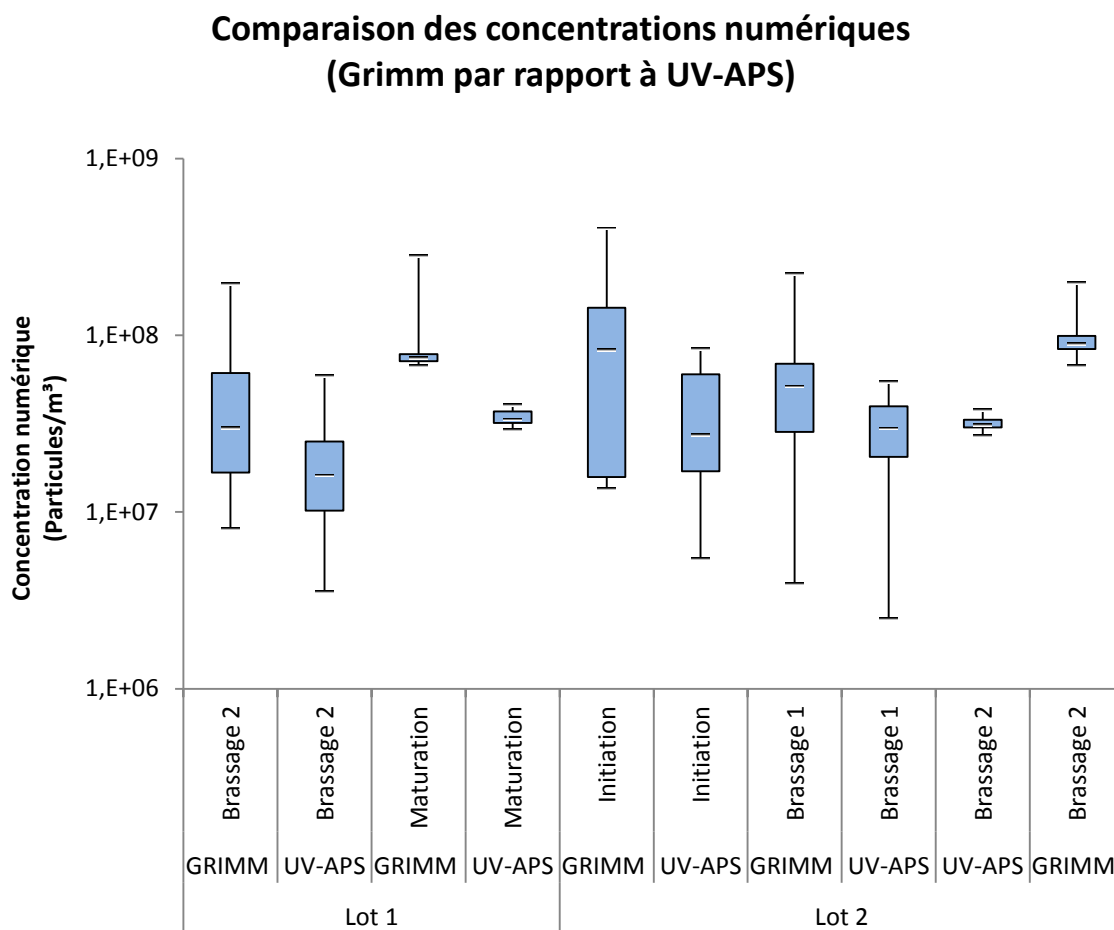


Figure 28 : Comparaison des concentrations numériques (Grimm/UV-APS) pour le centre de compostage ND.

4.8 Composés gazeux et composés organiques volatils (COV)

Sauf pour les concentrations de NH_3 au centre de compostage LP, les concentrations moyennes calculées pour l'ensemble des autres contaminants gazeux ne dépassent pas leur valeur limite d'exposition (Tableau 12). Les concentrations de NH_3 au centre de compostage LP sont élevées en début de processus, mais tendent à baisser considérablement lors du second brassage. La concentration de méthane (CH_4) à ce centre atteint 50 % de la valeur limite lors d'un second brassage. Toujours dans ce centre, une concentration maximale en H_2S de 2,2 a été mesurée lors du remplissage de la cellule. Aux deux autres centres, les concentrations mesurées pour l'ensemble des contaminants demeurent faibles. La concentration moyenne maximale de COV mesurée dans notre étude est de 8,9 ($\pm 2,9$) ppm. Cette concentration a été estimée lors du compostage dans le centre CR. Aucune norme n'est actuellement en vigueur pour les COV. Les concentrations mesurées durant cette étude se rapprochent des concentrations retrouvées dans la littérature. Moreno et ses collègues ont mesuré des concentrations maximales de 13 ppm dans la fraction fraîche du compost⁽¹¹¹⁾, alors que Viegas et ses collègues ont mesuré une moyenne de

8,6 ppm (entre 1,2 et 12,2) de COV total au prétraitement et de 20,8 ppm (entre 16 et 27,1) au chargement des bioréacteurs pour une journée de 8 heures ⁽¹¹²⁾. Selon l'ADEME et Poirot et ses collaborateurs, les concentrations des COV totaux sont relativement faibles dans les centres de compostage et elles se retrouvent principalement au début du procédé de compostage ⁽⁴⁸⁾.

Tableau 12 : Concentrations des contaminants gazeux mesurées aux sites de compostage

Site	Activité	Lot	H ₂ S		CO		CO ₂		CH ₄		NH ₃		NO		NO ₂		COV		N ₂ O	
			n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)	n	Moyenne (écart-type)
				ppm		ppm		ppm		%		ppm		ppm		ppm		ppm		ppm
	VLE		10		35		5000		1,25		25		25		3		-		50	
	Limite de détection		0,05		1				0,05		1		1		0,1		0,1			
CR	Triage	1	184	ND	184	ND	101 615 (38)	184	ND	184 1,4 (1,1)	184	ND	184	ND	184	ND	184 3,4 (1,9)	101	0,9 (0,03)	
	Triage	2	184	ND	184	ND	138 612 (59)	184	ND	193 1,1 (0,6)	193	ND	193	ND	193	ND	193 3,0 (1,5)	138	0,81 (0,09)	
	Broyeur	1	294	ND	294	ND	139 530 (80)	294	ND	294 4,5 (4,7)	294	ND	294	ND	294 0,5(0,5)	294	8,9 (2,9)	139	0,89 (0,07)	
	Broyeur	2	234	ND	234	ND	163 526 (89)	234	ND	235 ND	235 0,7 (0,1)	235	0,8 (0,9)	235	1,3 (1,1)	163	0,73 (0,09)			
LP	Initiation	1	228	ND	228	ND	143 562 (129)	228	ND	228 11,2 (12,6)	228	ND	228	ND	228	ND	228 1,9 (0,9)	143	0,8 (0,07)	
	Initiation	2	137 0,08 (0,2)		137	ND	99 652 (136)	137	ND	160 20,2 (18,3)	160	ND	160	ND	160	ND	160 1,8 (0,9)	99	1,0 (0,2)	
	Brassage 1	1	160 0,06 (0,08)		160	ND	80 630 (129)	160	ND	137 20,4 (12,1)	137	ND	137	ND	137	ND	137 1,4 (0,6)	80	0,79 (0,09)	
	Brassage 1	2	159	ND	159	ND	77 555 (157)	159	ND	113 26,0 (26)	113	ND	113	ND	113 0,2 (0,1)	113	2,6(1,4)	77	0,76 (0,01)	
	Brassage 2	1	118	ND	118	ND	112 449 (74)	119	ND	159 1,5 (2,1)	159	ND	159	ND	159	ND	159 1,1 (0,4)	112	0,70 (0,08)	
	Brassage 2	2		ND	113	ND	60 491 (123)	113 1 (1,4)	113	12 (10)	113	ND	155	ND	155	ND	60	0,7 (0,05)		
	Épandage	1		ND	85	ND	55 425 (8)	85	ND	85 2 (1,4)	85	ND	114	3 (0,7)	114	ND	55	0,6 (0,1)		
	Épandage	2	73	ND	73	ND	46 406 (8)	73	ND	72 ND	72	ND	72	ND	72	ND	46	0,8 (0,06)		
ND	Initiation	1	141	ND	141	ND	91 423 (19)	141	ND	134 ND	134	ND	134	ND	134	ND	134 0,5 (0,2)	91	0,7 (0,1)	
	Initiation	2	4	ND	4	ND	64 472 (67)	4	ND	4 1 -	4	ND	4	ND	4	ND	4 2,0 (0,1)	64	0,7 (0,06)	
	Brassage 1	1	118	ND	118	ND	154 456 (172)	118	ND	119 ND	119	ND	119	ND	119	ND	119 0,7 (0,7)	154	1,9 (5,6)	
	Brassage 1	2	107	ND	107	ND	- DT	107	ND	108 1,3 (0,5)	108	ND	108	ND	108	ND	108 1,4 (1,3)	-	DT	
	Brassage 2	1	64	ND	64	ND	40 497 (57)	64	ND	62 1,3 (0,6)	62	ND	62	ND	62	ND	62 4,1 (0,6)	40	0,6 (0,04)	
	Brassage 2	2	-	-	-	-	- DT	-	-	57 1,5 (0,6)	57	ND	57	ND	57	ND	57 1,3 (0,1)	-	DT	
	Maturation	1	-	DT	-	DT	- DT	-	DT	111 0,8 (0,3)	111	ND	111	ND	111	ND	111 0,9 (0,3)	-	DT	

n : effectif

ppm : parties par million

DT : difficulté technique

ND : non détecté

Les coefficients de corrélation qui ont produit des relations significatives entre les paramètres du compost et les contaminants de l'air sont présentés au Tableau 13.

Tableau 13 : Coefficients de corrélation calculés entre les paramètres mesurés dans le compost et les concentrations de contaminants obtenues dans l'air ambiant. Niveau de signification à $p < 0,05$

		pH	TEE b. h.	MVA	MOT	Taux oxygénation	N total	
							b. s.	b. h.
Actinomycète thermophile cultivable	Corr.		-0,2788		-0,3200			
	p		0,0374		0,0162			
	n		56		56			
Bactérie mésophile cultivable	Corr.							
	p							
	n							
Moisissure mésophile cultivable	Corr.	-0,7081	-0,6235		0,2848			
	p	0,0000	0,0000		0,0334			
	n	56	56		56			
<i>Aspergillus fumigatus</i> cultivable	Corr.	-0,8031	-0,7935		0,2948	0,5141		
	p	0,0000	0,0000		0,0321	0,0204		
	n	54	53		53	20		
<i>Aspergillus fumigatus</i> (par PCR)	Corr.							
	p							
	n							
<i>Mycobacterium spp</i> (par PCR)	Corr.	-0,5341	-0,4838					
	p	0,0224	0,0419					
	n	18	18					
<i>Aspergillus Penicillium</i> (par PCR)	Corr.							
	p							
	n							
Endotoxine	Corr.	-0,3539	-0,4606	-0,4044	0,3315			
	p	0,0293	0,0032	0,0144	0,0392			
	n	38	39	36	39			
NH ₃	Corr.	0,4282	0,5379	0,2575	0,1889		-0,4414	-0,4414
	p	0,0000	0,0000	0,0490	0,0461		0,0000	0,0000
	n	106	112	59	112		112	112
Composé organique volatil	Corr.	-0,3701	-0,3115					
	p	0,0001	0,0009					
	n	105	111					
Poussière non classifiée autrement	Corr.	-0,4385	-0,4065					
	p	0,0084	0,0153					
	n	35	35					

Corr. : coefficient de corrélation
p : niveau de probabilité
n : effectif
b.s. : base sèche

MVA : Masse volumique apparente
MOT : Matière organique totale
TEE : Teneur en eau
b.h. : base humide

Dans cette étude, le pH est le paramètre pour lequel la meilleure corrélation avec les autres contaminants microbiens a été observée. Les meilleures corrélations ont été observées avec les moisissures, l'*Aspergillus fumigatus* (Figure 29). Certaines bactéries, lors de la décomposition de

produits carbonés, produiront des acides organiques intermédiaires qui provoquent l'acidification de l'andin⁽⁸³⁾. Le pH est important pour les microorganismes et peut favoriser une espèce au détriment d'une autre. Par exemple, les bactéries se développent mieux dans un pH neutre tandis que plusieurs moisissures ont une facilité à croître dans un milieu plus acide. La concentration plus élevée de moisissures lorsque le pH est acide s'explique donc par le processus naturel d'évolution de l'activité microbienne dans le compost. Une corrélation significative entre l'ammoniaque et le pH a aussi été démontrée (Tableau 13). Il est reconnu qu'un pH initialement plus basique, comme c'est le cas au centre LP, risque de produire des concentrations plus élevées en ammoniaque⁽⁸³⁾. Les concentrations d'ammoniaque les plus élevées ont été mesurées dans ce centre (Tableau 12).

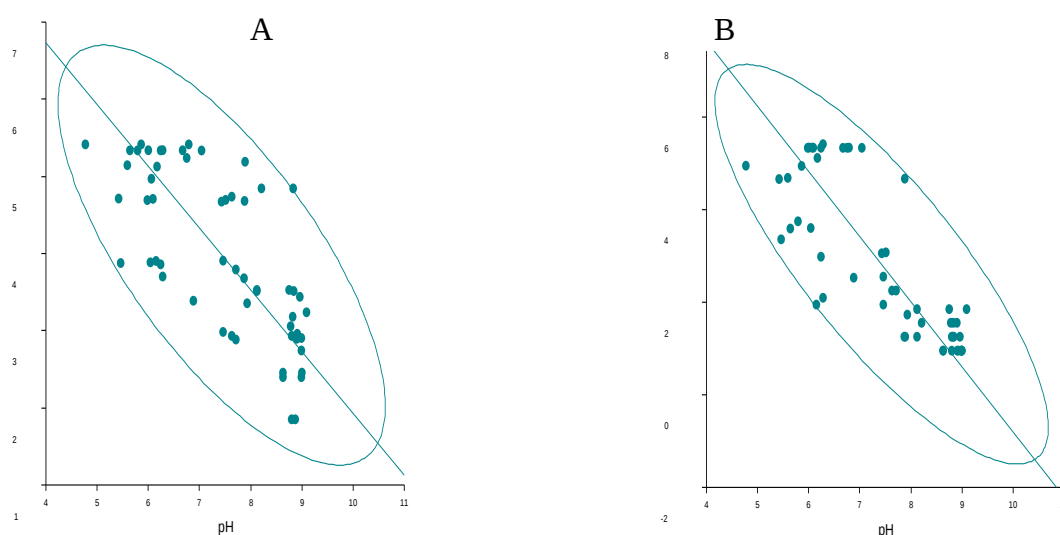


Figure 29 : Régression entre le pH mesuré dans le compost et les concentrations de moisissures cultivables (A) et d'*Aspergillus fumigatus* cultivables (B) dans l'air ambiant, sans égard au centre de compostage. La ligne représente la régression orthogonale de X et Y.

A : r^2 : 0,5206, corrélation : - 0,7215, régression orthogonale = ordonnée : 9,9285 et pente : -0,8001

B : r^2 : 0,6639, corrélation : - 0,8148, régression orthogonale = ordonnée : 13,2718 et pente : 1,4070

Selon les analyses de corrélation, la MOT a une corrélation positive modérée avec la charge mycologique alors que l'inverse s'observe pour les actinomycètes thermophiles (Tableau 13). Les actinomycètes thermophiles ont une croissance lente; comme il a été expliqué précédemment, ils arrivent tardivement dans le processus de compostage. L'apparition de ce groupe microbien se produit principalement lorsque la disponibilité en nutriment diminue et que la température s'élève, favorisant ainsi leur croissance par rapport aux autres groupes microbiens. Ces caractéristiques métaboliques expliquent en partie l'accroissement de leur présence lorsque la matière organique totale diminue dans le compost. Les endotoxines démontrent également une bonne corrélation avec la MOT. La relation positive avec les endotoxines s'explique par la lyse cellulaire produite lorsque les croissances microbiennes

entraînent l'élévation des températures à des degrés intolérables pour la majorité des cellules bactériennes. Des chercheurs appellent cette phase thermophile du compostage le « suicide microbien »^(113,114), malgré qu'elle s'apparente plus à un génocide microbien. La croissance microbienne importante provoque l'élévation de la température de l'andain et c'est l'activité bactérienne par son utilisation des substrats présents qui provoque la diminution de la MOT.

Contrairement à certaines de nos attentes, la teneur en eau du compost ne semble pas avoir un impact aussi important que suspecté sur les concentrations de poussières mesurées dans l'air (Figure 30). Un compost plus humide aurait pu limiter ou du moins partiellement réduire l'aérosolisation, et ainsi permettre une réduction des concentrations de poussières. Par contre, cela ne peut être démontré dans cette étude. Il est toutefois important de se rappeler que les niveaux massiques de poussières mesurés sont bien en dessous des valeurs limites d'exposition. Sur le plan des moisissures, une teneur en eau plus forte affecte négativement ce groupe.

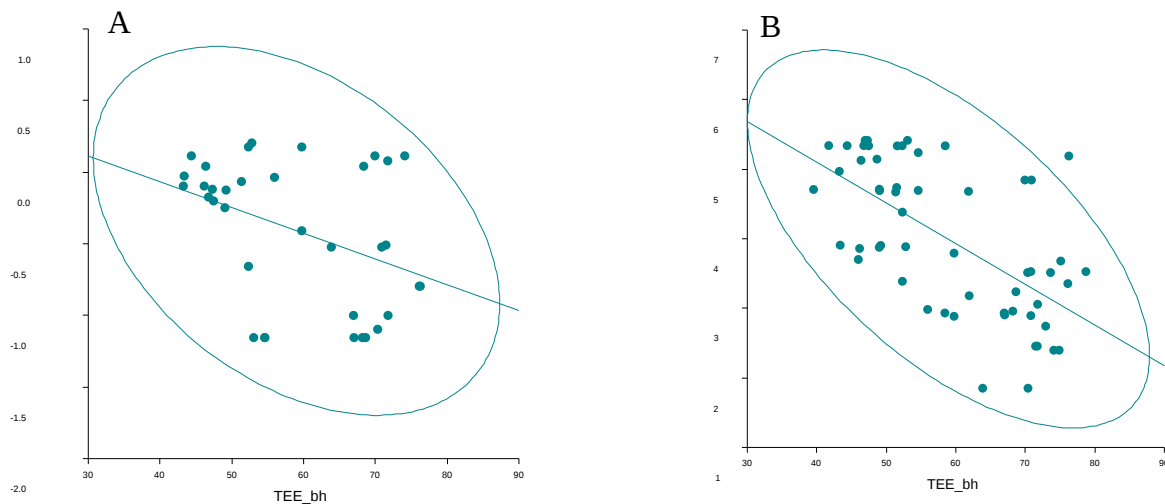


Figure 30 : Régressions entre la teneur en eau (b.h.) mesurée dans le compost et a) les concentrations de poussières et b) les concentrations de moisissures détectées par biologie moléculaire dans l'air ambiant, sans égard au centre de compostage. La ligne sur le graphique représente la régression orthogonale de X et Y.

A : r^2 : 0,1556, corrélation : -0,3944, régression orthogonale = ordonnée : 0,6495 et pente : - 0,0180

B : r^2 : 0,3839, corrélation : -0,6196, régression orthogonale = ordonnée : 7,4478 et pente : -0,0586

5. CONCLUSION

La comparaison des concentrations de contaminants chimiques et microbiologiques dans l'air ambiant des trois centres de compostage étudiés démontre que l'activité, la phase et le lot sont des facteurs qui influencent les concentrations d'un ou de plusieurs des contaminants mesurés. Comme attendu, la manipulation de la matière en compostage produit une remise en suspension des particules engendrant par le fait même l'augmentation des concentrations de microorganismes.

Des différences entre les centres ont également été observées tant pour les microorganismes que pour les composés gazeux. En ce qui a trait aux gaz, seule l'ammoniaque a été détectée à des niveaux supérieurs à la norme au centre de compostage de fumiers de bovins laitiers. Tous les autres gaz mesurés sont présents en concentration très faible, souvent en dessous de la limite de détection des appareils. Pour les gaz, la mesure pourrait se limiter à l'ammoniaque lorsque les intrants sont à risque d'engendrer des concentrations plus élevées. Quant aux microorganismes cultivables, des concentrations supérieures aux niveaux recommandés ont été mesurées pour les bactéries mésophiles au centre de compostage de fumiers de bovins laitiers ainsi qu'au centre de compostage de résidus organiques triés à la source. Dans les trois centres, les concentrations de moisissures sont supérieures au niveau recommandé, mais c'est au centre de compostage de carcasses et tissus animaux qu'elles atteignent les concentrations les plus élevées soit 76 fois le niveau recommandé.

Le pH et le TEE sont les deux paramètres du compost qui ont démontré avoir une relation avec les concentrations de contaminants microbiens. Lorsque le TEE est plus faible et que le pH est acide, les moisissures semblent favorisées. Par contre, des conclusions sur les paramètres optimaux de compostage sont limitées, des expérimentations supplémentaires sont nécessaires.

La recommandation d'utiliser des marqueurs microbiens permettant une évaluation du risque plus rapide, plus spécifique et mieux ciblée est confirmée dans cette étude. En effet, la présence de *Legionella spp* et *pneumophila* dans l'air d'un des centres, celle de *S. rectivirgula* lors de quelques interventions et la présence soutenue des MNT dans l'ensemble des centres de compostage démontre l'apport important que peuvent avoir les analyses de biologie moléculaire à l'aide de marqueurs sur l'évaluation du risque microbien. La présence de ces microorganismes dans l'air appuie leur considération comme marqueurs lors des interventions futures. Les analyses traditionnelles par culture demandent des analyses laborieuses, sont limitées à la flore qui est apte à se multiplier dans les conditions proposées et qui risque de produire des interférences tant pour l'inhibition de la croissance que lors du dénombrement.

Les endotoxines sont un autre contaminant microbien rencontré en concentrations élevées dans les centres de compostage. Puisqu'elles ont des effets sur la santé, leur utilisation conjointement avec les marqueurs moléculaires permettrait certainement une évaluation du risque dans les centres de compostage sans passer par la méthode traditionnelle de culture.

L'évaluation de la biodiversité microbienne établit la présence d'une aérosolisation préférentielle des *Actinobacteria* et des *Mycobacterium spp*. Ces deux microorganismes sont reconnus pour leurs effets sur la santé des travailleurs.

L'étude granulométrique des particules permet de démontrer que les diamètres aérodynamiques des particules fluorescentes sont inférieurs à 10 µm dans les trois centres; le centre de compostage de résidus organiques est celui pour lequel le diamètre est le plus grand. Le diamètre optique des particules totales est plus petit soit de l'ordre de 2 µm. Elles ont donc toutes les deux la capacité de pénétrer profondément à l'intérieur des poumons.

Cette étude permet de confirmer que peu importe les intrants utilisés, les travailleurs des centres de compostage peuvent être exposés à des concentrations élevées de microorganismes et de particules dont la dimension se retrouve dans la fraction respirable. Les concentrations sont variables dans le temps et les types de microorganismes diffèrent également.

6. LIMITES

Cette étude a été réalisée dans trois centres de compostage traitant différents intrants. Bien qu'ils permettent de fournir une estimation des concentrations et contaminants présents dans différents centres, les résultats ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des centres de compostage. De plus, puisque ces trois centres sont localisés en milieu rural où des activités autres peuvent être génératrices de contaminants, il est possible que ces derniers aient une influence sur les concentrations mesurées. Par contre, la prise de mesures avant le début des activités et dans l'air extérieur en retrait du site permet de contrôler cette influence. Il faut également préciser que des installations plus récentes ont vu le jour depuis le début de ce projet et que l'exposition possible des travailleurs dans les centres répondant aux nouvelles normes peut être bien différente que ce qui a été documenté dans ce projet.

Ce projet n'avait pas comme objectif d'évaluer la dispersion des contaminants microbiens ou chimiques dans le voisinage des centres de compostage; les résultats obtenus par les mesures de l'air extérieur ne permettent pas non plus d'en faire l'évaluation puisque ces mesures étaient effectuées pour évaluer les concentrations lors de la manipulation des composts.

L'ensemble des prélèvements a été réalisé en poste fixe, aucun prélèvement personnel n'a été effectué durant ce projet. Les échantillonneurs ont été positionnés afin d'évaluer les concentrations de contaminants produites lors des activités des travailleurs dans les centres. Puisque les travailleurs, qui opéraient les chargeuses, étaient dans leur cabine, celle-ci les maintenait à une certaine distance des échantillonneurs. Des prélèvements personnels auraient permis d'évaluer l'exposition réelle des individus. De plus, il est pertinent de souligner que le temps d'exposition de ces travailleurs n'est pas de 8 heures, car il est limité à la phase de brassage et de transfert du compost, mis à part pour les travailleurs au triage.

L'UV-APS utilisé pour la fraction de particules fluorescentes a une limite de détection pour les particules supérieures à 15 µm, ce qui peut produire une sous-évaluation du nombre de certaines spores de moisissures ayant des dimensions supérieures. Pour les bactéries, le risque de sous-estimation n'est pas présent en raison de la dimension des cellules.

7. RETOMBÉES ET RECOMMANDATIONS

Ce projet permet de proposer une méthodologie d'évaluation de l'exposition des travailleurs basée sur l'analyse à partir de marqueurs moléculaires microbiens et des endotoxines. Cette approche favorise non seulement l'obtention de résultats à l'intérieur d'un court délai, elle peut permettre également de procéder à des prélèvements personnels ce qui n'est pas possible avec la méthode traditionnelle par culture. Finalement, bien que hautement spécialisée comme méthodologie, cette approche demande au laboratoire une charge de travail moins importante.

Dans le cadre de cette étude, il a été démontré la présence de différents pathogènes opportunistes dans les centres de compostage ayant participé au projet. En effet, des bactéries des genres *Legionella spp* et *Mycobacterium* ont été détectées dans plusieurs échantillons d'air et de compost, confirmant ainsi leur présence potentielle au Québec. De tels constats n'avaient pas encore été rapportés dans les centres de compostage du Québec.

En raison du diamètre inhalable des particules et des concentrations élevées de contaminants microbiens mesurées dans les trois centres de compostage participants, il serait judicieux d'envisager l'utilisation d'une protection respiratoire lors de manipulations importantes du compost. Le choix de l'appareil respiratoire peut se faire en considérant les recommandations du « Guide sur la protection respiratoire contre les bioaérosols - Recommandations sur le choix et l'utilisation »⁽⁵⁰⁾.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) TAILLEFER, S. (2010). *Les matières organiques*, [en ligne], <<https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-matieres-organiques.pdf>> (consulté le 15 septembre 2015).
- (2) U.S.EPA (2009). *Opportunities to Reduce Greenhouse Gas Emissions through Materials and Land Management Practices*, [en ligne], <https://www.epa.gov/region-9-documents/opportunities-reduce-greenhouse-gas-emissions-through-materials-and-land>> (consulté le 15 septembre 2015).
- (3) MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (2011). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles plan d'action 2011-2015 : allier économie et environnement.*, [en ligne], Québec, Développement durable, environnement et parcs Québec], <<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2062225>> (consulté le 15 septembre 2015).
- (4) BURELLE, S., et C. FLEURY (2012). *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, [en ligne], Ministère du développement durable de l'environnement et des parcs, <<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2219969>> (consulté le 16 septembre 2015).
- (5) ROBICHAUD, S. (2014). *Le Bannissement des matières organiques au Québec en 2020 comment l'opérationnaliser?*, [en ligne], Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.), Université de Sherbrooke, <https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2014/Robichaud_S_2014-06-26_.pdf> (consulté le 17 septembre 2015).
- (6) BOUTARD, A. (2006). « Le compostage: un outil à privilégier », dans *La gestion intégrée des résidus* :, [en ligne], Montréal, UQAM, p. 24.
- (7) MISRA, R. V., R. N. ROY et H. HIRAOKA (2005). *Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole*, [en ligne], <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/y5104f/y5104f00.pdf>> (consulté le 17 septembre 2015).
- (8) LAVEINE, A., L. POLO, A. ESQUERRE, G. BLINET, J. GAUVIN, P. PARDO et Y. CASAMAYOU BOUCAU (2010). « II- Du compostage au compost : Processus et procédé », dans *Bureau d'Etudes Industrielles Energies Renouvelables et Environnement*, [en ligne], <<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe1/node/51>> (consulté le 17 septembre 2015).
- (9) LECLERC, B. (2012). *Compostage : Les Principes*, [en ligne], <http://www.casasso.com/uploads/rte/File/DossiersPresse/Les%20sols%20vivants%20Bio/4_Compostage_Principes.pdf> (consulté le 17 septembre 2015).

- (10) GOUVERNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK (2015). « Lignes directrices régissant l'emplacement, l'exploitation et l'agrément des installations de compostage au Nouveau-Brunswick », http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/environnement/content/terre_et_dechets/content/compostage/lignes_directricesregissantleplacementexploitationetlagrementd.html (consulté le 17 septembre 2015).
- (11) PERSOONS, R., S. PARAT, M. STOKLOV, A. PERDRIX et A. MAITRE (septembre 2010). « Critical working tasks and determinants of exposure to bioaerosols and MVOC at composting facilities », *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, [en ligne], vol. 213, n° 5, p. 338-347, <http://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.06.001> (consulté le 18 septembre 2015).
- (12) WÉRY, N. (4 avril 2014). « Bioaerosols from composting facilities a review », *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, [en ligne], vol. 4, <http://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00042> (consulté le 18 septembre 2015).
- (13) COCCIA, A. M., P. M. B. GUCCI, I. LACCHETTI, R. PARADISO et F. SCAINI (2010). « Airborne microorganisms associated with waste management and recovery: biomonitoring methodologies », *Annali dell'Istituto superiore di sanità*, [en ligne], vol. 46, n° 3, p. 288-292, http://www.scielo.org/scielo.php?pid=S0021-25712010000300011&script=sci_arttext (consulté le 18 septembre 2015).
- (14) HANS_GATE, A. M., P. D. SCHLOSS, A. G. HAY et L. P. WALKER (janvier 2005). « Molecular characterization of fungal community dynamics in the initial stages of composting », *FEMS Microbiology Ecology*, [en ligne], vol. 51, n° 2, p. 209-214, <http://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.08.009> (consulté le 18 septembre 2015).
- (15) SYKES, P., R. H. K. MORRIS, J. A. ALLEN, J. D. WILDSMITH et K. P. JONES (mars 2011). « Workers' exposure to dust, endotoxin and β -(1-3) glucan at four large-scale composting facilities », *Waste Management*, [en ligne], vol. 31, n° 3, p. 423-430, <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.016> (consulté le 18 septembre 2015).
- (16) DOMINGO, J. L., et M. NADAL (février 2009). « Domestic waste composting facilities: A review of human health risks », *Environment International*, [en ligne], vol. 35, n° 2, p. 382-389, <http://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.004> (consulté le 18 septembre 2015).
- (17) POULSEN, O. M., N. O. BREUM, N. EBBEHØJ et Å. M. HANSEN (1995). « Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes », *Science of the total environment*, [en ligne], vol. 168, n° 1, p. 33-56, [http://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04521-2](http://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04521-2) (consulté le 22 octobre 2014).
- (18) ALBRECHT, A., R. WITZENBERGER, U. BERNZEN et U. JACKEL (2007). « Detection of airborne microbes in a composting facility by cultivation based and cultivation-independent methods », *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, [en ligne], vol. 14, n° 1, p. 81, <http://www.aaem.pl/pdf/14081.pdf> (consulté le 18 septembre 2015).

- (19) DUTKIEWICZ, J. (1997). « Keynote Reviews-Bacteria and Fungi in Organic Dust as Potential Health Hazard », *Ann Agric Environ Med*, [en ligne], vol. 4, p. 11–16, <http://www.aaem.pl/pdf/9741_11.pdf> (consulté le 18 septembre 2015).
- (20) LACEY, J., et B. CROOK (1988). « Fungal and Actinomycetes spores as Pollutants of the Workplace and Occupational Allergens », *Annals of Occupational Hygiene*, [en ligne], vol. 32, n° 4, p. 515–533, <<http://doi.org/10.1093/annhyg/32.4.515>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (21) DANON, M., I. H. FRANKE-WHITTLE, H. INSAM, Y. CHEN et Y. HADAR (juillet 2008). « Molecular analysis of bacterial community succession during prolonged compost curing: Bacterial succession during compost curing », *FEMS Microbiology Ecology*, [en ligne], vol. 65, n° 1, p. 133–144, <<http://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00506.x>> (consulté le 15 décembre 2015).
- (22) SHELTON, B. (avril 1999). « Mycobacterium sp. as a Possible Cause of Hypersensitivity Pneumonitis in Machine Workers », *Emerging Infectious Diseases*, [en ligne], vol. 5, n° 2, p. 270–273, <<http://doi.org/10.3201/eid0502.990213>> (consulté le 14 septembre 2016).
- (23) WALLACE JR, R. J., Y. ZHANG, R. W. WILSON, L. MANN et H. ROSSMOORE (novembre 2002). « Presence of a single genotype of the newly described species *Mycobacterium immunogenum* in industrial metalworking fluids associated with hypersensitivity pneumonitis », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 68, n° 11, p. 5580–5584.
- (24) PRIMM, T. P., C. A. LUCERO et J. O. FALKINHAM (1 janvier 2004). « Health Impacts of Environmental Mycobacteria », *Clinical Microbiology Reviews*, [en ligne], vol. 17, n° 1, p. 98–106, <<http://doi.org/10.1128/CMR.17.1.98-106.2004>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (25) KREISS, K., et J. COX-GANSER (1997). « Metalworking fluid-associated hypersensitivity pneumonitis: a workshop summary », *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 32, n° 4, p. 423–432.
- (26) MOORE, J. S., M. CHRISTENSEN, R. W. WILSON, R. J. WALLACE, Y. ZHANG, D. R. NASH et B. SHELTON (avril 2000). « Mycobacterial contamination of metalworking fluids: involvement of a possible new taxon of rapidly growing mycobacteria », *AIHAJ: a journal for the science of occupational and environmental health and safety*, vol. 61, n° 2, p. 205–213.
- (27) KHAN, I. U. H., S. B. SELVARAJU et J. S. YADAV (novembre 2005). « Occurrence and characterization of multiple novel genotypes of *Mycobacterium immunogenum* and *Mycobacterium chelonae* in metalworking fluids », *FEMS Microbiology Ecology*, [en ligne], vol. 54, n° 3, p. 329–338, <<http://doi.org/10.1016/j.femsec.2005.04.009>> (consulté le 6 septembre 2016).

- (28) STEELE, T. W., C. V. MOORE et N. SANGSTER (1990). « Distribution of *Legionella longbeachae* serogroup 1 and other legionellae in potting soils in Australia. », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 56, n° 10, p. 2984–2988, <<http://aem.asm.org/content/56/10/2984.short>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (29) O'CONNOR, B. A., J. CARMAN, K. ECKERT, G. TUCKER, R. GIVNEY et S. CAMERON (janvier 2007). « Does using potting mix make you sick? Results from a *Legionella longbeachae* case-control study in South Australia », *Epidemiology and Infection*, [en ligne], vol. 135, n° 1, p. 34, <<http://doi.org/10.1017/S095026880600656X>> (consulté le 9 septembre 2015).
- (30) CONZA, L., S. C. PAGANI et V. GAIA (2 juillet 2013). « Presence of *Legionella* and Free-Living Amoebae in Composts and Bioaerosols from Composting Facilities », *PLoS ONE*, [en ligne], vol. 8, n° 7, p. e68244, <<http://doi.org/10.1371/journal.pone.0068244>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (31) WHILEY, H., et R. BENTHAM (avril 2011). « *Legionella longbeachae* and Legionellosis », *Emerging Infectious Diseases*, [en ligne], vol. 17, n° 4, p. 579–583, <<http://doi.org/10.3201/eid1704.100446>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (32) WHILEY, H., M. TAYLOR et R. BENTHAM (septembre 2011). « Detection of *Legionella* species in potting mixes using fluorescent in situ hybridisation (FISH) », *Journal of Microbiological Methods*, [en ligne], vol. 86, n° 3, p. 304–309, <<http://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.05.023>> (consulté le 9 septembre 2015).
- (33) BRU-ADAN, V., N. WÉRY, M. MOLETTA-DENAT, P. BOIRON, J.-P. DELGÈNES et J.-J. GODON (septembre 2009). « Diversity of Bacteria and Fungi in Aerosols During Screening in a Green Waste Composting Plant », *Current Microbiology*, [en ligne], vol. 59, n° 3, p. 326–335, <<http://doi.org/10.1007/s00284-009-9438-3>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (34) LE GOFF, O., V. BRU-ADAN, H. BACHELEY, J.-J. GODON et N. WÉRY (janvier 2010). « The microbial signature of aerosols produced during the thermophilic phase of composting: Diversity in compost bioaerosols », *Journal of Applied Microbiology*, [en ligne], vol. 108, n° 1, p. 325–340, <<http://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04427.x>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (35) EPSTEIN, E., N. WU, C. YOUNGBERG et G. CROTEAU (juin 2001). « Dust and Bioaerosols At a Biosolids Composting Facility », *Compost Science & Utilization*, [en ligne], vol. 9, n° 3, p. 250–255, <<http://doi.org/10.1080/1065657X.2001.10702042>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (36) SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A., E. I. STENTIFORD et S. T. URPILAINEN (mai 2005). « Bioaerosol Generation at Large-Scale Green Waste Composting Plants », *Journal of the Air & Waste Management Association*, [en ligne], vol. 55, n° 5, p. 612–618, <<http://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464652>> (consulté le 18 septembre 2015).

- (37) VAN KAMPEN, V., I. SANDER, V. LIEBERS, A. DECKERT, H.-D. NEUMANN, M. BUXTUP, E. WILLER, C. FELTEN, U. JACKEL, K. KLUG, T. BRUNING, M. RAULF et J. BUNGER (1 juillet 2014). « Concentration of Bioaerosols in Composting Plants Using Different Quantification Methods », *Annals of Occupational Hygiene*, [en ligne], vol. 58, n° 6, p. 693-706, <<http://doi.org/10.1093/annhyg/meu026>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (38) MARCHAND, G., J. LAVOIE et L. LAZURE (octobre 1995). « Evaluation of Bioaerosols in a Municipal Solid Waste Recycling and Composting Plant », *Journal of the Air & Waste Management Association*, [en ligne], vol. 45, n° 10, p. 778-781, <<http://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467406>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (39) LAVOIE, J., G. MARCHAND et G. GINGRAS (1997). « Pit ventilation in pig-housing facilities », *CAN AGRIC ENG*, vol. 39, n° 4, p. 317-326.
- (40) MACHER, J., et H. M. AMMANN (1999). *Bioaerosols: assessment and control*, Cincinnati, Ohio, ACGIH.
- (41) SCHLOSSER, O., A. HUYARD, K. CARTNICK, A. YAÑEZ, V. CATALÁN et Z. DO QUANG (1 septembre 2009). « Bioaerosol in Composting Facilities: Occupational Health Risk Assessment », *Water Environment Research*, [en ligne], vol. 81, n° 9, p. 866-877, <<http://doi.org/10.2175/106143009X407258>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (42) CHANG, M.-W., C.-R. LEE, H.-F. HUNG, K.-S. TENG, H. HUANG et C.-Y. CHUANG (24 décembre 2013). « Bioaerosols from a Food Waste Composting Plant Affect Human Airway Epithelial Cell Remodeling Genes », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [en ligne], vol. 11, n° 1, p. 337-354, <<http://doi.org/10.3390/ijerph110100337>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (43) IVENS, U. I., N. O. BREUM, N. EBBEHØJ, B. H. NIELSEN, O. M. POULSEN et H. WÜRTZ (1 juin 1999). « Exposure-response relationship between gastrointestinal problems among waste collectors and bioaerosol exposure », *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol. 25, n° 3, p. 238-245.
- (44) BÜNGER, J., M. ANTLAUF-LAMMERS, T. G. SCHULZ, G. A. WESTPHAL, M. M. MÜLLER, P. RUHNAU et E. HALLIER (2000). « Health complaints and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers », *Occupational and Environmental Medicine*, [en ligne], vol. 57, n° 7, p. 458-464, <<http://oem.bmj.com/content/57/7/458.short>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (45) DEACON, L., L. PANKHURST, J. LIU, G. H. DREW, E. T. HAYES, S. JACKSON, J. LONGHURST, P. LONGHURST, S. POLLARD et S. TYRREL (2009). « Endotoxin emissions from commercial composting activities », *Environmental Health*, [en ligne], vol. 8, n° Suppl 1, p. S9, <<http://doi.org/10.1186/1476-069X-8-S1-S9>> (consulté le 25 novembre 2015).

- (46) BÜNGER, J., B. SCHAPPLER-SCHEELE, R. HILGERS et E. HALLIER (19 janvier 2007). « A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants », *International Archives of Occupational and Environmental Health*, [en ligne], vol. 80, n° 4, p. 306-312, <<https://doi.org/10.1007/s00420-006-0135-2>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (47) KIVIRANTA, H., A. TUOMAINEN, M. REIMAN, S. LAITINEN, A. NEVALAINEN, J. LIESIVUORI et OTHERS (1999). « Exposure to airborne microorganisms and volatile organic compounds in different types of waste handling », *Annals of agricultural and environmental medicine*, vol. 6, n° 1, p. 39-44.
- (48) ADEME (2012). *Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage. Connaissances acquises et synthèse bibliographique*.
- (49) EDUARD, W. (2007). *The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals: 139. Fungal spores*, Stockholm, National Institute for Working Life.
- (50) LAVOIE, J., Y. CLOUTIER, J. LARA et G. MARCHAND (2007). *Guide sur la protection respiratoire contre les bioaérosols recommandations sur le choix et l'utilisation: rapport*, [en ligne], Montréal, IRSST, Direction des communications, <<http://bibvir1.uqac.ca/archivage/030012723.pdf>> (consulté le 18 septembre 2015).
- (51) HEALTH COUNCIL OF THE NETHERLANDS (2010). *Endotoxins health-based recommended occupational exposure limit*, The Hague, Health Council of the Netherlands.
- (52) DUQUENNE, P., G. MARCHAND et C. DUCHAINE (1 mars 2013). « Measurement of Endotoxins in Bioaerosols at Workplace: A Critical Review of Literature and a Standardization Issue », *Annals of Occupational Hygiene*, [en ligne], vol. 57, n° 2, p. 137-172, <<http://doi.org/10.1093/annhyg/mes051>> (consulté le 15 juin 2015).
- (53) RICE, E. W., et AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (dir.) (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22. ed., Washington, DC, American Public Health Association.
- (54) LAITINEN, S., M. LINNAINMAA, J. LAITINEN, H. KIVIRANTA, M. REIMAN et J. LIESIVUORI (1999). « Endotoxins and IgG antibodies as indicators of occupational exposure to the microbial contaminants of metal-working fluids », *International Archives of Occupational and Environmental Health*, [en ligne], p. 443-450, <http://download.springer.com/static/pdf/357/art%253A10.1007%252Fs004200050397.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%252Fs004200050397&token2=exp=1449846335~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F357%2Fart%25253A10.1007%25252Fs004200050397.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs004200050397*~hmac=977f5533b415c395b2fb0f8fcf4f79cb5ef859255a9cdc50e8152b20247a2024> (consulté le 11 décembre 2015).

- (55) LE GOFF, O., J.-J. GODON, J.-P. STEYER et N. WÉRY (septembre 2011). « New specific indicators for qPCR monitoring of airborne microorganisms emitted by composting plants », *Atmospheric Environment*, [en ligne], vol. 45, n° 30, p. 5342-5350, <<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.052>> (consulté le 19 novembre 2015).
- (56) SCHAFER, J., K. KLUG, V. VAN KAMPEN et U. JACKEL (1 août 2013). « Quantification of *Saccharopolyspora rectivirgula* in Composting Plants: Assessment of the Relevance of *S. rectivirgula* », *Annals of Occupational Hygiene*, [en ligne], vol. 57, n° 7, p. 875-883, <<http://doi.org/10.1093/annhyg/met010>> (consulté le 25 septembre 2015).
- (57) LAVOIE, J., et G. MARCHAND (1997). *Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques* /, [en ligne], Montréal, <http://catalogue.santecom.qc.ca/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=25790&shelfbrowse_itemnumber=46590#> (consulté le 18 septembre 2015).
- (58) POIROT, P., J. GROSJEAN, T. NICOT, F. ZIMMERMANN, P. DUQUENNE, G. GREFF-MIRGUET, V. KOEHLER et C. PIERNOT (2010). « Approches des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. Hygiène et sécurité du travail », *INRS-Hygiène et sécurité du travail*, n° 221, p. 16,
- (59) IRSST (2005). *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail*, [en ligne], IRSST (Institut de recherche en santé et en sécurité du travail), <http://www.airtechnovac.com/pdf/T06-Guide_echantillonnage_contaminants_air_milieudetravail.pdf> (consulté le 21 septembre 2015).
- (60) RSST (2014). « Règlement sur la santé et la sécurité du travail », <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM> (consulté le 3 novembre 2014).
- (61) ANDERSEN, A. A. (novembre 1958). « New Sampler for the Collection, Sizing, and Enumeration of Viable Airborne Particles », *Journal of Bacteriology*, vol. 76, n° 5, p. 471-484.
- (62) MARCHAND, G. (1992). *Dénombrement et identification des bactéries et des moisissures viables*.
- (63) BACH, H.-J., J. TOMANOVA, M. SCHLOTER et J. . MUNCH (mai 2002). « Enumeration of total bacteria and bacteria with genes for proteolytic activity in pure cultures and in environmental samples by quantitative PCR mediated amplification », *Journal of Microbiological Methods*, [en ligne], vol. 49, n° 3, p. 235-245, <[http://doi.org/10.1016/S0167-7012\(01\)00370-0](http://doi.org/10.1016/S0167-7012(01)00370-0)> (consulté le 25 septembre 2015).
- (64) HERPERS, B. L., B. M. De JONGH, K. Van der ZWALUW et E. J. Van HANNEN (10 janvier 2003). « Real-Time PCR Assay Targets the 23S-5S Spacer for Direct Detection and

- Differentiation of *Legionella* spp. and *Legionella pneumophila* », *Journal of Clinical Microbiology*, [en ligne], vol. 41, n° 10, p. 4815-4816, <<http://doi.org/10.1128/JCM.41.10.4815-4816.2003>> (consulté le 23 avril 2014).
- (65) JOLY, P., P.-A. FALCONNET, J. ANDRÉ, N. WEILL, M. REYROLLE, F. VANDENESCH, M. MAURIN, J. ETIENNE et S. JARRAUD (4 janvier 2006). « Quantitative Real-Time *Legionella* PCR for Environmental Water Samples: Data Interpretation », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 72, n° 4, p. 2801-2808, <<http://doi.org/10.1128/AEM.72.4.2801-2808.2006>> (consulté le 23 avril 2014).
- (66) KOX, L. F., H. M. JANSEN, S. KUIJPER et A. H. KOLK (1997). « Multiplex PCR assay for immediate identification of the infecting species in patients with mycobacterial disease. », *Journal of clinical microbiology*, [en ligne], vol. 35, n° 6, p. 1492-1498, <<http://jcm.asm.org/content/35/6/1492.short>> (consulté le 4 septembre 2015).
- (67) U.S.EPA (19 mai 2015). « EPA Mold Technology | Microbiological and Chemical Exposure Assessment Research | US EPA », dans *EPA-United States Environmental Protection Agency*, [en ligne], <<http://www.epa.gov/microbes/moldtech.htm#references>> (consulté le 25 septembre 2015).
- (68) SCHAFER, J., P. KAMPFER et U. JACKEL (1 juillet 2011). « Detection of *Saccharopolyspora rectivirgula* by Quantitative Real-Time PCR », *Annals of Occupational Hygiene*, [en ligne], vol. 55, n° 6, p. 612-619, <<http://doi.org/10.1093/annhyg/mer018>> (consulté le 25 septembre 2015).
- (69) SCHLOSS, P. D., B. R. LARGET et J. HANDELSMAN (1 septembre 2004). « Integration of Microbial Ecology and Statistics: a Test To Compare Gene Libraries », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 70, n° 9, p. 5485-5492, <<http://doi.org/10.1128/AEM.70.9.5485-5492.2004>> (consulté le 14 septembre 2016).
- (70) PRUESSE, E., C. QUAST, K. KNITTEL, B. M. FUCHS, W. LUDWIG, J. PEPLIES et F. O. GLOCKNER (14 novembre 2007). « SILVA: a comprehensive online resource for quality checked and aligned ribosomal RNA sequence data compatible with ARB », *Nucleic Acids Research*, [en ligne], vol. 35, n° 21, p. 7188-7196, <<http://doi.org/10.1093/nar/gkm864>> (consulté le 14 septembre 2016).
- (71) QUAST, C., E. PRUESSE, P. YILMAZ, J. GERKEN, T. SCHWEER, P. YARZA, J. PEPLIES et F. O. GLOCKNER (1 janvier 2013). « The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools », *Nucleic Acids Research*, [en ligne], vol. 41, n° D1, p. D590-D596, <<http://doi.org/10.1093/nar/gks1219>> (consulté le 14 septembre 2016).
- (72) LEGENDRE, P., et E. GALLAGHER (1 octobre 2001). « Ecologically meaningful transformations for ordination of species data », *Oecologia*, [en ligne], vol. 129, n° 2, p. 271-280, <<http://doi.org/10.1007/s004420100716>> (consulté le 17 décembre 2015).

- (73) MARCHAND, G. (2009). *Analyse des endotoxines*, [en ligne], <<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/M-332.pdf>> (consulté le 21 décembre 2015).
- (74) IRSST (1998). « *Poussière totale* ». *Méthode 48-1*.
- (75) HINTZE, J. (2013). *NCSS-NCSS Statistical Software*, [en ligne], LLC. Kaysville, Utah, USA., NSCC, <<http://www.ncss.com/software/ncss/ncss-documentation/>> (consulté le 18 juillet 2014).
- (76) STAGG, S., A. BOWRY, A. KELSEY et B. CROOK (2010). *Bioaerosol emissions from waste composting and the potential for workers' exposure*, [en ligne], Health and Safety Executive, <<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr786.pdf>> (consulté le 19 novembre 2015).
- (77) MALMROS, P., T. SIGSGAARD et B. BACH (1992). « Occupational health problems due to garbage sorting », *Waste Management & Research*, [en ligne], vol. 10, n° 3, p. 227-234, <[http://doi.org/10.1016/0734-242X\(92\)90101-P](http://doi.org/10.1016/0734-242X(92)90101-P)> (consulté le 17 octobre 2014).
- (78) SUVA, P. De la santé au poste de travail (2015). *Valeurs limites d'exposition aux postes de travail*, [en ligne], <<http://extra.suva.ch/webshop/54/54BC7469D03481C0E10080000A63035B.pdf>> (consulté le 18 novembre 2015).
- (79) LE GOFF, O., J.-J. GODON, K. MILFERSTEDT, H. BACHELEY, J.-P. STEYER et N. WÉRY (décembre 2012). « A new combination of microbial indicators for monitoring composting bioaerosols », *Atmospheric Environment*, [en ligne], vol. 61, p. 428-433, <<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.081>> (consulté le 19 novembre 2015).
- (80) GOUVERNEMENT DU CANADA, AGENCE DE SANTÉ PUBLIQUE DU CANADA (2011). « *Aspergillus spp. - Pathogen Safety Data Sheets* », <<http://www.phac-aspc.gc.ca/lab-bio/res/psds-ftss/aspergillus-spp-eng.php>> (consulté le 6 septembre 2016).
- (81) PEARSON, C., E. LITTLEWOOD, P. DOUGLAS, S. ROBERTSON, T. W. GANT et A. L. HANSELL (2015). « Exposures and Health Outcomes in Relation to Bioaerosol Emissions From Composting Facilities: A Systematic Review of Occupational and Community Studies », *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, [en ligne], vol. 18, n° 1, p. 43-69, <<http://doi.org/10.1080/10937404.2015.1009961>> (consulté le 19 juin 2015).
- (82) REBOLLIDO, R., J. MARTINEZ, Y. AGUILERA, K. MELCHOR, I. KOERNER et R. STEGMANN (2008). « Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste », *Applied ecology and environmental research*, [en ligne], vol. 6, n° 3, p. 61-67, <http://aloki.hu/pdf/0603_061067.pdf> (consulté le 27 novembre 2015).

- (83) DE BERTOLDI, M. De, G. Et VALLINI et A. PERA (1983). « The biology of composting: a review », *Waste Management & Research*, [en ligne], vol. 1, n° 1, p. 157–176, <<http://wmr.sagepub.com/content/1/1/157.short>> (consulté le 27 novembre 2015).
- (84) BEFFA, T., M. BLANC, L. MARILLEY, J. L. FISCHER, P.-F. LYON et M. ARAGNO (1996). « Taxonomic and Metabolic Microbial Diversity During Composting », dans M. De Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes et T. Papi (dir.), *The Science of Composting*, [en ligne], Dordrecht, Springer Netherlands, p. 149–161, <http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-1569-5_16> (consulté le 27 novembre 2015).
- (85) RYCKEBOER, J., J. MERGAERT, J. COOSEMANS, K. DEPRINS et J. SWINGS (2003). « Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin », *Journal of Applied Microbiology*, [en ligne], vol. 94, n° 1, p. 127–137, <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2672.2003.01800.x/pdf>> (consulté le 27 novembre 2015).
- (86) BLAIS LECOURS, P., M. VEILLETTE, D. MARSOLAIS et C. DUCHAINE (1 mai 2012). « Characterization of Bioaerosols from Dairy Barns: Reconstructing the Puzzle of Occupational Respiratory Diseases by Using Molecular Approaches », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 78, n° 9, p. 3242–3248, <<http://doi.org/10.1128/AEM.07661-11>> (consulté le 12 septembre 2016).
- (87) BONIFAIT, L., M. VEILLETTE, V. LETOURNEAU, D. GRENIER et C. DUCHAINE (1 juin 2014). « Detection of Streptococcus suis in Bioaerosols of Swine Confinement Buildings », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 80, n° 11, p. 3296–3304, <<http://doi.org/10.1128/AEM.04167-13>> (consulté le 12 septembre 2016).
- (88) MILLNER, P. D., P. B. MARSH, R. B. SNOWDEN et J. F. PARR (1977). « Occurrence of *Aspergillus fumigatus* during composting of sewage sludge. », *Applied and Environmental Microbiology*, [en ligne], vol. 34, n° 6, p. 765–772, <<http://aem.asm.org/content/34/6/765.short>> (consulté le 19 novembre 2015).
- (89) HAUG, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*, Boca Raton, Lewis Publishers.
- (90) SHITAYE, J. E., A. HORVATHOVA, L. BARTOSOVA, M. MORAVKOVA, M. KAEVSKA, N. DONNELLY et I. PAVLIK (2009). « Distribution of nontuberculosis mycobacteria in environmental samples from a slaughterhouse and in raw and processed meats », *Czech Journal of Food Sciences*, [en ligne], vol. 27, n° 3, p. 194–202, <<http://agriculturejournals.cz/publicFiles/08683.pdf>> (consulté le 25 novembre 2015).
- (91) HRUSKA, K., M. KAEVSKA et OTHERS (2012). « Mycobacteria in water, soil, plants and air: a review », *Vet Med*, [en ligne], vol. 57, p. 623–679, <<http://81.0.228.28/publicFiles/83354.pdf>> (consulté le 25 novembre 2015).

- (92) CAYER, M.-P., M. VEILLETTE, P. PAGEAU, R. HAMELIN, M.-J. BERGERON, A. MÉRIAUX, Y. CORMIER et C. DUCHAINE (janvier 2007). « Identification of mycobacteria in peat moss processing plants: application of molecular biology approaches », *Canadian Journal of Microbiology*, [en ligne], vol. 53, n° 1, p. 92-99, <<http://doi.org/10.1139/w06-105>> (consulté le 25 novembre 2015).
- (93) CASATI, S., A. GIORIA-MARTINONI et V. GAIA (2009). « Commercial potting soils as an alternative infection source of *Legionella pneumophila* and other *Legionella* species in Switzerland », *Clinical Microbiology and Infection*, [en ligne], vol. 15, n° 6, p. 571-575, <<http://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2009.02742.x>> (consulté le 21 août 2015).
- (94) CASATI, S., L. CONZA, J. BRUIN et V. GAIA (juillet 2010). « Compost facilities as a reservoir of *Legionella pneumophila* and other *Legionella* species », *Clinical Microbiology and Infection*, [en ligne], vol. 16, n° 7, p. 945-947, <<http://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2009.03009.x>> (consulté le 13 juin 2016).
- (95) DE GANNES, V., G. EUDOXIE et W. J. HICKEY (avril 2013). « Prokaryotic successions and diversity in composts as revealed by 454-pyrosequencing », *Bioresource Technology*, [en ligne], vol. 133, p. 573-580, <<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.138>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (96) KARADAG, D., B. ÖZKAYA, E. ÖLMEZ, M. E. NISSILÄ, M. ÇAKMAKÇI, Ş. YILDIZ et J. A. PUHAKKA (février 2013). « Profiling of bacterial community in a full-scale aerobic composting plant », *International Biodeterioration & Biodegradation*, [en ligne], vol. 77, p. 85-90, <<http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.10.011>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (97) PAŚCIAK, M., K. PAWLIK, A. GAMIAN, B. SZPONAR, J. SKÓRA et B. GUTAROWSKA (décembre 2014). « An airborne actinobacteria *Nocardiopsis alba* isolated from bioaerosol of a mushroom compost facility », *Aerobiologia*, [en ligne], vol. 30, n° 4, p. 413-422, <<http://doi.org/10.1007/s10453-014-9336-4>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (98) MCGRATH, C. E., et D. B. WILSON (novembre 2006). « Characterization of a *Thermobifida fusca* β -1,3-Glucanase (Lam81A) with a Potential Role in Plant Biomass Degradation [†] », *Biochemistry*, [en ligne], vol. 45, n° 47, p. 14094-14100, <<http://doi.org/10.1021/bi061757r>> (consulté le 14 septembre 2016).
- (99) KAARAKAINEN, P., H. RINTALA, T. MEKLIN, P. KÄRKKÄINEN, A. HYVÄRINEN et A. NEVALAINEN (décembre 2011). « Concentrations and diversity of microbes from four local bioaerosol emission sources in Finland », *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), vol. 61, n° 12, p. 1382-1392.
- (100) PRUSSIN, A. J., L. C. MARR et K. J. BIBBY (août 2014). « Challenges of studying viral aerosol metagenomics and communities in comparison with bacterial and fungal aerosols », *FEMS Microbiology Letters*, [en ligne], vol. 357, n° 1, p. 1-9, <<http://doi.org/10.1111/1574-6968.12487>> (consulté le 18 décembre 2015).

- (101) KÖNÖNEN, E., et W. G. WADE (avril 2015). « Actinomyces and Related Organisms in Human Infections », *Clinical Microbiology Reviews*, [en ligne], vol. 28, n° 2, p. 419-442, <<http://doi.org/10.1128/CMR.00100-14>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (102) GALÈS, A., V. BRU-ADAN, J.-J. GODON, K. DELABRE, P. CATALA, A. PONTHEUX, M. CHEVALLIER, E. BIROT, J.-P. STEYER et N. WÉRY (avril 2015). « Predominance of single bacterial cells in composting bioaerosols », *Atmospheric Environment*, [en ligne], vol. 107, p. 225-232, <<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.035>> (consulté le 19 novembre 2015).
- (103) PICARD-MASSON, M., É. LAJOIE, J. LORD, C. LALANCETTE, G. MARCHAND, É. LEVAC, M.-A. LEMIEUX, P. HUDSON et L. LAJOIE (juillet 2016). « Two Related Occupational Cases of Legionella longbeachae Infection, Quebec, Canada », *Emerging Infectious Diseases*, [en ligne], vol. 22, n° 7, p. 1289-1291, <<http://doi.org/10.3201/eid2207.160184>> (consulté le 7 juillet 2016).
- (104) FRONCZEK, C. F., et J.-Y. YOON (2015). « Biosensors for Monitoring Airborne Pathogens », *Journal of laboratory automation*, [en ligne], p. 2211068215580935, <<http://jla.sagepub.com/content/early/2015/04/10/2211068215580935.abstract>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (105) MCNEIL, M. M., et J. M. BROWN (juillet 1994). « The medically important aerobic actinomycetes: epidemiology and microbiology », *Clinical Microbiology Reviews*, vol. 7, n° 3, p. 357-417.
- (106) CHANDRA, H., J. LOCKEY et J. S. YADAV (juin 2015). « Novel antigens of Mycobacterium immunogenum relevant in serodiagnosis of occupational hypersensitivity pneumonitis in machinists », *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, [en ligne], vol. 114, n° 6, p. 525-526.e4, <<http://doi.org/10.1016/j.anai.2015.03.005>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (107) BRAY, J. R., et J. T. CURTIS (1957). « An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin », *Ecological monographs*, vol. 27, n° 4, p. 325-349.
- (108) AGNEW, J. M., J. J. LEONARD, J. FEDDES et Y. FENG (2003). « A modified air pycnometer for compost air volume and density determination », *Canadian Biosystems Engineering*, [en ligne], vol. 45, p. 6-27, <<http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/45/c0241.pdf>> (consulté le 18 décembre 2015).
- (109) WEINDORF, D. C., et R. WITTIE (2003). « Determining particle density in dairy manure compost », *Texas Journal of Agriculture & Natural Resources*, vol. 16.
- (110) LAVOIE, J., G. MARCHAND, Y. CLOUTIER, S. HALLÉ, S. NADEAU, C. DUCHAINE et G. PICHETTE (2015). « Evaluation of bioaerosol exposures during hospital bronchoscopy examinations », *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 17, n° 2, p. 288-299.

- (111) MORENO, A. I., N. ARNÁIZ, R. FONT et A. CARRATALÁ (novembre 2014). « Chemical characterization of emissions from a municipal solid waste treatment plant », *Waste Management*, [en ligne], vol. 34, n° 11, p. 2393-2399, <<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.008>> (consulté le 25 septembre 2015).
- (112) VIEGAS, S., M. ALMEIDA-SILVA et C. VIEGAS (2014). « Exposure to volatile organic compounds in a composting plant », dans *SHO2014-International Symposium on Occupational Safety and Hygiene: proceedings book*. Arezes PM, Batista JS, Barroso MP, Carneiro P, Cordeiro P, Costa N, et al, p. 471-473.
- (113) AHMED, Z. A., Z. M. SEDIK, M. D. ALHARERY, M. A. KHALAF, S. A. NASR et H. A. ABDELRAHMAN (2012). « Microbial Ecology of Composting Dead Poultry and Their Wastes », [en ligne] <http://www.academia.edu/4088081/Microbial_Ecology_of_Composting_Death_Poultry_and_Their_Wastes> (consulté le 25 décembre 2015).
- (114) BEFFA, T. (2002). « The composting biotechnology: a microbial aerobic solid substrate fermentation complex process. », *The composting process and management*., p. 1-30.