

À
Université de Montréal

Évaluation de l'exposition aux microorganismes des chauffeurs de camion et des éboueurs responsables du transport des matières résiduelles et des déchets

Département de santé environnemental et santé au travail

École de Santé Publique de l'Université de Montréal

Mémoire présenté à la faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
ès sciences (M.Sc.) en santé environnemental et santé au travail

Mars 2020

©Fabiola Roseline Dulcie Salambanga

Université de Montréal

Unité académique : Département de santé environnementale et santé au travail/ Institut de
recherche en santé et sécurité au travail Robert-Sauvé, École de santé publique

Ce mémoire intitulé

**Évaluation de l'exposition aux microorganismes des chauffeurs de camion et des éboueurs
responsables du transport des matières résiduelles et des déchets**

Présenté par

Fabiola Roseline Dulcie Salambanga

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Marc André Verner
Président rapporteur

Maximilien Debia
Directeur de recherche

Geneviève Marchand
Codirecteur

Naima El Majidi
Membre du jury

RÉSUMÉ

Les travailleurs impliqués dans la gestion des matières résiduelles domestiques sont continuellement exposés à des bioaérosols pouvant entraîner des problèmes de santé de nature infectieux, allergène et cancérigène. Le but de cette étude était d'évaluer l'exposition aux bioaérosols des éboueurs et des chauffeurs de camion durant la collecte des déchets et des matières résiduelles à Montréal par une analyse multimétrique et multimédia.

Les conditions de travail ont été évalués dans six camions (2 recyclages, 2 organiques et 2 domestiques). Pour chaque camion, des mesures ambiantes (cabine du chauffeur) et des mesures dans la zone respiratoire d'un collecteur et d'un chauffeur ont été réalisées. Des prélèvements sur la surface des sièges des chauffeurs ont aussi été effectués et les filtres à air de l'habitacle des camions ont été évalués. Les échantillons ont été analysés au laboratoire microbiologique de l'IRSST selon la méthode par culture microbienne et la méthode moléculaire Droplet Digital PCR. Les résultats indiquent que les collecteurs sont généralement les plus exposés aux bioaérosols. Les collecteurs des déchets domestiques étaient notamment les plus exposés avec des concentrations moyennes pour les bactéries (27 000 UFC/m³), les endotoxines (100 UE/m³) et les moisissures (5 900 UFC/m³) excédant les recommandations sanitaires. Néanmoins, les collecteurs du compost étaient les plus exposés aux moisissures (6 800 UFC/m³). *E.coli* et *A.fumigatus* ont été détectés dans tous nos échantillons avec des expositions plus importantes pour les travailleurs du domestique. De plus, les sièges des chauffeurs des camions domestiques avaient les niveaux de contamination les plus élevés. La concentration moyenne de *A.fumigatus* (2 500 UG/m³) dans l'air de ces camions était supérieure à celle des camions de recyclage et de compost. Les résultats des filtres n'ont pas permis de tirer de conclusions quant à l'exposition des chauffeurs aux bioaérosols. Les résultats de cette recherche ont permis de mettre en évidence que l'exposition des travailleurs lors de la collecte des déchets pourrait être influencée par le type de déchets, le poste de travail ainsi que les tâches exécutées. Cette étude confirme le potentiel élevé d'exposition aux bioaérosols des travailleurs attitrés au transport des matières résiduelles et des déchets. Elle valide aussi le besoin de réduire les expositions professionnelles par diverses stratégies, y compris les procédures de nettoyage de la cabine et l'utilisation d'équipement de protection respiratoire lors de tâches génératrices de bioaérosols (nettoyage des camions au jet, déchargement des camions).

Mots clés : Matières résiduelles domestiques, bactéries, moisissures, endotoxines, droplet digital PCR (ddPCR), collecteurs, chauffeurs, filtres, habitacle, sièges-chauffeurs

ABSTRACT

Workers involved in the management of household residual materials are continuously exposed to bioaerosols which can cause them health problems of an infectious, allergenic and carcinogenic nature. The purpose of this study was to assess the exposure to bioaerosols of collectors and trucks drivers during the collection of domestic waste and residual materials in Montreal by a multimeric and multimedia analysis.

A sampling campaign was conducted on six drivers and six collectors. A total of 6 trucks that collect recyclable (2), organic (2) and compost (2) waste were evaluated. Samples were also taken from the surface of the drivers' seats, and the cabin air filters were recovered. Samples were analyzed at the microbiology laboratory of the IRSST using the microbial culture method and the molecular method of Droplet Digital PCR (ddPCR).

The results indicate that collectors are generally the most exposed to bioaerosols. Domestic waste collectors were in particular the most exposed with average concentrations for bacteria (27,000 CFU/m³), endotoxins (100 EU/m³) and fungi (5,900 CFU/m³) exceeding health recommendations. However, the compost collectors were the most exposed to fungi (6,800 CFU/m³). *E. coli* and *A. fumigatus* were detected in all of our samples, but exposures were greater for workers collecting domestic waste. In addition, the seats of drivers involved in domestic waste collection had the highest levels of contamination. The average concentration of *A. fumigatus* (2,500 UG/m³) in the air of the cabin of domestic waste trucks was higher than that of recycling and compost trucks. The results of the filters did not allow us to draw any conclusions on their role in terms of drivers exposure to bioaerosols.

The results of this research highlighted that workers exposure to bioaerosols could be influenced by factors such as the type of waste, the workplace and workers' tasks performed. This study confirms the high potential for exposure to bioaerosols of workers assigned to the transport of household residual materials and waste. It also validates the need to reduce workers exposures by various strategies including, cabin cleaning procedures and the use of respiratory protection equipment for specific tasks generating bioaerosols (water jet cleaning of trucks, unloading of trucks).

Key words: Household residual materials, bacteria, fungi, endotoxins, ddPCR, collectors, drivers, filters, cabins, driver's seats

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS et ACCRONYMES	x
DÉDICACES	xii
REMERCIEMENTS.....	xiii
I. INTRODUCTION	1
1.1 Industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques.....	2
1.1.1 Collecte des déchets et des matières résiduelles	2
1.1.2 Enfouissement et incinération des déchets.....	3
1.1.3 Compostage et biométhanisation des matières résiduelles organiques.....	4
1.1.4 Recyclage et réemploi des matériaux.....	6
1.2 Dangers pour la santé dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques	7
1.2.1 Dangers associés à la collecte des ordures	7
1.2.2 Dangers associés à l'industrie du compostage	8
1.3 Exposition aux bioaérosols dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques	8
1.3.1 Bioaérosols	8
1.3.2 Effets sur la santé liés à l'exposition aux bioaérosols dans l'industrie de la gestion des déchets.....	10
1.3.1 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des collecteurs de déchets	13
1.3.2 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs de camion collectant les déchets.....	14
1.3.3 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des travailleurs dans les centres de tri, de compost et d'incinération.....	16
1.4 Réglementation.....	17
1.5 Problématiques et objectifs du projet	18
II. MÉTHODOLOGIE.....	20
2.1 Description du milieu et des tâches	20
2.2 Méthodes d'échantillonnage.....	20
2.2.1 Échantillonnage des particules microbiennes et des endotoxines dans la zone respiratoire des travailleurs	20
2.2.2 Échantillonnage du microbiote de l'air de la cabine et des filtres de l'habitacle	21
2.2.3 Échantillonnage des particules sur le siège du chauffeur.....	21
2.3 Extraction des échantillons.....	22
2.3.1 Extraction des filtres SASS	22
2.3.2 Extraction des filtres à air des cabines	22
2.3.3 Extraction des cassettes.....	22

2.4	Culture bactérienne et mycologique.....	22
2.1	Analyse des endotoxines	23
2.2	Extraction de l'ADN.....	23
2.3	Droplet digital PCR (ddPCR).....	24
III. ARTICLE : ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX MICROORGANISMES ET		
AUX ENDOTOXINES LORS DE LA COLLECTE DES DÉCHETS ET DES MATIÈRES		
RECYCLABLES		
3.1	Contribution des auteurs.....	25
3.2	Abstract.....	27
3.3	Introduction	28
Methods		31
3.3.1	Work description.....	31
3.3.2	Sampling	31
3.3.3	Samples preparation	32
3.3.4	Cultivable analysis	33
3.3.5	Endotoxin analysis	33
3.3.6	Sampling and molecular detection of fungal, targeted bacterial and fungal species (ddPCR).....	33
1.1.	Statistical analysis.....	35
3.4	Results	36
3.4.1	Humidity and temperatures parameters.....	36
3.4.2	Cultivable exposure level.....	36
3.4.3	Molecular quantification and detection of bacteria and fungi.....	40
3.5	Discussion.....	43
3.5.1	Bacterial exposure.....	43
3.5.2	Fungal exposure	43
3.5.3	Endotoxin exposure.....	44
3.5.4	Molecular detection and quantification.....	45
3.5.5	Workers exposure assessment.....	46
3.6	Conclusion	49
IV. RÉSULTATS		
55		
V. DISCUSSION GÉNÉRALE		
59		
5.1	Niveau de bioaérosols dans la zone respiratoire des travailleurs et dans l'air ambiant de la cabine du camion	59
5.1.1	Zone respiratoire des chauffeurs et des collecteurs.....	59
5.1.2	Cabines	60
5.1.3	Évaluation de l'exposition des chauffeurs	61
5.2	Niveau de contamination et effet du temps sur la prolifération microbienne des filtres à air de l'habitacle des cabines	61
5.2.1	Contamination bactérienne et en endotoxines des filtres à air de l'habitacle	62
5.2.2	Contaminations fongiques.....	62
5.2.3	Évaluation microbienne en fonction du temps.....	63
5.3	Relation entre l'exposition microbienne du chauffeur avec les niveaux de contamination de l'air de la cabine, des filtres à air et des sièges du camion.	63
5.3.1	Comparaison des deux méthodes : culture et moléculaire (ddPCR).....	64

5.4	Recommandations de l'étude.....	64
VI.	Conclusion.....	66
	BIBLIOGRAPHIE.....	67
	APPENDICE	74

LISTE DES FIGURES

PARTIE I

Figure 1 : Composition d'un contenant à déchets	1
Figure 2 : Principe de l'incinération	4
Figure 3 : Principe de la biométhanisation	5
Figure 4 : Photographie de deux échantillons de culture mycologique après 3-6 jours d'incubation à 25 °C	23
Figure 5 : Évaluation de la concentration des contaminants des filtres à air de l'habitable en fonction du temps.....	57

PARTIE II (ARTICLE):

Figure 1: CIP10 sampling method	32
Figure 2: Distribution of bacteria (A), fungi (B) and endotoxin (C) concentrations stratified by the type of waste	38
Figure 3: Distribution of bacteria (A), fungi (B) and endotoxin (C) concentrations stratified by the matrix	39
Figure 4: Distribution of molecular concentrations stratified by the type of waste.....	41
Figure 5: Distribution of molecular concentrations stratified by the matrix	42
Figure 6: The two types of domestic waste discharges.....	47

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I :

Tableau 1 : Concentrations moyennes et médianes des bioaérosols dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques.....	16
Tableau 2 : Sommaire des recommandations pour les niveaux d'exposition aux bioaérosols en milieu professionnel.....	18
Tableau 3 : Niveaux de contamination bactériens et en endotoxines des filtres à air de l'habitacle	55
Tableau 4 : Niveaux de contamination fongiques des filtres à air de l'habitacle	56
Tableau 5 : Concentrations des bactéries et des endotoxines mesurées sur les sièges des chauffeurs.....	58
Tableau 6 : Concentrations fongiques mesurées sur les sièges des chauffeurs	58

PARTIE II (ARTICLE) :

Table 1: Primers and probes	35
Table 2: Combinations parameters	36
Table 3: Geometric mean (GM) and geometric standard deviation (GSD) of airborne bacteria, fungi and endotoxin for personal (drivers and collectors) and ambient (cabins) measurements during the waste collection	37
Table 4: Microorganism quantification and detection of personal (collectors and drivers) and ambient (cabins) measurements during the waste collection.....	40

LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS ET ACCRONYMES

18S:	Petit sous unité ribosomique 18 des eucaryotes
3RV-E:	Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation, Élimination
σ_g :	Écart type geometric/Geometric standard deviation
ACGIH:	American conference of governmental industrial hygienists
ADN:	Acide Désoxyribonucléique
AFB1:	Aflatoxine B1
<i>A.fumigatus</i> :	<i>Aspergillus fumigatus</i>
APBA:	Aspergillose broncho-pulmonaire allergique
APSAM:	Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail, secteur « affaires municipales »
CFU :	Colony forming unit
CO :	Monoxyde de carbone
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
ddPCR :	Droplet Digital Polymerase Chain Reaction
DECOS:	Dutch Expert Committee on Occupational Safety
DL:	Detection limit
EU:	Endotoxins units
FEV1:	Forced expiratory volume one second
FVC:	Forced vital capacity
GM:	Geometric mean
GSD:	Geometric standard deviation
GU:	Genomic units
IL-8:	Interleukine-8
INRS:	Institut national de recherche et de sécurité
IRSST:	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail
LER:	Limite d'exposition relative
LET:	Lieu d'enfouissement technique
MG :	Moyenne géométrique
Min :	Minutes
N ₂ O:	Oxyde nitrique
NH ₃ :	Ammoniac
NOEL :	No observed effect level
NTC:	Negative target control
q-PCR :	Polymerase chain Reaction quantitative
p:	Probability-value
PC :	Positive control
REL:	Relative exposure limit
rpm:	rotation par minute
r _s :	Coefficient de Spearman

SUVA: Caisse nationale d'assurance Suisse en cas d'accidents
UE: Unité d'endotoxine
UFC: Unité formatrice colonies
UG : Unité génomique
VEM : Valeur d'exposition moyenne

DÉDICACES

À l'Éternel et à Jésus,

À travers l'Esprit Saint qui m'a guidé et m'a donné la force tout au long de ses deux années de maîtrise.

À mes parents,

François-Xavier Salambanga et Caroline Sorgho Salambanga, qui sont mes deux modèles. Ils m'ont permis de venir faire mes études au Canada en les subventionnant. Ils m'ont aussi inculqué des valeurs nobles qui m'ont toujours permis d'avoir la tête sur les épaules.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier de tout mon cœur Geneviève Marchand et Maximilien Debia de m'avoir donné l'opportunité d'intégrer leur équipe de recherche et de m'avoir permis d'acquérir de nombreuses connaissances toujours dans le souci de la rigueur. Merci beaucoup pour tous vos conseils et vos critiques constructives qui ont su nourrir mes réflexions. Merci pour vos encouragements perpétuels, votre assistance, votre patience, votre compréhension et surtout vos disponibilités.

J'aimerais aussi témoigner toute ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué de façon substantielle à ce projet, dont Loïc Wingert, Isabelle Valois, Julien Trépanier et Nancy Lacombe.

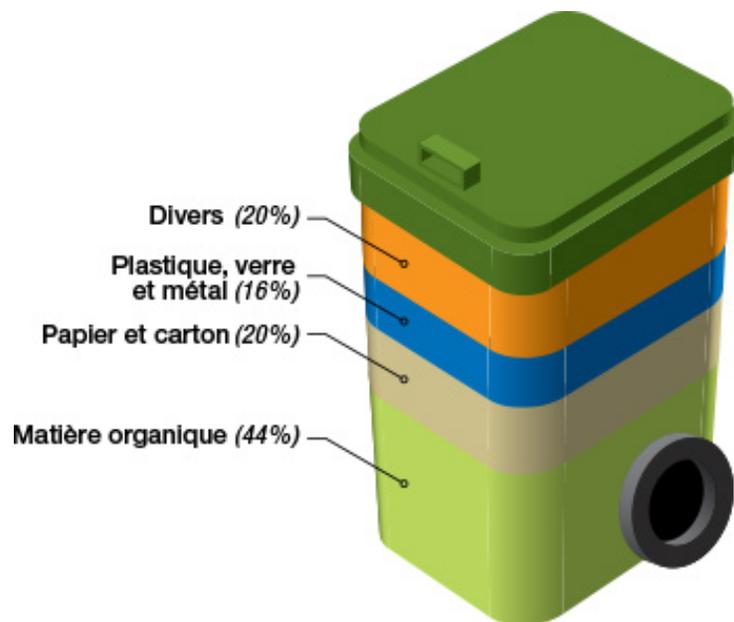
Je remercie aussi Jérôme Lavoue d'avoir accepté d'être mon mentor. Merci pour vos conseils, votre disponibilité et surtout votre aide avec le logiciel R studio.

Un grand merci au département de santé environnementale et santé au travail et la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de Montréal de m'avoir octroyé la bourse de dépannage de la FESP.

Merci aussi gouvernement burkinabè de m'avoir accordé l'exemption des frais de scolarité pour les étudiants internationaux.

I. INTRODUCTION

Au Québec, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques rapporte qu'environ 13 millions de tonnes de matières résiduelles sont produites annuellement par les citoyens (1). La loi sur la qualité de l'environnement, dans son article 1, définit les matières résiduelles domestiques (matières résiduelles domestiques) comme étant « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, tous matériaux et produits, ou plus généralement tout bien abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon » (2). Généralement, il s'agit des ordures produites par tout ménage durant sa vie quotidienne tels que les résidus alimentaires (matières putrescibles), les résidus de jardin ou verts (matières organiques), et les matériaux recyclables (papier, carton, plastique, métal et les résidus de construction). La figure 1 donne un aperçu de la quantité des différents types de matières résiduelles domestiques produits par les ménages et pouvant se retrouver dans un contenant à déchets.



https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/matieresresiduelles/ordures_menageres/lieu_enfouissement.aspx

Figure 1: Composition d'un contenant à déchets

Au cours des dix à 15 dernières années, la nécessité de réduire les risques d'atteinte à l'environnement et à la santé humaine s'est fait sentir en favorisant des perspectives et des comportements de développement durable basés sur un concept « d'économie verte » (3). Le principe de l'économie verte repose sur un mode de production et de gestion respectant l'environnement.

D'après Cheneval et al., les nombreux secteurs de l'économie verte peuvent être regroupés en plusieurs catégories, dont la protection de l'environnement, la gestion des ressources et les services environnementaux. La gestion des matières résiduelles domestiques peut être classée dans la catégorie de la protection de l'environnement ou encore de la gestion des ressources (3).

La politique québécoise de gestion de matières résiduelles « vise à créer une société sans gaspillage qui cherche à maximiser la valeur ajoutée par une saine gestion de ses matières résiduelles ». Cet objectif se base sur le potentiel d'exploitation des matières résiduelles domestiques pour la fabrication de biens et pour la production d'énergie (4).

Cette prise de conscience face aux risques de pollution causés par les matières résiduelles domestiques s'est manifestée par l'augmentation des centres de tri, la création et la mise en marché de nouveaux procédés permettant la production de source d'énergie alternative. Cet essor d'écologisation a engendré un accroissement rapide de la main-d'œuvre dans ce secteur industriel couramment appelé les « emplois verts » ou les « métiers de l'environnement » (3,5).

1.1 Industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques

Une fois les matières résiduelles domestiques collectées au Québec, elles peuvent être éliminées par l'enfouissement ou l'incinération, être réutilisées ou mises en valeur par différents procédés tels que le recyclage, le réemploi, le compostage et la biométhanisation. La politique québécoise de gestion de matières résiduelles hiérarchise les actions à privilégier pour une saine gestion des matières résiduelles selon le principe des **3RV-E** (**R**éduction à la source, **R**éemploi, **R**ecyclage, **V**alorisation, **É**limination) (6).

1.1.1 Collecte des déchets et des matières résiduelles

La collecte consiste à ramasser les matières résiduelles domestiques sur leur lieu de production, puis les vider dans les camions à ordures et enfin les acheminer à leur lieu de traitement (7). Plusieurs types de matières résiduelles domestiques sont collectés quotidiennement, dont les

matières résiduelles organiques, recyclables et les déchets domestiques. Dépendamment de leur nature, les matières résiduelles domestiques vont être dirigés vers un centre de tri, de recyclage, de regroupement, de valorisation ou de stockage.

La collecte des matières résiduelles domestiques est une activité génératrice d'impacts et de nuisances sur l'environnement et le voisinage en raison des émissions des camions, du bruit généré par les systèmes de compactage et par la manipulation des contenants et des sacs à ordures.

1.1.2 Enfouissement et incinération des déchets

L'enfouissement et l'incinération se regroupent dans la catégorie de l'élimination des 3RV-E. Ces deux modes de traitement s'appliquent généralement aux déchets qui n'ont pas de potentiel de réemploi, de recyclage et de valorisation (2). Au Québec, le gouvernement a prévu de bannir l'élimination des matières organiques d'ici 2020 à 2022 au profit de leur valorisation (8).

i. Enfouissement

Sur les lieux d'enfouissement, les déchets sont compactés et recouverts régulièrement avec de la terre ou un matériau inerte afin de réduire les odeurs, les risques sanitaires, environnementaux et de sécurité publique.

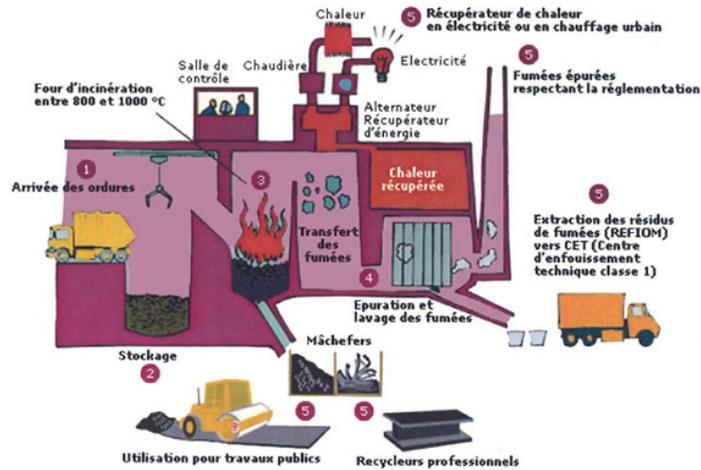
L'enfouissement des matières organiques contribue à la pollution et au réchauffement climatique. Les matières organiques putrescibles enfouies génèrent des gaz à effets de serre tels que le méthane. Le ruissellement des eaux de pluie à travers des matières résiduelles, produit aussi une eau appelée lixiviat pouvant contaminer les nappes souterraines.

Afin de réduire les risques de pollution et de contamination, il existe des lieux d'enfouissement sanitaires dotés d'un système de contrôle permettant de capter les gaz à effets de serre. Quant au lixiviat, celui-ci est généralement récolté et traité afin de pouvoir contrôler et respecter les valeurs de rejets réglementaires.

ii. Incinération

L'incinération est l'ultime étape de traitement des déchets. Un incinérateur est un dispositif qui permet de réduire ou de détruire les objets sous l'action de la combustion. Il est composé de plusieurs éléments, dont essentiellement un four qui doit pouvoir atteindre des températures comprises entre 700 °C et 1 000 °C.

Sur les sites d'incinération, la technologie d'épuration des gaz d'incinérateur permet de promouvoir la valorisation énergétique des déchets en transformant la chaleur produite par la combustion des déchets sous forme de vapeur qui peut être ensuite utilisée pour produire de l'électricité. La figure 2 décrit le principe.



<http://www.smiecom.fr/lincineration-des-ordures-menageres/>

Figure 2 : Principe de l'incinération

Toutefois, l'incinération est une source de pollution atmosphérique, car le processus génère des agents toxiques tels que le dioxyde de carbone et de l'oxyde nitreux.

1.1.3 Compostage et biométhanisation des matières résiduelles organiques

Selon le principe, 3RV-E, le compostage et la digestion anaérobique sont deux procédés qui rejoignent la catégorie de la valorisation des matières résiduelles organiques. Ces deux techniques reposent sur la dégradation de la matière organique par les bactéries (9). Des exemples concrets de matières résiduelles organiques destinés au compostage et la biométhanisation sont les résidus verts (feuilles mortes, gazons), les boues d'épuration des eaux usées et les résidus alimentaires (restes de tables, résidus de préparation des repas) (10).

i. Compostage

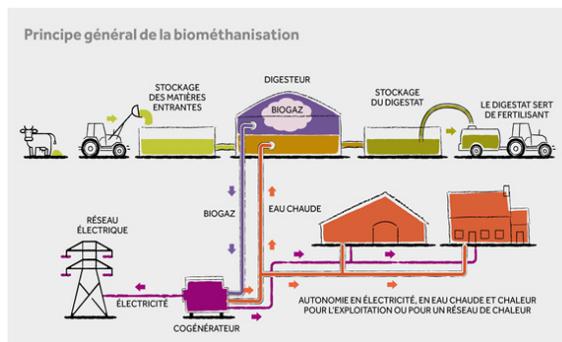
Haug définit le compostage comme « la décomposition biologique et la stabilisation des substrats organiques à des conditions permettant le développement de température thermophile à la suite de la chaleur produite biologiquement afin d'obtenir un produit final stable, exempt de pathogènes, de semences et de plantes viables et qui peut être appliqué de manière bénéfique à la terre » (11).

En d'autres mots, le compostage repose sur l'action des bactéries utilisant l'oxygène communément appelé microorganismes aérobies. Celles-ci décomposent la matière organique afin de générer un terreau riche en composés fertilisants qui est utilisable pour le sol. Les étapes du compostage sont généralement les suivantes : la réception des déchets organiques, le prétraitement, la fermentation, le post-traitement (criblage du compost frais), la maturation, l'affinage et le stockage du compost mûr (vente, distribution) (13).

L'utilisation du compost permet l'amélioration de l'activité biologique et de la structure des sols lourds. De plus, c'est un procédé que l'on peut appliquer dans son jardin personnel. Par ailleurs, c'est une technique qui demande de l'espace et peut attirer certains rongeurs.

ii. Biométhanisation

La digestion anaérobie ou biométhanisation est un processus biologique de décomposition de la matière organique par des microorganismes anaérobies (des bactéries qui s'activent dans des conditions sans oxygène) pour produire un biogaz et un résidu solide appelé digestat. Le biogaz peut ensuite être transformé en chaleur, en électricité ou en carburant tandis que le digestat peut être utilisé comme fertilisant ou comme un complément pour le compost (14). La figure 3 décrit le principe de la biométhanisation.



<https://www.renouvele.fr/technologies/la-biomechanisation-un-bilan-carbone-positif>

Figure 3 : Principe de la biométhanisation

Les retombées de la biométhanisation sont nombreuses. Sur le plan environnemental, elle permet la réduction des gaz à effets de serre et la production d'une énergie renouvelable. Du côté économique, la biométhanisation permet de diminuer les coûts liés à l'enfouissement. À l'opposé, l'inconvénient de ce procédé est la difficulté à introduire le biogaz dans le réseau de gaz naturel. Ainsi, il est préférentiellement utilisé sur le site de biométhanisation ou localement.

1.1.4 Recyclage et réemploi des matériaux

Le réemploi et le recyclage correspondent aux deuxième et au troisième R du principe des 3RV-E. Ces deux procédés peuvent être différenciés par le statut et l'usage de l'objet à recycler ou à réemployer.

iii. Réemploi

Le réemploi peut se définir comme une manière de prolonger la durée de vie utile des biens et de combler des besoins tout en réduisant la pression exercée sur les ressources naturelles (15). D'un côté, il permet la création d'emplois, mais aussi l'acquisition de biens pour les personnes moins fortunées à des prix avantageux. De l'autre côté, il retarde les étapes du recyclage, de la valorisation ou de l'élimination du bien conférant ainsi un avantage écologique (15).

Plusieurs facteurs peuvent limiter la croissance des activités liées au réemploi tels que la compétition des produits neufs à bas prix, la durabilité des biens de consommation neufs, l'apparence ou la présence de signes d'usure et les exigences de propreté (15).

iv. Recyclage

Le ministère de la Santé et des Services sociaux définit les déchets recyclables comme de la matière pouvant être réintroduite dans le procédé de production dont elles sont issues ou un procédé similaire utilisant le même type de matériaux. Les étapes de la gestion des matières recyclables consistent à acheminer les matériaux vers un centre de récupération et de tri où ils vont être séparées par catégories et envoyées chez des recycleurs spécialisés (16).

À Montréal, tous les résidents ont accès à un service de collecte « pêle-mêle » dont les matériaux suivants sont acceptés : le plastique, le métal, le verre rincé et le papier. Le recyclage a pour avantage de permettre la réutilisation des matières premières pour la fabrication de nombreux articles d'usage courant. Par exemple, le papier recyclé permettra de fabriquer des annuaires téléphoniques, des contenants à œufs et du papier journal (16,17). Malgré les avantages permettant de réutiliser les matières premières, le recyclage présente aussi des inconvénients. Certaines matières premières comme le plastique peuvent être abîmées lors de la collecte ou de la transformation, limitant ainsi la réutilisation. De plus, le recyclage présente un coût supplémentaire pour les entreprises, car c'est un mode de traitement plus onéreux que les autres méthodes.

1.2 Dangers pour la santé dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques

Malgré les bénéfices écologiques et professionnels apportés par le traitement des matières résiduelles domestiques, tels que le contrôle de la pollution et la création de nouveaux emplois, « les métiers verts » sont aussi connus pour leur potentiel d'exposer les travailleurs à une variété de danger pouvant affecter leur santé (18).

1.2.1 Dangers associés à la collecte des ordures

Le traitement des matières résiduelles domestiques nécessite plusieurs étapes : de la collecte, en passant par le tri jusqu'à la récupération, la mise en valeur ou l'élimination. À chaque étape, des expositions professionnelles à différents contaminants sont possibles (2).

i. Éboueurs

Dans son guide de l'éboueur, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail, secteur « affaires municipales » (APSAM) résume quelques dangers auxquels les éboueurs peuvent être exposés. Outre les dangers physiques de piqûre, coupure, chute ou collision, l'APSAM identifie aussi les dangers ergonomiques et ceux dus aux contraintes thermiques. De plus, la présence du compacteur et de certains déchets dangereux peut causer une explosion, une projection des débris ou un coincement d'un membre lors de la compaction (19).

Plusieurs études mentionnent que les activités impliquant la manutention des ordures ont un potentiel d'exposition des travailleurs aux bioaérosols. Les bioaérosols peuvent être définis comme des particules biologiques suspendues dans l'air composées de cellules microbiennes, d'endotoxines, d'éléments de la paroi cellulaire des microorganismes, de champignons, de bactéries mésophiles et thermophiles (20–23).

ii. Chauffeurs de camion

Malgré le fait qu'ils ne sont pas directement en contact avec les matières résiduelles, les chauffeurs de camion peuvent eux aussi être exposés aux agents biologiques (24,25). Les particules microbiennes peuvent par évidence pénétrer par les fenêtres ou les portes lors de la manipulation des déchets autour du camion.

Une autre possibilité est une exposition liée à une réémission des poussières microbiennes dans la cabine provenant des filtres à air de l'habitacle au niveau des systèmes d'alimentation en air mal entretenus. Pour finir, les chauffeurs peuvent aussi être exposés par une remise en suspension dans

l'air des cellules microbiennes entreposées sur les surfaces environnantes et les moquettes du camion (26).

1.2.2 Dangers associés à l'industrie du compostage

Marchand et al. ont identifiés deux principaux types de dangers liés à l'industrie du compost : biologique et chimique (20).

D'un point de vue biologique, les travailleurs peuvent être exposés par contact direct ou sous forme de bioaérosols aux microorganismes présents durant toutes les phases de transformation du compost. En plus des cellules microbiennes, ils peuvent aussi être exposés à d'autres contaminants biologiques tels que les endotoxines, les mycotoxines, les composés organiques volatils microbiens, les composés de la paroi cellulaires des microorganismes (20,21,23).

D'un point de vue chimique, plusieurs composés sont produits lors des différentes étapes du processus de compostage. C'est ainsi que le processus de fermentation aérobie émet principalement du gaz carbonique en grande quantité (13). Durant ce processus, Lavoie et al. ont pu détecter des concentrations de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂), d'ammoniac (NH₃), d'oxyde nitrique (N₂O) dans deux centres de compost en été et en hiver (27). Dans une étude, des chercheurs de l'INRS après avoir mesuré 300 plateformes de compost, avaient trouvé que 28 % des concentrations ambiantes d'ammoniac étaient supérieures à la valeur d'exposition moyenne (VEM) de la réglementation française qui est de 7 mg/m³ (13). D'autres composés chimiques gazeux présents sur les sites de compostage, dont le méthane (CH₄) et les composés organiques volatils totaux, avaient aussi été identifiés dans cette étude (28).

1.3 Exposition aux bioaérosols dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques

1.3.1 Bioaérosols

La manipulation des déchets engendre l'aérosolisation des microorganismes et de la poussière. Les bioaérosols sont des aérosols ou encore des particules aéroportées de source biologique qui sont constitués d'organismes vivants ou non vivants. Il s'agit des bactéries, des moisissures et de leurs spores, des virus et/ou des composés organiques dérivés des microorganismes comme les endotoxines, les métabolites et les fragments de microorganismes (21, 23, 29). Généralement, les bioaérosols mesurent entre le submicron (<0,02 µm) et le multi-micron (jusqu'à 50 µm) (21).

À cause de leur omniprésence dans l'environnement, les êtres vivants sont continuellement exposés aux microorganismes. Goyer et al. ont rapporté de manière non exhaustive les principaux bioaérosols retrouvés dans des milieux de travail présentant des risques biologiques élevés. D'après les auteurs, des bactéries Gram négatives (*Acinobacter*, *Escherichia*,) et positives (*Athrobacter*, *Bacillus*), des bâtonnets gram positifs irréguliers, des actinomycètes, des moisissures et des mycotoxines pourraient être retrouvés (29).

i. Bactéries

Les bactéries sont des microorganismes unicellulaires et sans noyau que l'on retrouve abondamment dans l'environnement et chez les humains. Elles sont capables d'utiliser plusieurs sources nutritives : organiques et inorganiques. Celles qui utilisent des sources organiques sont appelées saphrotypes et elles sont retrouvées le plus souvent dans l'air. Les bactéries sont classées en deux groupes : les Gram positives et les Gram négatives. La différence entre ces deux groupes est liée aux propriétés physiques et chimiques de leurs parois cellulaires. Les bactéries Gram positives possèdent une paroi plus résistante et riche en peptidoglycanes (29).

ii. Moisissures

Les moisissures sont connues depuis l'antiquité, dans l'Ancien Testament : « *Lorsque vous serez entrés au pays de Canaan que je vous ai donné en propriété, si je produis une tâche de moisissures à une maison du pays...* ». *Lévitique 14 :34*

Les moisissures sont des champignons et des organismes pluricellulaires omniprésents dans l'environnement. Elles sont généralement aérobies et de couleur verdâtre ou blanchâtre. Leur croissance et leur reproduction sont fonction de l'humidité, de la température et de la présence de nutriments. Leur source nutritive primaire est la matière organique morte. Elles se propagent sous forme de spores qui sont libérées en réponse à un stress tel que les changements en humidité et en température. Durant leur métabolisme, elles peuvent produire des métabolites comme les mycotoxines et les composés organiques volatils microbiens (29).

iii. Endotoxines et mycotoxines

Les endotoxines sont des toxines qui constituent la paroi des bactéries Gram négatives. Elles sont composées de lipopolysaccharides et elles sont libérées lors de la lyse des bactéries (29).

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires qui sont libérés par les champignons pour leur défense. Elles sont difficilement dégradables, et peuvent persister même après l'élimination des champignons (29).

1.3.2 Effets sur la santé liés à l'exposition aux bioaérosols dans l'industrie de la gestion des déchets

L'exposition aux bioaérosols peut induire des effets infectieux, immunologiques, allergènes et constitue un risque de maladies cancérogènes à long terme. Les virus, les bactéries, les moisissures peuvent causer des maladies infectieuses (gastro-entérite, aspergillose...) par la transmission aéroportée de l'agent infectieux à un hôte sensible. En ce qui concerne les symptômes respiratoires liés à l'exposition professionnelle, ils résultent généralement d'une inflammation des voies respiratoires causée par une exposition à des toxines (endotoxines, mycotoxines) ou/et à des agents inflammatoires ou allergènes (moisissures, spores). Deux types de symptômes ou maladies respiratoires peuvent être observés dépendamment du mécanisme d'inflammation généré par l'organisme de l'hôte : allergiques (pneumopathie d'hypersensibilité, rhino conjonctivite, asthme) et non allergiques (bronchique chronique, syndrome organique des poussières). Les symptômes respiratoires allergiques reflètent une inflammation immunitaire spécifique dans laquelle plusieurs anticorps (IgE, IgG) peuvent jouer un rôle majeur (30,31).

Poulsen et al. ont identifié les effets sur la santé pouvant être rencontrés dans quelques secteurs de l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques. Ils rapportent que les travailleurs dans les centres d'incinération sont à risque de développer des problèmes pulmonaires et gastro-intestinaux (diarrhée, nausées). Dans les centres de tri manuels, les symptômes les plus fréquents et mentionnés par les auteurs sont les maladies pulmonaires, le syndrome toxique des poussières organiques et l'irritation des yeux et des muqueuses. Les travailleurs de l'industrie du compost sont à risque d'éprouver de la fièvre, des symptômes semblables à la grippe, une inflammation des voies respiratoires et des symptômes gastro-intestinaux (32).

La littérature rapporte que l'exposition aux bioaérosols dépend de plusieurs facteurs tels que les tâches exécutées par le travailleur, la flore microbienne présente dans les déchets, le type de contenant, l'état du camion et l'organisation du travail (19). Néanmoins, Boutin et Mouline pensent que l'exposition microbienne ne diffère que par la quantité et non par le type de microorganismes lors de la collecte et de la décharge des ordures dans les centres de tri et de

recyclage, durant les processus de compostage, d'incinération et d'enfouissement (18). En d'autres mots, cela signifie que la plupart des travailleurs de l'industrie de la gestion des matières résiduelles sont exposés aux mêmes microorganismes, mais selon les tâches effectuées par ceux-ci, les niveaux d'exposition peuvent varier (18). En dépit de ces faits, Douwes et al. ont identifié trois principaux groupes de maladies pouvant être associées à l'exposition aux bioaérosols : les maladies infectieuses, respiratoires et cancérigènes (31).

Schlosser rapporte que dans le domaine de la santé au travail, une attention particulière devrait être portée aux problèmes respiratoires, allergiques et toxiques (22). Étant donné que l'exposition microbienne dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles est plus importante par la voie respiratoire, les maladies pulmonaires devraient particulièrement être ciblées. De plus, les effets de santé découlant de l'exposition chronique aux bioaérosols sont plus sévères, car ils peuvent affecter la qualité de vie des travailleurs et réduire le temps alloué à leur capacité de travail (18).

i. Éboueurs et les chauffeurs de camion

Schantotora et al. ont évalué la prévalence des symptômes respiratoires et de rhino conjonctive d'origine professionnelle chez des collecteurs et des chauffeurs de camion durant la collecte de déchets domestiques. Ils ont utilisé trois critères pour vérifier l'association entre les symptômes et l'emploi. Le premier critère était l'absence des symptômes avant le début de l'emploi, le deuxième était l'apparition cumulative des symptômes pendant le travail et le troisième était la rémission de ceux-ci pendant les vacances. La relation entre le travail et les symptômes était probable lorsqu'au moins deux de ces critères étaient observés. Sur un total de 69 sujets, dont 13 chauffeurs, 29 chauffeurs/éboueurs et 27 éboueurs, une moyenne totale de 65 % présentait des symptômes oculaires (larmoiement, irritation et sensation d'un corps étranger) d'origine professionnelle, dont 66,77 % pour les chauffeurs, 57,1 % pour les chauffeurs/éboueurs et 70 % pour les éboueurs. Pour les symptômes nasaux comprenant la congestion, l'écoulement nasal et un dysfonctionnement du sens olfactif, la moyenne totale était de 63 % avec 66,7 % pour les chauffeurs, 66,7 % pour les chauffeurs/éboueurs et 55,6 % pour les éboueurs. Toutefois, leurs résultats suggéraient que la durée de l'emploi augmentait la prévalence de la rhinite, de la toux et de la bronchite chronique et que le poste de travail n'avait pas d'impact sur ces symptômes (33).

Heldald et al. ont étudié le niveau d'inflammation des voies respiratoires chez des collecteurs de déchets compost (déchets alimentaires et de jardin). Leur but était de caractériser les médiateurs

de l'inflammation et les différents types de cellules dans les expectorations des travailleurs afin de corréler ces résultats avec l'exposition à différentes composantes des bioaérosols produits durant la collecte. Les résultats démontraient une augmentation significative de la concentration des neutrophiles, d'éosinophiles et de l'interleukine 8 (IL-8). Le lundi, la concentration médiane des neutrophiles était de $1,39 \times 10^6$ ng/mL, tandis que le jeudi elle était de $2,35 \times 10^6$ ng/mL. En ce qui concerne l'IL-8, la concentration médiane variait de 1,14 ng/mL (lundi) à 1,40 ng/mL (jeudi). Enfin, celle des éosinophiles était $0,002 \times 10^6$ ng/mL le lundi et de $0,007 \times 10^6$ ng/mL le jeudi. À cet effet, ils ont démontré que l'inhalation des endotoxines induit un afflux de neutrophiles, la production de cytokines et de biomarqueurs pro-inflammatoires qui se reflètent dans les fluides des voies respiratoires des éboueurs. Ainsi, l'exposition médiane aux endotoxines était significativement corrélée avec l'augmentation du niveau d'IL-8 dans les expectorations des travailleurs avec un $r_s = 0,55$ et $p < 0,005$. Parallèlement, les auteurs ont aussi rapporté une obstruction aiguë des voies respiratoires causées par les neutrophiles et caractérisée par une corrélation entre l'afflux des neutrophiles et la diminution du ratio du volume expiratoire obligatoire en 1 secondes / la capacité vitale obligatoire (FEV1/FVC : ratio permettant la mesure de la quantité d'air expirée par les poumons). Dans l'ensemble, cette étude a démontré que l'exposition aux bioaérosols durant la collecte des déchets organiques peut induire une inflammation respiratoire observable dans les expectorations des travailleurs. Cette inflammation est caractérisée par une infiltration des neutrophiles avec une sécrétion accrue d'IL-8 du lundi au jeudi (34). Ces résultats rejoignent ceux de Wouters et al. qui ont montré une inflammation des voies respiratoires supérieures par une augmentation de la concentration de IL-8 en fin de semaine de travail chez des collecteurs de déchets domestiques (32).

ii. Industrie du compostage

Dans les usines de compost, les travailleurs sont exposés à de grandes quantités de poussières, d'endotoxines et de moisissures tels que l'*Aspergillus fumigatus*. Poole et al. ont rapporté deux cas d'aspergilloses broncho-pulmonaires allergiques chez deux éboueurs travaillant dans la même compagnie de collecte de déchets organiques (déchets compost). L'aspergillose broncho-pulmonaire allergique (APBA) est une maladie causée par des spores d'*Aspergillus* qui touche généralement les personnes ayant un antécédent d'asthme ou de fibrose kystique (mucoviscidose) (35). Le premier travailleur était âgé de 35 ans et il avait une ancienneté de trois ans. Le deuxième travailleur avait 43 ans et il travaillait pour la compagnie depuis deux ans. En définitive, ces

travailleurs ont reçu la recommandation d'éviter les activités en relation avec l'industrie du compost (36).

D'autres effets de santé tels que l'irritation des yeux et de la peau ont été recensés dans les usines de compost (37). Certains de ces effets peuvent être amplifiés chez des sujets présentant déjà des affections cutanées et oculaires ou une sensibilité de la peau (35).

iii. Centres de triage

Dès les années 1980, les Danois ont rapporté plusieurs cas de problèmes respiratoires d'origine professionnelle dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques. Dans un centre de tri au Danemark comportant 20 employés, 15 avaient été identifiés comme étant à risque de développer des problèmes de santé suite à une exposition aux bioaérosols lors de l'exécution de leurs tâches respectives. Entre 1986 et 1987, parmi les 15 travailleurs exposés, neuf cas de maladies professionnelles avaient été diagnostiqués, dont huit cas d'asthme bronchique et un cas de bronchite chronique. Initialement, les huit sujets malades ressentaient les mêmes symptômes : une irritation des yeux et de la gorge, une toux nocturne, de la fièvre et des frissons. De plus, les deux premiers sujets malades travaillaient dans les sections de nettoyage et de triage manuel. En définitive, sept des neuf cas ont été acceptés comme maladies professionnelles par la commission nationale des accidents du travail (5).

1.3.1 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des collecteurs de déchets

Les éboueurs manutentionnent quotidiennement des tonnes de matières résiduelles, ce qui les expose à des risques biologiques. En fait, les résidus organiques retrouvés dans les déchets sont une source de nutriments pour la croissance des microorganismes. Lors de la collecte des ordures, l'aérosolisation de ces microorganismes et de leurs particules peut se faire durant la manipulation, le lavage et le vidage des contenants et des sacs à déchets dans le camion (18). Même si elle est fonction de plusieurs facteurs, l'exposition des éboueurs aux bioaérosols est principalement associée à la manipulation des matériaux contaminés et/ou en décomposition.

Wouters et al. ont rapporté que la fréquence de collecte pouvaient impacter les niveaux d'exposition aux bioaérosols. Les auteurs ont observé qu'une collecte des déchets une fois par semaine augmentait significativement les niveaux d'exposition à la poussière, aux endotoxines et aux glucanes par rapport à une collecte une fois tous les 15 jours (38).

Lavoie et al. ont étudié l'exposition aux bactéries et aux moisissures des collecteurs à travers différents scénarios d'exposition en fonction du type de déchets (commerciales et résidentielles), de la séparation (déchets recyclables, mixtes et organiques), de la localité (rurale et urbaine). Pour les bactéries cultivables, les auteurs ont observé le niveau d'exposition le plus élevé chez les éboueurs ($50\,300\text{ UFC/m}^3$) qui manipulaient des déchets organiques dans les zones urbaines. Quant aux travailleurs maniant des déchets mixtes dans des zones urbaines, leur exposition bactérienne était en moyenne de $6\,300\text{ UFC/m}^3$. Les auteurs ont conclu que certains scénarios de travail représentent un risque excessif d'exposition pour les collecteurs particulièrement ceux impliqués dans la collecte de déchets organiques compost (24).

Park et al. ont identifié quelques facteurs affectant les niveaux d'exposition à la poussière, aux endotoxines et aux microorganismes lors de la collecte des déchets domestiques. Leurs résultats ont démontré qu'il semble avoir une corrélation significative entre les concentrations de poussière et celles des endotoxines, des bactéries, et des moisissures ($P < 0,01$) (39). Ces résultats sont en accord avec ceux de Heldad et al. qui ont observé que l'exposition à la poussière était intercorrélée avec les concentrations de bactéries totales (coefficient de Spearman : $r_s = 0,7$) et d'endotoxines ($r_s = 0,6$) (34). Dans l'étude de Park et al., 35 % des 48 éboueurs sélectionnés avaient des niveaux d'exposition aux endotoxines supérieurs à $1\,000\text{ UE/m}^3$; ce niveau d'exposition est considéré comme étant dangereux, car il vaut dix fois la valeur de 90 UE/m^3 recommandée par DECOS (40). Leur modèle de régression multiple, qui est un modèle comportant plusieurs variables explicatives, a permis d'observer une association significative entre l'exposition aux endotoxines et la température, l'humidité et la région de la collecte ($R^2 = 0,718$ et $P < 0,0001$) (39). Quant aux bactéries totales, les auteurs avaient observé que neuf travailleurs étaient exposés à des concentrations de plus de 10^6 UFC/m^3 , un niveau associé à des symptômes respiratoires et gastro-intestinaux (39).

1.3.2 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs de camion collectant les déchets

Étant donné qu'ils sont moins souvent en contact avec les matières résiduelles domestiques, l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs peut être potentiellement associée à une contamination de l'air de la cabine du camion par les particules émises lors de la manipulation des déchets aux alentours. La diversité des mécanismes par lesquels cette contamination peut se réaliser rend difficile l'appréciation du risque.

Li et al. ont caractérisé la contamination microbienne des filtres des systèmes d'air conditionné et des filtres du moteur des automobiles. Ils ont trouvé que les concentrations de bactéries et d'endotoxines des filtres de l'air conditionné étaient supérieures à celles des filtres du moteur. De plus, la composition du microbiote des filtres du moteur était plus diversifiée et plus riche que celle des filtres de l'air conditionné. Ils ont identifié plus de 400 types de souches bactériennes dans les filtres du moteur avec une prédominance pour les genres *Pseudomonas* et *Staphylococcus*.

Afin d'étudier la possibilité d'une aérosolisation des agents biologiques durant l'utilisation de l'air conditionné, les auteurs ont aussi surveillé la fluorescence des bioaérosols avec et sans air climatisé en utilisant la spectrométrie ultraviolette des particules aérodynamiques. Cette méthode « détecte les distributions de la taille et les niveaux de concentration des bioaérosols viables en mesurant le niveau de fluorescence intrinsèque de ceux-ci ». Dans un premier temps, ils ont observé une diminution des aérosols lorsque l'air conditionné était allumé et cette baisse était plus importante après que l'air conditionné ait fonctionné pendant dix minutes. Ces résultats sont en accord avec la littérature, car plusieurs études suggèrent que l'utilisation de l'air climatisé permet de diminuer progressivement la concentration des particules aérosolisées de différents diamètres (41–43). Deuxièmement, un pic inattendu correspondant à des particules de diamètre aérodynamique de 2,5 μm a été observé cinq minutes après la mise en marche de l'air conditionné. Les auteurs ont conclu que ce pic pouvait correspondre à un relargage de particules présentes sur le filtre (41).

Madsen et al. ont évalué la contamination de l'habitacle du camion à travers le transport des microorganismes par les vêtements et/ou cheveux des travailleurs. Pour cela, des échantillonneurs ont été installés sur les vêtements des travailleurs (échantillons personnels). L'air ambiant de la cabine des camions (échantillons camions) a aussi été échantillonné. Leur étude visant à caractériser l'exposition des éboueurs et des chauffeurs de camion aux bactéries et aux moisissures durant la collecte des déchets domestiques a montré que les genres *Micrococcus* et *Staphylococcus* étaient les plus observés. Concernant les moisissures, ils ont trouvé que *Penicillium* était le genre dominant avec des pourcentages respectifs de 84 % pour les échantillons personnels et de 92 % pour les échantillons camions. Les auteurs ont rapporté que les concentrations microbiennes retrouvées dans l'air ambiant de la cabine des camions étaient généralement inférieures à celles retrouvées sur les échantillons personnels. Par exemple, l'espèce *Penicillium italicum* avait été retrouvée sur les échantillons personnels de deux travailleurs avec des concentrations de $2,0 \times 10^3$ UFC/m³ et $3,3 \times 10^3$ UFC/m³. Cette même espèce avait aussi été retrouvée à une concentration

plus basse, de 615 UFC/m³, dans un camion spécifiquement utilisé par ces deux mêmes travailleurs durant leur quart de travail (44).

En définitive, il est difficile d'identifier les tâches de travail et les types de déchets qui exposent le plus les travailleurs aux bioaérosols et comportent plus de risques pour leur santé. Le tableau 1 présente un sommaire des concentrations des bioaérosols rapportées dans la littérature pour l'exposition des éboueurs et chauffeurs. Il permet d'avoir une idée des ordres de grandeur auxquels sont exposés les travailleurs impliqués dans la collecte des déchets.

Tableau 1 : Concentrations moyennes et médianes des bioaérosols dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles domestiques

Poste de travail	Déchets	Bactéries (UFC/m ³)	Moisissures (UFC/m ³)	Endotoxines (UE/m ³)	Auteurs
Éboueurs	Compost (MG)	NA	NA	498	Wouters et al. (38)
	Recyclage (MED)	5,6 × 10 ³	5,7 × 10 ⁴	NA	Lavoie et al. (24)
	Domestique/mixtes (M)	2,2 × 10 ⁵	2,4 × 10 ⁴	1,1 × 10 ³	Park et al. (39)
Chauffeurs	Compost (MG)	NA	NA	20	Wouters et al. (38)
	Recyclage (MG)	NA	NA	30	Wouters et al. (38)
	Domestique/mixtes (M)	1,8 × 10 ⁴	8,7 × 10 ³	1,1 × 10 ³	Park et al. (39)

NA=non applicable, UFC=Unité formatrice colonies, UE=Unité d'endotoxines, MG= moyenne géométrique, MED= médiane, M= moyenne

1.3.3 Caractérisation de l'exposition aux bioaérosols des travailleurs dans les centres de tri, de compost et d'incinération

Le compostage, comme toute activité impliquant la manutention des déchets, génère des émissions et induit la dispersion de la poussière organique. La dégradation de la matière organique produit un environnement favorable au développement des bioaérosols (22). La littérature suggère que l'aérosolisation des microorganismes et la génération de poussières peuvent se réaliser durant le déplacement des déchets, les processus de fermentation, de déchiquetage, de rotation, de criblage, et de tamisage (12, 47, 48).

Persoons et al. ont mesuré les concentrations de bioaérosols dans une usine de compost de matières recyclables et une autre de biodéchets. Dans l'usine traitant les matières recyclables, les auteurs ont trouvé que les concentrations de bactéries totales variaient entre 10² et 10⁵ UFC/m³ avec une moyenne de 3,8 × 10⁴ UFC/m³ durant le déchiquetage. Au niveau de l'usine de compostage des biodéchets, les concentrations de bactéries totales excédaient 10⁴ UFC/m³ durant les étapes de fermentation et de tamisage. Pendant le déchiquetage, la moyenne géométrique était de 2,9 × 10⁴ UFC/m³. Dans les deux usines, *Bacillus* était le genre bactérien principalement identifié (48).

Viegas et al. ont évalué l'exposition à l'aflatoxine B1 (AFB1) chez des travailleurs d'une industrie comprenant une unité de tri, de compost et d'incinération. Ils ont réalisé la surveillance biologique en utilisant un biomarqueur basé sur la dose interne qui mesure AFB1 dans le sérum. Le groupe contrôle était constitué de travailleurs du domaine administratif qui n'avaient pas de tâches connues impliquant une exposition à AFB1. Ceux-ci présentaient des concentrations de AFB1 en dessous de la limite de détection de 1 ng/mL. Tous les travailleurs impliqués dans la chaîne de la gestion des déchets de cette industrie présentaient des niveaux détectables de AFB1 variant entre 2,5 et 25,9 ng/mL. La concentration de 2,5 ng/mL avait été obtenue chez un travailleur de l'unité de maintenance de l'incinération et celle de 25,9 ng/mL avait été obtenue chez une travailleuse de l'unité de tri. De plus, pour six travailleurs, des résultats supérieurs à 20 ng/mL ont été obtenus. Parmi ces six travailleurs, quatre travaillaient dans l'unité du tri. Étant donné que seulement les travailleurs en contact avec les déchets avaient présenté des niveaux mesurables d'AFB1, contrairement aux travailleurs du groupe contrôle, les auteurs ont conclu que dans cette étude, l'exposition aux AFB1 était spécifique à la manutention des déchets (49).

Duquenne et al. ont évalué les concentrations ambiantes de bioaérosols à l'intérieur d'une usine de compost qui traitait à la fois des matières putrescibles et vertes. En général, ils ont observé que les concentrations d'endotoxines dépassaient 500 UE/m³. Cependant, la concentration la plus élevée, soit 5 400 UE/m³, avait été observée au niveau de la zone de fermentation (50). Ces résultats se rapprochent de ceux de Marchand et al. qui avaient mesuré des concentrations ambiantes maximales d'endotoxines de 3 000 UE/m³ et 5 000 UE/m³ dans deux cellules de compostage (20).

1.4 Réglementation

Malgré l'avancée des connaissances, des valeurs limites d'exposition aux bioaérosols n'ont toujours pas été établies dans le milieu professionnel. Néanmoins, plusieurs organismes et auteurs proposent des niveaux acceptables dans une perspective indicative, préventive ou informative pour l'évaluation de l'exposition aux agents biologiques dans l'air. Ces recommandations sont fondées sur des études épidémiologiques et toxicologiques qui ont mis en évidence un déclin de la fonction pulmonaire, des symptômes respiratoires et une inflammation des voies respiratoires suite à l'exposition aux bioaérosols (5,30,40). Elles sont basées sur une journée de travail de 8 heures, 40 heures par semaine. Le tableau ci-dessous résume ces recommandations.

Tableau 2 : Sommaire des recommandations pour les niveaux d'exposition aux bioaérosols en milieu professionnel

Contaminants	Recommandations	Organismes	Références
Bactéries totales	10 000 UFC/m ³	ACGIH	(5, 18, 29,40, 51, 52)
Bactéries gram négatives	1 000 UFC/m ³	IRSST	
Moisissures	1 000 UFC/m ³	IRSST	(35,51)
	10 000 spores	SUVA	
Endotoxines	90	DECOS	(40)

1.5 Problématiques et objectifs du projet

Au Québec, la gestion des matières résiduelles relève de la responsabilité de chaque municipalité régionale ; cela implique donc la planification de la collecte de l'ensemble des déchets d'origine domestique, industrielle commerciale ou institutionnelle produite sur le territoire municipal (4). Cette planification nécessite un large réseau de travailleurs qui étant régulièrement exposés aux bioaérosols par l'entremise de la manutention des déchets, sont à risque de développer des maladies professionnelles à long terme.

L'exposition chronique aux bioaérosols des chauffeurs de camions et des éboueurs peut induire des problèmes de santé parfois irréversibles à cause de leur nature immunologique ou toxique. Les effets sur la santé associés à cette exposition sont généralement des problèmes respiratoires tels que l'asthme, l'aspergillose, la rhinite, la sensibilisation aux moisissures, l'inflammation des voies respiratoires et le syndrome organique des poussières (31, 32, 34, 53). La plupart des études touchant l'industrie de la gestion des déchets se sont focalisées sur les éboueurs, les travailleurs des centres de tri et de compost (24, 47, 54, 55). Peu de données combinant l'exposition des travailleurs aux bioaérosols durant la collecte des matières résiduelles recyclables, organiques et domestiques sont disponibles. Par ailleurs, l'exposition des chauffeurs a jusqu'ici été peu évaluée, même si ces travailleurs peuvent être exposés aux microorganismes par une contamination de l'air et des surfaces de la cabine du camion et/ou par les filtres à air de l'habitacle (26, 44, 58).

Les études publiées utilisent la méthode de la culture pour évaluer la contamination et l'exposition microbienne dans les milieux de travail. Cette méthode permet la croissance des organismes viables pour rapporter des concentrations en unité formatrice de colonies (UFC). Toutefois, les microorganismes cultivables ne représentent qu'environ 10 % de la flore totale (30,64). Des méthodes moléculaires, permettent de quantifier la flore microbienne totale en unité génomique (UG) et de détecter des espèces sur la base de l'amplification de gènes spécifiques. Une évaluation

comparative entre ces deux méthodes est nécessaire afin de caractériser adéquatement le microbiote des travailleurs de l'industrie de la collecte des déchets et de fournir un portrait complet de l'exposition des travailleurs aux bioaérosols.

Dans le but d'aider les décideurs municipaux impliqués dans la gestion des matières résiduelles et de prévenir l'apparition de maladies professionnelles résultant de l'exposition aux bioaérosols, ce projet a pour objectif d'évaluer l'exposition aux microorganismes des chauffeurs et des éboueurs par une analyse multimétrique et multimédias de la flore microbienne présente au niveau de la zone respiratoire des travailleurs, des filtres à air de l'habitacle, de l'air et des sièges des chauffeurs des cabines du camion. A travers la stratification par poste de travail et type de déchets, la quantification des concentrations par deux méthodes d'analyse et l'identification spécifique d'*A.fumigatus*, ce projet permet de mettre en évidence les facteurs pouvant influencer l'exposition microbienne des travailleurs durant la collecte des matières résiduelles domestiques.

II. MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, une stratégie multimétrique et multimédia impliquant diverses approches méthodologiques a été utilisée. Dans un premier temps, la culture bactérienne, mycologique et l'analyse des endotoxines a permis d'obtenir les concentrations de bioaérosols au niveau de la zone respiratoire des éboueurs et des chauffeurs, de l'air de la cabine, des filtres à air de l'habitacle et de la surface des sièges chauffeurs de la cabine. Deuxièmement, l'analyse par Digital Droplet PCR (ddPCR) des échantillons obtenus à partir des matrices citées précédemment a permis de quantifier la flore totale mycologique et d'identifier la présence d'espèces microbiennes spécifiques (*E.coli* et *A.fumigatus*).

2.1 Description du milieu et des tâches

L'échantillonnage a été réalisé dans la ville de Montréal en été 2019. En début de journée, le formulaire de consentement avait été lu et expliqué aux travailleurs. Les participants avaient été recrutés sur la base du volontariat. Un total de six camions, dont deux camions pour chaque type de déchets (domestiques, recyclables et organiques) ont été suivis par l'équipe de recherche.

2.2 Méthodes d'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé en utilisant plusieurs instruments : le CIP10-M, pour les particules microbiennes et les endotoxines dans la zone respiratoire des travailleurs ; le SASS, pour le microbiote dans l'air de la cabine du camion ; et les cassettes munies de filtres, pour les particules sur le siège du chauffeur.

2.2.1 Échantillonnage des particules microbiennes et des endotoxines dans la zone respiratoire des travailleurs

Les mesures des particules microbiennes et des endotoxines dans la zone respiratoire des chauffeurs et des éboueurs ont été effectuées à l'aide de l'appareil portatif personnel CIP10-M. Son principe est basé sur le fait qu'il contient une petite coupelle rotative pouvant contenir une solution. Au niveau de sa partie supérieure, la coupelle comprend des lames horizontales qui génèrent un flux d'air sous l'effet de la ventilation et selon un mouvement centrifuge. De plus, le frottement de l'air sur les surfaces génère une zone de basse pression qui dirige le flux d'air dans un mouvement hélicoïdal vers le liquide de collecte, ce qui permet de placer les cellules vivantes

douxement sur le fluide et de garantir leur viabilité. Un mouvement d'impaction sur les parois de la coupelle permet de garder les cellules dans le liquide (56).

Un éboueur et le chauffeur d'une équipe avaient été sollicités pour porter les appareils. Pour chaque travailleur, deux échantillons séquentiels ont été obtenus, soit un total de quatre échantillons personnels par camion. La méthode d'échantillonnage est décrite plus en détail dans l'article.

2.2.2 Échantillonnage du microbiote de l'air de la cabine et des filtres de l'habitacle

L'échantillonnage du microbiote de l'air de la cabine a été réalisé à l'aide de l'appareil ambiant SASS[®]3100. C'est un échantillonneur à filtre sec permettant la collecte de particules en suspension dans l'air comme les bactéries, les spores et les toxines. La particularité du SASS est son filtre qui est un disque polymère dont chaque fibre est positionnée dans un champ électrique et qui infère une charge électrostatique aux aérosols traversant le filtre (57). Pour chaque camion, deux prélèvements successifs ont été réalisés. L'échantillonnage est décrit dans l'article.

Les filtres à air de l'habitacle des systèmes de ventilation de la cabine des camions ont été récupérés à la fin de chaque journée d'échantillonnage dans le but d'analyser le microbiote et la capacité de prolifération des microorganismes à travers le temps. Tous les filtres évalués étaient des filtres à air d'habitacle en pollen. Pour chaque camion, la date d'installation, et la date de retrait du filtre ont été notées.

2.2.3 Échantillonnage des particules sur le siège du chauffeur

La méthode de prélèvement par aspiration utilisée dans cette étude est une adaptation de la méthode de l'ASPEC décrite par Lavoie et al (58,59). Des cassettes de 37 mm de la compagnie Environmental Monitoring Systems (EMS INC., Charleston, SC, USA) ont été utilisées. Le médium de filtration de ces cassettes était composé d'une membrane de chlorure de polyvinyle (CPV) ayant des pores de 5 µm et déposé sur un support de cellulose. Les particules ont été échantillonnées en connectant le bec collecteur de la cassette à une pompe GAST (GAST manufacturing Inc., Benton Harbor, MI, USA). Le débit d'aspiration utilisé était de 15 L/min. Pour chaque camion, une cassette a été utilisée et les prélèvements ont été réalisés par des passages parallèles et successifs sur une surface de 15 000 cm² du siège du chauffeur.

2.3 Extraction des échantillons

L'extraction des filtres SASS, des filtres à air de l'habitacle et des cassettes a été réalisée le lendemain de l'échantillonnage en utilisant pour chaque échantillon 10 mL d'un tampon d'extraction constitué de PBS dans de l'eau PCR moléculaire et du tween 20 à 0,05 %. Après extraction de chaque matrice citée ci-dessous, des aliquotes ont été réalisées : soit 2 mL pour l'analyse PCR et 500 µL pour l'analyse des endotoxines. Le restant a servi pour la culture bactérienne et mycologique.

2.3.1 Extraction des filtres SASS

Afin d'analyser le microbiote de l'air de la cabine des camions, les filtres SASS ont été extraits selon la méthode décrite dans l'article.

2.3.2 Extraction des filtres à air des cabines

Dans le but d'analyser la prolifération microbienne des filtres à air des cabines en fonction du temps, quatre morceaux d'environ 2 x 4 cm² ont été découpés. Le premier échantillon (T0) a été extrait etensemencé sur gélose le jour même. Les autres échantillons ont été placés dans l'incubateur à 25 °C pour des périodes d'incubation de 7, 15 et 30 jours. Le 7^e, 15^e et 30^e jour, l'échantillon correspondant a été retiré et extrait dans 10 mL du tampon d'extraction en les passant au maxi-vortex pendant 10 min à une vitesse de 2 500 Rotation Par Minute (RPM). Le morceau de filtre a été enlevé et l'extrait a été recueilli pour les analyses.

2.3.3 Extraction des cassettes

Les cassettes issues de l'échantillonnage des sièges des chauffeurs ont été extraites en les remplissant avec 10 mL du tampon d'extraction puis en les passant au maxi-vortex pendant 10 minutes à 2 500 RPM. Le liquide d'extraction a ensuite été recueilli pour les analyses.

2.4 Culture bactérienne et mycologique

Le lendemain de l'échantillonnage, après les extractions s'il y avait lieu, tous les échantillons issus de nos matrices (CIP10-M, filtres SASS, filtres à air de l'habitacle et cassettes) ont étéensemencés sur gélose TSA pour les bactéries et sur gélose MEA pour les moisissures. La méthodologie de l'inoculation et de l'incubation pour les échantillons provenant des matrices CIP10-M et SASS a été décrite en détail dans l'article. En ce qui concerne les échantillons des sièges des chauffeurs et

des filtres à air de l'habitable, ils ont aussi été inoculés selon la méthodologie des échantillons SASS décrite dans l'article.

Pour chaque échantillon, deux ou trois dilutions successives au $1/10^6$ en plus l'échantillon pur (10^0) ont été réalisées afin d'identifier facilement les colonies sur les géloses pour des échantillons ayant un grand nombre de bactéries ou de moisissures. Les colonies de chaque échantillon ont été comptées de préférence sur les géloses de la dilution 10^0 . Si le décompte n'était pas faisable sur cette dilution, alors il était effectué à 10^{-1} , puis 10^{-2} ou 10^{-3} . Pour chaque échantillon, les trois géloses des dilutions considérées étaient décomptées. Afin de rapporter la concentration en UFC, la moyenne des comptes des triplicatas considérés a été effectuée.

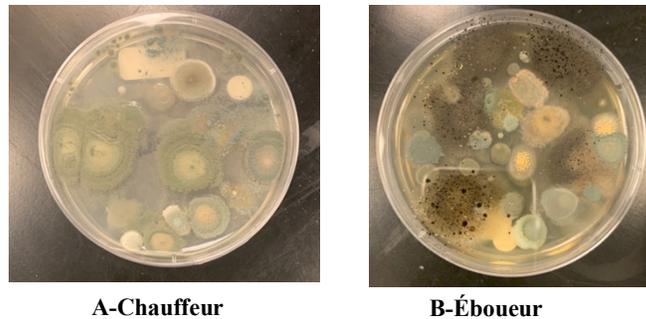


Figure 4 : Photographie de deux échantillons de culture mycologique après 3-6 jours d'incubation à 25 °C

2.1 Analyse des endotoxines

Les aliquotes de 500 μ L provenant des matrices CIP10-M, filtres SASS, filtres à air de l'habitable et cassettes ont été analysés pour les endotoxines selon la méthode 332 de l'IRSST (60). L'analyse a été faite le jour même de l'extraction ou le jour après. Le temps maximum alloué avant l'analyse était de 48 heures pour éviter la dégradation des endotoxines.

2.2 Extraction de l'ADN

Les aliquotes de 1 ou 2 mL des échantillons provenant des matrices CIP10-M, SASS, filtres à air de l'habitable et cassettes ont été centrifugés à 17 000xg pendant 5 minutes. Le surnageant a ensuite été enlevé en s'assurant de laisser environ 200 μ l de liquide. Les échantillons ont ensuite été congelés à -20°C en vue de l'extraction.

L'extraction a été réalisée selon les instructions du fabricant en utilisant le Quick-DNA Fungal/ Bacterial Miniprep Kit from Zymo (Zymo Manufacturing Inc., CA, USA). Les extraits ont ensuite été conservés à -20°C jusqu'à l'analyse PCR.

2.3 Droplet digital PCR (ddPCR)

Le principe de l'amplification par chaîne polymérase (PCR) est basé sur l'amplification d'une séquence d'acide désoxyribonucléique (ADN) ou d'acide ribonucléique (ARN) à partir d'une faible quantité d'acides nucléiques (amplicons) et de marqueurs spécifiques (amorces et sondes).

Le digital droplet PCR (ddPCR) est une technique de troisième génération qui a été développée en tant que technologie alternative de quantification (61,62). Elle utilise un système de gouttelettes en émulsion avec de l'eau et de l'huile. Les gouttelettes ont la même fonction que des tubes à essai individuels ou les puits d'une plaque où se déroule une réaction PCR (63). Lors de la réaction de ddPCR, les molécules d'ADN cibles sont donc répliquées dans les gouttelettes. Ainsi, certaines réactions possèdent une ou plusieurs copies de la matrice à amplifier tandis que d'autres n'en ont pas. Après l'amplification jusqu'à la phase plateau du PCR, les réactions contenant une ou plusieurs matrices donnent des points limites positifs alors que celles sans matrices restent négatives. Le nombre de molécules d'ADN est ensuite calculé à partir de la fraction de réactions positives grâce à l'équation suivante de la statistique de poisson : $\lambda = -\ln(1-p)$ où λ est le nombre moyen de molécules d'ADN cibles par réaction répliquée et p est la fraction des réactions finales positives. À partir de λ , du volume de chaque répliquât PCR et du nombre total de répliquât analysés, un estimé de la concentration absolue de l'ADN cible est calculée (59).

Pour tous nos échantillons, les marqueurs *Escherichia Coli* (*E.Coli*), moisissures totales et *Aspergillus Fumigatus* (*A. fumigatus*) ont été analysés par dd-PCR à partir des échantillons d'ADN extraits. Les amorces utilisées pour les moisissures totales ont été choisies dans les régions conservées non spécifiques des sous-unités ribosomales de l'acide ribonucléique (ARNr) 18S. Tandis que celles utilisées pour *E. coli* et *A. fumigatus* ont été choisies dans les régions conservées des séquences spécifiques aux espèces. La méthode d'analyse ddPCR est décrite en détail dans l'article.

III. ARTICLE : ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX MICROORGANISMES ET AUX ENDOTOXINES LORS DE LA COLLECTE DES DÉCHETS ET DES MATIÈRES RECYCLABLES

3.1 Contribution des auteurs

Fabiola Roseline Salambanga a aidé à la collecte des échantillons, aux analyses microbiologiques et biomoléculaires. Elle a ensuite analysé et interprété les résultats. Elle a aussi effectué la recherche bibliographique et a rédigé l'article.

Loic Winget était le coordinateur du projet à l'IRSST. Il a participé aux échantillonnages et a aussi révisé l'article.

Isabelle Valois était la coordonnatrice du projet à l'Université de Montréal. Elle a participé aux échantillonnages et elle a également révisé l'article.

Julien Trépanier a participé et a coordonné les analyses microbiologiques et biomoléculaires. Il a aussi contribué à l'analyse des résultats et révisé l'article.

Maximilien Debia a contribué au développement du devis d'activité du projet, a effectué la recherche du financement. Il a aussi corrigé et révisé l'article.

Geneviève Marchand a développé le devis d'activité du projet et elle a effectué la recherche du financement. Elle a supervisé les échantillonnages sur le terrain et les analyses de laboratoire. Elle a participé à l'analyse et à l'interprétation des résultats. Elle a corrigé et révisé l'article.

Microorganism and endotoxin exposure level assessment during waste and recyclable waste collection

Fabiola R.D Salambanga^{1,2}, Loïc Wingert², Isabelle Valois¹, Julien Trépanier², Maximilien Debia¹, Geneviève Marchand^{1,2*}

Authors' affiliation

¹Department of Environmental and Occupational Health, School of Public Health, University of Montreal

²Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail

***Corresponding author**

Geneviève Marchand

Email: Genevieve.Marchand@irsst.qc.ca

Article to be submitted to “Air and Waste Management Association.”

3.2 Abstract

Waste collectors and drivers are constantly exposed to bioaerosols during the handling, lifting, and dumping of garbage. Bioaerosol exposure has been linked to major health problems such as asthma, airway irritant symptoms, infectious, gastrointestinal, skin and cancer diseases. Our objective was to characterize the exposure of urban collectors and drivers to inhalable bacteria, endotoxins and fungi in order to assess the potential health risk by using two different quantification methods (microbiology cultivation and molecular biology).

A sampling campaign was conducted on 6 drivers and 6 collectors during the summer of 2019 in Montreal, Quebec. A total of 6 trucks that collect recyclable (2), organic (2) and compost (2) waste were evaluated. Bioaerosols were collected by taking personal (worker breathing zone) and ambient (indoor cabin) measurements using the CIP10-M and the SASS 3100 samplers, respectively. Cultivable methods were used to report bacterial and fungal concentrations (CFU/m³). Endotoxin exposure levels (EU/m³) were also assessed. Molecular biology method was carried out by performing ddPCR assays to detect and quantify *E. coli*, the total fungi flora and *A. fumigatus* (GU/m³). While household waste collectors were exposed to average concentrations over the recommendations for bacteria (27,000 UFC/m³) and endotoxins (100 EU/m³), recyclable and organic waste workers were exposed to lower concentrations. The gram-negative bacteria *E. coli* was detected in all samples with a maximum concentration of 150 GU/m³. Exposure level to fungi was higher among compost waste collectors (6,800 CFU/m³) compared to other workers (5,900 CFU/m³ and 1,200 CFU/m³). *A. fumigatus* was detected in all samples with important concentrations for both domestic waste workers breathing zone and domestic ambient cabin measurements.

This study establishes evidences that workers are exposed to bacteria, endotoxin, fungi and *A. fumigatus* during waste collection. Our results also suggest that exposures differ according to the type of waste, the work title, and some determinants of the environment such as the discharge/dumping location.

Keywords: waste, collectors, drivers, cabins, exposure, bioaerosols, endotoxins, fungi, ddPCR

3.3 Introduction

Sorting, recycling and composting activities are constantly increasing in order to reduce environmental impacts caused by waste deposition and treatment. Many municipalities have begun to upgrade their household and recyclable waste organization by developing waste management programs. The waste management industry can be classified into the environmental protection category of “green economy” which is a concept based on “the sustainable development” (Cheneval et al. 2015). Therefore, many employees are involved in “green employment”.

Several studies reported that workers in waste management industry are exposed to bioaerosols during the handling, lifting, and dumping of waste (Poulsen et al. 1995; Lavoie et al. 2006; Ncube, Ncube, and Voyi 2017; Viegas et al. 2020). Bioaerosols can be defined as solid biological particulates suspended in the air with different aerodynamic diameters ranging from hundreds of nanometers to tens of micrometers (Sykes et al. 2011). They may consist of pathogenic or non-pathogenic live or dead bacteria and fungi, viruses, allergens, bacterial endotoxin, mycotoxins, peptidoglycans, and/or microbial volatile organic compounds (Douwes et al. 2003; Wéry 2014).

Exposure to bioaerosol in the waste sorting and recycling occupational environment is a major concern because it has been linked to several health effects. Studies have reported an association with airway symptoms, asthma, respiratory and infectious diseases, nose irritation, gastrointestinal and skin problems (Douwes et al. 2003; Ivens et al. 1999). Wouters et al. reported a high concentration of interleukin 8 (IL-8), a strong chemoattractant of neutrophils, in domestic waste collectors’ nasal lavage. Authors concluded that bioaerosol exposure probably triggers neutrophil-mediated inflammation, resulting in respiratory symptoms (Wouters et al. 2002). In the same way, Heldad et al. observed that neutrophils, eosinophils and IL-8 concentrations significantly increased in organic waste collectors’ induced sputum. They also observed a correlation between IL-8 and neutrophils concentrations. Authors suggested that exposition to bioaerosol while collecting organic household waste may cause lower airway inflammation (Heldal et al. 2003).

Airborne fungal metabolites, spores and microbial volatile organic compounds are known to be associated with health effects following inhalation (Fischer and Dott 2003). For example, 2 cases of allergic bronchopulmonary aspergillosis (APBA) have been reported among compost collectors. APBA is a complex allergic response to *Aspergillus* mostly seen in patients with asthma. In both cases, *Aspergillus fumigatus* (*A. fumigatus*), a group 2 biological pathogen (Santé

Canada 2011), was identified in patients' sputum (Poole and Wong 2013). *A. fumigatus* is a well-described and common component of bioaerosols which was proposed as a good indicator for bioaerosol emissions in epidemiological studies (Roca-Barcelo et al. 2020). Generally, the persistence of allergic asthma can be linked to fungal sensitization. Indeed, most fungi possess multiple and diverse allergens (Knutsen et al. 2012).

Toxic effects following exposure to airborne biological agents are also associated with endotoxins exposure. Endotoxins consist of aerosolized liposaccharides from the cell wall of gram-negative bacteria. Internalisation of endotoxins by macrophages and endothelial cells may result in the production of inflammatory cytokines with the subsequent migration of inflammatory cells into the lung. This cascade of events can lead to clinical effects such as toxic pneumonitis, airway inflammation and systemic symptoms (Rylander 2002).

Bioaerosol pathology mechanisms are still not fully understood, but exposure to an airborne mixture of biologically active compounds may lead to potentially additive and synergic effects (Essen and Donham 1999; Samake et al. 2017).

A variety of factors were identified as determinants of exposure to bioaerosol during waste and recyclable collection. The collection location and the type of waste may influence worker exposure. Lavoie et al. reported maximal bacterial concentrations of 27,100 CFU/m³ and 6,800 CFU/m³ for rural compost collectors and mixed urban collectors, respectively (Lavoie et al. 2006). Park et al. found that workers handling non separated recyclable waste were exposed to concentrations of 2,000 EU/m³ for endotoxin, 10⁴ CFU/m³ for fungi and 10⁵ CFU/m³ for bacteria (Park et al. 2011). The fungal and bacterial flora encountered in studies characterizing airborne microorganisms in waste industry treatment is generally similar with mainly identification of *Penicillium spp*, *Cladosporium spp*, *Aspergillus spp*, *Staphylococcus spp*, *Bacillus spp* and *Pseudomonas spp* (Madsen et al. 2016; Solans et al. 2007; Gutarowska et al. 2015; Pearson et al. 2015; Grisoli et al. 2009).

Cabin filters have been identified as a potential source of microorganisms. Viegas et al. analyzed filters belonging to the system filtration from forklifts operating in one waste sorting industry in Lisbon. After cultivable method, they noticed fungal overgrowth on 5 of the 11 analyzed filters. The most frequent *Aspergillus* sections identified following the culture were *Circumdati* (48 %) and *Nigri* (32 %). However, *Aspergillus* section *fumigati* was detected in all of the 11 samples by

q-PCR (Viegas et al. 2017). These results indicate that drivers can be exposed to bioaerosols through the ventilation system of the truck.

Exposures to cultivable bacteria and fungi based on air sampling have commonly been reported in occupational hygiene (Park et al. 2011; Wouters et al. 2006; Lavoie et al. 2006; Marchand et al. 2017). However, cultivable flora approximately represents only 10 % of the total flora (Eduard 2009; Russell, Mitchell, and Godish 1999). Some studies have performed molecular analysis in order to assess the total flora; quantitative PCR (q-PCR) methods have been used in occupational hygiene studies to evaluate worker exposures (Madsen et al. 2016; Viegas et al. 2017). Nevertheless, the use of a next-generation PCR technology called digital droplet PCR (ddPCR) has been proposed (Hindson et al. 2011; Taylor et al. 2015; Verhaegen et al. 2016). The partitioning of the PCR reaction into thousands of individual reactions droplets prior to amplification and the acquisition of absolute count of DNA target at the reaction end point are the principal advantages of the ddPCR (Rački et al. 2014; Devonshire et al. 2016; Taylor et al. 2015; Taylor, Laperriere, and Germain 2017). Indeed, those features provide an absolute quantification of bioaerosols nucleic acids without dependence on amplification efficiency and without a standard curve leading to more precision compared to other PCR methods. In addition, ddPCR overcomes the problem of contaminated samples that can partially inhibit Taq polymerase and/or primer annealing that would likely inhibit the amplification and lead to undetectable target levels when using qPCR (Verhaegen et al. 2016; Rački et al. 2014; Taylor, Laperriere, and Germain 2017).

The purpose of this study was to quantify and characterize bioaerosol concentrations during waste collection stratified by the type of waste, to detect specific microorganisms by droplet digital PCR (ddPCR) and to compare drivers and collectors exposures.

Methods

Measurements were performed during the summer to assess the worst-case scenario because warm temperatures promote the microbial proliferation. Six trucks from the urban sector were assessed during a full working day. Workers were followed by the research team in a vehicle during the whole collection shift.

3.3.1 Work description

For each truck, the waste collection team was composed of one driver and at least one collector. All participants were males. Collectors manually loaded garbage containers. They could also use a mechanical lift behind the truck for loading. Drivers drove the trucks, and, in some situations, they could help collectors to load. Trucks used a compaction system during the collection. At the end of the working day or during the shift, the truck could be brought to the discharge to dump the collected waste.

The different type of waste that workers carried out on a day can be separated into 3 categories: domestic (mixed fractions), recyclable (packing fractions, glasses, papers) and compost (organic, fruits, vegetables, remain fractions of food). Two trucks for each type of waste were evaluated.

An employee's normal working day was approximately 7.5 to 8 hours. During the collection, workers generally took a 30 min break. Sometimes, the collection only lasted 4 to 7 hours. Sampling was completed only during the collection.

3.3.2 Sampling

i. Cabin ambient air sampling

Bioaerosols in the cabin were sampled with a smart air sampler commonly called SASS 3100 (Research International Instrument Inc., Washington, DC). The instrument was set at a flow rate of 300 L/min. For each truck, a total of 2 sequential samples were taken using a bioaerosol filter. Those filters are composed of polypropylene electret microfibre and they have a reported collection efficacy of 80 % or better at a 1.0 μm aerosol particle diameter (Research International). Every sampling lasted approximately 1.5 to 2 hours.

ii. Personal breathing zone measurement of bioaerosols

Personal breathing zone measurements were taken on drivers and collectors during their full shifts (**figure1**). Inhalable fraction of airborne biological agents was collected using a personal sampler CIP10-M (Bio-Rad Instrument Inc., Hercules, Ca, USA) (**figure 1**). The flow rate was adjusted to 10 L/min according to the INRS sampling method (INRS 2017). Before sampling, CIP10-M devices were calibrated on a laboratory test bench to set a speed rotation close to 7,000 Rotations Per Minutes (RPM). Before every sampling day, instruments were verified with a tachymeter to validate calibration settings. A difference of +/-100 RPM was accepted. In addition, CIP10-M cupules were decontaminated by dipping and rubbing them in isopropanol for 1 minute then in DNA AWAY decontaminant (Thermo Fisher Scientific, Burlington, ON, CA) for 5 minutes and finally they were sterilized by autoclave.

The day of the sampling, 2 sequential samples of approximately 3 to 4 hours each were taken for each worker. 2 mL of sterile PCR grade Phosphate Buffered Saline (PBS) was added in the cupule before starting the sampling. Every hour, 1 mL of PBS was refilled in the cupule to prevent dryness. After the collection, the sample was harvested in a 2 mL Eppendorf tube (Thermo Fisher Scientific, Burlington, ON, CA). In order to optimize particles recovery between 500 µl to 1 mL of PBS was used to rinse the cupule and then combined to the original sample harvest.



Figure 1: CIP10 sampling method

3.3.3 Samples preparation

At the end of the sampling day, samples were brought to the laboratory, kept at 5°C and analyzed the next day.

i. SASS samples

The rigid edge of the bioaerosol electret filter was removed and the microfibre part was extracted in a falcon 50 mL (Thermo Fisher Scientific, Burlington, ON, CA) with 10 mL of PBS and 0.05 % tween 20 (Sigma-Aldrich Canada Co., Oakville, ON, CA). Extraction was completed using a multitube vortex (Fischer scientific company, Ottawa, ON, CA) at 2,500 RPM for 10 minutes. The

microfibre pieces were removed from the fluid and aliquots of 2 mL for DNA and 500 µl for endotoxin were made.

ii. CIP10 M samples

All samples from the CIP-10M were completed with PBS to a final volume of 2 mL. Aliquots of 500 µl for endotoxin and 1 mL for PCR analysis were made. The rest of the sample was used to make an 1/6 dilution which constitutes the stock solution for the cultivable analysis.

3.3.4 Cultivable analysis

All samples were analyzed for cultivable microorganisms. Samples were plated in triplicated using the easySpiral Dilute (Interscience, Woburn, MA, USA). The culture media used were Tryptone Soya Agar (TSA) for bacteria and Malt Extract Agar (MEA) for fungi (Oxoid Company, Nepean, ON, Canada). The cultivable samples were placed at 25°C during 2 days for TSA and 3-6 days for MEA. All colonies were counted according to the IRSST method 264 (Marchand 2011) under a stereomicroscope SNZ18 (Nikon, Melville, NY, USA).

3.3.5 Endotoxin analysis

Endotoxin samples were either analyzed the same day or kept at -4°C for 24h. Analyses were performed following the IRSST analytical method 332 (Marchand 2009).

3.3.6 Sampling and molecular detection of fungal, targeted bacterial and fungal species (ddPCR)

DNA samples were centrifuged at 17,000xg for 5 min. The supernatant was removed. Samples were then kept at -20°C until DNA extraction. DNA extraction was done using the Quick-DNA Fungal/ Bacterial Miniprep Kit from Zymo Research (Zymo Research, Irvine, CA, USA) following the manufacturer's protocol. Extracted DNA samples were kept at -20° C until ddPCR analysis.

Escherichia coli (*E. coli*), the total fungi flora and *Aspergillus fumigatus* (*A. fumigatus*) detections were performed by dd-PCR assays. **Table 1** displays the sequences of the primers and probes used for the detection (Integrated DNA Technologies IDT, Coraville, IA, USA). The digital droplet PCR assay (ddPCR) was performed with a final PCR reaction volume of 20 µL using the ddPCR™ Supermix for Probes (no dUTP) master mix (Bio-Rad, Hercules, CA). Each reaction included 10 µL of ddPCR Probe Supermix (2X), forward and reverse primers (Integrated DNA

Technologies, Coralville, IA, USA) at 500 nM each, Taqman probe at 375nM, a supplement of 1mM of Mgcl₂ and 5 µL of the extracted DNA samples. Negative (NTC) and positive controls (PC) were analyzed at the same time as the samples. For the PC, the 5 µL of sample DNA was replaced by DNA from a fungal mix, *E. coli*, or *A. fumigatus* depending on the target assay. For the NTC, the DNA was replaced by PCR grade water. Before amplification, droplets were generated using QX200™ droplet generator (Bio-Rad) .The dd-PCR assays were performed in a Bio-Rad T-100 thermal cycler (Bio-Rad) using the following cycling conditions: an initial denaturation step at 95 °C for 10 min, followed by 40 cycles consisting of denaturation at 94 °C for 30 s, annealing step at 48 °C for 1 min and extension at 72 °C for 30 s, followed by a final extension step at 90 °C for 5 min and a 12 °C indefinite hold. After PCR cycles, droplets were analyzed using the QX200™ Droplet Reader (Bio-Rad). Droplets were classified as positive or negative according to a threshold manually set across all wells based upon results of the NTC and PC results. The QuantaSoft™ v.1.7.4.0917 (Bio-Rad) software was used to calculate the concentration of the targeted DNA sequences, along with their Poisson-based 95 % confidence intervals (Hindson et al. 2011). In order to ensure reliable results, wells with less than 12,000 accepted droplets were not included in the analysis (Viegas et al. 2020). The detection limit (DL) was set at 3 copies/µL, DL/2 was used in the statistical analysis for the sample's concentrations under the DL.

Table 1: Primers and probes

Systems	Primers and Probes	Sequences	References
FungiQuant	FungiQuant-F	GGR AAA CTC ACC AGG TCC AG	(Liu et al. 2012)
	Fungiquant-R	GSW CTA TCC CCA KCA CGA	
	Fungiquant-Prb	TGG TGC ATG GCC GTT	
<i>E. coli</i>	EcolUSPA222F	AA CAC TGA ATC TTTA CGG CT	IRSST (2020)
	EcolUSPA446R	GAA ACT TTC GCA TTG TAG GG	
	EcolUSPA328P	TGG AAG GAG TAA CAC TAT GGC	
<i>A. fumigatus</i>	AfumiF1	GCC CGC CGT TTC GAC	(Cruz-Perez, Buttner, and Stetzenbach 2001)
	AfumiR1	CCG TTG TTG AAA GTT TTA ACT GAT TAC	
	AfumiP1	CCC GCC GAA GAC CCC AAC	

1.1. Statistical analysis

Expostats tool 1 was used to estimate parameters of the log normal distribution of bacteria, fungi, endotoxins and genomic unit concentrations (available from www.expostats.ca). Descriptive statistics using medians, geometric means, standard deviations and graphical representations appropriate to the nature of the data were carried out with the R studio software (RStudio Team 2015).

3.4 Results

3.4.1 Humidity and temperatures parameters

Table 2 summarizes for each truck the temperature, and the humidity parameters measured on sampling days. Measurements were taken during the morning and the afternoon.

Table 2: Combinations parameters

Type of waste	Number of samples (personal +ambient)	Humidity (%)	Temperature(°C)
Recyclable	6	AM :61.5	AM :25
		PM :62.5	PM :26
Recyclable	6	AM :84.3	AM :22.8
		PM :66	PM :26
Compost	6	AM:66.5	AM:20.7
		PM :63.6	PM :21.6
Compost	6	AM :70	AM :20
		PM :60	PM :24
Domestic	6	AM :62.4	AM :18.5
		PM :52.7	PM :23.3
Domestic	7	AM :63	AM :26.5
		PM :42.2	PM :35

AM= Ante meridiem= morning; PM= Post Meridiem= afternoon

3.4.2 Cultivable exposure level

The personal and ambient exposure levels to inhalable bacteria, fungi and endotoxin are presented in **table 3**. The bacterial geometric mean (GM) ranged from 800 CFU/m³ (compost-driver) to 27,000 CFU/m³ (domestic waste collector). All fungal GM concentrations exceeded 460 CFU/m³ and the highest concentration was measured among compost collectors. Domestic waste collectors had the highest exposure to endotoxin with a value of 100 EU/m³. Geometric standards deviations (GSD) ranged from 1 to 5 with an extreme value of 22. For the three types of waste, collectors were more exposed than drivers. In addition, ambient cabins and personal drivers concentrations for bacteria, fungi and endotoxin during recyclable collection were similar. However, for the compost trucks, ambient cabins concentrations were slightly higher than personal drivers concentrations. Contrarily, personal drivers concentrations were higher than ambient cabins concentrations during the domestic waste collection.

Table 3: Geometric mean (GM) and geometric standard deviation (GSD) of airborne bacteria, fungi and endotoxin for personal (drivers and collectors) and ambient (cabins) measurements during the waste collection

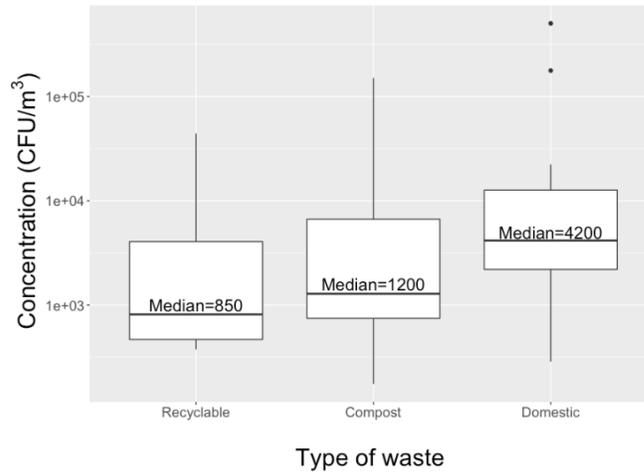
Type of waste	Matrix	Bacteria CFU/m ³ GM (GSD)	Fungi CFU/m ³ GM (GSD)	Endotoxin EU/m ³ GM (GSD)
Recyclable	Cabins (n=4)	1,100 (3,1)	450 (1.4)	2.7 (2.6)
	Drivers (n=4)	1,000 (5.2)	460 (2.2)	2.7 (2.5)
	Collectors (n=4)	3,300 (6.8)	1,200 (4)	13 (2.4)
Compost	Cabins (n=4)	1,600 (6.8)	1,000 (2.1)	5.2 (1.6)
	Drivers (n=4)	800 (4)	740 ¹ (2.4)	4.5 (2.1)
	Collectors (n=4)	10,000 (9)	6,800 (3)	52 (4.5)
Domestic	Cabins (n=4)	2,800 (1.6)	980 (2.9)	19 (1.3)
	Drivers (n=5)	3,700 (5.3)	5,100 (6.2)	38 (3.5)
	Collectors (n=4)	27,000 (22)	5,900 (9)	100 (4.7)

¹ Because of technical issues: n=3

Figure 2 shows the distribution of the bacterial (A), fungi (B) and endotoxin (C) concentrations stratified by the type of waste. Boxplots A, B and C have the same pattern in which the domestic waste group has the highest concentrations. For instance, the maximum bacterial, fungi and endotoxin concentrations observed during domestic waste collection were 5×10^5 CFU/m³, 8.7×10^4 CFU/m³ and 450 EU/m³, respectively.

The distribution of bacterial, fungi and endotoxin concentrations stratified by matrix is shown in **figure 3**. The three boxplots display the same pattern in which collectors have the greatest exposure. However, a maximum fungal concentration was reported among drivers with a concentration of 8.7×10^4 CFU/m³.

A. Bacteria



B. Fungi



C. Endotoxin

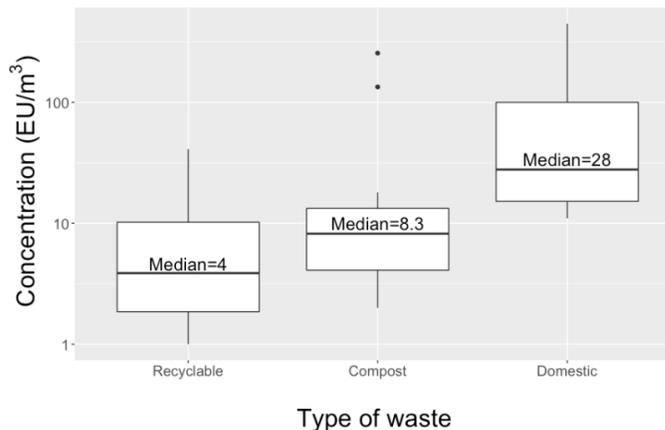
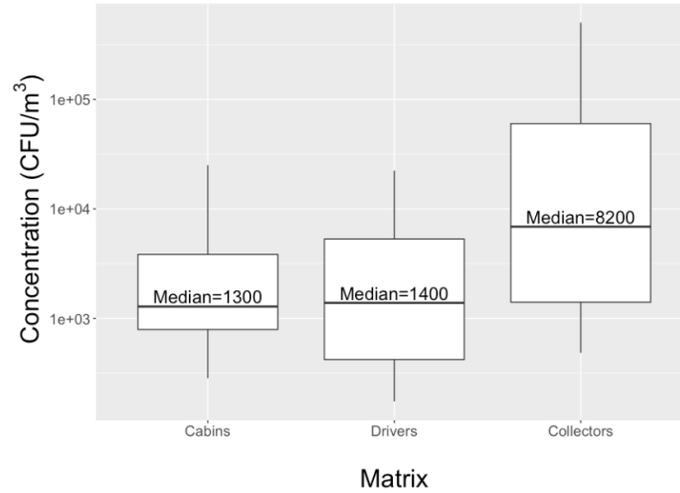
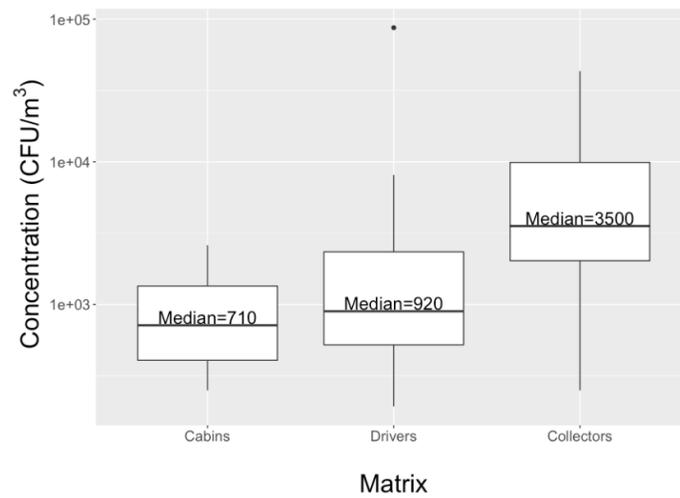


Figure 2: Distribution of bacteria (A), fungi (B) and endotoxin (C) concentrations stratified by the type of waste. $n=12$ for Recyclable and Compost; and $n=13$ for Domestic. The upper and lower hinges of the boxplots correspond to the first and third quartiles which are the 25th and 75th percentiles. The upper whisker covers from the hinge to the highest value that is within $1.5 \times \text{IQR}$ of the hinge, where IQR is the inter-quartile range, or distance between the first and third quartiles. The lower whisker extends from the hinge to the lowest value within $1.5 \times \text{IQR}$ of the hinge.

A. Bacteria



B. Fungi



C. Endotoxin

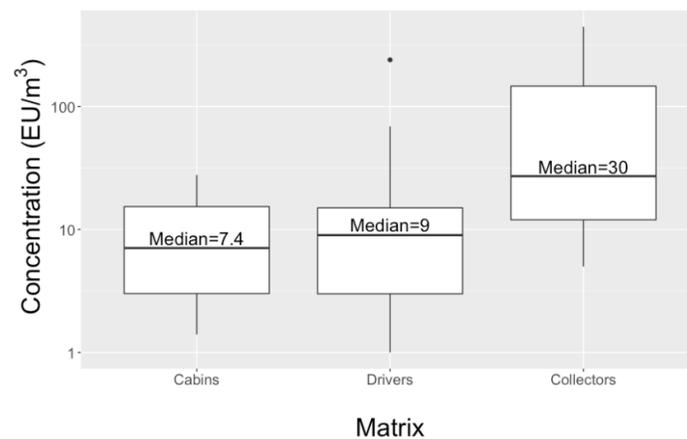


Figure 3: Distribution of bacteria (A), fungi (B) and endotoxin (C) concentrations stratified by the matrix. n=12 for Cabins and Collectors; n=13 for Drivers (A and C); and n=12 for Drivers (B)

3.4.3 Molecular quantification and detection of bacteria and fungi

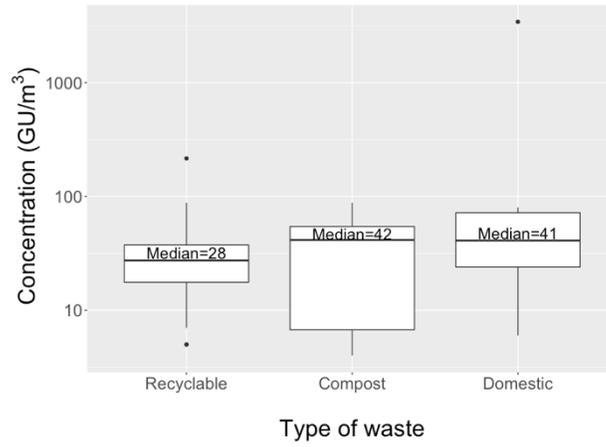
Table 4 summarizes the genomic unit (GU) concentrations of *E. coli*, the total fungi flora, and *A. fumigatus* for cabins, drivers and collectors during recyclable, compost and domestic waste collection. Domestic waste collectors had the greatest *E. coli* exposure (GM=140 GU/m³). Fungal levels were greater during compost collection with concentrations of 860,000 GU/m³ for ambient cabins and 320,000 GU/m³ for personal collectors. The concentrations of *A. fumigatus* ranged from 39 to 24,000 GU/m³ and highest concentrations were reported during the domestic waste collection. GSD ranged from 1.2 to 20.

Table 4: Microorganism quantification and detection of personal (collectors and drivers) and ambient (cabins) measurements during the waste collection

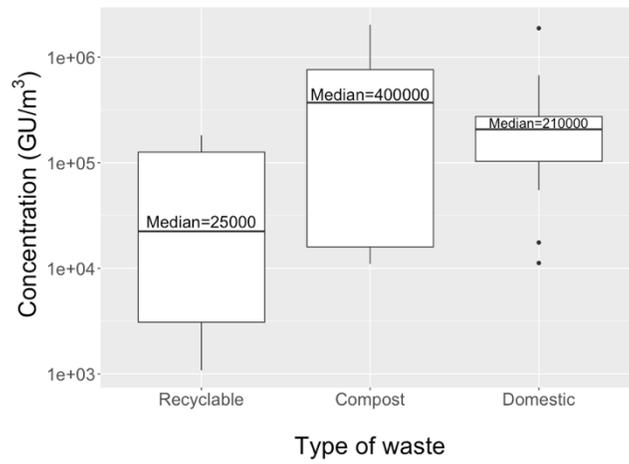
Type of waste	Matrix	<i>E. coli</i> GU/m ³ GM (GSD)	Total fungi GU/m ³ GM (GSD)	<i>A. fumigatus</i> GU/m ³ GM (GSD)
Recyclable	Cabins (n=4)	9.5 (3)	55,000-(3.1)	260 (4.8)
	Drivers (n=4)	46 (3)	6,800(3.6)	39 (1.4)
	Collectors(n=4)	37 (2)	17,000 (15)	48 (2.9)
Compost	Cabins (n=4)	5.6 (1.2)	860,000 (1.6)	310 (2.8)
	Drivers (n=4)	48 (1.6)	13,000 (1.2)	210 (2.9)
	Collectors (n=4)	53 (1.2)	320,000 (6.2)	530 (4.8)
Domestic	Cabins (n=4)	9.5 (2.3)	150,000 (2)	2,500 (1.7)
	Drivers (n=5)	53 (1.4)	130,000 (3.8)	24,000 (20)
	Collectors (n=4)	140 (9.1)	200,000 (8.3)	1,700 (9.1)

The distributions of the GU concentrations obtained by ddPCR are shown in **figure 4 and 5**. When stratified by the type of waste (**figure 4**), *E. coli* medians were in the same range for all type of waste and values were similar during compost and domestic waste collection. Highest fungi concentrations were reported during compost collection. Contrarily, *A. fumigatus* levels were higher during the domestic waste collection. When stratified by the matrix (**figure 5**), collectors and drivers showed exposure levels in the same range for *E. coli* and *A. fumigatus*. However, highest fungal concentrations were reported for collectors compared to drivers. Cabins appeared to be poorly contaminated by *E.Coli* but highly contaminated by fungi and *A. fumigatus* with median concentrations of 200,000 GU/m³ and 730 GU/m³, respectively.

A. *E. Coli*



B. Total fungi



C. *A. fumigatus*

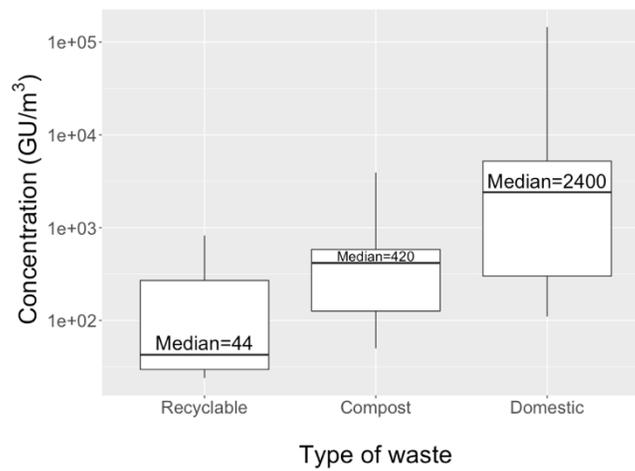
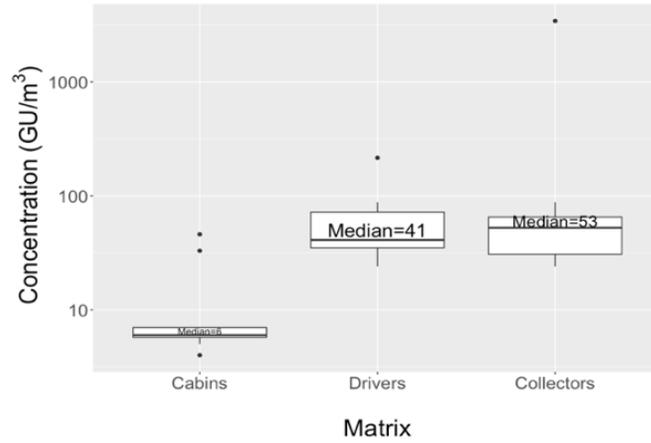
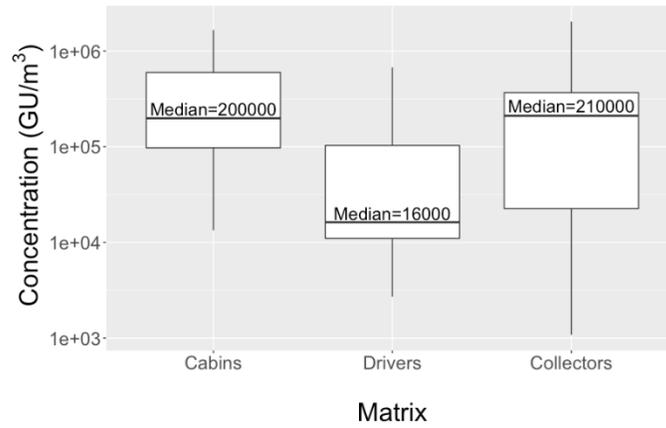


Figure 4: Distribution of molecular concentrations stratified by the type of waste. n=12 for Recyclable and Compost; and n=13 for Domestic

A. E. Coli



B. Total fungi



C. A. fumigatus

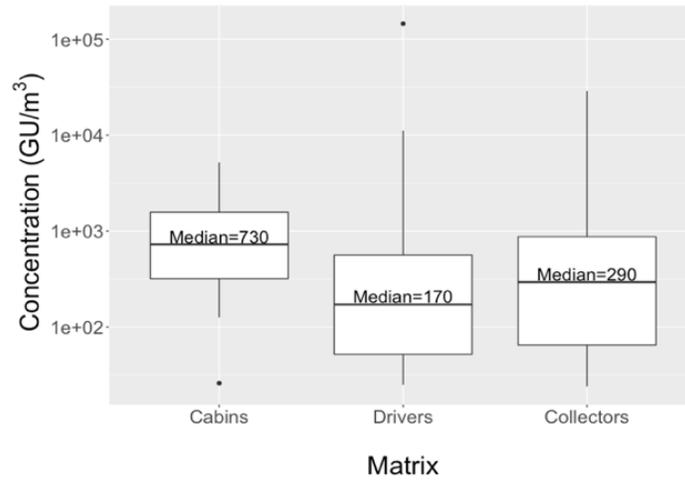


Figure 5: Distribution of molecular concentrations stratified by the matrix. n=12 for Cabins and Collectors; n=13 for Drivers

3.5 Discussion

The purpose of this study was to quantify and characterize bioaerosol concentrations during recyclable, compost and domestic waste collection in order to assess drivers and collectors exposure. By using a next generation biological molecular method (ddPCR), this study also aimed to detect specific microorganisms in workplaces.

3.5.1 Bacterial exposure

When grouping data according to the work post, our study reported higher bacterial concentrations for collectors (8,200 CFU/m³). Cabins bacterial concentrations were approximately similar to drivers exposure levels with median concentrations of 1,300 CFU/m³ and 1,400 CFU/m³, respectively (**figure 3**).

When grouping data according to the type of waste, higher concentrations were reported during domestic waste collection, following by compost and recyclable waste collection (**figure 2**). The concentrations reported in this study during the domestic waste collection were comparable with previously reported bioaerosol mean concentrations of 21,000 CFU/m³ for collectors, 3,400 CFU/m³ for drivers and 470 CFU/m³ for cabins (Nielsen, Nielsen, and Breum 1995). However, Park (collectors=220,000 CFU/m³; drivers=18,000 CFU/m³) and Krajewski (collectors=267,000 CFU/m³; drivers=59,000 CFU/m³) observed higher average exposure levels for domestic waste workers (Park et al. 2011; Krajewski et al. 2002).

Concerning recyclable and compost waste, respective median concentrations of 5,600 CFU/m³ and 50,300 CFU/m³ were reported for collectors in a previous study carried out in Québec, Canada (Lavoie et al. 2006). Although they reported median concentrations, a difference factor of 10 was also observed between both type of waste as our study observed (**table 3**).

Overall, our results confirmed that domestic and compost waste collectors were exposed to bacterial concentrations that are near the recommendation limit of 10⁴ UFC/m³ which is based on epidemiological studies (Poulsen et al. 1995; Goyer 2005; Marchand et al. 2017).

3.5.2 Fungal exposure

Our results indicate that the exposure level of collectors to fungi was about 4 times higher than drivers exposure and cabins contamination level (**figure 3**). In addition, fungal concentrations observed during the collection of compost and domestic waste were about 3 to 5 times higher than

the concentrations during recyclable waste collection (**figure 2**). Both drivers and collectors exposure level of our study were in the same range as Madsen's findings (GM: 5,700 CFU/m³) (Madsen et al. 2016). However, some studies reported higher concentrations up to 10³ CFU/m³ (Park et al. 2011; Krajewski et al. 2002) and one study has found a lower concentration of 1,200 UFC/m³ (Kiviranta et al. 1999) both for domestic waste collectors. Park reported domestic waste drivers exposure to fungi in the same range as the levels reported in our study while other studies reported higher concentrations ranging from 47,000 to 63,000 CFU/m³ (Park et al. 2013; Krajewski et al. 2002; Nielsen, Nielsen, and Breum 1995).

Our results also show that during domestic waste collection, drivers (5,100 CFU/m³) and collectors (5,900 CFU/m³) were exposed to similar level while the concentration in the cabin (90 CFU/m³) was lower (**table 3**). In addition, all collectors and the domestic waste drivers average exposure exceeded the fungal recommendation of 1,000 CFU/m³ proposed by Marchand (Marchand et al. 2017)

3.5.3 Endotoxin exposure

Endotoxin levels ranged from 2.7 to 100 EU/m³ and the concentrations were higher during the collection of domestic waste. Workers concentrations were in the same range (Wouters et al. 2002), lower (Park et al. 2011; Krajewski et al. 2002) and higher (Nielsen, Nielsen, and Breum 1995) than literature endotoxin-reported levels. For instance, Wouters measured collectors and drivers endotoxin GM ranging from 29 to 66 EU/m³ during organic, residual and mixed waste collection (Wouters et al. 2002). Krajewski measured average concentrations for domestic waste workers 4 to 10 times higher than the levels presented in our study (Krajewski et al. 2002).

Concerning cabins, concentrations were lower than 19 EU/m³ and the highest value was observed in the domestic waste cabin. The maximal concentration reported by Nielsen (2 EU/m³) for domestic waste cabins was lower than our findings (27.8 EU/m³) (Nielsen, Nielsen, and Breum 1995).

The Dutch Expert Committee of Exposure has recommended a health based occupational limit value of 90 EU/m³ based on respiratory symptoms which was exceeded by some domestic waste workers (DECOS 2010).

3.5.4 Molecular detection and quantification

i. E.coli

A new biomolecular analytical tool (ddPCR) has been used to characterize workers exposures. *E. coli* exposure levels were in the same range for compost, recyclable and domestic waste workers with average concentrations lower than 150 GU/m³. Drivers and collectors exposure levels were about 5 to 15 times higher than cabins levels (**figure 5**).

Not a lot of authors have performed detection and quantification of *E. coli* in the occupational health field of the waste industry. However, Krajewski identified the presence of *E. coli* on 9 of 10 workers' air samples during waste collection (Krajewski et al. 2002). Although exposure to this bacterium can lead to health effects such as gastroenteritis (Harrington, Dudley, and Nataro 2006), there is no occupational exposure limit to *E. coli*.

ii. Total fungi flora

Total fungi concentrations in our study ranged from 6,800 to 860,000 GU/m³ (**table 4**). These levels were largely higher than what was found with the classic methods of cultivation through which concentrations ranged from 450 to 6,800 CFU/m³ (**table 3**). This difference was expected since cultivable methods only reflect viable organisms that were successfully sampled and grown on the selected media (Cox et al. 2019). In addition, the cultivable organisms represent approximately 10 % of the total microflora (Russell, Mitchell, and Godish 1999; Eduard 2009). In this study, only 0.6 % to 7 % of fungi were cultivable when compared to the total flora.

Overall, our results show that compost and domestic waste collectors were the most exposed to fungi. The ambient measurements for all three types of waste show that cabins were highly contaminated by fungi and contamination was the greatest in the compost truck (860,000 GU/m³). However, drivers exposure during compost waste collection was 70 times lower than the cabin ambient measurements; our study did not find any explanation to this observation.

iii. Aspergillus fumigatus

The waste management environment is known to be associated with exposure to various biological compounds such as fungi belonging to the genera of *Aspergillus* and *Penicillium*, which are known for their potential to cause respiratory illnesses (Madsen et al. 2016; Wéry 2014). Our results showed that the most exposed group to *Aspergillus fumigatus* was domestic waste workers. Within that group, all (100 %) of our samples showed at least detectable presence for this fungi whereas,

in a previous study, microscopy detection was only achievable in 20 % of domestic waste workers samples in a range of 100 to 2,000 CFU/m³ (Nielsen, Nielsen, and Breum 1995). In our study, molecular detection of *A. fumigatus* ranged between 110 to 150,000 GU/m³. Even if high values were observed for domestic waste collectors, on average drivers appear to be the most exposed group with a GM of 24,000 GU/m³. Moreover, *A. fumigatus* was detected in all of our cabins samples and the domestic waste trucks were highly contaminated with an average level of 2,500 GU/m³. Contrarily, microscopy detection on the cabin samples was only achievable on 13 % of Nielsen's samples in an average level of 200 CFU/m³.

Because it is an opportunist pathogen, *A. fumigatus* can cause severe or fatal aspergillosis in immunosuppressed patients (Malta-Vacas et al. 2012); by consequence, as soon as its presence is detected in a work environment, it is recommended to reduce exposure (Marchand et al. 2017).

3.5.5 Workers exposure assessment

The present study suggests that bioaerosol occupational health risks are lower during recyclable collection compared to domestic waste and compost collections. Our results show that, during compost waste collection, workers were at risk of developing health effects related to fungi exposure. However, domestic waste workers were exposed to concentrations of bacteria, endotoxins, *E. coli*, and *A. fumigatus* sufficiently high enough to produce respiratory health effects. In general, collectors were particularly exposed. This was expected because collectors are in close contact with waste and aerosolization of microorganisms could occur during the loading of the garbage in the truck.

Nevertheless, one driver of a domestic waste truck was exposed to high concentrations of bacteria (22,000 CFU/m³), endotoxins (240 EU/m³), fungi (87,000 CFU/m³ and 670,000 GU/m³), and *A. fumigatus* (150,000 CFU/m³) during a very hot afternoon (35°C), especially at the time of the waste dumping. Those results exceed the health-based occupational recommendations. It was observed that during domestic collection, drivers were getting out to help collectors transferring waste into the truck; this may be one reason for the higher driver exposure level when compared to the cabin concentration.

In this study, only one of the two domestic waste drivers had high exposure levels because they had different trucks, collection routes and two different dumping locations. One of the drivers was dumping into a close and controlled environment by transferring the waste into a big container.

The other one, the most exposed, was dumping in a landfill with a mountain of waste (**figure 6**). At the moment of the dump, collectors would get out of the truck to take their break and only drivers would get inside the discharge. During the waste unloading process, drivers would exit the truck to activate the control levers to tilt and empty the car's container. Sometimes, drivers would use a stick to facilitate the emptying when the waste is blocked in the container.

Our results suggest that high exposure levels measured during this part of the work shift could occur during the waste unloading, but a specific evaluation is necessary to validate this hypothesis.



Figure 6: The two types of domestic waste discharges

Because of the intensity of the waste collection activity, the high temperatures and the humid environment (**table 2**), and the need to communicate in a noisy environment, it is very difficult to put in place personal protective equipment during the collection. However, it should be recommended to wear protective equipment in specific situations which have the potential to generate high bioaerosol concentrations such as the waste dumping at the discharge and the truck cleaning using pressure water jets. Administrative measures also need to be implemented to regularly clean the cabin in order to reduce the long-term contamination risks.

The use of the SASS to assess driver exposure permitted to overcome the limit volume of the personal measurements. Indeed, the SASS volume is higher than the CIP10-M and it is capable of sampling smaller particles. Despite drivers' exposure variations that may be due to the moving in and out of the truck, in general cabins bioaerosols levels was in the same range as drivers exposure, except for total fungi.

This study has some limitations; when compared to other studies, the sample size of this study is low thus effective conclusions cannot be drawn in the presence of outlier measurements.

The lack of data in the literature during recyclable and compost collection is also a limit. In addition, it was not possible to look at all workers exposure risk in relation to tasks such as the dumping process because not all workers would go to the dumping location the day of the

collection. Since this study assessed the worst-case scenario, the risk may not be the same during another time of the year.

3.6 Conclusion

This study is one of the first in occupational health to use the quantification and detection of microorganisms by ddPCR in order to have an overall portrait of workers exposure to cultivable and non-cultivable bioaerosols.

Our results undoubtedly demonstrated that workers were exposed to bacteria, endotoxins, fungi and *A. fumigatus* during waste collection. Our results also suggest that exposures vary according the type of waste, job titles, type of trucks and some determinants of the environment such as the discharge/dumping location.

Therefore, this study supports the control of workers exposures by various strategies including administrative regulations, cabins cleaning procedures and the use of respiratory protective equipment during specific tasks.

BIBLIOGRAPHY

- Cheneval E., Busque M-A., Ostiguy C., Lavoie J., Bourbonnais R., Labrèche F., Zayed J., et al. 2015. “Les emplois verts au Québec: définition et appréciation de leurs risques chimiques ou biologiques potentiels pour la santé des travailleurs”. *IRSST*. Available at: <http://www.deslibris.ca/ID/247118>.
- Cox J., Mbareche H., Lindsley W. G., and Duchaine C. 2019. “Field Sampling of Indoor Bioaerosols”. *Aerosol Science and Technology: The Journal of the American Association for Aerosol Research*. DOI: 10.1080/02786826.2019.1688759.
- Cruz-Perez P., Buttner M. P., and Stetzenbach L. D. 2001. “Detection and quantitation of *Aspergillus Fumigatus* in pure culture using polymerase chain reaction”. *Molecular and Cellular Probes*. 15 (2): 81–88.
- DECOS. “Endotoxins- Health-based recommended occupational exposure limit”. 2010. The Hague: Health Council of the Netherlands, publication no. 2010/04OSH. Available at: <https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2010/07/15/endotoxins-health-based-recommended-occupational-exposure-limit>.
- Devonshire A. S., Sanders R., Whale A. S., Nixon G. J., Cowen S., Ellison S. L. R., Parkes H., et al. 2016. “An International Comparability Study on Quantification of mRNA Gene Expression Ratios: CCQM-P103.1”. *Biomolecular Detection and Quantification*. 8: 15–28.
- Douwes J., Thorne P., Pearce N., and Heederik D. 2003. “Bioaerosol Health Effects and Exposure Assessment: Progress and Prospects”. *The Annals of Occupational Hygiene*. 47 (3): 187–200.
- Eduard W. 2009. “Fungal Spores: A Critical Review of the Toxicological and Epidemiological Evidence as a Basis for Occupational Exposure Limit Setting”. *Critical Reviews in Toxicology*. 39 (10): 799–864.
- Essen S. G. Von, and Donham K. 1999. “Illness and Injury in Animal Confinement Workers”. *Occupational Medicine (Philadelphia, Pa.)*. 14 (2): 337–50.
- Fischer G., and Dott W. 2003. “Relevance of Airborne Fungi and Their Secondary Metabolites for Environmental, Occupational and Indoor Hygiene”. *Archives of Microbiology*. 179 (2): 75–82.
- Goyer N. 2005. “*Les bioaérosols en milieu de travail guide d'évaluation, de contrôle et de prévention*”. *IRSST*. Available at: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2048945>.
- Grisoli P., Rodolfi M., Villani S., Grignani E., Cottica D., Berri A., Picco A. M., and Dacarro C. 2009. “Assessment of Airborne Microorganism Contamination in an Industrial Area Characterized by an Open Composting Facility and a Wastewater Treatment Plant”. *Environmental Research*. 109 (2): 135–42.
- Gutarowska B., Skóra J., Stępień Ł., Szponar B., Otlewska A., and Pielech-Przybylska K. 2015. “Assessment of Microbial Contamination within Working Environments of Different Types of Composting Plants”. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 65 (4): 466–78.
- Harrington S. M., Dudley E. G., and Nataro J. P. 2006. “Pathogenesis of Enteroaggregative *Escherichia Coli* Infection”. *FEMS Microbiology Letters*. 254 (1): 12–18.

- Heldal K. K., Halstensen A. S., Thorn J., Eduard W., and Halstensen T. S. 2003. “Airway Inflammation in Waste Handlers Exposed to Bioaerosols Assessed by Induced Sputum”. *The European Respiratory Journal*. 21 (4): 641–45.
- Hindson B. J., Ness K. D., Masquelier D. A., Belgrader P., Heredia N. J., Makarewicz A, Bright I. J., et al. 2011. “High-Throughput Droplet Digital PCR System for Absolute Quantitation of DNA Copy Number”. *Analytical Chemistry*. 83 (22): 8604–10.
- Institut national de recherche et de sécurité. 2017. “Prélèvement Des Aérosols Par Le Dispositif CIP 10”. Available at: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8fIN3mwobRcJ:www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cip10/metropol-prelevement-cip10.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=ca&client=safari>.
- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail. 2009. “Endotoxin Analysis”. Available at: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/M-332-en.pdf?v=2019-10-24>.
- Institut de recherche en santé et sécurité au travail Robert-Sauvé. 2011. “Dénombrement Des Bactéries et Moisissures Cultivables de l’air Prélevées sur Les Filtrés de Polycarbonate”. Available at: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/MA-368.pdf>.
- Ivens U. I., Breum N. O., Ebbenhøj N., Nielsen B. H., Poulsen O. M., and Würtz H. 1999. “Exposure-Response Relationship between Gastrointestinal Problems among Waste Collectors and Bioaerosol Exposure”. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 25 (3): 238–45.
- Kiviranta H., Tuomainen A., Reiman M., Laitinen S., Nevalainen A., and Liesivuori J. 1999. “Exposure to Airborne Microorganisms and Volatile Organic Compounds in Different Types of Waste Handling”. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 6 (1): 39–44.
- Knutsen A. P., Bush R. K., Demain J. G., Denning D. W., Dixit A., Fairs A., Greenberger P. A., et al. 2012. “Fungi and Allergic Lower Respiratory Tract Diseases”. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 129 (2): 280–91.
- Krajewski J. A., Tarkowski S., Cyprowski M., Szarapińska-Kwaszewska J., and Dudkiewicz B. 2002. “Occupational Exposure to Organic Dust Associated with Municipal Waste Collection and Management”. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 15 (3): 289–301.
- Lavoie J., Dunkerley C. J., Kosatsky T., and Dufresne A. 2006. “Exposure to Aerosolized Bacteria and Fungi among Collectors of Commercial, Mixed Residential, Recyclable and Compostable Waste”. *The Science of the Total Environment*. 370 (1): 23–28.
- Liu C. M., Kachur S., Dwan M. G., Abraham A. G. A., M., Hsueh P.-R., Huang Y.-T., et al. 2012. “FungiQuant: A Broad-Coverage Fungal Quantitative Real-Time PCR Assay”. *BMC Microbiology*. 12 (1): 255.
- Madsen A. M., Alwan T., Ørberg A., Uhrbrand K., and Jørgensen M. B. 2016. “Waste Workers’ Exposure to Airborne Fungal and Bacterial Species in the Truck Cab and During Waste Collection”. *The Annals of Occupational Hygiene*. 60 (6): 651–68.

- Malta-Vacas J., Viegas S., Sabino S., R., and Viegas C. 2012. “Fungal and Microbial Volatile Organic Compounds Exposure Assessment in a Waste Sorting Plant”. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A* 75 (22–23): 1410–17.
- Marchand G., Bonifait L., Veillette M. et al. 2017. “Évaluation des bioaérosols et des composés gazeux émis lors des compostages de résidus agroalimentaires et résidentiels”. *IRSST*. Available at: <http://www.deslibris.ca/ID/10089603>.
- Marchand G., Gardette M., Nguyen K., Amano V., Neesham-Grenon E., and Debia M. 2017. “Assessment of Workers’ Exposure to Grain Dust and Bioaerosols During the Loading of Vessels’ Hold: An Example at a Port in the Province of Québec”. *Annals of Work Exposures and Health*. 61 (7): 836–43.
- Ncube F., Ncube E. J., and Vayi K. 2017. “Bioaerosols, Noise, and Ultraviolet Radiation Exposures for Municipal Solid Waste Handlers”. *Journal of Environmental and Public Health*. 2017: 3081638.
- Nielsen E. M., Nielsen B. H., and Breum N. O. 1995. “Occupational Bioaerosol Exposure during Collection of Household Waste”. *Annal of Agricultural and Environmental Medicine*. 2: 53–59.
- Park D., Seunghun R., Shinbum K., Hyaeyeong B., Chungsik Y., and Kyeongmin L. 2013. “Airborne Bacteria and Fungi Associated with Waste-Handling Work”. *International Journal of Occupational and Environmental Health*. 19 (4): 311–18.
- Park D., Ryu S-H., Kim S-B., and Yoon C-S. 2011. “An Assessment of Dust, Endotoxin, and Microorganism Exposure during Waste Collection and Sorting”. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 61 (4): 461–68.
- Pearson C., Littlewood E., Douglas P., Robertson S., Gant T. W., and Hansell A.L. 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, Critical Reviews*. 18 (1): 43–69.
- Poole C. J. M., and Wong. M. 2013. “Allergic Bronchopulmonary Aspergillosis in Garden Waste (Compost) Collectors--Occupational Implications”. *Occupational Medicine (Oxford, England)*. 63 (7): 517–19.
- Poulsen O. M., Breum N. O., Ebbenhøj N., Hansen A. M., Ivens U. I., D. L.V., Malmros P., Matthiasen L., Nielsen B. H., and Nielsen E. M. 1995. “Sorting and Recycling of Domestic Waste. Review of Occupational Health Problems and Their Possible Causes”. *The Science of the Total Environment*. 168 (1): 33–56.
- Rački N., Dreo T., Gutierrez-Aguirre I., Blejec A., and Ravnkar M. 2014. “Reverse Transcriptase Droplet Digital PCR Shows High Resilience to PCR Inhibitors from Plant, Soil and Water Samples”. *Plant Methods* 10 (1): 42.
- Research International. SASS 3100 Dry Air Sampler. Available at: https://www.resrchintl.com/SASS_3100_air_sampler.html
- Roca-Barcelo A., Douglas P., Fecht D., Sterrantino A. F., Williams B., Blangiardo M., Gulliver J., Hayes E.T., and Hansell A. L. 2020. “Risk of Respiratory Hospital Admission Associated with Modelled Concentrations of *Aspergillus Fumigatus* from Composting Facilities in England”. *Environmental Research*, January, 108949.

- RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA. Available at: <http://www.rstudio.com/>.
- Russell C., Mitchell J., and Godish T. 1999. “Apparent Viability of Airborne Mould Spores/Particles Determined from Culturable/Viable and Total Mould Spore Sampling Methods”. *Proceedings from Indoor Air 1999*, 934–938.
- Rylander R. 2002. “Endotoxin in the Environment-Exposure and Effects”. *Journal of Endotoxin Research* 8 (4): 241–52.
- Samake A., Uzu G., Martins J. M. F., Calas A., Vince E., Parat S., and Jaffrezo J. L. 2017. “The Unexpected Role of Bioaerosols in the Oxidative Potential of PM”. *Scientific Reports* 7. Report No: 10978.
- Santé Canada, Agence de la santé publique du Canada. 2011. “Fiche Technique Santé-Sécurité : Agents Pathogènes – Aspergillus spp.” Available at: <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agents-pathogenes-evaluation-risques/aspergillus.html>.
- Solans X., Alonso R. M., Constans A., and Mansilla A. 2007. “Occupational exposure to airborne fungi and bacteria in a household recycled container sorting plant”. *Revista Iberoamericana De Micología* 24 (2): 131–35.
- Sykes P., Morris R. H. K., Allen J. A., Wildsmith J. D., and Jones. K. P. 2011. “Workers’ Exposure to Dust, Endotoxin and β -(1–3) Glucan at Four Large-Scale Composting Facilities”. *Waste Management*. 31 (3): 423–30.
- Taylor S. C., Carbonneau J., Shelton D. N., and Boivin G. 2015. “Optimization of Droplet Digital PCR from RNA and DNA Extracts with Direct Comparison to RT-QPCR: Clinical Implications for Quantification of Oseltamivir-Resistant Subpopulations”. *Journal of Virological Methods*. 224: 58–66.
- Taylor S. C., Laperriere G., and Germain H. 2017. “Droplet Digital PCR versus QPCR for Gene Expression Analysis with Low Abundant Targets: From Variable Nonsense to Publication Quality Data”. *Scientific Reports* 7 (1): 1–8.
- Verhaegen B., D. R. K., De Z. L., Verstraete K., Heyndrickx M., and Van C. E. 2016. “Comparison of Droplet Digital PCR and QPCR for the Quantification of Shiga Toxin-Producing Escherichia Coli in Bovine Feces”. *Toxins* 8 (5): 157.
- Viegas C., Dias M., Almeida B., Aranha C. L., Carolino E., Quintal G. A., Twarużek M., et al. 2020. “Are Workers from Waste Sorting Industry Really Protected by Wearing Filtering Respiratory Protective Devices? The Gap between the Myth and Reality”. *Waste Management* 102: 856–67.
- Viegas C., Faria T., de Oliveira A. C., Caetano L. A., Carolino E., Quintal-Gomes A., Twarużek M., Kosicki R., Soszczyńska E., and Viegas S. 2017. “A New Approach to Assess Occupational Exposure to Airborne Fungal Contamination and Mycotoxins of Forklift Drivers in Waste Sorting Facilities”. *Mycotoxin Research* 33 (4): 285–95.
- Wéry N. 2014. “Bioaerosols from Composting Facilities—a Review”. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 4:42.

Wouters I.M., Hilhorst S., Kleppe P., Doekes G., Douwes J., Peretz C., and Heederik D. 2002. "Upper Airway Inflammation and Respiratory Symptoms in Domestic Waste Collectors". *Occupational and Environmental Medicine* 59 (2): 106–12.

Wouters I. M., Spaan S., Douwes J., Doekes G., and Heederik D. 2006. "Overview of Personal Occupational Exposure Levels to Inhalable Dust, Endotoxin, Beta (1-->3)-Glucan and Fungal Extracellular Polysaccharides in the Waste Management Chain". *The Annals of Occupational Hygiene* 50 (1): 39–53.

IV. RÉSULTATS

Les résultats de l'article scientifique ont permis d'observer que les chauffeurs (bactéries=3 700 UFC/m³ et endotoxines =38 UG/m³) et les collecteurs (bactéries= 27 000 UFC/m³ et endotoxines=100 UG/m³) des déchets domestiques étaient exposés à des concentrations moyennes de bioaérosols au-dessus des recommandations tandis que les collecteurs des autres types de déchets étaient exposés à des niveaux plus faibles. *E. coli* a été détecté dans tous nos échantillons avec une concentration moyenne maximale de 150 UG/m³ observée chez les collecteurs des déchets domestiques. L'air de tous les camions était faiblement contaminée en *E.coli* avec une concentration maximale de 9.5 UG/m³ pour les camions domestiques et recyclages. Les niveaux d'exposition moyens aux moisissures étaient plus élevés chez les collecteurs de compost (6 800 UFC/m³ et 320 000 UG/m³). Néanmoins, les chauffeurs des déchets domestiques présentaient des concentrations de moisissures plus élevées que les autres chauffeurs. *A.fumigatus* a été détecté dans tous nos échantillons avec des concentrations moyennes importantes dans la zone respiratoires des travailleurs des déchets domestiques (collecteurs = 1 700 UFC/m³ et chauffeurs = 24 000 UFC/m³) et dans l'air de leur camion (2 500 UFC/m³).

Les résultats de cette section ne sont pas inclus dans l'article car ils feront l'objet d'un article différent. Le **tableau 3** résume les concentrations de bactéries cultivables, d'*E. coli* et d'endotoxines sur les filtres à air de l'habitacle à T=0. La concentration bactérienne maximale a été observée au niveau du camion organique 008 avec une valeur de 230 000 UFC/cm². *E. coli* a été détecté dans tous nos échantillons et le niveau de contamination le plus élevé a été observé au niveau du camion organique 159. Les concentrations d'endotoxines les plus élevées ont été observées au niveau du camion recyclage 015, organique 008 et domestique 074.

Tableau 3 : Niveaux de contamination bactériens et en endotoxines des filtres à air de l'habitacle

Camions ¹	Déchets	Bactéries UFC/cm ²	<i>E. coli</i> UG/cm ²	Endotoxines UE/cm ²
015	Recyclable	17 000	58	133
081	Recyclable	12 000	19	76
008	Organique	230 000	75	103
159	Organique	2 500	105	49
16 118	Domestique	11 000	53	92
074	Domestique	9 000	63	113

n=nombre d'échantillon du filtre à air de la cabine du camion ; les numéros des camions correspondent aux 3 derniers chiffres.

Les concentrations des filtres à air de l'habitable pour les moisissures cultivables, totales et pour *A. fumigatus* sont présentées dans **tableau 4**. Les concentrations de moisissures cultivables variaient de 1 100 à 10 000 UFC/cm² tandis que celles de moisissures totales obtenues par la méthode moléculaire s'étendaient de 19 000 à 830 000 UG/cm². La concentration la plus élevée de moisissures cultivables a été observée au niveau du camion domestique 074 tandis que celle de moisissures totales a été observée au niveau du camion recyclage 015. *A. fumigatus* a été détecté sur tous les filtres ; les concentrations minimales ont été observées au niveau des deux camions recyclables et les concentrations maximales au niveau des deux camions domestiques.

Tableau 4 : Niveaux de contamination fongiques des filtres à air de l'habitable

Camions	Déchets	Moisissures UFC/cm ²	Moisissures totales UG/cm ²	<i>A. fumigatus</i> UG/cm ²
015 (n=1)	Recyclable	1 300	830 000	11 000
081 (n=1)	Recyclable	1 100	19 000	1 000
008 (n=1)	Organique	3 700	430 000	26 000
159 (n=1)	Organique	9 700	410 000	16 000
16 118 (n=1)	Domestique	8 900	130 000	45 000
074 (n=1)	Domestique	10 000	670 000	120 000

UG=Unité génomique

L'évolution des contaminants des filtres à air de l'habitable en fonction de la durée d'incubation est présentée dans la **figure 5**. Pour chaque contaminant, les courbes ne suivent pas une tendance particulière. L'évolution microbienne n'est pas constante entre 0, 7, 15 et 30 jours.

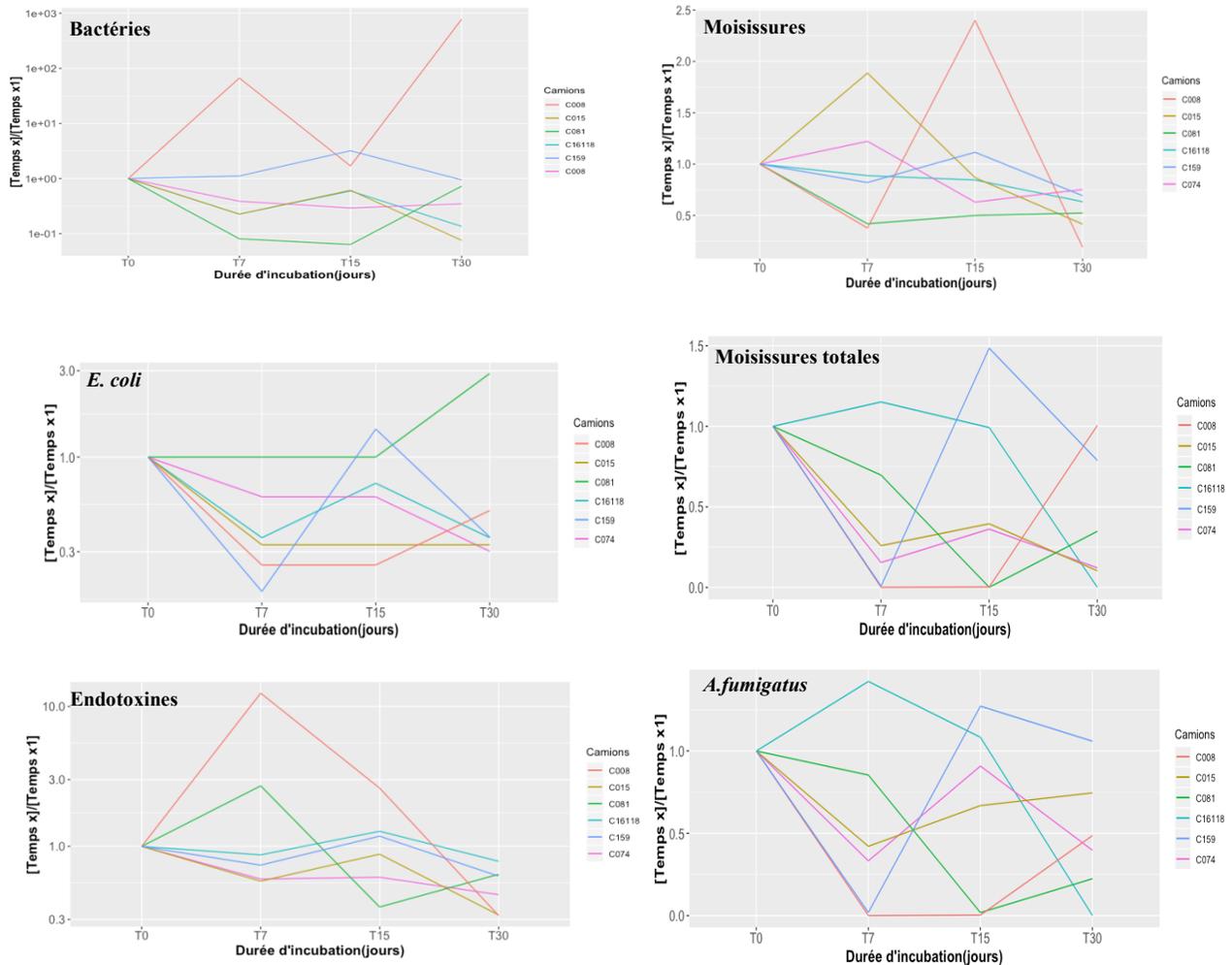


Figure 5 : Évaluation de la concentration des contaminants des filtres à air de l'habitable en fonction du temps. L'axe des ordonnées correspond au quotient de x/x_1 avec x = la concentration à T0 et x_1 = la concentration à un certain temps d'incubation ([T0], [T7], [T15], ou [T30]).

Les résultats des concentrations de bactéries, d'*E. coli* et des endotoxines mesurées au niveau des sièges des chauffeurs de camion sont présentés dans le **tableau 5**. Les sièges des deux camions organiques ainsi que ceux des deux camions recyclables présentaient des concentrations de bactéries, d'*E. coli* et d'endotoxines très similaires. Les concentrations des deux camions domestiques sont plus élevées notamment pour les bactéries et les endotoxines. Les niveaux sont aussi différents entre ces deux camions et sont plus élevés pour le camion 16118.

Tableau 5 : Concentrations des bactéries et des endotoxines mesurées sur les sièges des chauffeurs

Camions	Déchets	Bactéries UFC/cm ²	<i>E. coli</i> UG/cm ²	Endotoxines UE/cm ²
015	Recyclable	12	0,03	0,02
081	Recyclable	15	0,05	0,08
008	Organique	5	0,36	0,2
159	Organique	5	0,56	0,2
16 118	Domestique	600	2,5	1,4
074	Domestique	46	0,31	0,4

Le **tableau 6** présente les concentrations fongiques mesurées au niveau des sièges des chauffeurs des six camions. Les concentrations de moisissures cultivables sont dans le même ordre de grandeur entre les camions de déchets recyclages. Les niveaux sont variables entre les camions des déchets organiques et domestiques. Les concentrations maximales de moisissures et de *A. fumigatus* ont été observées au niveau des camions de déchets domestiques. Pour les moisissures totales et *A. fumigatus*, des différences sont observées entre les camions d'un même type de déchets.

Tableau 6 : Concentrations fongiques mesurées sur les sièges des chauffeurs

Camions	Déchets	Moisissures UFC/cm ²	Moisissures totales UG/cm ²	<i>A. fumigatus</i> UG/cm ²
015	Recyclable	0,15	200	0,08
081	Recyclable	0,2	820	0,96
008	Organique	0,13	150	0,07
159	Organique	0,30	760	1,8
16 118	Domestique	0,4	6 500	19
074	Domestique	0,72	1 500	8,6

V. DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce projet avait pour objectif d'évaluer l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs de camion et des éboueurs attitrés au transport des matières résiduelles domestiques et des déchets. Pour y parvenir, deux méthodes ont été utilisées : la méthode de la culture et la méthode moléculaire. La méthode de la culture a permis la croissance des organismes viables pour rapporter des concentrations en unité formatrice de colonies (UFC). Quant à la méthode moléculaire, elle a permis de quantifier la flore microbienne totale en unité génomique (UG) et de détecter des espèces sur la base de l'amplification de gènes spécifiques. En fait, les microorganismes cultivés ne représentent qu'environ 10 % de la flore totale (30,64). Ainsi, avec ces deux méthodes qui permettent de caractériser le microbiote de la zone respiratoire des travailleurs (collecteurs et chauffeurs), des filtres à air de l'habitacle, de l'air et des sièges des chauffeurs de la cabine des camions, un portrait complet de l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs et des éboueurs a été obtenu.

5.1 Niveau de bioaérosols dans la zone respiratoire des travailleurs et dans l'air ambiant de la cabine du camion

Les travaux de recherche présentés dans l'article scientifique ont permis de rapporter des concentrations microbiennes et de détecter des pathogènes spécifiques au niveau de la zone respiratoire des chauffeurs et des éboueurs et dans l'air de la cabine du camion.

5.1.1 Zone respiratoire des chauffeurs et des collecteurs

Les résultats ont démontré que les collecteurs étaient les plus exposés aux bioaérosols avec des concentrations pouvant dépasser les recommandations sanitaires des bactéries, moisissures et endotoxines. Contrairement aux chauffeurs, les collecteurs sont ceux qui sont directement en contact avec les déchets contenant des microorganismes qui peuvent être aérosolisés lors du levage et vidage des poubelles, lors de la compression des déchets par le système de compactage du camion.

Lorsque stratifiés selon les catégories de déchets, la majorité des indicateurs d'exposition des collecteurs du recyclage étaient les plus faibles. La nature des déchets recyclables pourrait justifier les faibles concentrations de bioaérosols observés pour ces collecteurs. En fait, les déchets recyclables contiennent généralement peu de matières organiques, ce qui pourrait donc limiter la prolifération des microorganismes et l'exposition microbienne des travailleurs.

En général, les collecteurs des déchets domestiques étaient les plus exposés aux bactéries cultivables, aux endotoxines et à *E.coli*. Étant donné que les endotoxines proviennent des bactéries gram négatives et sont libérées lors de leur lyse, ces résultats sont cohérents. Quant aux collecteurs du compost, ils étaient les plus exposés aux moisissures cultivables et totales. En plus des conditions de température et d'humidité, les déchets compost sont généralement composés de restant de nourriture et de résidus de jardins qui constituent la matière organique nécessaire pour le développement des moisissures. La collecte des déchets compost produit donc un environnement propice à la prolifération des moisissures.

Concernant les chauffeurs, les résultats de la culture et ceux du moléculaire ont démontré que les chauffeurs du domestique étaient les plus exposés à la majorité des contaminants comparés aux autres catégories de chauffeurs. Les résultats de *A.fumigatus* obtenus pour les chauffeurs des déchets domestiques suggèrent qu'un travailleur en particulier était exposé à de fortes concentrations. Durant la collecte des déchets domestiques, les chauffeurs sortaient souvent du camion pour aider les éboueurs. Ainsi, leur exposition pourrait potentiellement augmenter lors de l'exécution de certaines tâches génératrices de bioaérosols. Même si les chauffeurs des déchets domestiques avait le niveau moyen d'exposition à *E.coli* le plus élevé, les niveaux d'exposition pour les autres chauffeurs étaient peu différents et tous dans le même ordre. Étant donné que les chauffeurs ne manipulent pas constamment les déchets comme les éboueurs, ces résultats suggèrent que l'exposition à *E.coli* des chauffeurs n'est pas spécifique à un type de déchet en particulier.

5.1.2 Cabines

Les concentrations moyennes obtenues dans les cabines des camions de déchets domestiques étaient les plus élevées pour la majorité de nos indicateurs d'exposition sauf pour les moisissures totales et cultivables. En effet, la forte contamination des cabines des camions domestiques pourrait s'expliquer par les sorties et les entrées fréquentes du chauffeur dans l'optique d'aider les collecteurs mais aussi de faire avancer le camion.

Toutes les cabines étaient faiblement contaminées en *E. coli* avec un maximum de 9,5 UG/m³ pour les cabines des camions recyclages et domestiques. Ces résultats rejoignent encore une fois l'hypothèse selon laquelle la contamination à *E.coli* n'est pas spécifique au type de déchets. Les concentrations moyennes obtenues pour *A.fumigatus* démontrent que les cabines des camions domestiques étaient fortement contaminées. A date, il n'existe pas de valeur de recommandation

pour *A.fumigatus*, cependant il est fortement conseillé d'agir dès sa détection dans le milieu de travail (47).

En plus des mesures personnelles sur les chauffeurs, les concentrations obtenues dans l'air des cabines permettent d'avoir le portrait de l'exposition des chauffeurs exclusivement dans la cabine. Ainsi, pour toutes les types de camions, les concentrations médianes de bactéries, de moisissures cultivées et d'endotoxines dans l'air des cabines étaient dans le même ordre que celles des chauffeurs.

5.1.3 Évaluation de l'exposition des chauffeurs

La présente étude a mis en évidence que certains chauffeurs peuvent être exposés à des concentrations élevées de bioaérosols et à des niveaux très variables durant une même journée de travail. Ces résultats indiquent qu'il y a des sources ponctuelles importantes. Parmi les sources possibles, la zone de déchargement a été identifiée comme une potentielle source de bioaérosols. En fait, le camion domestique 16118 déchargeait sa cargaison directement au niveau du lieu d'enfouissement sur une montagne de déchets. À l'inverse, le camion domestique 074, échantillonné la même journée, déchargeait sa cargaison dans des contenants situés dans un environnement contrôlé sur une dalle de béton. En conséquence, des évaluations des environnements de travail dans les décharges devraient aussi être envisagées puisque des travailleurs opèrent directement dans ces lieux.

En définitive, il est important que les travailleurs impliqués dans la collecte des déchets soient protégés lors de l'exécution de certaines tâches. De plus, des mesures administratives devraient être mises en place afin de contrôler le nettoyage des camions pour limiter l'exposition.

5.2 Niveau de contamination et effet du temps sur la prolifération microbienne des filtres à air de l'habitacle des cabines

Les données de la littérature suggèrent que la charge biologique filtrée par le filtre à air pouvait proliférer dans des conditions de forte humidité et par conséquent représenter une source potentielle d'exposition aux bioaérosols (43,65). En effet, les études rapportent que les particules sur les filtres à air pourraient être libérées dans la cabine notamment lors de l'utilisation de l'air climatisé (42,43).

5.2.1 Contamination bactérienne et en endotoxines des filtres à air de l'habitable

Dans cette étude, le filtre du camion 008 présentait une concentration bactérienne très élevée et supérieure à notre limite de quantification. En comparant les deux camions des déchets organiques, la durée d'utilisation du filtre pourrait expliquer les différences de niveau de contamination. Le filtre du camion 008 a été utilisé deux fois plus longtemps que le filtre du camion 159. Cela supposerait donc que le filtre aurait accumulé plus de matières organiques à travers le temps favorisant ainsi une croissance bactérienne plus importante. Néanmoins, des analyses additionnelles devraient être réalisées afin de valider l'hypothèse formulée ci-dessus.

Les concentrations d'endotoxines étaient toutes dans le même ordre de grandeur pour tous les filtres à air de l'habitable. Toutefois, les niveaux de contamination les plus importants ont été observés sur les filtres d'un camion recyclable et d'un camion domestique. Ces résultats ne permettent pas de tirer de conclusions particulières.

5.2.2 Contaminations fongiques

Les concentrations fongiques des filtres à air dans notre étude s'étendaient de 1 100 à 10 000 UFC/cm² soit de 0,1 à 1 UFC/m². Ces résultats sont largement inférieurs à la plage de concentration de 500 à 501 × 10³ UFC/m² observés sur les filtres à air des chariots élévateurs utilisés pour transporter les déchets dans un centre de tri (65). Même si les filtres des chariots ont le même objectif que les filtres d'habitable, plusieurs facteurs justifient les contaminations plus importantes. En fait, Viegas et al. ont rapporté que les chariots étaient situés dans un pavillon fermé et démuné d'air conditionné, d'où un environnement propice à la prolifération microbienne. De plus, ces chariots utilisaient des filtres à charbon qui peuvent piéger plus de contaminants et d'impuretés (63).

Les filtres des camions recyclables semblaient être les moins contaminés avec la méthode de la culture. Cependant, les résultats de moisissures totales obtenus grâce au ddPCR suggèrent que les filtres les plus contaminés provenaient du camion recyclable 015 et du camion domestique 074. Les concentrations obtenues par la culture sont généralement inférieures aux concentrations obtenues par la biologie moléculaire, car la culture ne permet que la croissance des microorganismes cultivables (66). La méthode de quantification et de détection moléculaire par ddPCR procure un avantage important étant donné qu'elle permet de prendre en compte les spores, les fragments et toxines qui peuvent aussi engendrer des effets sur santé.

En ce qui concerne *A. fumigatus*, sa présence a été détectée sur tous nos filtres à air d'habitacle comme l'avait observé Viegas au niveau des filtres des chariots élévateurs (65).

5.2.3 Évaluation microbienne en fonction du temps

L'évaluation de la concentration des contaminants des filtres à air en fonction du temps ne démontre pas une tendance particulière. Néanmoins, Forthomme et al. ont démontré une absence de croissance microbienne après incubation à 7 jours sur des filtres fibreux de verre. Ils ont observé une diminution de la viabilité microbienne sauf après incubation à 48 h avec un niveau d'humidité de 80 % (67). Ceci nous laisse penser que les résultats pourraient être influencés par les conditions de laboratoire qui ne sont pas forcément représentatives de la situation réelle.

La figure 5 de la prolifération microbienne en fonction de la durée d'incubation démontre que lorsque les concentrations sont normalisées en fonction de T0, les courbes des deux camions organiques présentent des niveaux bactériens plus élevés que les autres camions. Cette observation rejoindrait l'hypothèse selon laquelle les filtres des camions organiques apporteraient les nutriments nécessaires permettant une prolifération bactérienne plus importante.

5.3 Relation entre l'exposition microbienne du chauffeur avec les niveaux de contamination de l'air de la cabine, des filtres à air et des sièges du camion.

Étant donné que les chauffeurs peuvent passer la majorité de leur quart de travail dans la cabine du camion, les concentrations du microbiote de l'air de la cabine, des filtres à air de l'habitacle et des sièges-chauffeurs ont été utilisées comme des indicateurs pour évaluer leur exposition professionnelle.

Les résultats des sièges des chauffeurs pour le transport des déchets domestiques ont démontré que le camion 16118 présentait des niveaux de bactéries, d'*E. coli*, d'endotoxines, de moisissures totales et d'*A. fumigatus* plus importants que le camion 074. Le chauffeur du camion 16118 est celui qui se rendait au lieu d'enfouissement pour décharger sa cargaison et qui avait des mesures dans sa zone respiratoire excédant les recommandations. De plus, sa cabine était très contaminée en *A. fumigatus* (voir article). Ces résultats témoignent de la nécessité de réaliser d'autres analyses afin de déterminer si la zone de déchargement pourrait être un des facteurs de contamination de l'air et des surfaces de la cabine.

Puisque les microorganismes peuvent pénétrer dans la cabine des camions, ils pourraient potentiellement s'accumuler sur les surfaces, se retrouver dans l'air et devenir une source ponctuelle d'exposition pour les chauffeurs. Madsen et al. ont démontré que les espèces fongiques retrouvées dans la zone respiratoire des travailleurs et sur leurs vêtements étaient aussi retrouvées dans l'air des cabines des camions qui leur étaient attitrés (44). Dans le même ordre d'idée, cette étude illustre que l'analyse du microbiote de l'air et des sièges chauffeurs sont de bons indicateurs de l'exposition professionnelle des chauffeurs.

Malgré la possibilité de relargage des microorganismes contenu sur les filtres à air de l'habitacle vers la cabine, les résultats des filtres n'ont pas permis de tirer de conclusion quant à leur rôle dans l'exposition des chauffeurs.

5.3.1 Comparaison des deux méthodes : culture et moléculaire (ddPCR)

Les méthodes basées sur la culture permettent de caractériser les communautés microbiennes tout en déterminant si les microorganismes sont vivants ou non, et s'ils sont capables de se développer et de causer des infections. Toutefois, une partie des microorganismes ne peuvent pas être cultivés par les méthodes de laboratoires courantes. Certains pathogènes peuvent entrer dans un état viable, mais non cultivable en laboratoire tout en ayant toujours la capacité de causer des problèmes de santé. De plus, la portion non viable et non cultivable des bioaérosols peut être nocive pour les personnes exposées. Certains problèmes de santé dus à l'exposition aux bioaérosols ne dépendent pas forcément de la viabilité ou du potentiel infectieux des microorganismes (66).

Depuis la mise en place de la technique d'amplification par PCR, la biologie moléculaire s'est implantée rapidement dans les laboratoires de microbiologie (66). Comparée aux techniques de microbiologie classique, la biologie moléculaire présente de nombreux avantages, car le résultat est rapide, sensible et spécifique. Elle permet d'obtenir une vision plus large de la diversité microbienne car elle prend en compte le viable et le non viable (64).

5.4 Recommandations de l'étude

En raison de la complexité de l'exposition microbienne des travailleurs de l'industrie du traitement des matières résiduelles, la coexistence de plusieurs contaminants biologiques doit être prise en compte, car il peut en découler des effets potentiellement additifs ou supra additifs (69). En effet,

les aspects toxico-cinétiques et toxico-dynamiques peuvent être modifiés lorsque deux ou plusieurs contaminants sont présents (70,71).

À cause des conditions de travail telle que la chaleur en été, les mouvements constants des travailleurs, il n'est pas facile de mettre en place des mesures de protection individuelles surtout pour les collecteurs. Notre étude indique toutefois que les niveaux d'exposition peuvent être supérieurs à certaines recommandations sanitaires et met en évidence le fait que les cabines des camions peuvent être contaminées par différents microorganismes. Ainsi, des mesures administratives visant à limiter l'exposition des chauffeurs et des éboueurs devraient être instaurées. Par exemple, sensibiliser les travailleurs afin qu'ils évitent d'être à proximité du camion lorsqu'il y a compression des déchets, mais aussi pour qu'ils adoptent des mesures d'hygiène personnelles (lavage des mains, utilisation des gels antibactériens avant de toucher des bouteilles d'eau ou de prendre une collation). Quant à la cabine du camion, un nettoyage régulier devrait être pratiqué et des housses facilement nettoiyables devraient être utilisées sur les sièges des chauffeurs au lieu des sièges en tissus identifiés dans les camions. Une autre alternative serait des moyens d'ingénierie mécanique sur les camions au niveau des bennes afin de capter les bioaérosols et amener de l'air frais dans la zone respiratoire des travailleurs. Parallèlement, il serait toutefois envisageable de limiter les expositions des travailleurs avec le port de masques filtrants lors de l'exécution de certaines tâches spécifiques pouvant générer des bioaérosols tels que le débarquement de la cargaison dans les décharges, ou le nettoyage des camions aux jets d'eau qui a été identifié comme source d'exposition des travailleurs à des mycotoxines comme l'aflatoxine B1 et la stérigmatocystine (72).

VI. Conclusion

Ce projet a permis d'obtenir un portrait global de l'exposition aux bioaérosols des chauffeurs de camion et des éboueurs attitrés au transport des matières résiduelles et des déchets. Les collecteurs étant directement en contact avec les matières résiduelles domestiques, sont notamment les plus exposés aux bioaérosols avec des concentrations pouvant dépasser les recommandations sanitaires. Les chauffeurs de camion peuvent être exposés en aidant les collecteurs et par l'entremise des camions contaminés. L'exposition des chauffeurs pourrait particulièrement être augmentée par des facteurs tels que l'environnement et l'organisation du travail sur les lieux de décharge. Néanmoins d'autres données devraient être produites afin de caractériser l'exposition des travailleurs présents dans ces milieux. Parallèlement cette étude a démontré que l'analyse du microbiote de l'air de la cabine et des microorganismes présents sur les sièges des chauffeurs sont de bons indicateurs de l'exposition des travailleurs contrairement à l'analyse des filtres à air de la cabine.

En définitive, les résultats de cette étude suggèrent que l'exposition des travailleurs aux bioaérosols dépend de plusieurs facteurs, dont le type de déchets, le poste de travail et les tâches exécutées. En fonction de ces facteurs, les niveaux d'exposition peuvent varier dans une même journée de travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Matières résiduelles. Consulté en avril 2019 et disponible à: <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/inter.htm>
2. Ministère de la santé et des services sociaux. 2017. Guide de gestion des déchets du réseau de la santé et des services sociaux. Consulté en Mars 2019. Disponible à: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2772194>
3. Cheneval E., Busque M-A., Ostiguy C., Lavoie J., Bourbonnais R., Labrèche F., et al. 2015. Les emplois verts au Québec: définition et appréciation de leurs risques chimiques ou biologiques potentiels pour la santé des travailleurs. Consulté en Mars 2019. Disponible à: <http://www.deslibris.ca/ID/247118>
4. Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Consulté en Avril 2019. Disponible à: <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/index.htm>
5. Malmros P., Sigsgaard T., Bach B. 1992. Occupational health problems due to garbage sorting. *Waste Management and Research*. 10 (3): 227-34
6. Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Saine gestion des matières résiduelles. Consulté en Avril 2019 et disponible à: <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/gestion.htm>
7. Velasco G. M., Bittner C., Harth V., Preisser A.M. 2015. Health status and health-related quality of life of municipal waste collection workers – a cross-sectional survey. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 10 (1): 22.
8. Ville de Montréal. Traitement des matières organiques. Consulté en Juin 2019 et disponible à: http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,130343595&_dad=portal&_schema=PORTAL
9. Cerda A., Artola A., Font X, Barrena R., Gea T., Sánchez A. 2018. Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*. 248: 57-67.
10. Recyc-Québec. Matières organiques. 2018. Consulté en Mars 2019 et disponible à: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-matieres-organiques.pdf>
11. Haug R. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. 1993. Routledge; 2018. 655 p.
12. The composting association and health and Safety Laboratory. 2003. Occupational and environmental exposure to bioaerosols from composts and potential health effects: a critical review of published. Research report 130. Consulté en Avril 2019 et disponible à: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr130.pdf>

13. Institut National de Recherche et de Sécurité. 2010. Approche des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. Rapport No.: ND236-221-10. Consulté en Avril 2019 et disponible à: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202336>
14. Recyc-Québec. La digestion anaérobie. Fiche technique. Consulté en Avril 2019 et disponible à: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-technique-digestion-anaerobie.pdf>
15. Recyc-Québec. Le réemploi des matières résiduels. 2010. Fiche informative. Consulté en Juin 2019 et disponible à: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-reemploi.pdf>
16. Ville de Montréal. Recyclage. Consulté en Mars 2019 et disponible à: http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,75369725&_dad=portal&_schema=P-ORTAL
17. Ville de Montréal. Mieux recycler chez soi. Consulté en Juin 2019 et disponible à: http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/V-MTL-DEPLRECYGENEJUI13-WEBV3.PDF
18. Poulsen O.M., Breum N.O., Ebbenhøj N, Hansen A.M., Ivens U.I., van Lelieveld D., et al. Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. 1995. *Science of the Total Environment*. 168 (1): 33-56.
19. Association Paritaire pour la Santé et la Sécurité du Travail, secteur « affaires municipales ». Guide de l'éboueur. 2006. Consulté en Juin 2019 et disponible à: <https://www.apsam.com/sites/default/files/docs/publications/eboueur-guide.pdf>
20. Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du travail. Évaluation des bioaérosols et des composés gazeux émis lors des compostages de résidus agroalimentaires et résidentiels. 2017. Rapport No.: R-960. Consulté en Mars 2019 et disponible à: <http://www.deslibris.ca/ID/10089603>
21. Sykes P., Morris R.H.K., Allen J.A., Wildsmith J.D., Jones K.P. 2011. Workers' exposure to dust, endotoxin and β -(1-3) glucan at four large-scale composting facilities. *Waste Management*. 31 (3): 423-30.
22. Schlosser O., Huyard A., Cartnick K., Yañez A., Catalán V., Quang Z.D. Bioaerosol in composting facilities: occupational health risk assessment. 2009. *Water Environment Research*. 81 (9): 866-77.
23. Wéry N. Bioaerosols from composting facilities—a review. *Frontiers Cellular Infection Microbiology*. 2014 (4): 42.
24. Lavoie J., Dunkerley C.J., Kosatsky T., Dufresne A. 2006. Exposure to aerosolized bacteria and fungi among collectors of commercial, mixed residential, recyclable and compostable waste. *Science of the Total Environment*. 370 (1): 23-8.

25. Ncube F., Ncube E.J., Voyi K. 2017. Bioaerosols, noise, and ultraviolet radiation exposures for municipal solid waste handlers. *Journal of Environmental and Public Health*. ID: 3081638.
26. Sattar S.A., Wright K.E., Zargar B., Rubino J.R., Ijaz M.K. 2016. Airborne infectious agents and other pollutants in automobiles for domestic use: potential health impacts and approaches to risk mitigation. *Journal of Environmental and Public Health*. ID:1548326
27. Lavoie J., Marchand G. Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostages des déchets domestiques. 1995. IRSST. Rapport No.: R-159. Consulté en Mars 2019 et disponible à: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-159.pdf?v=2019-03-13>
28. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie. Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage. 2012. Consulté en Mars 2019 et disponible à: https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20120701_programme-de-recherche-de-l-ademe-sur-les-emissions-atmospheriques-du-compostage_ademe.pdf
29. Goyer N. Les bioaérosols en milieu de travail guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. 2005. IRSST. Consulté en Mars 2019 et disponible à: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2048945>
30. Eduard W. 2009. Fungal spores: a critical review of the toxicological and epidemiological evidence as a basis for occupational exposure limit setting. *Critical Review in Toxicology*. 39 (10): 799-864.
31. Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. 2003. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *The Annal of Occupational Hygiene*. 47 (3): 187-200.
32. Wouters I., Hilhorst S., Kleppe P., Doekes G., Douwes J., Peretz C., et al. 2002. Upper airway inflammation and respiratory symptoms in domestic waste collectors. *Occupational Environmental Medicine*. 59 (2): 106-12.
33. Schantora A.L., Casjens S., Deckert A., van Kampen V., Neumann H.D., Brüning T., et al. 2015. Prevalence of work-related rhino-conjunctivitis and respiratory symptoms among domestic waste collectors. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 834: 53-61.
34. Heldal K.K., Halstensen A.S., Thorn J., Eduard W., Halstensen T.S. 2003. Airway inflammation in waste handlers exposed to bioaerosols assessed by induced sputum. *European Respiratory Journal*. 21 (4): 641-5.
35. Caisse Nationale d'Assurance Suisse en Cas d'Accidents. Elimination de moisissures au sein de bâtiments – Vos collaborateurs disposent-ils d'une protection efficace? 2009. Consulté en Juillet 2019 et disponible à: [/materiel/documentation/elimination de moisissures au sein de batiments vos collaborateurs disposent ils d une protection efficace](#)

36. Poole C.J.M., Wong M. 2013. Allergic bronchopulmonary aspergillosis in garden waste (compost) collectors--occupational implications. *Occupational Medicine*. 63 (7):517-9.
37. Pearson C., Littlewood E., Douglas P., Robertson S., Gant T.W., Hansell A.L. 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*. 18 (1): 43-69.
38. Wouters I.M., Spaan S., Douwes J., Doekes G., Heederik D. 2006. Overview of personal occupational exposure levels to inhalable dust, endotoxin, beta (1-->3)-glucan and fungal extracellular polysaccharides in the waste management chain. *Annal of Occupational Hygiene*. 50 (1): 39-53.
39. Park D., Ryu S., Kim S., Yoon C. 2011. An assessment of dust, endotoxin, and microorganism exposure during waste collection and sorting. *Journal of Air and Waste Management Association*. 61 (4): 461-8.
40. Health Council of the Netherlands. 2010. Endotoxins - Health-based recommended occupational exposure limit. Advisory report. Consulté en Mai 2019 et disponible à: <https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2010/07/15/endotoxins-health-based-recommended-occupational-exposure-limit>
41. Li J., Li M., Shen F., Zou Z., Yao M., Wu C. 2013. Characterization of biological aerosol exposure risks from automobile air conditioning system. *Environmental Science et Technology*. 47 (18): 10660-6.
42. Lee J-H., Jo W-K. Exposure to airborne fungi and bacteria while commuting in passenger cars and public buses. 2005. *Atmospheric Environment*. 39: 7342-50.
43. Jo W-K, Lee J-H. 2008. Airborne fungal and bacterial levels associated with the use of automobile air conditioners or heaters, room air conditioners, and humidifiers. *Archives of Environmental and Occupational Health*. 63 (3): 101-7.
44. Madsen A.M., Alwan T., Ørberg A., Uhrbrand K., Jørgensen M.B. Waste Workers' Exposure to Airborne Fungal and Bacterial Species in the Truck Cab and During Waste Collection. 2016. *Annal of Occupational Hygiene*. 60 (6): 651-68.
45. Schlosser O., Huyard A., Rybacki D., Do Quang Z. 2012. Protection of the vehicle cab environment against bacteria, fungi and endotoxins in composting facilities. *Waste Management*. 32 (6): 1106-15.
46. Ivens U.I., Breum N.O., Ebbenhøj N., Nielsen B.H., Poulsen O.M., Würtz H. 1999. Exposure-response relationship between gastrointestinal problems among waste collectors and bioaerosol exposure. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*. 25 (3): 238-45.

47. Bonifait L., Marchand G., Veillette M., M'Bareche H., Dubuis M-E., Pépin C., et al. 2017. Workers' exposure to bioaerosols from three different types of composting facilities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 14 (10): 815-22.
48. Persoons R., Parat S., Stoklov M., Perdrix A., Maitre A. 2010. Critical working tasks and determinants of exposure to bioaerosols and MVOC at composting facilities. *International Journal of Hygiene Environmental Health*. 213 (5): 338-47.
49. Viegas S., Veiga L., Figueiredo P., Almeida A., Carolino E., Viegas C. Assessment of workers' exposure to aflatoxin B1 in a Portuguese waste industry. 2015. *Annals of Occupational Hygiene*. 59 (2): 173-81.
50. Duquenne P., Simon X., Koehler V., Goncalves-Machado S., Greff G., Nicot T., et al. 2012. Documentation of bioaerosol concentrations in an indoor composting facility in France. *Journal of Environmental Monitoring*. 14 (2): 409-19.
51. Lavoie J., Cloutier Y., Lara J., Marchand G. Guide sur la protection respiratoire contre les bioaérosols - Recommandations sur le choix et l'utilisation. 2007. IRSST. Rapport No. : RG-497. Consulté en Aout 2019 et disponible à : <https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/100283/n/guide-sur-la-protection-respiratoire-contre-les-bioaerosols-recommandations-sur-le-choix-et-l-utilisation-rg-497>
52. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1999. Bioaerosols: assessment and control.
53. Roca-Barcelo A., Douglas P., Fecht D., Sterrantino A.F., Williams B., Blangiardo M., et al. Risk of respiratory hospital admission associated with modelled concentrations of *Aspergillus fumigatus* from composting facilities in England. 2020. *Environmental Research*. ID: 108949.
54. Gutarowska B., Skóra J., Stępień Ł., Szponar B., Otlewska A., Pielech-Przybylska K. 2015. Assessment of microbial contamination within working environments of different types of composting plants. *Journal of Air Waste Management Association*. 65 (4): 466-78.
55. Kozajda A., Jeżak K., Cyprowski M., Szadkowska-Stańczyk I. 2017. Inhalable dust, endotoxins and (1-3)- β -d-glucans as indicators of exposure in waste sorting plant environment. *Aerobiologia*. 33 (4): 481-91.
56. Institut National de Recherche et de Sécurité. Prélèvement des aérosols par le dispositif CIP 10. Consulté en Août 2019 et disponible à : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8fIN3mwobRcJ:www.inrs.fr/dms/i/nrs/PDF/metropol-prelevement-cip10/metropol-prelevement-cip10.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=ca&client=safari>
57. Research International. SASS 3100 Dry Air Sampler. Consulté en Mars 2020 et disponible à : https://www.resrchintl.com/SASS_3100_air_sampler.html

58. Lavoie J., Marchand G., Cloutier Y., Lavoué J. 2011. Validation of the criteria for initiating the cleaning of heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) ductwork under real conditions. *Journal of Occupational Environmental Hygiene*. 8 (8): 467-72.
59. Lavoie J., Bahloul A., Cloutier Y. 2010. Cleaning Initiation Criteria for Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems in Non-Industrial Buildings. IRSST. Rapport No.: R-525. Consulté en Septembre 2019 et disponible à: <https://www.irsst.qc.ca/en/publications-tools/publication/i/100324/n/criteria-for-initiating-the-cleaning-of-heating-ventilation-and-air-conditioning-systems-of-non-industrial-buildings-r-525>
60. Marchand G. Endotoxin analysis. 2009. IRSST. Consulté en Décembre 2019 et disponible à: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/M-332-en.pdf?v=2019-10-24>
61. Hindson B.J., Ness K.D., Masquelier D.A., Belgrader P., Heredia N.J., Makarewicz A.J., et al. 2011. High-throughput droplet digital PCR system for absolute quantitation of DNA copy number. *Analytical Chemistry*. 83 (22): 8604-10.
62. Wang W-J., Zheng C-F., Liu Z., Tan Y-H., Chen X-H., Zhao B-L., et al. 2018. Droplet digital PCR for BCR/ABL(P210) detection of chronic myeloid leukemia: A high sensitive method of the minimal residual disease and disease progression. *European Journal of Hematology*. 101 (3): 291-6.
63. Droplet Digital™ PCR (ddPCR™) Technology. Consulté le 2019 et disponible à: <https://www.bio-rad.com/en-al/applications-technologies/droplet-digital-pcr-ddpcr-technology?ID=MDV31M4VY#1>
64. Russell C., Mitchell J., Godish T. 1999. Apparent viability of airborne mould spores/particles determined from culturable/viable and total mould spore sampling methods. *Proceeding from Air Indoor*. p 934–938.
65. Viegas C., Faria T., de Oliveira A.C., Caetano L.A., Carolino E., Quintal-Gomes A., et al. 2017. A new approach to assess occupational exposure to airborne fungal contamination and mycotoxins of forklift drivers in waste sorting facilities. *Mycotoxin Research*. 33 (4): 285-95.
66. Cox J., Mbareche H., Lindsley W.G., Duchaine C. Field sampling of indoor bioaerosols.2019. *Aerosol Sciences Technoly*. DOI: 10.1080/02786826.2019.1688759.
67. Forthomme A., Joubert A., Andrès Y., Simon X., Duquenne P., Bemer D., et al. 2014. Microbial aerosol filtration: Growth and release of a bacteria–fungi consortium collected by fibrous filters in different operating conditions. *Journal of Aerosol Science*. 72: 32-46.
68. Lamoril J., Ameziane N., Deybach J-C., Bouizegarène P., Bogard M. 2008. Les techniques de séquençage de l'ADN: une révolution en marche. Première partie. *Immuno-Analyse & Biologie Spécialisée*. 23 (5): 260-79.
69. Alassane-Kpembi I., Kolf-Clauw M., Gauthier T., Abrami R., Abiola F.A., Oswald I.P., et al. 2013. New insights into mycotoxin mixtures: the toxicity of low doses of Type B

- trichothecenes on intestinal epithelial cells is synergistic. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 272 (1): 191-8.
70. Klarić M.Š., Rašić D., Peraica M. 2013. Deleterious Effects of Mycotoxin Combinations Involving Ochratoxin A. *Toxins*. 5 (11): 1965-87.
71. Viegas C., Faria T., Monteiro A., Carolino E., Quintal Gomes A., Viegas S. 2016. Environmental mycology in public health: fungi and mycotoxins risk assessment and management. Elsevier. Consulté en ligne en Janvier et disponible à: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20120036083>
72. Schlosser O., Robert S., Noyon N. Airborne mycotoxins in waste recycling and recovery facilities: Occupational exposure and health risk assessment. 2020. *Waste Management*. 105: 395-404.

APPENDICE

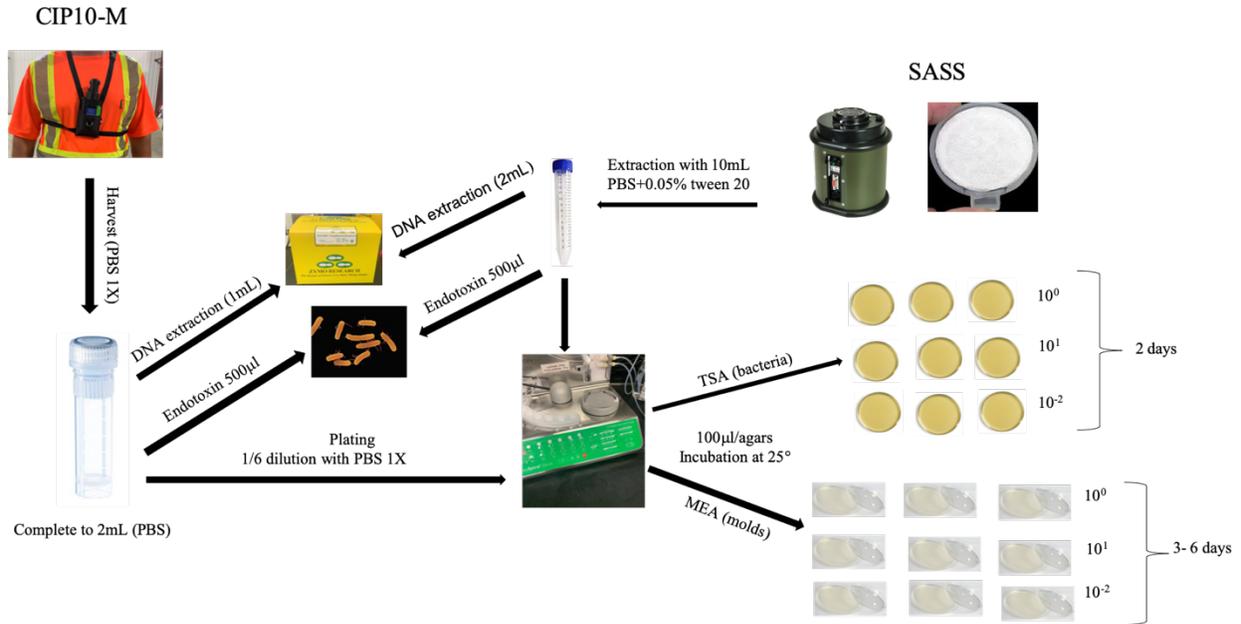


Figure 1A : Analyse des échantillons CIP10-M et SASS

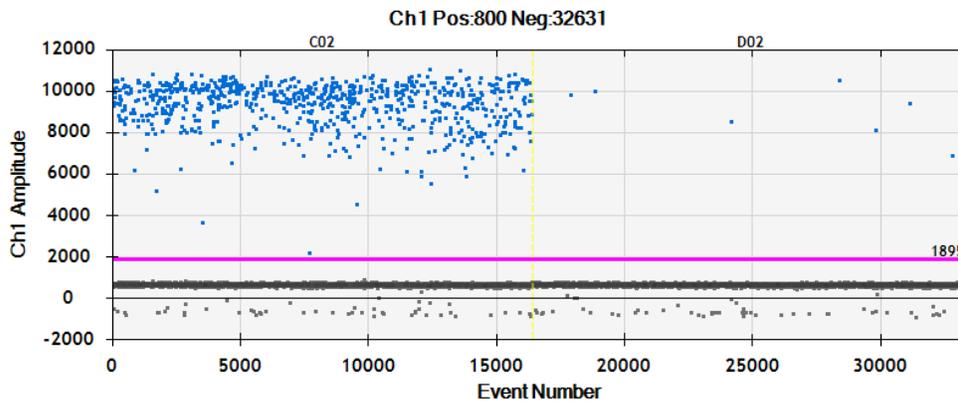


Figure 1B : Analyse des résultats du ddPCR. Les billes bleues correspondent aux billes positives, tandis que les billes grises correspondent aux billes négatives. Le trait horizontal rose correspond au seuil séparant les billes positives et négatives. Le trait vertical jaune sépare deux échantillons