irsst

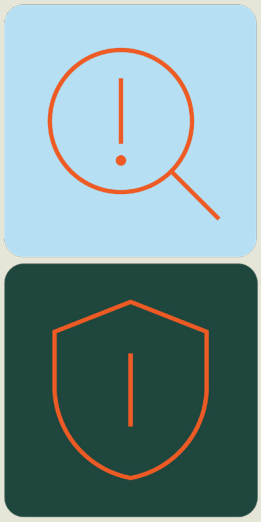
Fédérateur de connaissances
pour éclairer l'action en santé
et en sécurité du travail

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Évaluation de l'exposition aux microorganismes et appréciation du risque sanitaire des chauffeurs de camion et des éboueurs attitrés au transport des matières résiduelles et des dechets

Genevieve Marchand[1,2], Loïc Wingert[1,2], Maximilien Debia[2], Carla Viegas[3,4,5], Susana Viegas[3,4,5], Liliana Caetano [4,6], Magdalena Twarużek[7], Nancy Lacombe[1], François Gouin[1], Delphine Lanoie[1], Isabelle Valois[2], Robert Kosicki[7], Marta Dias[3,4], Ewelina Soszczyńska[7], Julien Trépanier[1], Tam Nguyen[1], Fabiola Salambanga[2], Noémie Gervais[2]

RS-1231-fr



[1] Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) [2] Département de santé environnementale et santé au travail de l'Université de Montréal, École de santé publique de l'Université de Montréal, [3] H&TRC, ESTeSL, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal), [4] Comprehensive Health Research Center, Portugal, [5] NOVA, Public Health Research Centre, University of Lisbon, Portugal, [6] Research Institute for Medicines, University of Lisbon, Portugal, [7] Department of Physiology and Toxicology, Kazimierz Wielki University, Poland

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Pour en savoir plus

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

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-351-3

https://doi.org/10.70010/XTME8617

Divulgation de l'utilisation de l'intelligence artificielle générative (IAG)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2026

Ce document est sous une licence Creative Commons. Attribution - Utilisation non commerciale - Pas d'œuvre dérivée 4.0 International. Cette licence autorise l'utilisation et le partage du document, à condition que l'IRSST soit cité en tant que source, que le contenu est diffusé sans modification et qu'il est utilisé à des fins non commerciales. Si vous souhaitez modifier son contenu ou l'utiliser à des fins commerciales, veuillez contacter : publications@irsst.qc.ca

IRSST — Service des communications et des relations publiques
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Note au lectorat

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des autrices et auteurs. Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information. Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle. Cette publication est disponible en version PDF sur le dépôt institutionnel de l'IRSST (PhareSST).

Cadre de référence pour la recherche en SST

Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique

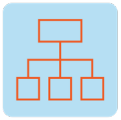
Réadaptation, retour et maintien au travail

Surveillance et prospection des données en SST

Identification des dangers, estimation et évaluation des risques

Élimination des dangers et maîtrise des risques

Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail

Santé mentale et psychologique

Population, société et SST

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les entreprises de gestion des déchets qui ont participé à cette étude. Nous sommes particulièrement reconnaissants envers les travailleurs qui ont accepté de s'impliquer concrètement aux campagnes de prélèvements, malgré les inconforts que nos équipements pouvaient apporter à leur travail déjà des plus exigeant. Merci de votre patience, vous avez tous été des plus compréhensifs, collaboratifs et accueillants dans votre milieu de travail.

Les auteurs tiennent à souligner le soutien financier obtenu par l'Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail (concours #2018-0016). Les auteurs du Portugal sont reconnaissant du soutien national de la FCT/MCTES « Fondation of science and technology/Ministry of Science, Technology and Higher Education » (UIDB/05608/2020 et UIDP/05608/2020). Les auteurs remercient également le Département de santé environnementale et de la santé au travail, de l'École de santé publique de l'Université de Montréal pour la bourse reçue par Fabiola Salambanga, étudiante à la maitrise.

SOMMAIRE

La gestion des déchets au Québec repose sur la collecte sélective pour revaloriser les matières résiduelles et réduire l'enfouissement. Les travailleurs du secteur sont exposés aux bioaérosols contenant microorganismes et allergènes. Les risques sanitaires sont influencés par la nature des matières manipulées et les méthodes de travail employées. La manutention des déchets a déjà été mise en lien avec des inflammations respiratoires, des troubles digestifs, et des syndromes liés aux poussières organiques toxiques. L'objectif du projet visait à évaluer l'exposition des travailleurs aux microorganismes et d'en apprécier les risques pour la santé.

Dans le cadre de ce projet, 28 camions ont été étudiés : 12 pour les déchets ultimes, 10 les matières recyclables et 6 les résidus organiques. Des prélèvements d'air ont été effectués au niveau des voies respiratoires des travailleurs lors d'une journée type, ainsi que dans l'habitacle. Les filtres ont été collectés et le nombre de jours d'utilisation documenté. L'analyse a combiné culture microbiologique, biologie moléculaire, tests de cytotoxicité, évaluation de la résistance aux antimicrobiens et mesures de performance des filtres. Des essais en laboratoire ont également examiné l'effet de l'usure et du colmatage des filtres sur la circulation d'air, la réémission microbienne et la prolifération.

Ce projet a démontré que

- Les travailleurs affectés à la collecte des déchets sont exposés à des concentrations de bactéries et d'endotoxines pouvant dépasser les recommandations.
- Les éboueurs présentent les expositions les plus élevées en microorganismes cultivables.
- Des mycètes du groupe *Aspergillus* (section *Fumigati*), potentiellement pathogènes, ont été détectés dans la zone respiratoire lors de la décharge au site d'enfouissement.
- Les tests de cytotoxicité ont révélé un potentiel toxique des bioaérosols sur les cellules pulmonaires et hépatiques.
- Dans les filtres de cabine, plusieurs microorganismes présentant des risques sanitaires (*Aspergillus*, *E. coli*, *Enterobacter spp.*, *Legionella spp.*) ont été identifiés, avec des concentrations plus élevées dans les camions de matières organiques.
- L'efficacité de filtration mesurée variait largement (1,3 à 42 % pour la taille de particule la plus pénétrante).
- Aucun filtre n'offrait une efficacité élevée, et certains modèles présentaient une faible rétention microbienne associée à une filtration peu performante.

Pour réduire l'exposition il est recommandé d'améliorer les méthodes de travail des éboueurs, notamment pour limiter le contact avec les matières organiques, d'installer des filtres d'habitacle plus performants et de renforcer les programmes d'entretien des cabines (remplacement des filtres, nettoyage des surfaces). Le présent rapport comprend le résumé de trois articles scientifiques qui abordent les résultats obtenus de cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION **1**

1.1 Effets sur la santé 2

1.2 Évaluation 2.0 de l'exposition aux agents microbiens 2

1.2.1 Prélèvements 2

1.2.2 Analyses 3

1.3 Arrimage entre les articles et les objectifs 5

2. RÉSUMÉS DES ARTICLES **7**

2.1 Résumé de l'article 1: Salambanga FRD, Wingert L, Valois I, Lacombe N, Gouin F, Trépanier J, Debia M, Soszczyńska E, Twarużek M, Kosicki R, Dias M, Viegas S, Caetano L, Viegas C, Marchand G. Microbial contamination and metabolite exposure assessment during waste and recyclable material collection. Environ Res. 2022 Sep;212(Pt D):113597. doi: 10.1016/j.envres.2022.113597. 7

2.2 Résumé de l'article 2: Marchand G, Wingert L, Viegas C, Caetano L, Viegas S, Twaruzek M, Lacombe N, Lanoie D, Valois I, Gouin F, Soszczyńska E, Kosicki R, Dias M, Debia M. Assessment of waste workers occupational risk to microbial agents and cytotoxic effects of mixed contaminants present in the air of waste truck cabin and ventilation filters. J Air Waste Manag Assoc. 2024 Mar;74(3):145-162. doi: 10.1080/10962247.2023.2299424 9

2.3 Résumé de l'article 3: Wingert L, Gervais N, Debia M, Marchand G. Performance of cabin air filters used in waste collection trucks. J Air Waste Manag Assoc. 2026 Jan 22:1-14. doi: 10.1080/10962247.2025.2596024. Epub. 11

3. DISCUSSION **13**

3.1 Caractérisation des risques biologiques 13

3.2 Approche méthodologique innovante 13

3.3 Filtration 14

4. Conclusion **15**

5. Recommandations pour la protection des travailleurs **15**

BIBLIOGRAPHIE **18**

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
CVCA	Chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air
ddPCR	Digital droplet polymerase chain reaction. Réaction de la polymérase en chaine intragouttelettes
ESTeSL	Escola Superior de Tecnologia da Saúde
H&TRC	Health and Technology Research Center
IRSST	Institut de Recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail
MDR	Matières domestiques résiduelles
NOVA	National School of Public Health
MEA	Gélose à l'extrait de malt
MPPS	Dimension des particules les plus pénétrantes
ODTS	Organic dust toxic syndrome

INTRODUCTION

La gestion saine des déchets relève de la responsabilité sociétale. La collecte sélective ou à trois voies permet de séparer et de récupérer les matières domestiques résiduelles (MDR) afin de les revaloriser. Les activités de triage, de recyclage et de compostage des matières résiduelles augmentent dans plusieurs municipalités puisqu'elles permettent de réduire les impacts environnementaux causés par l'enfouissement des déchets. En favorisant le compostage et la biométhanisation des résidus organiques, ainsi que le recyclage des plastiques, du verre, papier, aluminium, etc., seuls les résidus ultimes devraient subsister dans les bacs à ordures ménagères destinés à l'enfouissement.
En Europe, le traitement total des déchets est passé de 45,9 % en 2004 à près de 60 % entre 2004 et 2020 (Eurostat, 2023). Au Québec, depuis 2018, le recyclage a augmenté de 3 % et la quantité de déchets ménagers envoyés à l'enfouissement a diminué de 5 % (Recyc-Québec, 2023). Selon les dernières données, les secteurs municipaux recyclent maintenant 48 % de leurs déchets organiques (déchets verts, bacs bruns et les boues municipales) (Recyc-Québec, 2023). Ces transformations changent inévitablement les activités des travailleurs du milieu de la gestion des déchets. Une meilleure compréhension des risques microbiens auxquels ils sont exposés paraissait nécessaire à la prévention de leur santé et sécurité.

La manutention des MDR produit forcément des bioaérosols. Ils sont constitués d'un mélange de microorganismes, cultivables ou non (bactéries, moisissures, virus, protozoaires), de leurs métabolites et composantes (endotoxines [1-3] — β-glucanes, mycotoxines, peptidoglycans, enzymes, etc.) ainsi que de particules solides d'origines végétales ou animales (allergènes, y compris les pollens, les fibres végétales, cellules épithéliales, etc.) (Oppliger, 2014). Lorsqu'elles sont aéroportées, l'inhalation des particules par les travailleurs attitrés à la collecte des matières résiduelles devient inévitable. Madsen *et al*. (2021) ont confirmé, dans leur revue de la littérature, que les travailleurs impliqués dans l'industrie de la gestion des matières résiduelles sont exposés à des concentrations élevées d'agents biologiques. Plusieurs études réalisées dans des centres de tri des matières recyclables et de traitement des déchets organiques ont abordé cette problématique (Bonifait *et al.*, 2017 ; Dubuis *et al.*, 2017 ; Hei Wikuats *et al.*, 2022 ; Krajewski *et al.*, 2002 ; Madsen *et al.*, 2019 ; Malmros *et al.*, 1992 ; Marchand *et al.*, 1995 ; Park *et al.*, 2011 ; Poulsen *et al*., 1995 ; Szulc *et al*., 2022 ; Viegas *et al*., 2022).
Des mesures de l'exposition des conducteurs et des éboueurs durant la collecte des MDR ont également été réalisées (Krajewski *et al.*, 2002 ; *Lavoie et al.*, 2006 ; Madsen *et al.*, 2016; Madsen *et al.,* 2020 ; Neumann *et al.*, 2002 ; Nielsen *et al.*, 1995 ; Park*et al.*, 2011).
Les expositions aux microorganismes en milieu de travail sont reconnues comme étant liées aux matières et matériaux manipulés ainsi qu'aux tâches ou méthodes de travail (transport, brassage, transbordement, etc.) (Bonifait *et al*., 2017 ; Marchand *et al*., 2017 ; Wouters *et al*., 2006). Les travailleurs de la collecte des déchets peuvent aussi être exposés à des agents biologiques lorsqu'à qu'ils restent à l'intérieur du camion.
Cette exposition se produit par la remise en suspension de particules déposées sur les

surfaces (tapis, siège) ou par la réémission d'agents microbiens relargués par le système de ventilation (conduits et filtre) (Aquino *et al*., 2018 ; Gołofit-Szymczak *et al*., 2019 ; Simmons *et al*., 1997). Dans l'ensemble, les études précitées paraissent anciennes et non représentatives des expositions actuelles dans la filière des déchets qui évolue très rapidement. Ces évolutions de la collecte sélective, implantée dans l'objectif d'améliorer les capacités de valorisation des matières résiduelles et de réduire leurs impacts sur l'environnement, créent donc de nouvelles conditions de travail encore peu documentées.

1.1 Effets sur la santé

De nombreux problèmes de santé (respiratoires ou gastroentériques) développés en milieu de travail peuvent être causés par des bioaérosols. Les bioaérosols ont été associés à des problèmes d'asthme, d'irritation des voies respiratoires, d'aspergillose broncho-pulmonaire allergique, de maladies infectieuses gastro-intestinales et cutanées, ainsi qu'au cancer (Donham *et al.*, 1995; Donham *et al.,* 1985; Giusti, 2009 ; Liebers *et al.*, 2008 ; Mériaux *et al.*, 2006 ; Srikanth *et al.*, 2008). Certaines études ont permis de mettre en relation des problèmes au niveau des voies respiratoires (toux, irritation du nez) et du système digestif chez les travailleurs du milieu de la gestion des déchets (Heldal et Eduard, 2004; Heldal *et al.*, 2003 ; Ivens *et al.*, 1999 ; Wouters *et al.*, 2002).
La manutention des MDR a été associée spécifiquement à une inflammation des voies respiratoires, à la diminution des fonctions pulmonaires, à des problèmes gastro-intestinaux, ainsi qu'au syndrome des poussières organiques toxiques (ODTS) (Athanasiou *et al.*, 2010 ; Kuijer *et al.*, 2010 ; Nielsen, G. D. *et al.*, 2012 ; Poulsen *et al.*, 1995 ; Sigsgaard *et al.*, 1994 ; Thorn *et al.*, 1998). Une aspergillose broncho-pulmonaire allergique a également été signalée chez deux collecteurs de matière organique, où *Aspergillus fumigatus* a été identifié dans le mucus des travailleurs (Poole et Wong, 2013).

1.2 Évaluation 2.0 de l'exposition aux agents microbiens

1.2.1 Prélèvements

L'évaluation des expositions occupationnelles aux agents biologiques demeure complexe. L'emploi d'une approche qui combine des méthodes de prélèvement passif sur des supports ou surfaces (poussières déposées et filtre CVCA) et actif (air aspiré) présente des avantages puisqu'elle produit un portrait étendu (Marchand *et al.*, 2022 ; Viegas, 2018). Les études réalisant l'analyse d'une seule matrice à l'aide d'une seule méthode d'analyse ont tendance à limiter considérablement les capacités de documenter les risques biologiques pour les travailleurs. Combiner le prélèvement de différentes matrices (air, poussière, matériaux) ainsi que l'utilisation de méthodes d'analyses diverses (culture, mycotoxine, cytotoxicité, etc.) permet donc d'enrichir les informations recueillies ce qui

favorise une caractérisation plus complète et possiblement plus représentative de l'exposition des travailleurs (Lindsley *et al.*, 2017 ; Reponen, 2017).

1.2.1.1 Prélèvement actif

Les prélèvements actifs s'accomplissent à l'aide d'un train d'échantillonnage muni d'un système d'aspiration de l'air. Ce type de prélèvement permet de déterminer les concentrations de particules aéroportées porteuses d'agents microbiens dans la zone respiratoire des travailleurs ou dans l'air ambiant du milieu de travail. Toutefois, la très grande variation spatio-temporelle des bioaérosols en milieu de travail représente un défi de taille dans la réalisation des prélèvements actifs. Des expositions à de fortes concentrations, qui se produiraient sporadiquement, pourraient être sous-estimées par ce type de prélèvement (Marchand, 2021). L'effort d'échantillonnage qui devrait être déployé afin de limiter ces incertitudes nécessiterait alors d'énormes ressources.

1.2.1.2 Prélèvement passif

Les prélèvements passifs possèdent l'avantage d'être très simples et de représenter une accumulation de particules microbiennes sur une longue période. Comme les informations sur les volumes d'air ne sont pas disponibles pour ces méthodes, il n'est pas possible de déterminer les concentrations d'agents microbiens aéroportés et donc de connaitre l'exposition par inhalation des travailleurs (Marchand, 2021). Ce type de prélèvement se limite aux particules qui se déposeront passivement sur la surface ou sur un support ce qui réduit l'analyse aux seuls agents microbiens qui ont atteint de façon autonome la zone de prélèvement. Les prélèvements sur les filtres des systèmes de ventilation et de climatisation qui collectent des particules de l'air peuvent être utilisés afin de documenter les aérosols sur une période de quelques semaines ou mois. Cette approche pourrait permettre de récupérer des agents microbiens présents sporadiquement et qui pourraient être manqués par un prélèvement actif.

1.2.2 Analyses

Dans le cadre de ce projet, 28 camions ont été suivis : 12 pour les déchets ultimes, 10 pour les matières recyclables et 6 pour les résidus organiques. Des prélèvements d'air ont été réalisés dans la zone respiratoire des travailleurs à l'aide de capteurs individuels CIP-10 (CDL Tecora, France) et dans l'air ambiant des cabines avec les échantillonneurs à haut débit SASS 3100 ((Research International Instrument Inc., États-Unis). Les filtres d'habitacle ont été collectés, et leur durée d'utilisation documentée. Des essais en laboratoire ont examiné l'effet de l'usure et du colmatage des filtres d'habitacle sur la circulation d'air. Des tests permettant d'évaluer la réémission et la prolifération microbienne ont aussi été effectués.

La diversité des analyses permettant l'évaluation des agents microbiens dans les milieux de travail a augmenté au cours des années. Au départ c'était exclusivement la méthode par culture et le dosage des endotoxines et plus récemment l'analyse des mycotoxines, la détection de l'ADN et la détermination des effets cytotoxiques de l'air sur des cellules humaines se sont ajoutées (Eduard *et al.*, 2012 ; Viegas *et al.*, 2018). Dans le cadre de ce projet l'analyse a combiné l'ensemble de ces méthodes. Les méthodes de cytotoxicité et de détection par biologies moléculaires seront succinctement abordées dans ce rapport puisque plus récentes.

1.2.2.1 Cytotoxicité

L'exposition à un mélange de contaminants tel que les bioaérosols peut entrainer des effets potentiellement additifs et synergiques (Samake *et al.*, 2017 ; Von Essen et Donham, 1999). L'utilisation de modèles cellulaires qui permet de déterminer les effets biologiques combinés a été rapportée dans divers contextes, y compris l'industrie de la gestion des déchets (Frankel *et al.*, 2012 ; Gniadek *et al.*, 2017 ; Huttunen *et al.*, 2008 ; Segura *et al.*, 2009 ; Viegas, C., Caetano, L. A., *et al.*, 2020 ; Viegas *et al.*, 2018 ; Viegas, C., Twarużek, M., *et al.*, 2020). Différentes lignées cellulaires peuvent être utilisées, dans le cadre de ce projet, deux lignées ont été exposées aux contaminants provenant de différentes matrices. Des cellules de carcinome hépatocellulaire humain (HepG2) pour cibler la cytotoxicité de plusieurs mycotoxines (McKean *et al.*, 2006) et des cellules épithéliales pulmonaires humaines (A549) comme modèle de cellules alvéolaires (Swain *et al.*, 2010). L'utilisation de modèles cellulaires fournit des informations précieuses qui permettent d'améliorer la compréhension des effets attribuables aux multiples voies de toxicité (Altenburger *et al.*, 2018 ; Hernandez *et al.*, 2019 ; Mack *et al.*, 2019 ; Roy *et al.*, 2020). Bien que cette approche ne permette pas de déterminer l'agent causal qui peut être d'origine non microbienne, elle permet de déterminer l'impact toxique global de l'air auquel les travailleurs sont exposés.

1.2.2.2 Indicateurs microbiens

Au cours des dernières années, l'utilisation d'indicateurs de risques microbiens a été proposée dans quelques milieux de travail. Ils permettent de cibler avant tout des agents microbiens en raison de leur risque sur la santé, mais aussi pour leur potentiel de renseigner sur l'aérosolisation microbienne concomitante (Bonifait *et al.*, 2017 ; Viegas *et al.*, 2022 ; Wingert *et al.*, 2022). La détection d'*E. coli,* dans l'air d'un milieu de travail informe de la présence potentielle, des agents pathogènes fécaux. Par contre, celle de *Streptococcus pneumoniae* informe sur la présence d'agents biologiques qui proviennent des voies respiratoires (Wingert *et al.*, 2022). Le choix des indicateurs microbiens doit présenter une harmonie avec le milieu de travail évalué. Dans les centres de compostages, *Aspergillus fumigatus*, *Legionella* spp. *et pneumophilia* et *Saccharopolyspora rectivirgula* ont été ciblés. Au niveau des usines de traitements des

eaux, les adénovirus, les bactéries totales ou les endotoxines ont été proposés comme indicateurs d'exposition microbienne (Bonifait *et al.*, 2017 ; Duchaine *et al.*, 2019 ; Viegas *et al.*, 2022).

Dans le cadre de la gestion des déchets, les fungi appartenant au genre *Aspergillus* sont proposés comme indicateur de risque. Tout d'abord puisque la section *Fumigati* regroupe des agents pathogènes fréquemment retrouvés dans les aérosols de l'industrie des déchets. Et d'autre part, en raison de l'augmentation de la résistance aux azoles observée chez plusieurs isolats d'*Aspergillus.* La résistance aux azoles représente un problème potentiel pour la santé des travailleurs exposés (Roca-Barcelo *et al.*, 2020 ; Sabino *et al.*, 2016 ; « Stop neglecting fungi », 2017 ; Varga *et al.*, 2015 ; Viegas, C., Caetano, L. A., *et al.*, 2020 ; Viegas *et al.*, 2021, Viegas *et al.,* 2015; Viegas, S. *et al.*, 2020).
Les endotoxines et les mycotoxines, toutes deux des sous-produits microbiens, sont des indicateurs microbiens d'intérêt dans ce milieu de travail en raison de leurs effets sur la santé (Rylander, 2002 ; Varga *et al.*, 2015). Les évaluations des *Legionella* spp, qui est une bactérie pathogène du système respiratoire, ont généralement été limitées aux environnements aqueux. Cependant, puisque leur présence avait été démontrée dans les centres de compostage de résidus domestiques (Bonifait *et al.*, 2017), elles avaient été retenues comme un indicateur d'intérêt dans le cadre de ce projet.

1.2.2.3 Biodiversité

La biologie moléculaire permet, en plus, de l'évaluation des indicateurs, de documenter la diversité des agents microbiens présents dans un environnement. Cette approche a l'avantage de ne pas devoir déterminer à priori les agents microbiens d'importances. Elle permet d'obtenir un portrait large du microbiote présent et peut aider à comprendre les variations entre les milieux et les substrats. Une meilleure compréhension du microbiote capable de se développer dans un environnement permet d'estimer les potentielles expositions des travailleurs. Des études de biodiversité ont été réalisées, entre autres, dans les centres de compostage, les usines de traitement des eaux et certains milieux agricoles (Bonifait *et al.*, 2017 ; Duchaine *et al.*, 2019 ; Mbareche *et al.*, 2019).

1.3 Arrimage entre les articles et les objectifs

L'objectif général de ce projet était d'évaluer l'exposition aux microorganismes afin d'en apprécier le risque sur la santé des travailleurs. De façon plus spécifique, les objectifs étaient :

1) d'évaluer l'exposition aux microorganismes par l'analyse multimétrique du microbiote présent en zone respiratoire des chauffeurs et éboueurs, dans l'air de l'habitacle et dans les filtres d'habitacle (Salambanga et al. 2022 et Marchand et al 2024);

2) d’étudier le relargage potentiel de microorganismes à partir de filtres d’habitacle en utilisation ;

3) de documenter l’efficacité de filtration et la perte de charge selon la durée d’utilisation des filtres (Wingert et al. 2025);

4) d’apprécier le risque microbien des chauffeurs et des éboueurs (Salambanga et al. 2022 et Marchand et al 2024);

5) de comparer l’exposition et le risque microbien des chauffeurs et des éboueurs (Salambanga et al. 2022).

Les résultats obtenus ont été publiés dans les articles scientifiques qui sont cités dans les objectifs spécifiques énoncés précédemment. Ces articles sont décrits brièvement dans les sections subséquentes du rapport.

2. RÉSUMÉS DES ARTICLES

2.1 Résumé de l'article 1: Salambanga FRD, Wingert L, Valois I, Lacombe N, Gouin F, Trépanier J, Debia M, Soszczyńska E, Twarużek M, Kosicki R, Dias M, Viegas S, Caetano L, Viegas C, Marchand G. Microbial contamination and metabolite exposure assessment during waste and recyclable material collection. Environ Res. 2022 Sep;212(Pt D):113597. doi: 10.1016/j.envres.2022.113597.

L'objectif de cet article est de présenter les résultats de l'exposition aux bioaérosols mesurée au niveau de la zone respiratoire des travailleurs (conducteurs et éboueurs) affectés à la collecte des matières résiduelles en régions urbaines.

Des prélèvements en mode personnel au niveau de la zone respiratoire des travailleurs ainsi que dans l'air ambiant des habitacles des camions ont été réalisés au cours de l'été 2019. Durant cette période, 12 camions collectant des matières recyclables, des résidus organiques et des déchets domestiques ultimes ont été évalués. Sur tous les échantillons, les bactéries et les mycètes ont été analysés par la culture. Parallèlement aux analyses du microbiome cultivable, des dosages d'endotoxines et la détection d'indicateurs de risques microbiens à l'aide de méthodes de biologie moléculaire ont également été effectués. En supplément aux méthodes de microbiologie plus traditionnelle, une approche novatrice qui utilise des cellules pulmonaires et hépatiques a permis de déterminer les effets cytotoxiques des échantillons d'air prélevés dans la cabine des camions. Ces mesures de l'effet cytotoxique sur les cellules humaines permettent d'apprécier l'effet combiné que peut avoir le mélange des contaminants auquel ces travailleurs sont exposés dans le cadre de leur travail.

Le personnel attitré à la collecte d'ordures ménagères est exposé à des concentrations de bactéries et d'endotoxines supérieures aux limites recommandées. Les éboueurs attitrés à la collecte des déchets domestiques sont ceux pour lesquels les concentrations les plus élevées de microorganismes cultivables ont été observées. De plus, des concentrations critiques d'*Aspergillus* section *Fumigati* ont été détectées au niveau de la zone respiratoire de certains travailleurs, notamment chez un conducteur affecté à la décharge des matières au site d'enfouissement. Aucune mycotoxine n'a été détectée dans les échantillons d'air, tant au niveau des voies respiratoires des travailleurs que dans les échantillons d'air ambiant prélevés dans la cabine. Toutefois, des mycètes avaient une résistance aux azoles. La résistance aux azoles augmente les difficultés de traitement en cas d'infection fongique. De plus, des effets cytotoxiques ont été observés à partir de nombreux échantillons. La présence d'effets toxiques démontre le potentiel néfaste de l'air prélevé tant sur les cellules pulmonaires que sur celles du foie (cellules hépatiques). Ces travailleurs sont exposés quotidiennement à un mélange hétérogène de contaminants présents dans l'air de leur environnement de travail.

Cette étude confirme que le personnel du secteur de la collecte des résidus domestiques est exposé à des agents microbiens qui causent des risques pour leur santé.
Elle démontre également la pertinence de l'utilisation les tests cytotoxiques, puisque ceux-ci permettent de documenter l'impact combiné des contaminants présents dans les échantillons d'air sur des cellules humaines. Nos résultats suggèrent également que les niveaux d'expositions, et conséquemment les risques sur la santé des travailleurs de ce secteur, diffèrent en fonction du type de déchets manipulé, des tâches effectuées par le travailleur ainsi que du lieu de déchargement des camions de collecte.

2.2 **Résumé de l'article 2:** Marchand G, Wingert L, Viegas C, Caetano L, Viegas S, Twaruzek M, Lacombe N, Lanoie D, Valois I, Gouin F, Soszczyńska E, Kosicki R, Dias M, Debia M. Assessment of waste workers occupational risk to microbial agents and cytotoxic effects of mixed contaminants present in the air of waste truck cabin and ventilation filters. J Air Waste Manag Assoc. 2024 Mar;74(3):145-162. doi: 10.1080/10962247.2023.2299424**.**

L'objectif spécifique de cet article était de documenter à l'aide de prélèvements actifs et intégrés l'exposition des travailleurs attitrés à la collecte des résidus domestiques afin d'évaluer les risques microbiens professionnels. Pour ce faire, un échantillonnage actif de l'air ambiant, un échantillonnage intégré à l'aide des filtres à air et une combinaison de méthodes analytiques afin d'évaluer le mélange complexe d'agents biologiques ont été effectués. En ce qui concerne les échantillons d'air actifs, des analyses du microbiote cultivable, du dosage des endotoxines, des essais de biologie moléculaire et des analyses de cytotoxicité ont été réalisées. En ce qui concerne les filtres, en plus des analyses précédentes, des tests de relargages ont été effectués par l'analyse du microbiote cultivable. Vingt-huit camions de zones urbaines et rurales ont été étudiés. Les trois types de résidus ont été collectés.

Des indicateurs de risques ont été détectés par la ddPCR dans les filtres des camions collectant les trois types de matières résiduelles. Les concentrations les plus élevées de bactéries, de mycètes, d'Aspergillus/Penicillium et d'Aspergillus flavi ont été mesurés dans les filtres provenant des camions qui effectuent la collecte des résidus organiques.

La majorité des filtres ont aussi démontré avoir des effets cytotoxiques sur les cellules pulmonaires (75 %) et hépatiques (93 %). Des différences significatives de la biomasse microbienne ont été observées entre les différents modèles de filtres récupérés dans les camions ($p<0,05$). Le modèle de filtre qui présentait la charge microbienne la plus faible avait également l'efficacité de filtration qui était la moins performante.

Dans l'air ambiant des cabines, les concentrations d'ADN microbien pour les mycètes, les Aspergillus/Penicillium, les Aspergillus des sections Fumigati et Flavi étaient plus élevés dans les camions qui réalisent la collecte des résidus organiques. Les Enterobacter spp et les bactéries à Gram négatifs entériques étaient plus élevées lors de la collecte des matériaux recyclables. Cependant, les bactéries (16S) et les Legionella spp. étaient plus répandues dans les camions qui effectuent la collecte des déchets domestiques ultimes. Un lien étroit a été établi entre les bactéries cultivables et la concentration d'endotoxines (coefficient de corrélation de Spearman = 0,85). Moins de 25 % des échantillons ont montré des effets cytotoxiques sur les cellules pulmonaires, par rapport à 85 % des échantillons sur les cellules hépatiques. La proportion la plus élevée d'échantillons sans effet cytotoxique sur les cellules pulmonaires a été observée pour les camions qui effectuent la collecte de matériaux recyclables (84 %).

La localisation (rurale, urbaine) a aussi été identifiée comme étant un facteur d'influence potentiel du microbiote et de l'effet cytotoxique des échantillons de filtres d'habitacle et d'air ambiant. La majorité des résultats a mis en évidence un effet cytotoxique plus important sur les échantillons d'air qui proviennent des régions urbaines. La présence soutenue d'effets cytotoxiques à travers les échantillons permet de confirmer l'impact négatif potentiel sur la santé des travailleurs attitrés à la collecte des matières résiduelles. Dans l'ensemble, cette étude souligne la nécessité d'appliquer des méthodes d'échantillonnage et d'analyse multiples afin d'accomplir une évaluation complète du risque microbien dans les environnements de travail.

2.3 **Résumé de l'article 3**: Wingert L, Gervais N, Debia M, Marchand G. Performance of cabin air filters used in waste collection trucks. J Air Waste Manag Assoc. 2026 Jan 22:1-14. doi: 10.1080/10962247.2025.2596024. Epub.

Cet article rapporte l'évaluation des performances (efficacité fractionnelle de collecte et perte de charge) de différents modèles de filtres à air utilisés dans les habitacles de camions attitrés à la collecte des matières résiduelles. Le caractère innovant de cette étude réside dans le fait que ces essais ont été réalisés sur des filtres utilisés en situations réelles dans des camions de collectes. De plus, ces essais ont été effectués sur des particules avec un large spectre de diamètres et ne se sont pas limités aux diamètres des particules les plus pénétrantes ou aux particules plus grandes que 300 nm, comme la majorité des autres articles sur le sujet. Au total, ce sont 27 filtres à air qui ont été étudiés. Ces filtres avaient été utilisés sur des périodes de 3 à un peu plus de 391 jours dans des camions qui réalisent la collecte de matières résiduelles. Ces filtres étaient de sept modèles différents quoique la majorité provenait de trois modèles. Des échantillons de ces filtres étaient évalués sur un banc de filtration. Le diamètre des particules utilisées pour les tests variait entre 28,4 nm et 1528 nm. Pour comparer les filtres, des diamètres de particules spécifiques ont été analysées plus en détails en représentant les aérosols auxquels les conducteurs sont le plus exposés, c.-à-d les particules ultrafines de 50 nm et les particules micrométriques, incluant les bioaérosols, de 1058 nm.

Les comparaisons ont été également réalisées pour la taille de particule correspondant au minimum de filtration de chaque filtre (MPPS). Afin de représenter les conditions réelles d'utilisation, des vitesses de filtration comprises entre 10 cm/s et 55 cm/s ont été utilisés, tant pour les essais de filtration que pour les mesures de perte de charge.

Tous les filtres testés ont démontré une courbe d'efficacité fractionnelle en forme de « U » cohérente avec la théorie de la filtration. Indépendamment des filtres et des vitesses de filtration, les efficacités minimales de collecte ont varié entre 1,3 % et 42,5 %. Sur la base des trois diamètres testés (50 nm, MPPS et 1058 nm), les filtres à air des cabines ont été classés en deux groupes, à savoir les filtres à moyenne efficacité (9082, ABP, 9052, 4316, CF19010) et ceux à faible efficacité (4466, AF 26430). Les filtres moyennement efficaces montrent des efficacités minimales de plus de 10 % et les faiblement efficaces de moins de 10 %, pour toutes les vitesses d'air. Aucun des modèles testés n'a démontré une haute efficacité de filtration. Concernant l'effet du flux d'air dans les filtres, l'efficacité de collecte des particules de 1058 nm augmente, tandis que celle des particules de 50 nm diminue avec l'augmentation de la vitesse de filtration, conformément aux attentes.

Par ailleurs, des analyses statistiques ont indiqué que les médias filtrants sont relativement homogènes sur leur surface de filtration. Les variations d'efficacité et de perte de charge entre filtres d'un même modèle étaient principalement dues aux différences de performances initiales ou aux différences de niveaux de colmatage. Seules quelques études antérieures ont porté sur le colmatage des filtres d'habitacle et le

plus souvent pour des véhicules particuliers. Ces études ont montré que l'efficacité de collecte et/ou la perte de charge étaient faiblement altérées par la quantité de particules déposées sur des périodes d'utilisation typiques. Comparé à ces données disponibles pour les véhicules particuliers, le colmatage des filtres à air d'habitacle semble plus sévère dans les conditions de collecte des déchets. Les tendances attendues ont été observées pour tous les modèles de filtres dans le cadre de cette étude. En effet, tant la diminution du diamètre des particules les plus pénétrantes (MPPS) que l'augmentation de leur efficacité de collecte et de la perte de charge ont été observées en lien avec le colmatage des filtres. De plus, l'effet du type de matières résiduelles collectées et de l'environnement de circulation sur l'efficacité des filtres et sur le colmatage a été étudié, mais aucune influence n'a pu être démontrée.

Une augmentation de l'efficacité de collecte au cours du colmatage pourrait paraitre intéressante puisqu'elle procure une meilleure protection des conducteurs. Toutefois, cela s'accompagne d'une perte de charge plus importante, qui impacte le fonctionnement du système de ventilation. Par conséquent, le filtre doit permettre de fournir le meilleur compromis entre la perte de charge et son efficacité de collecte. Du fait de la diversité des contaminants particulaires, des performances actuellement faibles à modérées des filtres à air d'habitacle des camions de cueillette de déchets, et de l'exposition des conducteurs, cette étude souligne la nécessité d'une protection améliorée et plus fiable. Il est donc essentiel de développer des réglementations ou des normes spécifiques pour ces filtres, incluant des mesures systématiques de l'efficacité fractionnelle de collecte sur une large gamme de tailles de particules, des particules ultrafines aux particules micrométriques. La question du remplacement préventif des filtres devrait également être abordée.

3. DISCUSSION

3.1 Caractérisation des risques biologiques

Les résultats de ce projet ont démontré que les travailleurs attitrés à la collecte des matières résiduelles sont exposés à un mélange complexe de contaminants biologiques lors de la collecte de tous les types de déchets.

Plus explicitement, ces travailleurs sont exposés à des concentrations élevées d'*Aspergillus* section *Fumigati*, à des souches fongiques résistantes aux azoles en zones rurales, ainsi qu'à des concentrations élevées de mycètes et de bactéries lors de la collecte de déchets organiques. De plus, la présence des bactéries du genre *Legionella* et de bactéries entériques lors de la collecte de tous les types de déchets est aussi à souligner.

Bien que des mycotoxines n'aient été quantifiées que dans un seul échantillon, la présence soutenue d'effets cytotoxiques produits par les échantillons confirme l'impact potentiellement négatif sur la santé. L'hétérogénéité des contaminants auxquels les travailleurs sont exposés est mise en évidence par cette méthode.

Ce projet démontre que les éboueurs sont en général plus exposés que les chauffeurs. Toutefois, ces derniers sont exposés de façon importante lorsqu'ils se rendent à la décharge pour vider le contenu des camions, tant aux centres d'enfouissement qu'au centre de traitement des matières recyclables.

3.2 Approche méthodologique innovante

En plus des résultats sur l'exposition des travailleurs, cette étude appuie la pertinence de combiner plusieurs méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour la réalisation d'une évaluation exhaustive du risque microbien dans les environnements de travail.
Les méthodes utilisant la culture, la biologie moléculaire, l'analyse des mycotoxines et des endotoxines, ainsi que les essais de cytotoxicité sur les cellules pulmonaires et hépatiques, ont toutes démontré des avantages qui permettent de brosser un portrait exhaustif des risques sur la santé des travailleurs.

Ce projet confirme que la mesure intégrée à l'aide du filtre de ventilation de l'habitacle fournit des informations complémentaires sur le potentiel d'exposition à long terme.
Le filtre présente une mesure intégrée sur plusieurs jours, tandis que les échantillons d'air ambiant indiquent l'exposition caractéristique de la journée de travail lors du prélèvement.
La combinaison de ces deux méthodes d'échantillonnage contribue à une spécification de l'exposition plus complète.

3.3 Filtration

Les résultats d'efficacité obtenus, pour des filtres neufs ou peu utilisés, sont cohérents avec ceux présents dans la littérature pour des véhicules particuliers. On y retrouve notamment une séparation en deux groupes de performance, avec des efficacités faibles (inférieures à environ 10 %) et moyennes (environ 20 % à 40 %). La littérature démontre toutefois qu'il est possible par filtration mécanique comme électrostatique d'obtenir des efficacités élevées sans pour autant engendrer une trop forte résistance à l'air pour le système de ventilation des véhicules (Ji et al 2023).

Si les performances initiales des filtres de camions de cueillette de déchets peuvent se comparer avec celles des filtres destinés à des véhicules pour particuliers, il en est autrement au cours du colmatage. En effet, la comparaison avec les quelques données disponibles dans la littérature (Chan et al 2021, Xu et al. 2014 et Xu et al. 2011) montre que l'efficacité et la perte de charge des filtres sont, à durée d'installation équivalente, plus impactées par l'activité de cueillette des matières résiduelles (augmentation de l'efficacité et de la perte de charge). Ceci est cohérent avec une utilisation plus intensive dans des milieux ou situations favorisant des concentrations plus élevées en particules dans l'air (ex. : centres urbains, circulation à faible vitesse, décharges…). L'exposition accrue à des bioaérosols peut également favoriser un colmatage plus sévère, du fait de la croissance microbienne se produisant à même le filtre, un phénomène documenté également dans ce projet. Un colmatage trop important peut avoir des effets négatifs tels que la diminution du débit de ventilation et relargage de particules préalablement piégées dans l'habitacle du chauffeur.

La littérature et les résultats de ce projet ont démontré l'exposition des conducteurs de camions de cueillette de déchets à des aérosols, biologiques ou non, dont les effets sur la santé sont avérés (Madsen et al. 2011, Park et al 2011, Krajewski et al 2002, Wouters et al. 2002 et Ivens et al. 1999). Malgré cela, et malgré la durée importante de leur exposition, aucune norme ne fixe de niveau minimal de performance ni de procédure d'essais complète pour les filtres à air d'habitacle de ce type de véhicules. Ceci conduit à une diversité de filtres ayant des performances faibles ou moyennes et dont la dégradation avec le colmatage est significative. Par conséquent, il est nécessaire d'offrir à ces travailleurs une meilleure protection et plus fiable passant par l'élaboration d'une réglementation spécifique. Cette réglementation devra comprendre (1) des mesures systématiques de l'efficacité fractionnelle de filtration sur une large gamme de tailles de particules, des particules ultrafines aux particules de taille micrométrique, et (2) des lignes directrices pour le remplacement préventif des filtres à air d'habitacle

4. Conclusion

Ce projet a démontré que les travailleurs qui collectent les ordures ménagères sont exposés à des concentrations de bactéries et d'endotoxines qui dépassent à certains moments les recommandations sanitaires. Ces travailleurs sont ainsi à risque de développer des maladies en lien avec leur travail. Les déterminants de l'exposition sont principalement liés aux conditions de travail (type de déchets, poste de travail, environnement). Pour les chauffeurs de camion, la qualité des filtres d'habitacle, et l'entretien des cabines, apparaissent comme des facteurs à considérer pour maitriser les expositions.

5. Recommandations pour la protection des travailleurs

Bien qu'il serait souhaitable de réduire l'exposition des travailleurs responsables de la collecte des matières résiduelles pour certaines tâches, il n'est pas réaliste de recommander le port d'un appareil de protection respiratoire (APR) aux éboueurs en raison des contraintes physiques liées à l'emploi. Des modifications aux camions pourraient être envisagées telles que l'aspiration à la source vers la benne, un mur d'air afin de limiter la dispersion des particules hors de la benne, l'activation du transversement sans sortir de la cabine.

Malgré tout, il est possible de proposer des modifications à certaines pratiques observées qui pourraient aider à réduire les expositions des travailleurs.

Éboueur

– L'utilisation de bras mécaniques qui permettent de maintenir une distance plus grande entre les résidus déversés dans la benne du camion et les voies respiratoires des travailleurs devraient être favorisées.

– L'utilisation des petits bacs bruns pour la collecte des matières organiques pourrait être revue et repensée. Ces bacs sont peu adaptés du point de vue ergonomique et ne permettent pas la collecte mécanisée, ce qui oblige les travailleurs à soulever le bac et à le placer près de leurs voies respiratoires.

- Il faudrait éviter, voire interdire, le transbordement des résidus entre les bacs bruns. Les travailleurs combinent régulièrement plusieurs petits bacs entre eux afin de réduire le nombre de déplacements et de bacs à décharger dans la benne. Les bacs devraient pouvoir être manipulés tels qu'ils sont conçus sans d'autre manipulation de la part des éboueurs pour faciliter leur travail.

- La collecte des déchets est en constante évolution pour répondre aux enjeux environnementaux, économiques et technologiques. Toutefois, les mesures de gestion des matières résiduelles et des déchets ne considèrent pas toujours les risques pour les travailleurs. Par exemple, allonger les fréquences de collecte, entraînera de nouveaux risques pour les travailleurs : charge plus lourde, augmentation de la contamination fongique et bactérienne. Ces considérations de santé et sécurité doivent être prises en compte par les décideurs. Des solutions alternatives à la collecte porte à porte dans les grands centres urbains sont aussi envisageables. Des points de collecte groupés et dans lesquels les citoyens pourraient placer leur bac ou le contenu des bacs le jour de la collecte. Une telle approche pourrait permettre une collecte automatisée dans plusieurs situations, ce qui présente des avantages en santé et sécurité du travail.

Conducteur, lors des transbordements

– Le port d'un APR pourrait leur être offert afin de réduire la charge microbienne inhalée lorsqu'ils doivent sortir pour activer le déversement.

– La période durant laquelle ils sont à l'extérieur du camion dans les sites de déversement devrait être limitée

– L'ajustement de la ventilation en mode recirculation pourrait aider puisque ceci limiterait l'apport en air extérieur largement contaminé dans les centres de transbordement et d'enfouissement.

Habitacle

– Des variations importantes de la charge microbienne et de l'état de propreté général ont été observées. Selon Madsen, une contamination par les vêtements des travailleurs et les surfaces des sièges se produit dans les camions (2021). Puisque les travailleurs sont en contact avec beaucoup de poussières et de matières organiques, l'utilisation de recouvrement non poreux sur les sièges limiterait l'accumulation dans les tissus et aurait l'avantage d'être plus facile à nettoyer. L'utilisation de siège en cuirette permettrait un meilleur entretien des surfaces. La très grande majorité des sièges observés dans les camions étudiés étaient en tissus poreux et très peu étaient munis de housses de siège lavables. Une accumulation de matière organique au fil des mois ainsi qu'une accumulation éventuellement de cellules microbiennes est inévitable avec de tels types de revêtement.

Filtre d'habitacle

– Les filtres de ventilation de l'habitacle pourraient être choisis avec une meilleure efficacité de filtration. Des filtres à très haute efficacité (80 %) permettraient d'alimenter la cabine avec un air épuré de tous types de particules retrouvées à l'extérieur.

Puisque tous les systèmes ne peuvent permettre les filtres à haute efficacité, des filtres avec une efficacité près des maximums retrouvés dans le cadre de ce projet devraient être préconisés (40-60 %).

– Un calendrier de remplacement des filtres devrait aussi être disponible et la fréquence de changement augmenté afin de réduire les expositions potentielles attribuables aux relargages des particules.

– L'élaboration de standards de performances minimales de filtration devrait être envisagée pour choisir les filtres d'habitacle des camions de collectes des matières résiduelles.

BIBLIOGRAPHIE

Altenburger, R., Scholze, M., Busch, W., Escher, B. I., Jakobs, G., Krauss, M., . . . Kortenkamp, A. (2018). Mixture effects in samples of multiple contaminants: An inter-laboratory study with manifold bioassays. *Environment International*, *114*, 95-106. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.013

Aquino, S., de Lima, J. E. A., do Nascimento, A. P. B. et Reis, F. C. (2018). Analysis of fungal contamination in vehicle air filters and their impact as a bioaccumulator on indoor air quality. *Air Quality, Atmosphere and Health*, *11*(10), 1143-1153. https://doi.org/10.1007/s11869-018-0614-0

Athanasiou, M., Makrynos, G. et Dounias, G. (2010). Respiratory health of municipal solid waste workers. *Occupational Medicine*, *60*(8), 618-623. https://doi.org/10.1093/occmed/kqq127

Bonifait, L., Marchand, G., Veillette, M., M'Bareche, H., Dubuis, M.-E., Pépin, C., . . . Duchaine, C. (2017). Workers' exposure to bioaerosols from three different types of composting facilities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *14*(10), 815-822. https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1335054

Chan, T. W., Lee, M., Mallach, G., & Buote, D. (2021). Efficiency of the Vehicle Cabin Air Filters for Removing Black Carbon Particles and BTEX from the Air Intake. *Applied Sciences*, *11*(19), 9048. https://doi.org/10.3390/app11199048

Donham, K. J., Reynolds, S. J., Whitten, P., Merchant, J. A., Burmeister, L. et Popendorf, W. J. (1995). Respiratory dysfunction in swine production facility workers: Dose-response relationships of environmental exposures and pulmonary function. *American Journal of Industrial Medicine*, *27*(3), 405-418. https://doi.org/10.1002/ajim.4700270309

Donham, K. J., Yeggy, J. et Dague, R. R. (1985). Chemical and physical-parameters of liquid manure from swine confinement facilities: Health implications for workers, swine and the environment. *Agricultural Wastes*, *14*(2), 97-113. https://doi.org/10.1016/S0141-4607(85)80022-6

Dubuis, M.-E., M'Bareche, H., Veillette, M., Bakhiyi, B., Zayed, J., Lavoie, J. et Duchaine, C. (2017). Bioaerosols concentrations in working areas in biomethanization facilities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *67*(11), 1258-1271. https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1356762

Duchaine, C., Veillette, M., Dion Dupont, V., M'Bareche, H., Brisebois, E., Lavoie, J. et Beaudet, Y. (2019). *Exposition aux bioaérosols dans les centres de traitement des eaux usées : application d'approches moléculaires et risque viral* (Rapport n° R-1061). IRSST. https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1089&context=rapports-scientifique

Eduard, W., Heederik, D., Duchaine, C. et Green, B. J. (2012). Bioaerosol exposure assessment in the workplace: The past, present and recent advances. *Journal of Environmental Monitoring*, *14*(2), 334. https://doi.org/10.1039/c2em10717a

Eurostat. (2023). *Waste statistics*. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

Frankel, M., Timm, M., Hansen, E. W. et Madsen, A. M. (2012). Comparison of sampling methods for the assessment of indoor microbial exposure: Assessment of microbial exposure. *Indoor Air*, *22*(5), 405-414. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00770.x

Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, *29*(8), 2227-2239. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.028

Gniadek, A., Krzyściak, P., Twarużek, M. et Macura, A. B. (2017). Occurrence of fungi and cytotoxicity of the species: Aspergillus ochraceus, Aspergillus niger and Aspergillus flavus isolated from the air of hospital wards. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, *30*(2), 231-239. https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00841

Gołofit-Szymczak, M., Stobnicka-Kupiec, A. et Górny, R. L. (2019). Impact of air-conditioning system disinfection on microbial contamination of passenger cars. *Air Quality, Atmosphere and Health, 12*(9), 1127-1135. https://doi.org/10.1007/s11869-019-00731-7

Hei Wikuats, C. F., da Silva, I., Marques Cardoso Prates, K. V., Rodrigues da Silva, J. C., Duarte, E. H., Castro E Silva, D., . . . Martins, L. D. (2022). Health symptoms and inflammatory blood biomarkers from exposure of recyclable waste workers to particulate matter and bioaerosols. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(2), article 101323. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101323

Heldal, K. K. et Eduard, W. (2004). Associations between acute symptoms and bioaerosol exposure during the collection of household waste. *American Journal of Industrial Medicine*, *46*(3), 253-260. https://doi.org/10.1002/ajim.20058

Heldal, K. K., Halstensen, A. S., Thorn, J., Djupesland, P., Wouters, I., Eduard, W. et Halstensen, T. S. (2003). Upper airway inflammation in waste handlers exposed to bioaerosols. *Occupational and Environmental Medicine*, *60*(6), 444-450. https://doi.org/10.1136/oem.60.6.444

Hernandez, A. F., Buha, A., Constantin, C., Wallace, D. R., Sarigiannis, D., Neagu, M., . . . Tsatsakis, A. (2019). Critical assessment and integration of separate lines of evidence for risk assessment of chemical mixtures. *Archives of Toxicology*, *93*(10), 2741-2757. https://doi.org/10.1007/s00204-019-02547-x

Huttunen, K., Rintala, H., Hirvonen, M.-R., Vepsäläinen, A., Hyvärinen, A., Meklin, T., . . . Nevalainen, A. (2008). Indoor air particles and bioaerosols before and after renovation of moisture-damaged buildings: The effect on biological activity and microbial flora. *Environmental Research*, *107*(3), 291-298. https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.02.008

Ivens, U. I., Breum, N. O., Ebbehøj, N., Nielsen, B. H., Poulsen, O. M. et Würtz, H. (1999). Exposure-response relationship between gastrointestinal problems among waste collectors and bioaerosol exposure. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, *25*(3), 238-245. https://doi.org/10.5271/sjweh.430

Ji, J. H., Bae, G. N., Kang, S. H. et Hwang, J. (2003). Effect of particle loading on the collection performance of an electret cabin air filter for submicron aerosols. *Journal of Aerosol Science*, *34*(11), 1493-1504. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00103-4

Krajewski, J. A., Tarkowski, S., Cyprowski, M., Szarapinska-Kwaszewska, J. et 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.

Kuijer, P. P. F. M., Sluiter, J. K. et Frings-Dresen, M. H. W. (2010). Health and safety in waste collection: Towards evidence-based worker health surveillance. *American Journal of Industrial Medicine*, *53*(10), 1040-1064. https://doi.org/10.1002/ajim.20870

Lavoie, J., Dunkerley, C. J., Kosatsky, T. et 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), 23-28. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.016

Liebers, V., Raulf-Heimsoth, M. et Brüning, T. (2008). Health effects due to endotoxin inhalation (review). *Archives of Toxicology*, *82*(4), 203-210. https://doi.org/10.1007/s00204-008-0290-1

Lindsley, W. G., Green, B. J., Blachere, F. M., Martin, S. B., Jensen, P. A. et Schafer, M. P. (2017). Sampling and characterization of bioaerosols. Dans National Institute for Occupational Safety and Health (édit.), *NIOSH manual of analytical methods,* (5e éd., p. BA-1-BA-225). NIOSH.

Mack, S. M., Madl, A. K. et Pinkerton, K. E. (2019). Respiratory health effects of exposure to ambient particulate matter and bioaerosols. *Comprehensive Physiology, 10*(1), 1-20. https://doi.org/10.1002/cphy.c180040

Madsen, A. M., Alwan, T., Ørberg, A., Uhrbrand, K. et Jørgensen, M. B. (2016). Waste workers' exposure to airborne fungal and bacterial species in the truck cab and during waste collection. *Annals of Occupational Hygiene*, *60*(6), 651-668. https://doi.org/10.1093/annhyg/mew021

Madsen, A. M., Frederiksen, M. W., Jacobsen, M. H. et Tendal, K. (2020). Towards a risk evaluation of workers' exposure to handborne and airborne microbial species as exemplified with waste collection workers. *Environmental Research*, *183*, article 109177. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109177

Madsen, A. M., Frederiksen, M. W., Mahmoud Kurdi, I., Sommer, S., Flensmark, E. et Tendal, K. (2019). Expanded cardboard waste sorting and occupational exposure to microbial

species. *Waste Management*, *87*, 345-356. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.018

Madsen, A. M., Raulf, M., Duquenne, P., Graff, P., Cyprowski, M., Beswick, A., . . . Crook, B. (2021). Review of biological risks associated with the collection of municipal wastes. *Science of The Total Environment*, *791*, article 148287. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148287

Malmros, P., Sigsgaard, T. et Bach, B. (1992). Occupational health problems due to garbage sorting. *Waste Management and Research*, *10*(3), 227-234. https://doi.org/10.1016/0734-242X(92)90101-P

Marchand, G. (2021). Échantillonnage et analyse des microorganismes. Dans B. Roberge, G. Nadon, C. Gagné et É. Sirois (édit.), *Hygiène du travail : du diagnostic à la maitrise des facteurs de risques* (2e éd., p. 543-560). Chenelière.

Marchand, G., Gardette, M., Nguyen, K., Amano, V., Neesham-Grenon, E. et 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), 836-843. https://doi.org/10.1093/annweh/wxx045

Marchand, G., Lavoie, J. et Lazure, L. (1995). Evaluation of bioaerosols in a municipal solid waste recycling and composting plant. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *45*(10), 778-781. https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467406

Marchand, G., Wingert, L., Hallé, S. et Debia, M. (2022). *Assessing embalmer exposure to bioaerosols and the associated health risk* (Rapport n° R-1110-en). IRSST. https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1072&context=rapports-scientifique

Marchand, G., Wingert, L., Viegas, C., Caetano, L., Viegas, S., Twaruzek, M., Lacombe, N., Lanoie, D., Valois, I., Gouin, F., Soszczyńska, E., Kosicki, R., Dias, M., Debia, M. (2024). Assessment of waste workers occupational risk to microbial agents and cytotoxic effects of mixed contaminants present in the air of waste truck cabin and ventilation filters. J Air Waste Manag Assoc.,74(3):145-162. https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2299424

Mbareche, H., Veillette, M., Bilodeau, G. J. et Duchaine, C. (2019). Fungal aerosols at dairy farms using molecular and culture techniques. *Science of The Total Environment*, *653*, 253-263. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.345

McKean, C., Tang, L., Tang, M., Billam, M., Wang, Z., Theodorakis, C. W., . . . Wang, J.-S. (2006). Comparative acute and combinative toxicity of aflatoxin B1 and fumonisin B1 in animals and human cells. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, *44*(6), 868-876. https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.11.011

Mériaux, A., Cormier, Y., Pageau, P., Israël-Assayag, E. et Duchaine, C. (2006). Sensitization to airborne molds and its health effects in peat moss processing plant workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *3*(8), 442-447. https://doi.org/10.1080/15459620600790744

Neumann, H.-D., Balfanz, J., Becker, G., Lohmeyer, M., Mathys, W. et Raulf-Heimsoth, M. (2002). Bioaerosol exposure during refuse collection: Results of field studies in the real-life situation. *Science of The Total Environment*, *293*(1), 219-231. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00039-6

Nielsen, E., Nielsen, B. et Breum, N. (1995). Occupational bioaerosol exposure during collection of household waste. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, *2*(1), 53-59.

Nielsen, G. D., Larsen, S. T., Hansen, J. S. et Poulsen, L. K. (2012). Experiences from occupational exposure limits set on aerosols containing allergenic proteins. *Annals of Occupational Hygiene*, *56*(8), 888-900. https://doi.org/10.1093/annhyg/mes035

Oppliger, A. (2014). Advancing the science of bioaerosol exposure assessment. *Annals of Occupational Hygiene*, *58*(6), 661-663. https://doi.org/10.1093/annhyg/meu042

Park, D.-U., Ryu, S.-H., Kim, S.-B. et 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), 461-468. https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.4.461

Poole, C. J. M. et Wong, M. (2013). Allergic bronchopulmonary aspergillosis in garden waste (compost) collectors: Occupational implications. *Occupational Medicine*, *63*(7), 517-519. https://doi.org/10.1093/occmed/kqt097

Poulsen, O. M., Breum, N. O., Ebbehøj, N. et Hansen, Å. M. (1995). Sorting and recycling of domestic waste: Review of occupational health problems and their possible causes. *Science of The Total Environment*, *168*(1), 33-56. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04521-2

Recyc-Québec. (2023). *Les matières organiques*. Recyc-Québec. https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2021-matieres-organiques.pdf

Reponen, T. (2017). Sampling for microbial determinations. Dans C. Viegas, S. Viegas, A. Gomes, M. Täubel et R. Sabino (édit.), *Exposure to microbiological agents in indoor and occupational environments* (p. 85-96). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61688-9_4

Roca-Barcelo, A., Douglas, P., Fecht, D., Sterrantino, A. F., Williams, B., Blangiardo, M., . . . Hansell, A. L. (2020). Risk of respiratory hospital admission associated with modelled concentrations of *Aspergillus fumigatus* from composting facilities in England. *Environmental Research*, *183*, article 108949. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108949

Roy, R., Jan, R., Joshi, U., Bhor, R., Pai, K. et Satsangi, P. G. (2020). Characterization, pro-inflammatory response and cytotoxic profile of bioaerosols from urban and rural residential settings in Pune, India. *Environmental Pollution*, *264*, article 114698. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114698

Rylander, R. (2002). Endotoxin in the environment: Exposure and effects. *Journal of Endotoxin Research*, *8*(4), 241-252. https://doi.org/10.1177/09680519020080040101

Sabino, R., Carolino, E., Veríssimo, C., Martinez, M., Clemons, K. V. et Stevens, D. A. (2016). Antifungal susceptibility of 175 Aspergillus isolates from various clinical and environmental sources. *Medical Mycology*, *54*(7), 740-756. https://doi.org/10.1093/mmy/myw024

Salambanga, F.R.D., Wingert, L., Valois, I., Lacombe, N., Gouin F., Trépanier, J., Debia, M, Soszczyńska, E., Twarużek, M., Kosicki, R., Dias, M, Viegas, S., Caetano, L., Viegas, C., Marchand, G. (2022). Microbial contamination and metabolite exposure assessment during waste and recyclable material collection. Environ Res. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113597

Samake, A., Uzu, G., Martins, J. M. F., Calas, A., Vince, E., Parat, S. et Jaffrezo, J. L. (2017). The unexpected role of bioaerosols in the Oxidative Potential of PM. *Scientific Reports*, *7*(1), article 10978. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11178-0

Segura, P. A., François, M., Gagnon, C. et Sauvé, S. (2009). Review of the occurrence of anti-infectives in contaminated wastewater and natural and drinking waters. *Environmental Health Perspectives*, *117*(5), 675-684. https://doi.org/10.1289/ehp.11776

Sigsgaard, T., Malmros, P., Nersting, L. et Petersen, C. (1994). Respiratory disorders and atopy in Danish refuse workers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *149*(6), 1407-1412. https://doi.org/10.1164/ajrccm.149.6.8004291

Simmons, R. B., Noble, J. A., Rose, L., Price, D. L., Crow, S. A. et Ahearn, D. G. (1997). Fungal colonization of automobile air conditioning systems. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *19*(2), 150-153. http://dx.doi.org/10.1038/sj.jim.2900451

Srikanth, P., Sudharsanam, S. et Steinberg, R. (2008). Bioaerosols in indoor environment: Composition, health effects and analysis. *Indian Journal of Medical Microbiology*, *26*(4), 302-312. https://doi.org/10.1016/S0255-0857(21)01805-3

Stop neglecting fungi. (2017). *Nature Microbiology*, *2*(8), article 17123. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.120

Swain, R. J., Kemp, S. J., Goldstraw, P., Tetley, T. D. et Stevens, M. M. (2010). Assessment of cell line models of primary human cells by Raman spectral phenotyping. *Biophysical Journal*, *98*(8), 1703-1711. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.12.4289

Szulc, J., Okrasa, M., Majchrzycka, K., Sulyok, M., Nowak, A., Szponar, B., . . . Gutarowska, B. (2022). Microbiological and toxicological hazard assessment in a waste sorting plant and

proper respiratory protection. *Journal of Environmental Management*, *303*, article 114257. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114257

Thorn, J., Beijer, L. et Rylander, R. (1998). Airways inflammation and glucan exposure among household waste collectors. *American Journal of Industrial Medicine*, *33*(5), 463-470. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199805)33:5%3C463::AID-AJIM5%3E3.0.CO;2-T

Varga, J., Baranyi, N., Chandrasekaran, M., Vágvölgyi, C. et Kocsubé, S. (2015). Mycotoxin producers in the Aspergillus genus: An update. *Acta Biologica Szegediensis*, *59*(2), 151-167.

Viegas, C. (2018). Sampling methods for an accurate mycobiota occupational exposure assessment: Overview of several ongoing projects. Dans P. M. Arezes, J. S. Baptista, M. P. Barroso, P. Carneiro, P. Cordeiro, N. Costa, . . . G. Perestrelo (édit.), *Occupational safety and hygiene VI* (p. 7-11). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351008884-2

Viegas, C., Caetano, L. A., Cox, J., Korkalainen, M., Haines, S. R., Dannemiller, K. C., . . . Reponen, T. (2020). The effects of waste sorting in environmental microbiome, THP-1 cell viability and inflammatory responses. *Environmental Research*, *185*, article 109450. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109450

Viegas, C., Caetano, L. A. et Viegas, S. (2021). Occupational exposure to Aspergillus section Fumigati: Tackling the knowledge gap in Portugal. *Environmental Research*, *194*, article 110674. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110674

Viegas, C., Faria, T., dos Santos, M., Carolino, E., Gomes, A. Q., Sabino, R. et Viegas, S. (2015). Fungal burden in waste industry: An occupational risk to be solved. *Environmental Monitoring and Assessment*, *187*(4) article 199. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4412-y

Viegas, C., Faria, T., Monteiro, A., Caetano, L., Carolino, E., Quintal Gomes, A. et Viegas, S. (2018). A novel multi-approach protocol for the characterization of occupational exposure to organic dust: Swine production case study. *Toxics*, *6*(1), article 5. https://doi.org/10.3390/toxics6010005

Viegas, C., Pena, P., Dias, M., Gomes, B., Cervantes, R., Carolino, E., . . . Viegas, S. (2022). Microbial contamination in waste collection: Unveiling this Portuguese occupational exposure scenario. *Journal of Environmental Management*, *314*, article 115086. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115086

Viegas, C., Twarużek, M., Dias, M., Almeida, B., Carolino, E., Soszczyńska, E., ... Caetano, L. A. (2020). Cytotoxic effect of filtering respiratory protective devices from the waste sorting industry: Is in vitro toxicology useful for risk characterization? *Environmental Research*, *191*, article 110134. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110134

Viegas, S., Viegas, C., Martins, C. et Assunção, R. (2020). Occupational exposure to mycotoxins: Different sampling strategies telling a common story regarding occupational

studies performed in Portugal (2012–2020). *Toxins*, *12*(8), article 513. https://doi.org/10.3390/toxins12080513

Von Essen, S. et Donham, K. (1999). Illness and injury in animal confinement workers. *Occupational Medicine*, *14*(2), 337-350.

Wingert, L., Debia, M., Hallé, S. et Marchand, G. (2022). Occupational microbial risk among embalmers. *Atmosphere*, *13*(8), article 1281. https://doi.org/10.3390/atmos13081281

Wingert, L., Gervais, N., Debia, M., Marchand, G. (2026). Performance of cabin air filters used in waste collection trucks. J Air Waste Manag Assoc., 22, 1-14. https://doi.org/10.1080/10962247.2025.2596024

Wouters, I. M., Hilhorst, S. K. M., Kleppe, P., Doekes, G., Douwes, J., Peretz, C. et Heederik, D. (2002). Upper airway inflammation and respiratory symptoms in domestic waste collectors. *Occupational and Environmental Medicine*, *59*(2), 106-112. https://doi.org/10.1136/oem.59.2.106

Wouters, I. M., Spaan, S., Douwes, J., Doekes, G. et 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. *Annals of Occupational Hygiene*, *50*(1), 39-53. https://doi.org/10.1093/annhyg/mei047

Xu, B.; Wu, Y.; Lin, Z.; Chen, Z. (2014). Investigation of Air Humidity Affecting Filtration Efficiency and Pressure Drop of Vehicle Cabin Air Filters. *Aerosol Air Qual. Res.*, *14* (3), 1066–1073. https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.06.0204

Xu, B.; Liu, S.; Liu, J.; Zhu, Y. (2011). Effects of Vehicle Cabin Filter Efficiency on Ultrafine Particle Concentration Ratios Measured In-Cabin and On-Roadway. *Aerosol Sci. Technol.*, *45* (2), 234–243. https://doi.org/10.1080/02786826.2010.531792