

# Exposition des travailleurs aux substances chimiques et aux contaminants biologiques dans les usines de biométhanisation des matières organiques putrescibles – Évaluation exploratoire



Jacques Lavoie; Geneviève Marchand; Yves Cloutier; Yves Beudet (*IRSST*)  
Joseph Zayed (*Université de Montréal et IRSST*); Bouchra Bakhiyi (*Université de Montréal*)  
Caroline Duchaine; Marc Veillette; Marie-Eve Dubuis; Hamza MBareche (*Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec*).

## Introduction

- ✓ La décomposition des matières organiques putrescibles (MOP) dans les sites d'enfouissement traditionnels produit d'importantes émissions de gaz à effet de serre (GES), principalement du méthane dont le potentiel de réchauffement climatique est 25 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).
- ✓ La gestion responsable des MOP est devenue une priorité tant sur les plans politique qu'environnemental pour une grande majorité de pays.
- ✓ La biométhanisation est un procédé de transformation anaérobie des matières organiques putrescibles (MOP) en biogaz et en digestat destiné à l'épandage en milieu agricole .
- ✓ Ce procédé est en forte croissance en raison de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles qui prévoit le bannissement de l'enfouissement des MOP, et ce, dès 2020.

# Étapes de procédé de la biométhanisation

## ✓ Étape 1 : Réception, entreposage et prétraitement

## ✓ Étape 2 : Chargement des digesteurs, digestion anaérobique avec formation de biogaz et de digestat

- Le processus de biométhanisation se déroule en quatre étapes distinctes que sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse
- Les conditions sont dites mésophiles si la température est entre 30 et 40 °C et thermophiles si elle est entre 50 et 65 °C
- Les autres paramètres sont le temps de séjour, le pH, l'humidité, etc.

## ✓ Étape 3 : Traitement et valorisation

- Épuration du biogaz, vidange, séchage, entreposage ou compostage du digestat
- Les eaux de procédé peuvent être exploitées en tant que matières fertilisantes ou traitées avant d'être rejetées dans le réseau d'égouts municipaux

## Objectifs

### ✓ Objectif général :

- évaluer de manière exploratoire l'exposition ambiante aux substances chimiques et aux agents biologiques des travailleurs oeuvrant dans des usines de biométhanisation des matières organiques putrescibles (MOP) au Québec.

### ✓ De manière plus spécifique :

- détecter la présence et mesurer les concentrations de micro-organismes cultivables et totaux ainsi que de contaminants chimiques (composés organiques volatils totaux et spécifiques, poussières totales, certains métaux et gaz);
- apprécier le risque potentiel que représentent les différentes concentrations obtenues sur la santé des travailleurs.

## Méthodologie 1/5

- ✓ **Deux unités de biométhanisation :**
  - l'une opérant en condition mésophile (entre 30-40°C)
  - l'autre opérant en condition thermophile (entre 50 et 60°C)
  
- ✓ **Deux périodes d'échantillonnage :** été et hiver
  
- ✓ **Sites de prélèvements :** endroits où les **MOP et le digestat sont manipulés** (confirmés par des visites préliminaires des deux unités de biométhanisation)

## Méthodologie - Données techniques 2/5

Unité de BM	Nombre d'habitants	Nombre de travailleurs		Quantités de MOP <sup>1</sup> traitées le jour de l'échantillonnage (tonnes)		Quantités de MOP traitées/an (tonnes/an)	Nombre et volume des trémies (m <sup>3</sup> )	Nombre et volume des citernes <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> )	Nombre de jours dans les digesteurs	Nombre et volume de digesteurs (m <sup>3</sup> )	Quantité de biogaz produite par année (m <sup>3</sup> /an)
		Été	Hiver	Été	Hiver						
A	54 600 +	A1: 3	A1: 3	30,6	25	40 000	2 trémies de 25 chacune	2 x 30	26	3 x 1600	13 000 000
		A2: 4	A2: 4								
B	118 000	6 (3 P + 3 C) <sup>3</sup>	6 (3 P + 3 C) <sup>3</sup>	10	~20	27 200	1 trémie de 125	3 x 90	30 à 50 jours (15-20 prévus)	1 x 1000 et 3 x 2000	3 000 000

(BM, biométhanisation; MOP, matières organiques putrescibles)

<sup>1</sup> Les MOP proviennent de résidus de bac bruns et d'épicerie

<sup>2</sup> Les citernes stockent le substrat issu du prétraitement des MOP (« réservoir tampon » pour l'usine B)

<sup>3</sup> P, permanents ; C, contractuels

Unité A: Défense de composter du 1er décembre au 31 mars

# Méthodologie - Plan d'échantillonnage 3/5

## ➤ PRÉLÈVEMENTS EN POSTES FIXES DES CONTAMINANTS CHIMIQUES

- **Gaz** [méthane ( $\text{CH}_4$ ), anhydre carbonique ( $\text{CO}_2$ ), monoxyde de carbone (CO), hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), oxydes d'azote (NO,  $\text{NO}_2$ )]

Instruments à lecture directe

- **Composés organiques volatiles totaux (COV totaux)**

Détecteurs par photoionisation

- **COV spécifiques** (3 carène,  $\alpha$  et  $\beta$  pinène, limonène et éthanol)

Tubes de charbons actifs

- **Métaux** [Plomb (Pb), nickel (Ni), cadmium (Cd), Arsenic (As)]

Filtres en ester de cellulose, analyse par spectrophotométrie par absorption atomique

- **Matières particulaires totales (Poussière totales)**

Cassette ACUCAP munies de filtres en PVC

# Méthodologie - Plan d'échantillonnage 4/5

## ➤ PRÉLÈVEMENTS EN POSTES FIXES DES CONTAMINANTS BIOLOGIQUES

### 1) Bioaérosols viables (flore cultivable)

#### *Bactéries et moisissures mésophiles*

Impacteurs Andersen à 6 étages, décompte des **bactéries mésophiles** sur gélose TSA (Trypto-Caseine Soja) + Amphotericine B et des **moisissures mésophiles** sur MEA (Malt Extract Agar) + Chloramphenicol

#### *Thermo-actinomycètes et moisissures thermo-tolérantes (*Aspergillus fumigatus*)*

Impacteurs SAS (Super Air Sampler) Duo, MAS (Microbial Air Sampler) 100 et Andersen version N-6, décompte sur gélose par la mesure de trous positifs  
Échantillonneur Coriolis  $\mu$  pour les moisissures thermo-tolérantes

#### *Endotoxines*

Cassettes munies de membrane de fibre de verre, quantification par la méthode du LAL (Limulus Amebocyte Lysate)

# Méthodologie - Plan d'échantillonnage 5/5

## ➤ PRÉLÈVEMENTS EN POSTES FIXES DES CONTAMINANTS BIOLOGIQUES (Suite)

### 2) Bioaérosols totaux (flore totale par biologie moléculaires)

Échantillonneurs Coriolis et SASS 3100 - Extraction d'ADN

**Analyse par PCR quantitative** (réaction en chaîne par polymérase en temps réel)

Bactéries mésophiles totales, moisissures mésophiles genres *Penicillium* et *Aspergillus*, ainsi que des **marqueurs de risques pour la santé humaine** (*Legionella* spp, *Legionella pneumophila*, *Saccharopolyspora rectivirgula*, *Aspergillus fumigatus* et *Mycobacterium non tuberculeux*)

**Amplification et séquençage de 2e génération** : biodiversité bactérienne et fongique

Utilisation d'un séquenceur de 2<sup>e</sup> génération à la plateforme de séquençage de l'Institut de biologie intégrative et des systèmes (IBIS) de l'Université Laval.

## ➤ MESURE DE LA GRANULOMETRIE ET DES BIOAEROSOLS TOTAUX

UV-APS TSI 3314, granulomètre aérodynamique à fluorescence pour la mesure de la **granulométrie** et l'analyse en temps réel de la **quantité** de particules aérogènes d'origine biologiques.

# Sites d'échantillonnage

Unité opérant en condition  
mésophile

Unité opérant en condition  
thermophile

## USINE A1

(prétraitement des MOP)

- **Réception** des MOP (déchargement des camions)
- **Prétraitement** des MOP (*brassage-broyage*)
- **Maturation** du digestat (plateau de compostage)\*
- **Bruit de fond extérieur\*\***

## USINE A2

(Traitement des eaux usées et digestion anaérobique)

- Salle des **filtres presse** (*déshydratation du digestat* = digestion des MOP prétraitées et boues eaux usées)
- **Vidange des boues** (digestat déshydraté)
- **Bruit de fond extérieur\*\***

## USINE B

- **Réception** et prétraitement des MOP (*déchargement - brassage - broyage*)
- **Réservoir tampon** (*ultime broyage avant digestion anaérobique*)
- **Bruit de fond extérieur\*\***

ÉTÉ

28 juillet 2015

30 juillet 2015

26 août 2015

HIVER

26 janvier 2016

27 janvier 2016

10 février 2016

\* Échantillonnage uniquement en été, pas de compostage du 1<sup>er</sup> décembre au 31 mars

\*\* Échantillonnage uniquement en été en raison des températures sous le point de congélation

## Usine A1



**Vidange MOP  
camion-benne**



**Brassage mécanique**



**Broyeur/séparateur**

## Usine A2



Salle filtres presse

Vidange boues



Camion de  
chargement de  
boues



## Usine B

### Broyeur/séparateur



Benne de réception,  
brassage mécanique



Réservoir tampon

## Résultats contaminants chimiques 1/3

**TOUTES LES VALEURS DES CONCENTRATIONS DES CONTAMINANTS CHIMIQUES SONT INFÈRIEURES AUX VEMPs** (valeurs d'exposition moyennes pondérées) respectifs de chacun des contaminants pour les usines A1, A2 et B –

**Toutefois**, les concentrations de certains contaminants sont **supérieures aux valeurs minimales rapportées (VMR)** ou limites de détection.

## Résultats contaminants chimiques 2/3

### Usines A1 et A2

Contaminant	VMR <sup>1</sup>	Site d'échantillonnage	Concentration maximale mesurée	Usine	Observation
Ammoniac	<b>0,5 ppm</b>	Réception	Été: <b>2 ppm</b> - Hiver: 1 ppm	<b>A1</b>	Demeure inférieure à la VEMP de 25 ppm définie par la RSST [8h de travail/j - 5j/ semaine].
		Salle filtres presse	Été: <b>2 ppm</b>	<b>A2</b>	
		Aire de vidange boues	Été: <b>4 ppm</b> - Hiver: 1 ppm		
COV <sup>2</sup> totaux	<b>0,05 ppm</b>	Réception	Été: <b>2 ppm</b> – Hiver: 0,5 ppm	<b>A1</b>	Bien que faible, démontre la présence de COV totaux.
Limonène (COV terpénique)	<b>0,2 mg/m3</b>	Prétraitement	Hiver: <b>1,0 et 1,2 mg/m3</b>	<b>A1</b>	Due à la présence de restants de fruits et légumes
Poussières totales	<b>0,1 mg/m3</b>	Réception	Été: 0,15 mg/m3	<b>A1</b>	À l'état de trace.
		Maturation	Été: 0,16	<b>A1</b>	
		Salle filtres presse	Été: 0,26	<b>A2</b>	
Monoxyde de carbone	<b>0,5 ppm</b>	Prétraitement	Été: <b>10 ppm</b>	<b>A1</b>	Due à la circulation d'une chargeuse remplie de MOP. VEMP est de 35 ppm
Dioxyde de carbone	<b>300 ppm</b>	Prétraitement	Hiver: <b>1260 ppm</b>	<b>A1</b>	Due à la circulation d'un chariot élévateur alimentée au gaz propane

<sup>1</sup> Valeur minimale rapportée – <sup>2</sup> Composés organiques volatiles

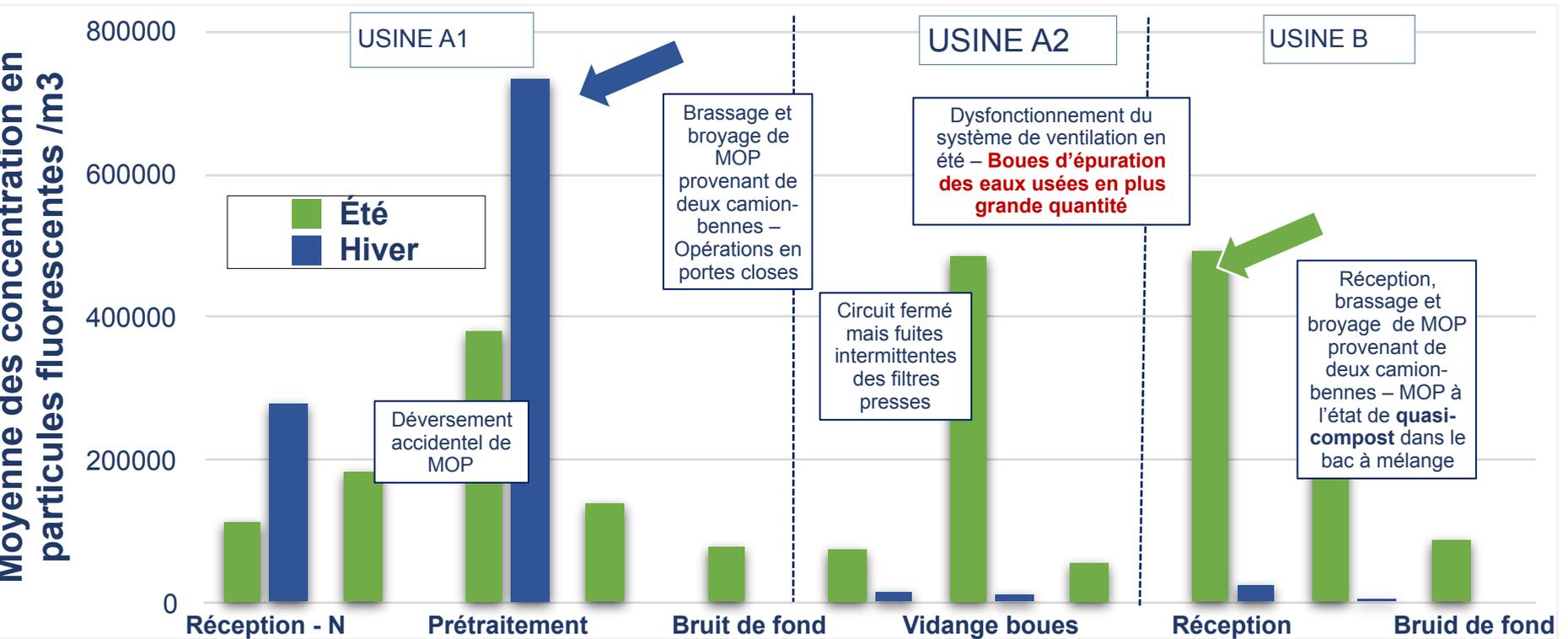
## Résultats contaminants chimiques 3/3

### Usine B

Contaminant	VMR <sup>1</sup>	Site d'échantillonnage	Concentration mesurée	Observation
Ammoniac	0,5 ppm	Réception	Été: 2,2 ppm - Hiver : 1,4 ppm	Demeure inférieure à la VEMP de 25 ppm définie par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail [RSST - 8h de travail/j - 5j/ semaine].
		Tampon	Été: 2 ppm – Hiver : 1 ppm	
COV <sup>2</sup> totaux	0,05 ppm	Réception	Été: 3 ppm – Hiver : 0,5 ppm	Bien que faible, démontre la présence de COV totaux.

<sup>1</sup>Valeur minimale rapportée – <sup>2</sup> Composés organiques volatiles

## Résultats bioaérosols totaux - UV APS – 1/3



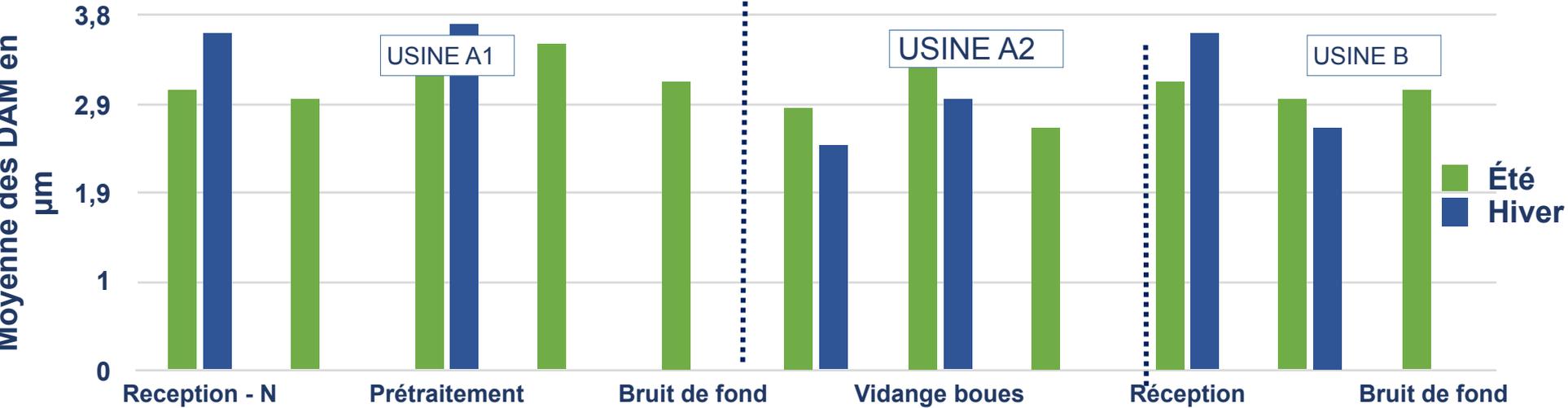
**Résultats bioaérosols totaux**  
**Tests statistiques pour particules fluorescentes (PF)**  
**2/3**

- **Les concentrations des PF sont statistiquement plus élevées dans l'usine A1. Aucune différence entre usines A2 et B.**
- **Les différences aux niveaux des concentrations en PF sont statistiquement significatives :**
  - **Usine A1 :** entre les saisons (**hiver plus élevé que l'été**) et entre les départements (**prétraitement plus élevé que la réception, été comme hiver**)
  - **Usine A2 :** entre les saisons (**été plus élevé que l'hiver**) et entre les départements en été (**vidange des boues plus élevé que filtres presse**)
  - **Usine B :** entre les saisons (**été plus élevé que l'hiver**) et entre les départements (**réception plus élevé que réservoir tampon en hiver**)

**Résultats bioaérosols totaux**  
**Tests statistiques sur les PF pour les activités**  
**3/3**

<b>Usine</b>	<b>Action statistiquement significative sur les concentrations de particules fluorescentes</b>
<b>A1</b>	Arrosage plancher Arrosage de la MOP Brassage manuel de la MOP dans la benne basculante Ouvertures des portes
<b>A2</b>	Giclage depuis les filtres presses Actionnement de piston au-dessus du local de vidange des boues
<b>B</b>	Remplissage de la benne par de la MOP Arrosage de la MOP dans la benne Opérations de brassage mécanique

## Résultats bioaérosols totaux Profils granulométriques particules fluorescentes

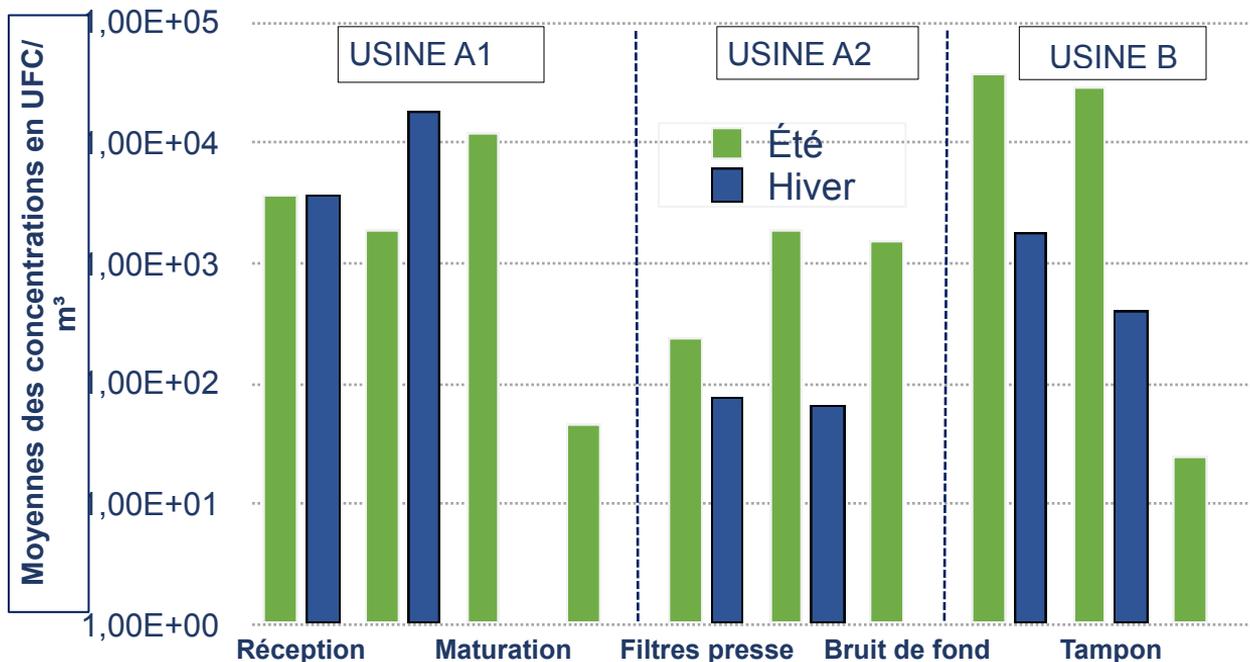


Les moyennes des diamètres aérodynamiques médians (DAM) des particules fluorescentes **demeurent inférieures à 5  $\mu\text{m}$ , été comme hiver**.

➡ les bioaérosols émis dans l'air dans les différents sites de prélèvement sont de nature respirables et peuvent se déposer dans les zones profondes du poumon des travailleurs présents dans ces lieux.

## Résultats bioaérosols cultivables 1/4

### Bactéries mésophiles



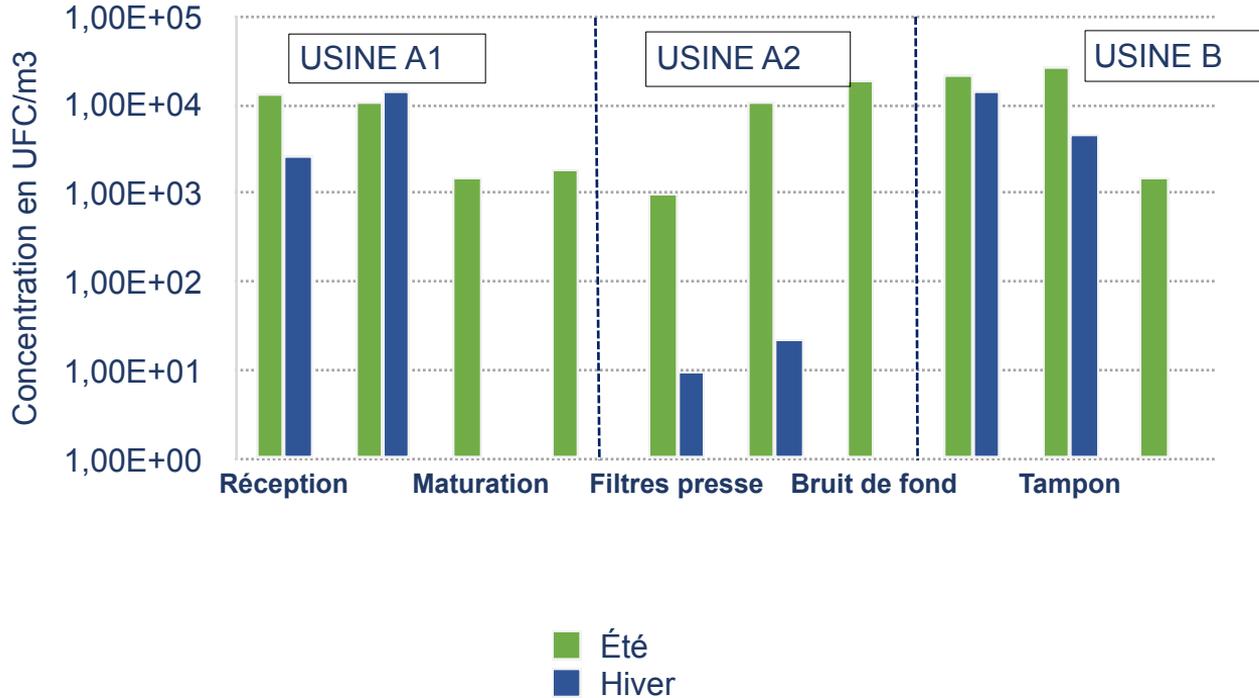
Concentrations **supérieures à la valeur guide d'exposition de 10 000 UFC/m<sup>3</sup>** pour une période de huit heures (valeur guide IRSST) :

- dans l'**aire de prétraitement** de l'usine A1, en hiver;
- les zones de **réception et mise en réservoir tampon** de l'usine B, en été.

UFC/m<sup>3</sup>: Unités Formatrices de Colonies par mètre cube

## Résultats bioaérosols cultivables 2/4

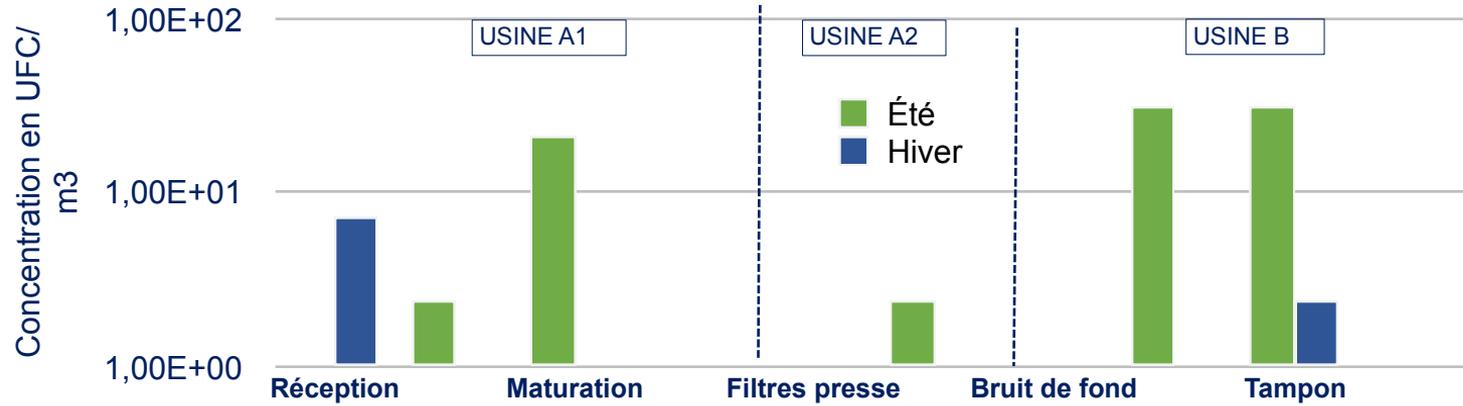
### Moisissures mésophiles

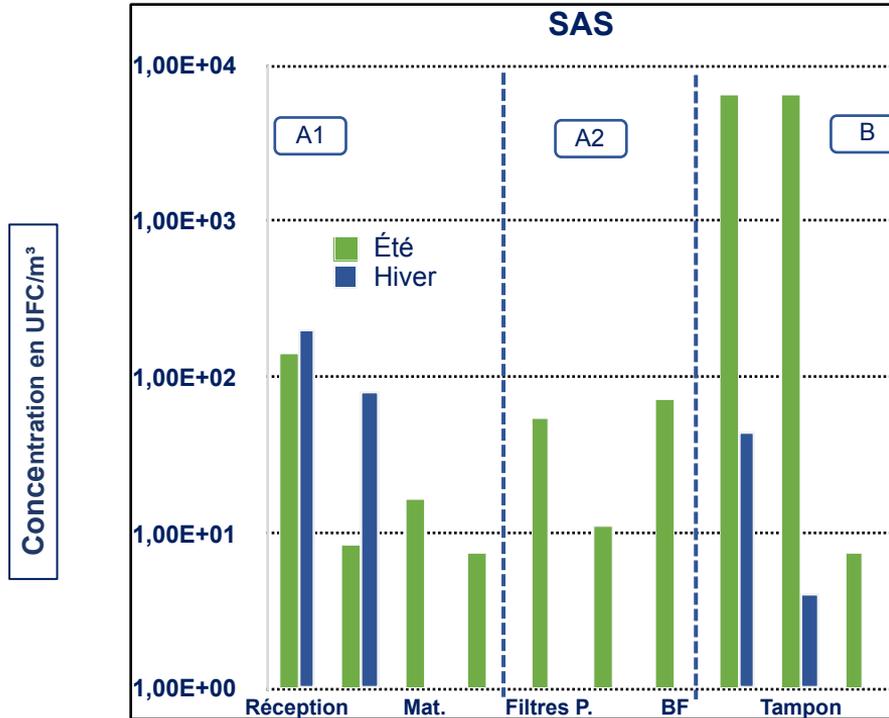


- Concentrations **supérieures à la valeur guide d'exposition de 1 000 UFC/m<sup>3</sup> pour une période de huit heures** dans :
  - Les aires de réception et prétraitement de l'usine A1 (sauf maturation), **en été et en hiver**;
  - Les zones de réception et de mises en réservoir tampon de l'usine B, **en été**.
- **Bruit de fond élevé pour l'usine A2** certainement due aux activités dans la cour intérieure (circulation de camions, vidanges de fosses septiques, etc.)

## Résultats bioaérosols cultivables 3/4

### Thermoactinomycètes

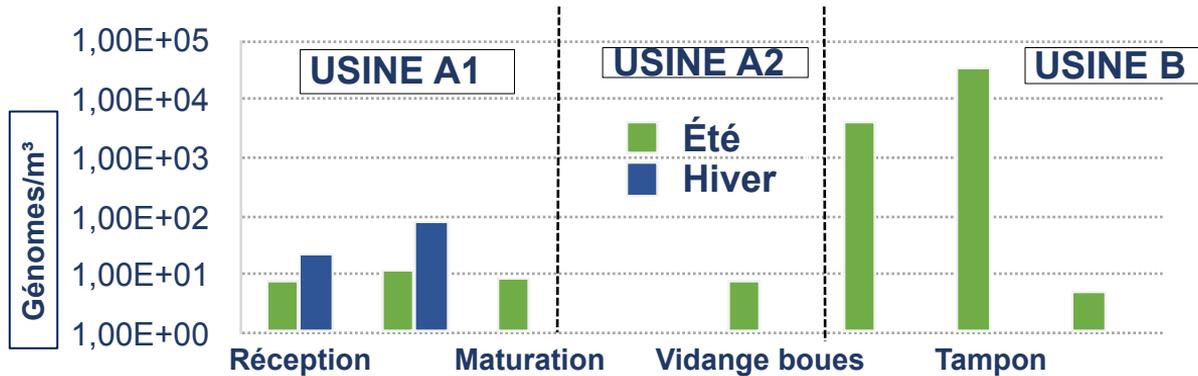




- Concentrations plus élevées dans:
- l'usine B, en été
- **Bruit de fond relativement élevé dans l'usine A2** (due probablement aux activités dans la cour intérieure (remise en suspension))

## Analyse par PCR quantitative 1/4

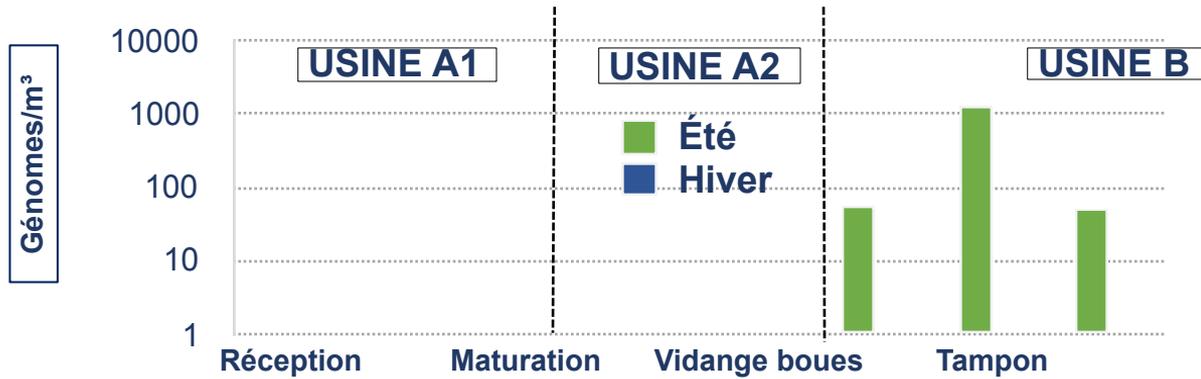
### *Aspergillus fumigatus*



**Présence de *A. fumigatus* dans les trois usines, en concentrations toutefois relativement élevées dans l'usine B en été.**

## Analyse par PCR quantitative 2/4

### *Saccharopolyspora rectivirgula*

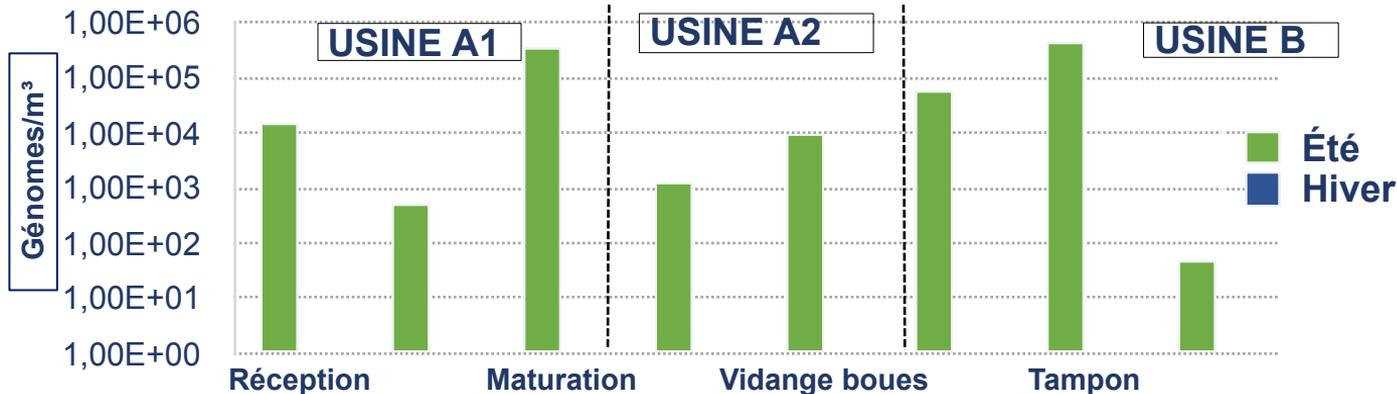


Concentrations relativement élevées *S. rectivirgula* dans l'usine B, en été

Des concentrations comprises entre 20 000 et 300 000 spores/m<sup>3</sup> seraient requises pour provoquer des irritations nasales et de la toux chez les travailleurs exposés

## Analyse par PCR quantitative 3/4

### *Mycobactéries non tuberculeuses*



**Concentrations relativement élevées** de mycobactéries dans les trois usines, en été

## Analyse par PCR quantitative 4/4

### *Legionella sp.*

Site de prélèvement		Concentration (génomés/m <sup>3</sup> )	
		Été	Hiver
Usine A1	Réception	Présence	Présence
	Prétraitement	Présence	Présence
	Maturation	Présence	
Usine A2	Filtres presse	Présence	Présence
	Vidange boues	3,64 x 10 <sup>1*</sup>	-
Usine B	Réception	-	Présence
	Tampon	Présence	Présence

#### Présence de *Legionella sp* dans les trois usines.

\* Vidange d'un mélange de boues issues de MOP digérées et d'eaux usées traitées, quantités plus importantes en été comparées à l'hiver.

- Valeur seuil : 5 génomés/m<sup>3</sup>

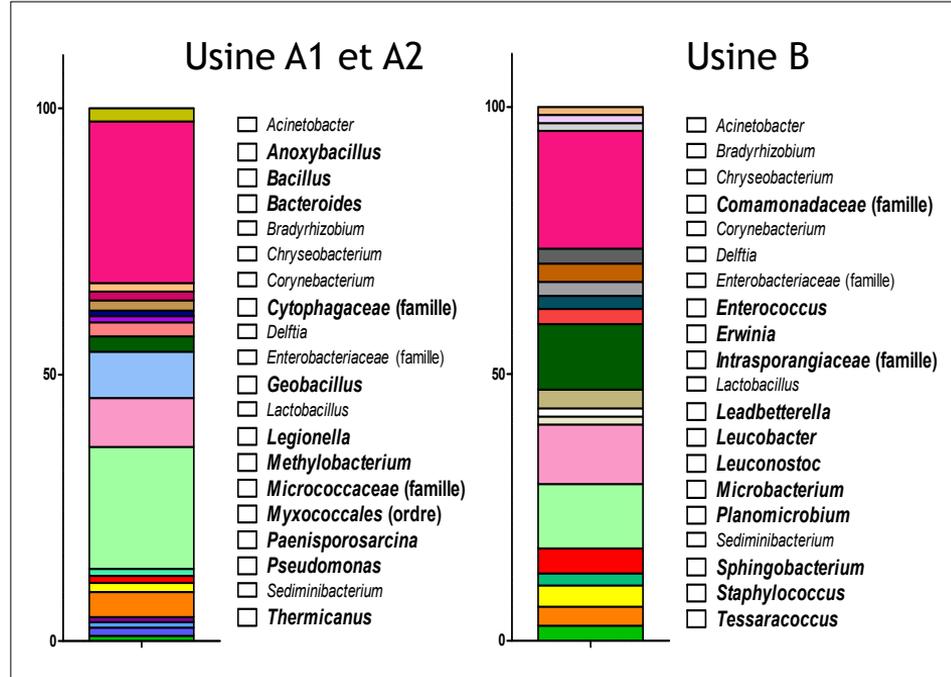
## Endotoxines

Usine	Site	Concentration en été (UE/m <sup>3</sup> )	Écart-type	Concentration en hiver(UE/m <sup>3</sup> )	Écart-type
Usine A1	Réception	<1,45	0	29,42	13,16
	Traitement	<1,43	0	3,91	3,97
	Maturation	4,65	0,21	<1,41	0
	Bruit de fond	<1,50	-	<2,13	-
Usine A2	Filtres presse	<1,20	0	<1,25	0
	Vidange boues	5,48	5,12	<1,25	0
	Bruit de fond	<1,25	-	-	-
Usine B	Réception	53,21	33,12	2,01	0,50
	Tampon	68,22	17,76	1,72	0
	Bruit de fond	< 1,53	-	-	-

UE/m<sup>3</sup> : unités d'endotoxines par mètre cube d'air

Concentrations en endotoxines ne **dépassant pas la recommandation de 90 UE/m<sup>3</sup> pour une période de huit heures** dans l'usine B en été, valeur définie par le Comité d'experts néerlandais sur les normes professionnelles du Conseil National de la Santé

## Biodiversité bactérienne

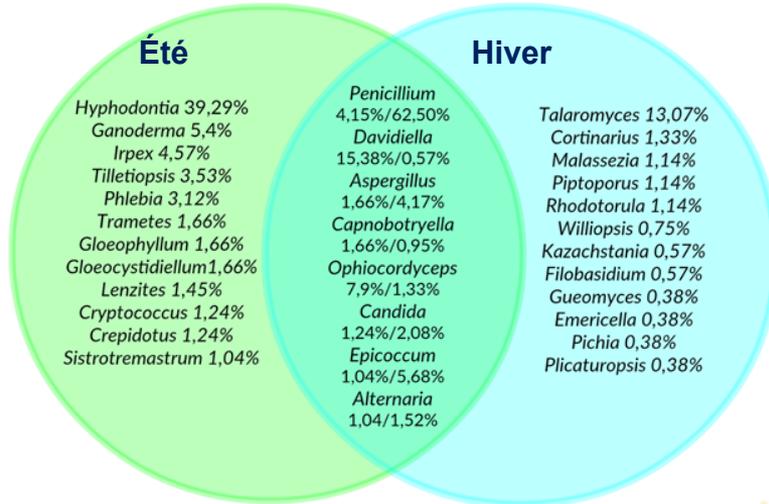


Présence de bactéries pathogènes telles la *Legionella*, les *Bacteroides*, les *Staphylococcus (aureus)*, les *Clostridium* (pas tous), les *Pseudomonas* et les *Sphingobacterium*

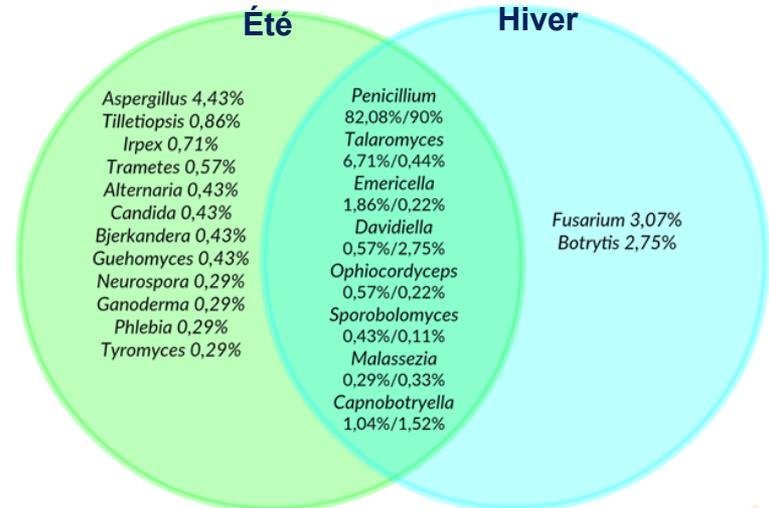
# Biodiversité fongique

## Diagrammes de Venn

### Usine A1 et A2



### Usine B



Des moisissures avec une activité allergène et/ou pathogène opportuniste connues ont été détectées : *Aspergillus*, *Malassezia*, *Emericella*, *Fusarium*, *Acremonium* et la levure *Candida*

## Limites et contraintes de l'étude

- Les usines A1,A2 et B ne fonctionnaient pas à plein régime (**période de rodage**), ne traitant donc pas la totalité de la quantité de MOP telles que visées par leurs objectifs.
- Toutes les opérations n'étaient pas en fonction : plateau de maturation du compost presque vide dans l'usine A1 en été, pas d'étapes de post-digestion dans l'usine B (sortie des digesteurs, post-traitement et maturation du compost).

Toutefois, des **constats importants se dégagent**, tenant compte des conditions de travail qui prévalaient lors des échantillonnages, et sont d'autant pertinentes que de plus grandes quantités de MOP seront manipulées et traitées dans le futur par ces usines.

## Conclusion 1/2

### ■ **CONTAMINANTS CHIMIQUES : absence de risque à la santé.**

1) Les **concentrations de contaminants chimiques d'intérêt** durant les **manipulations de MOP fraîches (réception, brassage, broyage) et du dérivé composté du digestat**, surtout lorsqu'il provient à la fois de MOP et de boues d'épuration des eaux usées, sont :

- **Ammoniac** (gaz irritant),
- **CO** (gaz asphyxiant) et **CO<sub>2</sub>** (baisse de la teneur en oxygène dans les locaux fermés) provenant des engins motorisés
- **Le H<sub>2</sub>S** devrait également être monitoré dans ces usines.

2) S'assurer d'un **taux de ventilation élevée** surtout dans les **locaux fermés** et lors de **la circulation d'engins motorisés** dans les aires de travail. Les engins motorisés doivent également être bien ajustés.

## Conclusion 2/2

- **CONTAMINANTS BIOLOGIQUES : risques potentielles à la santé des travailleurs.**
  - ✓ Exposition potentielle des travailleurs, durant les manipulations des MOP fraîches et dérivé composté du digestat déshydraté à une **charge relativement élevée de bioaérosols.**
  - ✓ Charge en bactéries mésophiles viables généralement sous la valeur guide IRSST de 10 000 UFC/m<sup>3</sup> quoique **des dépassements aient été mesurés dans les aires de brassage et broyage des MOP.**
  - ✓ Les moisissures mésophiles viables sont supérieures à la valeur guide de 1 000 UFC/m<sup>3</sup> **dans la majorité des départements.**
  - ✓ Présence de **microorganismes potentiellement pathogènes** tels que les Légionelles, *Aspergillus fumigatus*, *Saccharopolyspora rectivirgula* et les mycobactéries non tuberculeuses.

**→ Protections respiratoires et cutanées des travailleurs recommandées, surtout durant les activités de réception, de brassage et de broyage des MOP.**

### Rapports IRSST :

- Bakhiyi, B., Marchand, G., Cloutier, Y., Beaudet, Y., Veillette, M., Dubuis, M-E., Mbareche, H., Zayed, J., Duchaine, C., Lavoie, J. (2018). *Exposition des travailleurs aux substances chimiques et aux agents biologiques dans les usines de biométhanisation des matières organiques putrescibles – Évaluation exploratoire* (Rapport n° R-1023). Montréal, QC: IRSST.

## Publications 2/2

### Publications scientifiques:

- Mbareche, H., Veillette, M., Dubuis, M-E., Bakhiyi, B., Zayed J., Lavoie, J., Bilodeau, G. J., Duchaine, C. Fungal Exposure in Biomethanization facilities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68, 2018.
- Dubuis, M.-E., Mbareche, H., Veillette, M., Bakhiyi, B., Zayed, J., Lavoie, J., Duchaine, C. (2017). Bioaerosols concentrations in working areas in biomethanization facilities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(11), 1258-1271.

## communications

- Marchand, G., Cloutier, Y., Veillette M., Bonifait L., Bakhiyi B., Beaudet, Y., Pépin C. , Légaré É., Dubuis M.-É., MBareche H., Bernard Y., Zayed, J., Duchaine C., Lavoie, J. (2017). *Le compostage et la biométhanisation sont positifs pour l'environnement mais qu'en est-il pour les travailleurs?* Communication présentée au 39<sup>e</sup> Congrès annuel de l'AQHSST : prévenir au quotidien, nouveaux enjeux, nouveaux défis, Victoriaville.
- Marchand, G., Cloutier, Y., Lavoie, J., Zayed, J., Bakhiyi, B., Bernard, Y., MBareche, H., Dupuis, M.-É., Veillette, M., Duchaine, C. (2017). *Use of microbial indicators to evaluate the microbiological occupational risk during organic waste treatment by composting and biomethanization.* Communication présentée à ASM Microbe 2017 Meeting, New-Orleans.
- Dubuis, M.-É., MBareche, H., Veillette, M., Cloutier, Y., Bakhiyi, B., Lavoie, J., Zayed, J., Duchaine, C. (2016). *Worker's exposure to bioaerosols in biomethanisation facilities.* Communication présentée à 4<sup>th</sup> Workplace and Indoor Aerosols Conference, Barcelone, Espagne.
- MBareche, H., Veillette, M., Bonifait, L., Marchand, G., Lavoie, J., Bilodeau, G., Duchaine, C. (2016). *A next generation sequencing approach for the study of fungal diversity in bioaerosols.* Communication présente à 4<sup>th</sup> Workplace and Indoor Aerosols Conference (Aerosols 2016), Barcelone, Spain.

**Merci de votre attention!**

