

Réduire l'exposition des travailleurs aux gaz, odeurs, poussières et agents pathogènes humains présents dans les bâtiments porcins

Matthieu Girard
Caroline Duchaine
Stéphane Godbout
Ariane Lévesque
Valérie Létourneau
Stéphane P. Lemay

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1074

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-080-2
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
octobre 2019

Réduire l'exposition des travailleurs aux gaz, odeurs, poussières et agents pathogènes humains présents dans les bâtiments porcins

Matthieu Girard¹, Caroline Duchaine^{2,3}, Stéphane Godbout¹, Ariane Lévesque¹, Valérie Létourneau² et Stéphane P. Lemay¹

¹ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

² Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie du Québec – Université Laval (CRIUCPQ-U.Laval)

³ Département de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1074



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 site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière d'Agrivita Canada Inc. (Programme canadien de recherche appliquée en agrosécurité, Agriculture et Agroalimentaire Canada) et de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). L'équipe de recherche reconnaît aussi la contribution financière du gouvernement du Canada à travers le Programme Agri-innovation, volet Activités de recherche et développement dirigées par l'industrie.

Des remerciements s'adressent également à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et au Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec (CRIUCPQ - Université Laval) pour leur importante contribution lors de la réalisation de cette étude. Les auteurs remercient les participants au projet et reconnaissent l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et du CRIUCPQ - Université Laval, dont Jérémie Tremblay Gravel, Christian Gauthier, Jonathan Pilote, Émilie Blouin-Verroeuilst et Antoine Lamontagne.

SOMMAIRE

Les éleveurs de porcs du Québec sont quotidiennement exposés à d'importantes quantités de gaz, d'odeurs, de poussières et de bioaérosols. Par conséquent, ils sont à risque de développer des problèmes respiratoires (ex. asthme) ainsi que des maladies infectieuses telles qu'une méningite à *Streptococcus suis*. Le risque de développer un problème de santé est lié au nombre d'heures passées à l'intérieur des bâtiments d'élevage ainsi qu'aux concentrations des différents contaminants. De plus, les travailleurs peuvent être en contact avec des bactéries résistantes aux antibiotiques soit des bactéries sélectionnées par l'emploi d'agents antimicrobiens utilisés lors de l'engraissement des animaux. Finalement, de par l'inhalation des bioaérosols, la flore nasopharyngée des éleveurs de porcs peut contenir des bactéries ou des gènes de résistance aux antibiotiques présents dans l'air des bâtiments d'élevage. Actuellement, le risque d'exposition par l'air et celui d'une colonisation des éleveurs de porcs québécois à certains agents pathogènes humains ou à des bactéries résistantes au zinc et à des antibiotiques d'importance pour la santé des travailleurs est inconnu.

Plusieurs technologies permettent de diminuer les concentrations de gaz, d'odeurs ou de poussières à l'intérieur des bâtiments, mais il n'y a aucune donnée ni sur la réduction des bioaérosols ni sur l'effet synergique de leur combinaison. L'objectif général de la présente recherche consistait à proposer à l'industrie porcine du Québec une solution efficace et économiquement viable de réduction des contaminants de l'air, afin de protéger la santé de ses travailleurs.

Les résultats de ce projet ont permis de démontrer la présence de plusieurs pathogènes humains et de gènes de résistance à la fois dans les bâtiments d'élevages porcins et dans la flore nasopharyngée des travailleurs. L'air des dix élevages de porcs du Québec à l'étude comportait d'importantes concentrations en poussières totales, en endotoxines et en bactéries cultivables et totales. Les concentrations en poussières totales n'ont toutefois jamais été supérieures à celle normée par la [Loi sur la santé et la sécurité du travail](#), soit 10 mg/m³. Parmi les agents pathogènes humains, *S. aureus* a été le plus fréquemment trouvé dans les bioaérosols des dix élevages de porcs, et contrairement aux autres bactéries à l'étude, à des quantités semblables d'un bâtiment à un autre. Les autres pathogènes analysés (*Salmonella* spp., *C. difficile* et *M. avium*) ont tous été trouvés dans l'air des porcheries, mais moins fréquemment que *S. aureus*. Les gènes de résistance au zinc et au cadmium (*czrC*) se retrouvaient dans les bioaérosols de tous les élevages de porcs. La présence de gènes de résistance *bla*_{CTX-M-1} (bêta-lactamase à spectre étendu) dans l'air de 60 % des élevages est problématique d'un point de vue de la santé publique considérant que les céphalosporines de 3^e génération, des bêta-lactames, sont employées dans les hôpitaux afin de soigner de sévères infections telles que les méningites bactériennes. Finalement, des gènes de résistance à la colistine ont aussi été détectés dans 60 % des porcheries échantillonnées.

La présence d'agents pathogènes humains et de gènes de résistance au zinc et aux antibiotiques a été évaluée par PCR dans la flore nasopharyngée de producteurs de porcs et de sujets non exposés. L'analyse des résultats a révélé une prévalence plus élevée des différents agents biologiques chez les éleveurs. De plus, il a été possible d'établir une corrélation entre la diversité bactérienne de la flore nasopharyngée des travailleurs de porcheries et celle des bioaérosols trouvés dans les bâtiments d'élevages porcins. Ces résultats sont parmi les premiers à corréler la composition microbienne de la flore nasopharyngée de personnes exposées avec celle de la source d'exposition.

Trois stratégies ont été testées seules et en combinaison pour réduire les gaz, les odeurs, les poussières et les bioaérosols : 1) la séparation à la source des phases liquide et solide des déjections, 2) l'aspersion d'huile, 3) la filtration de l'air sortant du bâtiment d'élevage. Les essais à l'échelle du laboratoire ont permis de démontrer que la séparation du lisier peut réduire la concentration d'ammoniac dans les bâtiments et que l'unité de traitement de l'air permet de diminuer davantage les émissions à la sortie du bâtiment. Pour les poussières et les bioaérosols, l'aspersion d'huile et la filtration de l'air ont présenté de très bonnes performances, mais leur combinaison n'a pas permis une réduction supplémentaire. Pour les odeurs, l'aspersion d'huile et la séparation du lisier ont permis une certaine réduction, mais c'est le système de traitement de l'air qui a été le plus efficace.

À la suite de l'analyse des résultats, un comité d'experts a conclu que, pour protéger à la fois la santé des travailleurs à l'intérieur des bâtiments et celle des résidents ruraux, les trois stratégies devraient être utilisées simultanément. Il n'a pas été possible de trouver un bâtiment existant adéquat pour valider ces technologies à l'échelle commerciale. Toutefois, des essais à l'échelle précommerciale ont permis de démontrer, en partie, le potentiel de la combinaison des trois stratégies pour la réduction des contaminants de l'air.

En conclusion, il a été possible de réduire significativement les contaminants de l'air dans les bâtiments porcins et les émissions dans l'environnement en combinant différentes stratégies. L'implantation de ces stratégies dans un bâtiment commercial permettrait de réduire les risques pour la santé des travailleurs. Cependant, pour favoriser leur adoption par les producteurs, il serait pertinent d'effectuer une analyse économique pour connaître le potentiel commercial de ces stratégies de réduction des contaminants de l'air.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1 Caractérisation des bioaérosols en bâtiment et risque pour la santé.....	3
2.2 Stratégies de réduction des contaminants de l'air et leurs effets	3
2.2.1 Les planchers lattés.....	4
2.2.2 La gestion des lisiers	4
2.2.3 L'aspersion d'huile.....	4
2.2.4 Le traitement de l'air	5
2.3 Besoin d'approfondir la recherche.....	5
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	7
3.1 Objectif 1	7
3.2 Objectif 2	7
3.3 Objectif 3	7
4. MÉTHODOLOGIE	9
4.1 Objectif 1 – Évaluation de la flore microbienne présente dans l'air.....	9
4.2 Objectif 2 – Sélection des stratégies de réduction des contaminants	13
4.2.1 Laboratoire de production porcine (BABE)	13
4.2.2 Stratégies de réduction.....	14
4.2.3 Méthodologie analytique.....	17
4.2.4 Calcul des émissions et des performances.....	18
4.2.5 Méthode statistique	19
4.3 Objectif 3 – Implantation de la combinaison optimale à échelle commerciale	20
4.3.1 Laboratoire de production porcine à échelle précommerciale	20
4.3.2 Stratégies de réduction.....	21
4.3.3 Méthodologie analytique.....	23
4.3.4 Calcul des émissions et des performances.....	25
4.3.5 Méthode statistique	25

5.	RÉSULTATS	27
5.1	Objectif 1 - Évaluation de la flore microbienne présente dans l'air	27
5.2	Objectif 2 - Sélection des stratégies de réduction des contaminants	31
5.2.1	Performance animale	31
5.2.2	Qualité de l'air dans les salles d'élevage	32
5.2.3	Émissions de contaminants dans l'environnement	35
5.3	Objectif 3 - Implantation de la combinaison optimale à l'échelle commerciale	37
5.3.1	Performance animale	37
5.3.2	Qualité de l'air dans les salles d'élevage	38
5.3.3	Émissions de contaminants dans l'environnement	41
6.	DISCUSSION	47
6.1	Objectif 1	47
6.2	Objectif 2	50
6.3	Objectif 3	51
7.	CONCLUSION.....	53
	BIBLIOGRAPHIE	55
	ANNEXE A EXPÉRIENCE COMPLÉMENTAIRE SUR LA NOUVELLE FORME DE LATTES.....	61
A.I	Résumé	61
A.II	Introduction.....	62
A.III	Matériel et méthodologie.....	63
A.III.I	Planchers lattés et leur profil	63
A.III.II	Salles d'élevage de porc	63
A.III.III	Mesure des émissions d'ammoniac.....	64
A.III.IV	Processus de lavage	66
A.III.V	Analyse statistique.....	66
A.IV	Résultats et discussion	67
A.V	Conclusion.....	69
A.VI	Remerciements.....	69
A.VII	Références	69
	ANNEXE B SCHÉMAS DES STRATÉGIES.....	71
B.I	Séparation du lisier – Gratte en V	71
B.II	Aspersion d'huile	72
B.III	Filtration de l'air - UTA	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Conditions de culture des agents pathogènes humains et des bactéries mésophiles.....	11
Tableau 2.	Amorces, sondes et thermoprotocoles pour la quantification PCR des bactéries totales, des agents pathogènes humains et des gènes de résistance	12
Tableau 3.	Stratégies de réduction des contaminants étudiées	15
Tableau 4.	Répartition des stratégies dans les salles (essai 1 – automne 2015)	16
Tableau 5.	Répartition des traitements (stratégies employées seules ou combinées) dans les salles (S1 à S8) durant les quatre élevages réalisés (E1 à E4).....	17
Tableau 6.	Répartition des traitements dans les salles 1 et 2 durant les deux élevages réalisés (E1 à E2)	21
Tableau 7.	Concentrations des agents pathogènes humains cultivables et totaux (qPCR).....	28
Tableau 8.	Concentrations des gènes de résistance au zinc/cadmium et à deux antibiotiques.....	29
Tableau 9.	Gain moyen et poids total dans chacune des salles lors des deux élevages.....	38
Tableau 10.	Concentrations en NH ₃ (moy. ± écart-type) comparées aux normes de la CNESST	38
Tableau 11.	Concentration moyenne (avec écart-type) de poussières pour chacune des stratégies étudiées, en comparaison avec le témoin	40
Tableau 12.	Pourcentage d'efficacité de réduction des poussières (moyenne ± écart- type, [min - max]) des différentes stratégies de réduction de contaminants de l'air	40
Tableau 13.	Pourcentage d'efficacité de réduction des endotoxines et des bactéries (moyenne ± écart-type, [min - max]) des différentes stratégies de réduction de contaminants de l'air	41
Tableau 14.	Comparaison relative des différentes technologies de réduction.....	50
Tableau 15.	Émissions de NH ₃ [moyenne (écart-type)] pour les planchers lattés en fonction du temps.....	67
Tableau 16.	Réduction des émissions de NH ₃ (%) pour les lattes avec entaille comparée aux lattes contrôles	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Échantillonnage des bioaérosols d'une porcherie à l'aide d'échantillonneurs à hauts et à très hauts débits (source : laboratoire C. Duchaine).	9
Figure 2.	Laboratoire BABE	14
Figure 3.	Stratégies de réduction des contaminants	15
Figure 4.	Capsule d'échantillonnage des poussières.	18
Figure 5.	L'une des salles d'élevage conçue pour les besoins du projet	20
Figure 6.	Gestion du lisier dans les salles	22
Figure 7.	Stratégies de réduction des contaminants	22
Figure 8.	Système d'analyse des gaz automatisé.	23
Figure 9.	Test de calibration du ventilateur de sortie d'une des salles.....	25
Figure 10.	Concentrations de poussières obtenues dans dix élevages de porcs.....	27
Figure 11.	Pourcentages de détection des agents pathogènes humains et des gènes de résistance dans la flore nasopharyngée	29
Figure 12.	Analyse en coordonnées principales illustrant la distance dans la composition bactérienne des trois groupes d'échantillons.....	30
Figure 13.	Performance animale moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées.....	31
Figure 14.	Concentration d'ammoniac (NH ₃) pour chacune des stratégies étudiées	32
Figure 15.	Intensité d'odeurs moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées	33
Figure 16.	Concentration moyenne (avec écart-type) de poussières pour chacune des stratégies étudiées.....	34
Figure 17.	Concentrations de PM ₁₀ et de PM _{2,5}	34
Figure 18.	Concentrations des bactéries totales	35
Figure 19.	Émissions moyennes de NH ₃ et performance de l'UTA (avec écart-type)	36
Figure 20.	Émissions moyennes de poussières et performance de l'UTA.....	36
Figure 21.	Intensité d'odeur moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées	39
Figure 22.	Émissions moyennes quotidiennes de NH ₃	42
Figure 23.	Charge moyenne de NH ₃ à l'entrée de l'UTA et son efficacité.....	44
Figure 24.	Émissions moyennes de poussières et efficacité de réduction des stratégies	46
Figure 25.	Corrélation entre les concentrations en poussières totales obtenues par gravimétrie (37 mm cassettes) et celles provenant du DustTrak DRX Aerosol Monitor.....	47

Figure 26.	Profils de latte testés.....	63
Figure 27.	Schéma du système de mesure des émissions d'ammoniac.....	65
Figure 28.	Émissions de NH ₃ des planchers lattés de chaque chambre.....	68
Figure 29.	Représentation de la gestion du lisier avec la gratte en V dans la salle n° 2.	71
Figure 30.	Représentation de l'aspersion d'huile dans la salle n° 2.....	72
Figure 31.	Représentation du système de traitement de l'air (UTA).	72

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BABE :	Laboratoire sur le bilan agroenvironnemental des bâtiments d'élevage
CH ₄ :	Méthane
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
CPV :	Chlorure de polyvinyle
EBRT :	Temps de résidence (de l'anglais <i>empty bed residence time</i>)
FV :	Fibre de verre
GV :	Stratégie de séparation du lisier (gratte en V)
H :	Stratégie d'aspersion d'huile
IRDA :	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
NH ₃ :	Ammoniac
N ₂ O :	Protoxyde d'azote
ppm :	Partie par million
ppmv :	Partie par million en volume
SARM :	<i>Staphylococcus aureus</i> résistant à la pénicilline
UE :	Unité d'endotoxine
UFC :	Unité formatrice de colonies
UTA :	Stratégie de filtration (unité de traitement de l'air)
UTO :	Unité taxonomique opérationnelle
VECD :	Valeur d'exposition de courte durée
VEMP :	Valeur d'exposition moyenne pondérée
VLE :	Valeur limite d'exposition

1. INTRODUCTION

Il y a 7 125 élevages de porcs répartis sur le territoire canadien (Conseil canadien du porc, 2014). Au Québec, 10 000 personnes travaillent dans les 1 890 bâtiments d'élevage recensés (Conseil canadien du porc, 2014; MCE conseils, 2014). Les travailleurs y sont quotidiennement exposés à d'importantes concentrations de gaz, d'odeurs, de poussières et de bioaérosols (Clark *et al.*, 1983; Cormier *et al.*, 1990; Cormier *et al.*, 2000; Donham *et al.*, 1986; Donham *et al.*, 1989; Duchaine *et al.*, 2000; Létourneau *et al.*, 2010a). Par leur exposition à l'air des bâtiments, les éleveurs de porcs peuvent développer différentes infections (Keessen *et al.*, 2013; Poggenborg *et al.*, 2008) et des problèmes respiratoires tels qu'une réduction des fonctions respiratoires, des sifflements, des bronchites chroniques et de l'asthme (Cormier *et al.*, 1991; Donham *et al.*, 1984; Iversen *et al.*, 2000). La prévalence de ces maladies est liée à la durée de l'exposition à l'intérieur des bâtiments d'élevage (Radon *et al.*, 2000) ainsi qu'aux concentrations de poussières totales et respirables, d'endotoxines et d'ammoniac (Von Essen *et al.*, 2005). La colonisation de la flore nasopharyngée des éleveurs de porcs par les bactéries présentes dans les bioaérosols est aussi possible (Létourneau *et al.*, 2010b).

Plus de 330 composés organiques volatils et gaz (ex. l'ammoniac) contribuent aux odeurs associées aux élevages de porcs (Schiffman *et al.*, 2001). Pour leur part, les bioaérosols sont des particules inorganiques ou organiques en suspension dans l'air pour une période de temps plus ou moins longue. Inférieures à 200 µm, les particules se composent entre autres de débris végétaux et animaux et de microorganismes, vivants ou non. Les gaz, les odeurs et les bioaérosols proviennent des animaux, de la nourriture, de la litière, des matériaux de construction et des lisiers. Les lisiers sont toutefois la source principale de bactéries dans l'air (Nehmé *et al.*, 2008; Pickrell *et al.*, 1993) et la présence de ces bactéries dans la flore nasopharyngée des éleveurs de porcs est possible (Létourneau *et al.*, 2010b).

Actuellement, la communauté scientifique s'interroge sur le lien possible entre l'exposition à des agents pathogènes humains dans les élevages de porcs et la présence de certaines maladies infectieuses dans les hôpitaux. Parmi les agents bactériens, il y a : *Clostridium difficile* (Keessen *et al.*, 2013; Knetsch *et al.*, 2014), *Listeria monocytogenes* (Boscher *et al.*, 2012; CDC, 2011), *Mycobacterium avium* (Agdestein *et al.*, 2014; Tirkkonen *et al.*, 2007), *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline [SARM] (Cavaco *et al.*, 2011) et *Salmonella* (Letellier *et al.*, 1999). *C. difficile* est responsable de diarrhées et d'autres troubles intestinaux (ex. colite pseudomembraneuse) et, dans les hôpitaux canadiens, la bactérie anaérobie stricte est responsable de la plupart des diarrhées infectieuses. Bien que relativement rare, la listériose humaine associée à *L. monocytogenes* est souvent grave. En effet, la listériose se manifeste entre autres par une septicémie, une méningite (ou méningo-encéphalite) et une encéphalite. *Staphylococcus aureus* est à l'origine d'infections de la peau ou d'infections de plaies et, plus rarement, de pneumonies soignables par divers agents antimicrobiens. Les antibiotiques efficaces contre le SARM sont par contre peu nombreux. Finalement, *Salmonella enterica* Derby et *S. enterica* Typhimurium, fréquemment trouvés chez le porc, sont associés à des gastroentérites. La présence de ces agents pathogènes humains ainsi que des gènes de résistance au zinc et aux céphalosporines de 3^e génération n'a jamais été investiguée dans l'air des bâtiments d'élevage de porcs. En effet, due à la prise d'agents antimicrobiens par les porcs, il y a présence dans l'air de bactéries résistantes à des antibiotiques tels que la tétracycline dans les porcheries du Québec (Létourneau *et al.*, 2010b).

Peu d'études ont évalué la qualité de l'air des porcheries par la quantification des particules en suspension PM_{10} [d'un diamètre aérodynamique inférieur à $10\ \mu\text{m}$] et $PM_{2,5}$ [d'un diamètre inférieur à $2,5\ \mu\text{m}$] (Van Ransbeeck *et al.*, 2014; Viegas *et al.*, 2013). Les PM_{10} et les $PM_{2,5}$ sont pourtant des marqueurs importants de la qualité de l'air des milieux urbains (pollution) et des concentrations élevées sont associées à un risque accru de maladies cardiovasculaires, d'altération des fonctions pulmonaires, de cancer du poumon et de diminution de l'espérance de vie (Losacco *et al.*, 2018).

Il n'existe aucune valeur limite d'exposition (VLE) aux bioaérosols et aux odeurs en raison, entre autres, de l'absence de méthodes standards d'échantillonnage et d'analyse (Duquenne *et al.*, 2013; Mandal *et al.*, 2011). Des chercheurs européens ont toutefois proposé 10^4 unités formatrices de colonies par mètre cube d'air (UFC/m³) en bactéries, 10^3 UFC/m³ en bactéries à Gram négatif, 10^5 spores/m³ en moisissures et 90 unités d'endotoxines par mètre cube d'air (UE/m³) à titre de VLE (Donham *et al.*, 1989; Dutch Expert Committee on Occupational Standards, 2010; Eduard, 2009; Heederik *et al.*, 1997). Les concentrations en bactéries et en endotoxines dans l'air des porcheries du Québec excèdent les VLE suggérées (Duchaine *et al.*, 2000; Létourneau *et al.*, 2010a). Il y a par contre des VLE pour les poussières et certains gaz. Selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (Chapitre S-2.1, règlement 13), un travailleur ne doit pas être exposé quotidiennement à plus de $10\ \text{mg}/\text{m}^3$ de poussières totales, à plus de 5 000 ppm de dioxyde de carbone (CO_2), à plus de 25 ppmv d'ammoniac (NH_3) et à plus de 50 ppmv de protoxyde d'azote (N_2O), soit des concentrations pouvant être présentes dans les élevages de porcs (Guingand, 2003). Toutefois, ces VLE ne tiennent pas compte du caractère additif des expositions professionnelles pouvant augmenter de façon importante les risques pour la santé.

Finalement, l'émission dans l'environnement de gaz, d'odeurs et de bioaérosols des bâtiments d'élevage est aussi importante et représente un risque pour la santé des éleveurs de porcs, leur famille ainsi que pour les membres de leur communauté (Thorne, 2007; Ko *et al.*, 2008; Sigurdarson *et al.* 2006; Von Essen *et al.*, 2005; Yuan *et al.*, 2010). Des bioaérosols en provenance des bâtiments d'élevage peuvent être mesurés jusqu'à une distance de 200 m (Yuan *et al.*, 2010). Différents symptômes tant physiologiques (ex. : maux de tête, nausées, fatigue, toux) que psychologiques (ex. : anxiété, colère) sont plus fréquemment rapportés par le voisinage des élevages de porcs que par les personnes éloignées des porcheries (Von Essen *et al.*, 2005). L'intensification des productions animales dans des milieux ruraux à haute densité agricole engendre une pression croissante sur la qualité de l'environnement. Ainsi, l'inquiétude des populations avoisinantes croît en matière de santé et celles-ci réclament davantage d'études à ce sujet et un encadrement réglementaire plus strict de l'industrie (Thorne *et al.* 2007).

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Caractérisation des bioaérosols en bâtiment et risque pour la santé

Les bioaérosols dans les bâtiments d'élevage de porcs proviennent de l'aérosolisation de particules inorganiques et organiques provenant des animaux, des lisiers, des litières, de la nourriture et du sol. La flore de bactéries présentes dans l'air est toutefois principalement issue du tractus intestinal des porcs et ainsi des lisiers (Leser *et al.*, 2002; Nehmé *et al.*, 2008; Snell-Castro *et al.*, 2005). Des agents pathogènes humains et des bactéries résistantes aux antibiotiques et aux métaux peuvent être présents dans les lisiers de porcs (D'Allaire *et al.*, 1999) et, par conséquent, se trouver dans l'air et être inhalés par les producteurs de porcs. À titre d'exemple, la présence de *Campylobacter* sp., de *Clostridium* sp., d'*Enterococcus* sp., d'*Escherichia coli*, de *Streptococcus suis*, de *Staphylococcus* sp., de *Yersinia enterocolitica* et de bactéries résistantes à la tétracycline et à l'érythromycine a d'ailleurs été mise en évidence dans l'air de porcheries (Arfken *et al.*, 2015; Bonifait *et al.*, 2014; Davis *et al.*, 2018; Ferguson *et al.*, 2016; Létourneau *et al.*, 2010b; Madsen *et al.*, 2018) ainsi que dans les flores nasale et nasopharyngée des travailleurs (Angen *et al.* 2018; Bos *et al.* 2016; Létourneau *et al.*, 2010b). La prolifération des bactéries résistantes aux antibiotiques et aux métaux chez les animaux est due à l'ajout par les éleveurs de porcs d'antibiotiques et de métaux dans l'eau ou la diète des animaux afin de soigner et de prévenir les infections ou d'accélérer le gain de poids.

Plusieurs classes d'antibiotiques employées chez le porc ont leurs équivalents chez les humains (ex. : tétracycline, pénicilline, céphalosporines, macrolides). La présence dans l'air de bactéries résistantes à la pénicilline, aux céphalosporines de 3^e génération, aux macrolides et au zinc n'est pas connue et, s'il y a lieu, constitue un risque pour la santé des travailleurs. Par exemple, les céphalosporines de 3^e génération représentent souvent l'ultime médicament contre des agents pathogènes humains multirésistants (Molbak *et al.*, 1999; WHO, 2014). L'emploi de zinc dans les porcheries est aussi problématique pour la santé des travailleurs puisque les gènes de résistance au zinc peuvent être situés sur le même élément génétique mobile (ex. : transposon, plasmide) que des gènes de résistance aux antibiotiques. Une population de bactéries résistantes aux antibiotiques peut ainsi être sélectionnée par la présence de zinc dans l'environnement, *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline, par exemple (Cavaco *et al.* 2011).

2.2 Stratégies de réduction des contaminants de l'air et leurs effets

Par le passé, plusieurs équipes de recherche ont travaillé à diminuer les concentrations de gaz, d'odeurs et de poussières à l'intérieur des bâtiments porcins. Toutefois, les effets de ces pratiques ou technologies ne sont pas toujours intéressants. Certains ont observé que, bien qu'une diminution de la densité des porcs dans un bâtiment d'élevage puisse réduire les concentrations en poussière, elle a également pour effet d'augmenter la concentration en ammoniac (Guinand, 2007). De plus, certaines autres pratiques ne présentent pas d'effet bénéfique sur les émissions dans l'environnement. C'est le cas de l'augmentation du débit d'air qui diminue les concentrations auxquelles les travailleurs sont soumis, mais sans diminuer la quantité totale de contaminants émis dans l'environnement (Massabie et Granier, 2004). Pourtant, l'émission dans l'environnement de gaz, d'odeurs et de bioaérosols des bâtiments d'élevage est aussi importante et représente un risque pour la santé des éleveurs de porcs, de leur famille et des membres de leur communauté (Thorne, 2007; Ko *et al.*, 2008; Sigurdarson *et*

al. 2006; Von Essen *et al.*, 2005; Yuan *et al.*, 2010). Parmi les technologies ou pratiques existantes qui puissent à la fois protéger la santé des travailleurs et les communautés avoisinantes, quatre d'entre elles ont été développées et/ou validées par les membres de l'équipe de recherche et sont prometteuses sur le plan de la réduction des contaminants de l'air dans les bâtiments commerciaux tout en assurant le maintien de la qualité de l'environnement avoisinant.

2.2.1 Les planchers lattés

Les planchers lattés ont été développés dans les années 50 afin de faciliter la régie des élevages principalement en production porcine et bovine. La conception de base des lattes n'a pas vraiment changé bien que le plancher soit considéré comme étant une source importante d'émissions (Cortus, 2006) et qu'il est difficile à nettoyer d'un point de vue microbien. Il y a eu quelques travaux sur la conception des lattes qui se consacraient à l'espacement entre les cavités et à leur surface plutôt qu'aux parois latérales ou aux matériaux de recouvrement. Un nouveau concept de lattes pour le plancher des élevages de porcs a été développé par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) en intégrant un recouvrement de plastique et une arête longitudinale le long de la paroi (Hamelin *et al.*, 2010; Pelletier *et al.*, 2005). Ces modifications de lattes (ex., ajout d'une arête) permettent de réduire la concentration d'ammoniac jusqu'à 40 %.

2.2.2 La gestion des lisiers

Au Québec, la plupart des élevages de porcs gèrent les déjections sous forme liquide et évacuent le lisier des bâtiments par vidange gravitaire produisant ainsi des quantités élevées de gaz et d'odeurs. La séparation des phases liquide et solide sous les planchers lattés des porcheries permet une gestion plus efficace des éléments fertilisants (azote et phosphore) en plus de réduire les émissions de gaz. Différents systèmes de séparation à la source ont été développés et expérimentés au cours des dernières années pour réduire les émissions de gaz et d'odeur en bâtiment porcin : filet, gratte en V et courroie. L'efficacité de séparation du système de gratte en V a été démontrée lors de plusieurs études (von Bernuth *et al.* 2005; Godbout *et al.*, 2006; Guimont *et al.* 2007) et la technologie a déjà été installée dans quelques bâtiments commerciaux au Québec. Ce séparateur à la source permet à la phase liquide de s'écouler sous le plancher par une fente centrale tandis que la phase solide demeure sur les plans inclinés puis est évacuée à l'aide de la gratte en V. De plus, la séparation des déjections par un système de gratte en V a permis de réduire les émissions de gaz et d'odeur, jusqu'à 49 % pour les émissions de NH₃ (Godbout *et al.*, 2006, 2010; Pelletier *et al.*, 2005).

2.2.3 L'aspersion d'huile

Dans une revue de la littérature sur les stratégies de contrôle des poussières, Maghirang *et al.* (1995) concluaient que l'aspersion d'huile et/ou d'eau était une technique prometteuse pour le contrôle des poussières dans les bâtiments d'élevage. Une étude de Pedersen *et al.* (2000) a également conclu que l'aspersion d'huile permettrait d'atteindre la plus grande efficacité de réduction des poussières dans les bâtiments par rapport à d'autres techniques disponibles telles que le type d'alimentation (humide ou sèche), des filtres électrostatiques, l'application d'eau ou l'ionisation. L'efficacité de l'aspersion d'huile à réduire les poussières a ensuite été démontrée dans quelques études et varie de 70 à 95 % selon la nature de l'huile et le taux

d'application (Lemay et Godbout 2004; Lemay *et al.*, 2002; Godbout et Joncas, 2002). Pour l'aspersion d'huile, les études antérieures (Lemay et Godbout 2004) ont démontré qu'en respectant les taux d'application recommandés (10 mL/m² par jour), la surface des bâtiments ne devient pas glissante et il n'y a aucun effet négatif sur les animaux. De plus, les concentrations d'ammoniac et les odeurs sont diminuées par l'application d'huile (Lemay *et al.*, 2002).

2.2.4 Le traitement de l'air

Ces différentes techniques permettent de réduire les émissions de gaz, d'odeurs et de poussières, mais il n'est généralement pas possible d'éliminer complètement les contaminants de l'air. Il est donc nécessaire d'envisager le traitement de l'air à la sortie des bâtiments afin de réduire les émissions dans l'environnement et ainsi limiter les risques pour la santé des populations rurales et contrôler la dérive sanitaire vers des bâtiments adjacents. Une revue systématique de la littérature portant sur les systèmes de traitement de l'air vicié des bâtiments porcins a été réalisée afin de revoir l'information existante portant sur les systèmes de traitement de l'air, tant au niveau agricole qu'industriel (Lemay *et al.* 2008). Cette revue a permis de déterminer qu'il y a deux grandes familles de technologie permettant le traitement de l'air : les technologies chimiques et les biologiques. Les technologies chimiques nécessitent des coûts d'implantation et d'exploitation qui sont élevés et qui les rendent inintéressantes. Parmi les technologies biologiques, on compte la biofiltration, la biofiltration par percolation et le biolavage. La biofiltration est simple, mais présente des problèmes potentiels d'accumulation de polluants, d'encrassement, de pertes de charge élevées et de dégradation rapide en plus d'imposer un temps de résidence élevé. Les biofiltres par percolation et les biolaveurs sont des équipements qui se ressemblent dans leur fonctionnement, la différence étant que le biolaveur nécessite un réacteur de boues activées, ajoutant de la complexité dans un contexte d'utilisation sur une exploitation agricole.

Ce sont pour ces raisons qu'une unité de traitement de l'air (UTA), basée sur le principe de la biofiltration par percolation, a été conçue et développée par l'IRDA. À l'intérieur de l'UTA, l'air vicié passe à travers un matériau filtrant synthétique dans lequel une solution filtrante circule en continu afin d'alimenter le biofilm microbien se développant sur le filtre. Les résultats obtenus à l'échelle laboratoire et à l'échelle pilote sont très prometteurs avec des efficacités de réduction jusqu'à 77 %, 92 % et 75 % respectivement pour l'ammoniac, les poussières totales et les odeurs (Lemay *et al.* 2012; Lemay 2013).

2.3 Besoin d'approfondir la recherche

À la suite de cette revue de la littérature scientifique, plusieurs questions ont été soulevées :

- 1) il n'y a aucune étude sur la présence ou non dans l'air des élevages de porcs québécois d'importants agents pathogènes humains (ex. *Clostridium difficile*) et de gènes de résistance au zinc et à certains antibiotiques d'importance pour la santé des travailleurs (ex., céphalosporines 3^e génération);
- 2) il n'y a aucune donnée sur la réduction des bioaérosols (ex. : PM₁₀, PM_{2,5}, bactéries, endotoxines, agents pathogènes humains) par les différentes stratégies conçues pour la diminution des gaz, des odeurs et des poussières ni sur l'effet synergique de leur combinaison.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif général de la présente recherche était de proposer à l'industrie porcine du Québec une stratégie efficace et économiquement viable de réduction des contaminants de l'air afin de protéger la santé des travailleurs tout en maintenant la qualité de l'environnement.

3.1 Objectif 1

L'objectif 1 visait d'abord à évaluer la présence d'agents pathogènes humains et de gènes de résistance au zinc et aux antibiotiques dans l'air des bâtiments et dans la flore nasopharyngée de travailleurs en élevage porcin québécois. Par la suite, le lien potentiel a été exploré entre la présence des agents pathogènes humains et des gènes de résistance avec les autres composants de l'air (ex. : poussières, bactéries totales, endotoxines).

3.2 Objectif 2

La deuxième partie de la recherche avait pour objectif de sélectionner la meilleure combinaison de technologies de réduction des contaminants de l'air et d'en quantifier l'effet synergique. À l'échelle laboratoire, la réduction des gaz, des odeurs, des poussières et des bioaérosols obtenue par l'emploi, seule ou en combinaison, de quatre stratégies existantes a été évaluée : 1) un nouveau concept de lattes pour le plancher, 2) une séparation à la source des phases liquide et solide des déjections, 3) l'aspersion d'huile, 4) la filtration de l'air sortant du bâtiment d'élevage. Les stratégies ont été optimisées afin de régler certains problèmes de mise à l'échelle et d'obtenir une solution technique à proposer aux éleveurs de porcs.

3.3 Objectif 3

L'objectif 3 a été réalisé dans un bâtiment d'élevage précommercial afin de valider et de démontrer la performance de la meilleure combinaison de stratégies qui permet d'améliorer la qualité de l'air des bâtiments d'élevage et de réduire l'émission des contaminants dans l'environnement.

4. MÉTHODOLOGIE

Le projet est subdivisé en trois parties suivant les objectifs établis. La méthodologie propre à chacun de ces segments est présentée dans cette section.

4.1 Objectif 1 – Évaluation de la flore microbienne présente dans l'air

Les bioaérosols de dix élevages de porcs situés près de la ville de Québec (dans un rayon de 250 km) ont été échantillonnés ainsi que la flore nasopharyngée de 25 éleveurs de porcs et de 30 sujets non exposés (autres critères d'inclusion : non-fumeurs ne prenant aucun antibiotique) afin d'y détecter des agents pathogènes humains et des gènes de résistance au zinc et aux antibiotiques (Figure 1). Les élevages de porcs recrutés présentaient les caractéristiques suivantes :

- un bâtiment d'élevage comprenant entre 1 200 et 1 600 porcs;
- des porcs pesant entre 90 et 120 kg et nourris avec de la moulée cubée;
- un plancher latté de 67 à 100 %;
- un système de ventilation mécanique;
- aucun taux de mortalité inhabituel des animaux.

De plus, l'échantillonnage a été réalisé lors de la saison froide (donc avec un débit de ventilation faible).



Figure 1. Échantillonnage des bioaérosols d'une porcherie à l'aide d'échantillonneurs à hauts et à très hauts débits (source : laboratoire C. Duchaine).

Les poussières et les endotoxines ont été échantillonnées durant 4 heures à 2 L/min (Gilian GilAir5 Tri-Mode Air Sampling pump, Sensidyne) à l'aide de cassettes de 37 mm fermées (SKC, Eighty Four, PA) contenant respectivement une membrane filtrante de chlorure de polyvinyle (CPV, porosité 5 µm, SKC) et de fibres de verre (FV, porosité 1 µm, SKC). Les endotoxines ont été extraites des filtres dans une solution d'eau saline (0,9 % NaCl) contenant 0,025 % Tween 20 puis quantifiées à l'aide de trousse Kinetic-QCL 192 Test Kit (Lonza, Walkersville MD). Les concentrations en endotoxines ont été exprimées en unités d'endotoxines par mètre cube d'air (UE/m³). Après l'échantillonnage, les filtres PVC ont quant à eux été conditionnés et pesés dans une chambre environnementale (température et humidité relative contrôlées) afin d'y mesurer les poussières totales (mg/m³) (Létourneau *et al.*, 2010a). Les concentrations en poussières totales, PM₁₀, PM₄, PM_{2,5} et PM₁ (mg/m³) ont été déterminées par l'emploi d'un compteur optique de particules, DustTrak™ DRX Aerosol Monitor (3 L/min, 3 h, Model 8534, TSI, Shoreview, MN). Les agents pathogènes humains et les gènes de résistance au zinc et à des antibiotiques ont été détectés par culture et par PCR quantitative à partir d'échantillons d'air obtenus en triplicata d'un cyclone humide Coriolis µ Biological Air Sampler (200 L/min, 10 minutes, Bertin Corp., Rockville, MD) ou d'un cyclone humide SASS 2300 Wetted-Wall Air Sampler (325 L/min, 10 minutes, Research International, Monroe, WA), par filtration sur des membranes électrostatiques (SASS 3100 Dry Air Sampler, 300 L/min, 30 minutes, Research International) et par l'écouvillonnage de la flore nasopharyngée des éleveurs de porcs et des sujets contrôles. Les prélèvements de la flore nasopharyngée ont été effectués par une infirmière à l'aide d'un écouvillon Puritan® HydraFlock® Collection Devices (Puritan Diagnostics LLC, Guilford, ME). Un formulaire d'information et de consentement a été lu et signé par tous les sujets recrutés (CÉR n° 21221, Comité d'éthique de la recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec).

Plus précisément, les microorganismes et les gènes de résistance suivants ont été quantifiés dans les différents échantillons par culture (Tableau 1) et à partir de l'ADN total extrait (PowerLyzer PowerSoil DNA Kit, Mo Bio Laboratories, Carlsbad, CA) (Tableau 2) : bactéries totales (Létourneau *et al.*, 2010b; Nehmé *et al.*, 2008), *Clostridium difficile*, *Mycobacterium avium*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline (SARM), *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, le gène *czrC* (résistance au zinc), le gène *bla*_{CTX-M-1} (résistance aux céphalosporines 3^e génération) ainsi qu'un gène assurant une résistance à la colistine, le gène *mcr-1*.

Tableau 1. Conditions de culture des agents pathogènes humains et des bactéries mésophiles

Microorganisme	Milieu de culture sélectif	Condition d'incubation	Temps d'incubation (h)	Fabricant
<i>Staphylococcus aureus</i>	CHROMagar <i>Staph aureus</i>	Aérobie / 37 °C	48	Becton Dickinson, Franklin Lakes, NJ
SARM	CHROMagar MRSA	Aérobie / 37 °C	48	Becton Dickinson
<i>Salmonella spp.</i>	Bismuth Sulfate Agar	Aérobie / 37 °C	48	Becton Dickinson
<i>Clostridium difficile</i>	<i>Clostridium difficile</i> Agar	Anaérobie / 37 °C	48	Becton Dickinson
<i>Mycobacterium avium</i>	Middlebrooke 7H10 + OADC Agar	5 % CO ₂ / 37 °C	240	Becton Dickinson
<i>Listeria monocytogenes</i>	PALCAM Agar	5 % CO ₂ / 37 °C	48	Becton Dickinson
Bactéries mésophiles	Brain Heart Infusion Agar + 5 µg/mL amphotéricine	Aérobie / 37 °C	48	Becton Dickinson

Les thermoprotocoles PCR ont été effectués dans des machines CFX-96 et CFX-384 Touch™ Real-Time PCR Detection System (Bio-Rad, Hercules, CA) et les données traitées à l'aide du logiciel Bio-Rad CFX Manager software (version 3.1). Les courbes standards, allant d'une à 10⁶ copies du gène ciblé, ont été construites à partir d'ADN génomique de souches de référence (ex., souches ATCC) ou de gènes synthétiques d'Integrated DNA Technologies (IDT, Coralville, IA). Toutes les amorces et les sondes ont été synthétisées par IDT. Les résultats ont été analysés par l'emploi de la régression linéaire de la fonction $\log_{10}(\text{nombre de copies de la cible}) = f(\text{cycle seuil})$. Les efficacités d'amplification des différents protocoles PCR ont été déterminées par l'équation $E = 10^{(-\text{slope}) - 1}$ (efficacités entre 90 et 110 %). Des contrôles négatifs ont été inclus dans toutes les plaques PCR. Le nombre de copies a par la suite été converti et exprimé en nombre de copies de la cible par mètre cube d'air (copies/m³). Pour les bactéries totales, de l'ADN génomique d'*E. coli* a été employé pour construire une courbe standard et les concentrations ont été exprimées en équivalents de génome d'*E. coli* par mètre cube d'air (équivalents *E. coli*/m³).

Tableau 2. Amorces, sondes et thermoprotocoles pour la quantification PCR des bactéries totales, des agents pathogènes humains et des gènes de résistance

Cible	Amorce 5' → 3'	Sonde 5' → 3'	Hybridation (°C)	pb	Référence
<i>Staphylococcus aureus</i> (nuc)	5'- GCGATTGATGGTGATACKGT -3' 5'- AGCCAAGCCTTGACGAACTAA -3'	N/A ^a	59	269	(Lu <i>et al.</i> , 2012)
SARM (orfX/SCCmec)	5'-GGATCAAACGGCCTGCACA-3' 5'-GTCAAAAATCATGAACCTCATTACTTATG-3'	5'- CGTAGTTACTGCGTTGTAAG ACGTC-3'	60	176	(Huletsky <i>et al.</i> , 2004)
<i>Salmonella</i> spp. (invA)	5'-GTGAAATTATCGCCACGTTCCGGGCAA-3' 5'-TCATCGCACCGTCAAAGGAACC-3'	N/A	60	284	(Fallschissel, Kampfer et Jackel, 2009)
<i>Clostridium difficile</i> (ARNr 16S)	5'-TTGAGCGATTTACTT CGGTAAAGA – 3' 5'-TGTA CTGGCTCACCTTT GATATTCA-3'	5'- CCACGCGTTACTCACCCGT CCG-3'	60	151	(Bandelj, Logar, Usenik, Vengust et Ocepek, 2013)
<i>Mycobacterium avium</i> (ARNr 16S)	5'-GGGATACTCGAGTGCCGAAC-3' 5'-GGCCGGCTACCCGTCGTC-3'	5'- ACCAGAAGACATGCGTCTT G-3'	60	207	(Cousins, Wilton, Francis et Gow, 1992)
<i>Listeria monocytogenes</i> (iap)	5'-AACTGGTTTCGTTAACGGTAAATACTTA-3' 5'-TAGGCGCAGGTGTAGTTGCT-3'	5'- CTACTACTCAACAAGCTGCA CCTGCTGC-3'	60	164	(Hitchins, Jinneman et Chen, 2017)
Total bacteria (ARNr 16S)	5'-GGTAGTCYAYGCMSTAAACG-3' 5'-GACARCCATGCASCACCTG-3'	5'- TKCGCGTTGCDTCAATTAA WCCAC-3'	62	264	(Bach <i>et al.</i> , 2002)
Résistance au zinc (czrC)	5'- TAGCCACGATCATAGTCATG-3' 5'- ACTGTCTCTCCAATTCCTTCG-3'	N/A	60	192	(Cavaco <i>et al.</i> , 2010)
Résistance aux céphalosporines de 3e génération (bla _{CTX-M-1})	5'-CGGGCRATGGCGCARAC-3' 5'-TGCRCCGGTSGTATTGCC-3'	5'- CCARCGGGCGCAGYTGGTG AC-3'	60	105	(Roschanski, Fischer, Guerra et Roesler, 2014)
Résistance à la colistine (mcr-1)	5'-ATGGCACGGTCTATGATA-3' 5'-CGGATAATCCACCTTAACA-3'	5'- CTACAGACCGACCAAGCCG A-3'	53	156	(Nijhuis <i>et al.</i> , 2016)

^a Ne s'applique pas

Les analyses statistiques sur les concentrations des différents contaminants de l'air ont été réalisées sur les données transformées en valeurs logarithmiques à l'aide du logiciel GraphPad Prism (version 6.02 pour Windows, GraphPad Software, La Jolla, CA). Le seuil de significativité statistique a été fixé à une valeur p inférieure à 0,05. Les corrélations entre les données ont été révélées en ayant recours au coefficient de corrélation Pearson r avec un niveau de confiance à 95 %.

Finalement, des échantillons de bioaérosols de huit porcheries ainsi que des échantillons de la flore nasopharyngée d'éleveurs de porcs ($n=25$) et de sujets non exposés ($n=29$) ont été séquencés à l'aide de la plateforme MiSeq d'Illumina® ciblant le gène de l'ARNr 16S (les régions variables V6-V8) pour l'étude de la diversité bactérienne. L'Institut de biologie intégrative et des systèmes (IBIS) s'est chargé de préparer les librairies et de réaliser l'amplification et le séquençage des échantillons. Un protocole bio-informatique personnalisé par le laboratoire de C. Duchaine a permis le nettoyage des séquences à l'aide du logiciel Mothur (v1.35.1). QIIME (v1.9.1) a été utilisé pour l'alignement des séquences avec les séquences références de la base de données SILVA. UPARSE (implémenté dans VSEARCH 2.8.2) a été employé pour la formation d'UTO (Unité opérationnelle taxonomique, pourcentage de similarité de >97 %). Des taxons ont été attribués aux UTO à l'aide de QIIME (v1.9.1) en se basant sur SILVA. Un fichier de mappage des métadonnées incorporant les informations sur les sujets contrôles, les éleveurs de porcs et l'air des bâtiments a été produit pour l'analyse multivariée. L'analyse de la diversité bactérienne incluant l'analyse statistique a été réalisée par QIIME (v1.9.1).

4.2 Objectif 2 – Sélection des stratégies de réduction des contaminants

Une série d'élevages porcins à l'échelle laboratoire a été réalisée entre novembre 2015 et juillet 2016 afin d'évaluer différentes combinaisons de stratégies de réduction (modification de lattes, séparation du lisier, aspersion d'huile et filtration de l'air) des contaminants de l'air (gaz, odeurs, poussières et bioaérosols), et d'en quantifier l'effet synergique.

4.2.1 Laboratoire de production porcine (BABE)

Le Laboratoire sur le bilan agroenvironnemental des bâtiments d'élevage (BABE) de l'IRDA (Deschambault, Québec), conçu spécialement pour accueillir des élevages sous des conditions environnementales contrôlées, a permis d'héberger des porcs en engraissement (environ 25 à 80 kg) afin de produire des contaminants de l'air pour l'étude.

Ce sont quatre élevages d'une durée d'environ sept semaines (novembre 2015 à juillet 2016) qui ont été réalisés à titre de répétitions de toutes les combinaisons de stratégies. Le cheptel d'environ 40 porcs était composé principalement de mâles castrés logés dans huit chambres indépendantes (4-5 porcs/chambre) de dimensions identiques (1,20 m de largeur, 2,44 m de profondeur et 2,44 m de hauteur) et hermétiques afin de prévenir l'échange d'air entre elles (Figure 2). La répartition des animaux, basée sur le poids des individus, était réalisée initialement et revue à la semaine 3 de chaque essai afin de conserver un poids global similaire parmi les différentes salles.

Pour limiter l'effet des conditions climatiques saisonnières sur les élevages, l'air d'entrée du bâtiment était d'abord préconditionné (chauffé ou climatisé) avant d'être acheminé dans des conduits indépendants vers les chambres. Les chambres étaient toutes munies d'une unité de

chauffage pour l'entrée d'air et d'un ventilateur au plafond. Un contrôleur par salle permettait un fonctionnement indépendant de chacune d'entre elles en modulant la puissance en chauffage et le débit de ventilation selon la consigne de température de l'air intérieur. Les animaux étaient élevés sur un plancher entièrement latté sous lequel était située une préfosse permettant d'entreposer le lisier indépendamment d'une salle à l'autre.



Figure 2. Laboratoire BABE : A) entrée des salles d'élevage indépendantes et B) intérieur d'une salle hébergeant des porcs pour engraissement sur la ferme expérimentale de l'IRDA (Deschambault, Québec).

4.2.2 Stratégies de réduction

Quatre stratégies de réduction des contaminants de l'air, déjà existantes, devaient être évaluées dans ce projet alors que seulement trois ont pu être appliquées intégralement durant les élevages au BABE :

- 1) La séparation du lisier avec une gratte en V (GV);
- 2) L'aspersion d'huile (H);
- 3) La filtration de l'air par une unité de traitement (UTA).

La stratégie de modification des lattes selon un nouveau concept n'a pu être réalisée en tenant compte des échéances établies en raison d'un problème d'approvisionnement. En effet, vu la complexité technique de fabrication, le fournisseur qui a été sélectionné n'a pu fabriquer les lattes requises avant le début des essais. Ainsi, une expérience supplémentaire a donc été réalisée en dehors du protocole actuel afin d'évaluer la réduction des contaminants par l'utilisation de ces lattes (annexe A). Les stratégies étudiées sont décrites au Tableau 3 et

présentées à la Figure 3. À titre de complément, chacune des stratégies est représentée schématiquement à l'annexe B.

Tableau 3. Stratégies de réduction des contaminants étudiées

Séparation du lisier - Gratte en V	Aspersion d'huile	Filtration de l'air - UTA
Séparation des phases liquide et solide du lisier.	Création de surfaces collantes pour capter et retenir les contaminants.	Traitement de l'air à la sortie du bâtiment.
Le liquide est drainé dans la préfosse par un canal central alors que le solide est retenu sur les surfaces bétonnées inclinées. Les surfaces sont raclées périodiquement à l'aide de la gratte qui en épouse les formes.	De l'huile de canola est aspergée sur une base quotidienne sous forme de gouttelettes à raison de 6 mL/s durant 5 secondes (dose de 10 mL/m ²). Pour assurer la précision et la répétition, l'aspersion est contrôlée par une valve électrique et une minuterie.	L'UTA est composée de 0,34 m ³ (12 ft ³) de média filtrant en PVC (surface de 223 m ² /m ³) ¹ dans lequel l'air circule à un débit de 68 L/s afin d'assurer un temps de résidence (EBRT) de 5 secondes. Une solution nutritive ² est recirculée au-dessus du média à un taux de 20 L/min pour maintenir l'humidité du milieu. La solution est renouvelée périodiquement pour assurer sa qualité et contrôler la croissance bactérienne.
4 salles étaient équipées du dispositif.	4 salles étaient aspergées.	6 salles étaient munies d'une UTA.

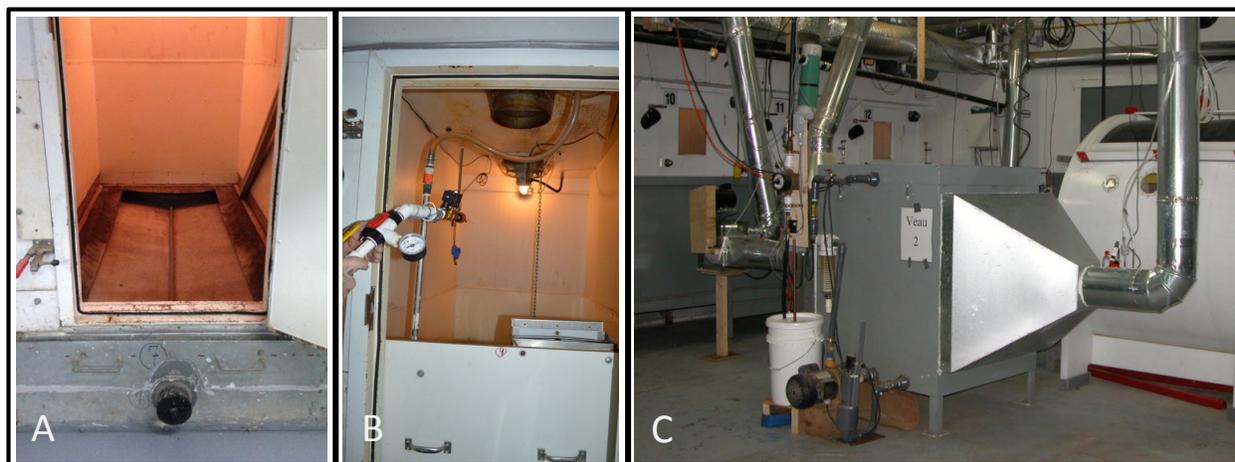


Figure 3. Stratégies de réduction des contaminants : A) gratte en V installée dans la préfosse d'une salle, B) aspersion d'huile, C) l'une des unités de traitement d'air.

¹ Jaeger Environmental (DURA-PAC XF68 PVC)

² Une entente de confidentialité ne permet pas de dévoiler la nature exacte de la solution nutritive.

Ces stratégies ayant toutes été développées ou validées par les membres de l'équipe de recherche, leur optimisation lors du projet a été réalisée sur la base de l'expérience déjà acquise et selon les besoins actuels de l'industrie porcine, afin de régler certains problèmes de mise à l'échelle :

- Un système d'automatisation de l'aspersion d'huile a été conçu afin de fournir aux éleveurs de porcs une stratégie de réduction des contaminants de l'air facilement utilisable.
- L'unité de traitement de l'air a été optimisée sur plusieurs aspects. D'abord, comme la proportion de surface mouillée du matériel filtrant est le facteur ayant le plus d'impact sur l'efficacité d'élimination du NH₃ (Martel, 2013), la distribution de la solution nutritive lors de l'arrosage du milieu filtrant a été améliorée. Le réseau de recirculation de la solution a été revu complètement avec l'ajout de filtres en série, et des buses d'aspersion permettant un meilleur patron d'arrosage ont été installées dans les UTA.

Chacune des stratégies (GV, H et UTA) a été employée seule ou en combinaison dans les huit salles d'élevage indépendantes pour un total de huit traitements différents, dont le témoin (gestion conventionnelle du lisier en préfosse, aucune aspersion d'huile ni de traitement de l'air). À chaque nouvel élevage, les stratégies devaient être interchangées aléatoirement parmi les salles pour éviter l'influence de l'emplacement sur les résultats. Par contre, en raison des infrastructures du laboratoire, seule la stratégie H a pu être déplacée alors que GV et UTA étaient installées de manière permanente dans les salles. Le Tableau 4 présente, à titre d'exemple, la répartition des stratégies dans les chambres lors de l'essai 1.

Tableau 4. Répartition des stratégies dans les salles (essai 1 – automne 2015)

Stratégie	1	2	3	4	5	6	7	8
Lisier					GV	GV	GV	GV
Huile		H		H		H		H
UTA	UTA	UTA	UTA			UTA	UTA	UTA

Le Tableau 5 présente ensuite la répartition des traitements dans les huit salles durant les quatre élevages.

Comme les UTA permettent de traiter l'air seulement à la sortie d'un bâtiment, les salles qui en étaient munies offraient la possibilité d'étudier deux traitements simultanément, soit en échantillonnant à la sortie de la salle (traitement sans UTA) et en aval de l'unité de filtration d'air (traitement avec UTA). Ainsi, même si toutes les salles n'étaient pas munies d'une UTA, en effectuant quatre élevages, il a été possible de réaliser suffisamment de tests pour comparer les effets de chacun des traitements : quatre répétitions des traitements effectifs à l'intérieur des salles (combinaisons de GV et H) et trois répétitions de ceux incluant les UTA.

Tableau 5. Répartition des traitements (stratégies employées seules ou combinées) dans les salles (S1 à S8) durant les quatre élevages réalisés (E1 à E4)

Traitement	E1	E2	E3	E4	Test
Témoin	S1, S3	S2, S4	S1, S3	S2, S4	8
GV	S5, S7	S6, S8	S6, S8	S5, S7	8
H	S2, S4	S1, S3	S2, S4	S1, S3	8
UTA	S1, S3	S2, S4	S1, S3	S2, S4	8
GV et H	S6, S8	S5, S7	S5, S7	S6, S8	8
GV et UTA	S7	S6, S8	S6, S8	S7	6
H et UTA	S2	S1, S3	S2	S1, S3	6
GV, H et UTA	S6, S8	S7	S7	S6, S8	6

Témoin : gestion du lisier conventionnelle, sans aspersion d'huile ni traitement de l'air;

GV : séparation du lisier (gratte en V); H : aspersion d'huile; UTA : unité de traitement de l'air.

4.2.3 Méthodologie analytique

L'évaluation des stratégies de réduction des contaminants de l'air porte sur leur performance au regard des gaz, des odeurs, des poussières et des bioaérosols. À cette fin, des échantillons d'air ont été prélevés à la sortie des salles d'élevage et des UTA suivant des méthodes adaptées pour chacune des analyses à réaliser.

Pour analyser l'ammoniac (NH₃), le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂) et l'oxyde nitreux (N₂O), les échantillons d'air ont été pompés aux quatre heures directement dans des tubes de téflon vers un laboratoire mobile d'analyse. Les concentrations de CH₄, de CO₂ et de N₂O y étaient mesurées par chromatographie en phase gazeuse (Agilent 6890N) avec détection par ionisation de flamme pour la quantification du CO₂ et du CH₄ et par détection à capture d'électrons pour le N₂O. Le NH₃ était mesuré par un analyseur non dispersif à infrarouge (Ultramat 6E, Siemens, Germany). Pour assurer la qualité des mesures, des gaz de calibration certifiés étaient analysés tous les deux jours.

Pour mesurer les odeurs ambiantes, des panélistes qualifiés analysaient l'intensité au supra seuil selon la méthode standard ASTM 544-99 (ASTM 1999) basée sur une échelle de concentrations de neuf points (120 à 15 550 ppm) de n-butanol.

Pour la mesure des poussières, les échantillons d'air étaient prélevés à l'aide de membranes filtrantes (MF-Millipore™, type AAWP, 37 mm, 0,8 µm) composées d'un mélange d'acétate de cellulose et de nitrate, placées sur un support de cellulose et protégées par une capsule de polystyrène (Figure 4), telle qu'utilisée dans les méthodes NIOSH d'échantillonnage d'air industriel. Le débit d'échantillonnage était fixé à 2 L/min. Les filtres étaient remplacés sur une base hebdomadaire et pesés.

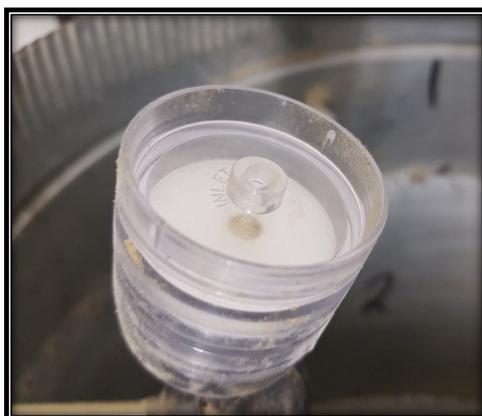


Figure 4. Capsule d'échantillonnage des poussières.

Les efficacités de réduction des différentes technologies envers les poussières totales, les PM₁₀, les PM_{2,5} et les bactéries totales ont été étudiées à l'aide de méthodes d'échantillonnage et d'analyse décrites à l'*objectif 1*. Les concentrations en poussières totales, PM₁₀ et PM_{2,5} (mg/m³) ont été déterminées par l'emploi d'un compteur optique de particules, DustTrak™ DRX Aerosol Monitor (3 L/min, 10 minutes, Model 8534, TSI, Shoreview, MN). Les bioaérosols ont été échantillonnés à l'aide d'un cyclone humide Coriolis µ Biological Air Sampler (100 L/min, 10 minutes, Bertin Corp., Rockville, MD). L'échantillonnage s'est fait de façon isocinétique à l'aide de sondes de diamètres variables situées aux sorties d'air des différentes salles et en aval des unités de traitement de l'air (UTA, bio-filtres). Les concentrations de bactéries totales ont été déterminées à partir de l'ADN total extrait (PowerLyzer PowerSoil DNA Kit, Mo Bio Laboratories) et de la quantification des gènes de l'ARNr16S par PCR (Bach *et al.*, 2002).

De nombreux paramètres physiques étaient aussi mesurés toutes les 15 minutes pour assurer le suivi des conditions ambiantes des salles et le fonctionnement des procédés de traitement de l'air : débit d'air, température de l'air et de l'eau, humidité relative, perte de charge dans le lit filtrant des UTA, conductivité électrique et pH de la solution nutritive.

4.2.4 Calcul des émissions et des performances

Les émissions de gaz calculées dans ce projet tiennent compte du poids des porcs dans chacune des salles et du débit de ventilation correspondant sur une base quotidienne :

$$Em_{g,i} = \frac{(C_{g,i} - C_{ga,i}) \times Q_i}{Poids_{tot,i}}$$

où	Em _g sont les émissions de gaz (g, soit NH ₃ , CO ₂ , CH ₄ ou N ₂ O)	[mg gaz/kg porc/jour]
	C _g est la concentration de gaz	[mg gaz/m ³]
	C _{ga} est la concentration du gaz dans l'air d'entrée	[mg gaz/m ³]
	Q est le débit de ventilation (de la salle ou d'une UTA)	[m ³ /jour]

Poids_{tot} est le poids total des porcs hébergés [kg porc]

i correspond au moment d'échantillonnage (aux 15 minutes) [-]

La moyenne des émissions ($Em_{g,i}$) ainsi calculées est ensuite rapportée sur une base quotidienne et hebdomadaire aux fins d'analyse pour alléger la comparaison des résultats et permettre une meilleure interprétation.

La concentration étant mesurée en ppmv, une conversion est nécessaire afin de tenir compte de la pression, de la température et de la masse molaire du gaz :

$$C_{g/ga} = \frac{C_{ppmv} \times M \times P}{1000 \times R (T + 273,15)}$$

où C_{ppmv} est la concentration de gaz mesurée [ppmv]

M est la masse molaire du gaz (NH₃=17, CH₄=16, CO₂ et N₂O=44) [g/mol]

P est la pression (estimée par l'atmosphère) [101 325 Pa]

R est la constante des gaz parfaits [8,314 m³·Pa/mol/K]

T est la température du gaz (ambiante) [°C]

Comme la pesée des porcs survient seulement à trois reprises durant les élevages, le poids de chacune des salles (Poids_{tot,i}) est pondéré linéairement en fonction du temps :

$$Poids_{tot,i} = \frac{Poids_{x+1} - Poids_x}{t_{x+1} - t_x} \times t_i$$

où Poids_x est le poids total d'une salle lors de la pesée [kg porc]

t est le moment de la pesée [jour]

i est le moment d'échantillonnage [-]

Une fois les émissions calculées, les performances de réduction des stratégies étudiées sont calculées en comparaison au témoin :

$$Perf_i = \frac{Em_{témoin,i} - Em_{traitement,i}}{Em_{témoin,i}} \times 100\%$$

4.2.5 Méthode statistique

Comme mentionné, seule l'aspersion d'huile était déplacée d'une salle d'élevage à l'autre au cours des différents essais, alors que la gratte en V et l'unité de traitement d'air y étaient installées de manière permanente. Toutefois, il a été considéré que la variabilité entre les essais prévalait sur celle attribuable aux différences entre les salles et leur répartition dans le laboratoire. Ainsi, le modèle statistique employé a pris en compte le design non équilibré des expériences effectuées. L'analyse statistique porte sur les résultats moyens obtenus sur 7

semaines d'élevage. Le modèle mixte d'analyse de variance pour données normales a été réalisé avec la procédure PROC MIXED de SAS (version 9.4). Les degrés de liberté étaient sujets à l'approximation Kenward-Roger. Un test de Fisher a été utilisé pour déclarer les effets significatifs à un seuil de probabilité de 0,1.

4.3 Objectif 3 – Implantation de la combinaison optimale à échelle commerciale

À la suite de la sélection du traitement le plus performant (GV, H et UTA) pour protéger à la fois la santé des travailleurs et réduire les émissions dans l'environnement lors de la réalisation de l'objectif 2, la combinaison de stratégies de réduction des contaminants retenue a été optimisée pour ensuite être instaurée dans un laboratoire adapté de production porcine. La série d'élevages porcins a été réalisée entre octobre 2017 et mars 2018 afin d'évaluer la performance du traitement optimal à plus grande échelle et suivant une opération représentative de la gestion conventionnelle d'un bâtiment d'élevage standard.

4.3.1 Laboratoire de production porcine à échelle précommerciale

Initialement, l'expérience devait se dérouler dans un bâtiment d'élevage commercial, mais aucun ayant une grappe en V opérationnelle n'a été trouvé. Comme la grappe en V doit être installée sous le plancher latté, il était difficile d'implanter cette technologie dans un bâtiment existant. Ainsi, un bâtiment de la ferme expérimentale de l'IRDA (Deschambault, Québec) a été adapté pour accueillir deux salles d'élevage porcine complètement indépendantes (Figure 5) et représentatives d'un bâtiment commercial afin de comparer le traitement retenu dans l'une (salle n° 1) à une gestion conventionnelle du lisier dans l'autre (salle n° 2).



Figure 5. L'une des salles d'élevage conçue pour les besoins du projet sur la ferme expérimentale de l'IRDA (Deschambault, Québec).

Chacune des salles permettait d'accueillir 16 porcs (mâles castrés) en engraissement (environ 25 à 85 kg) avec une superficie identique totale de 3,05 m x 3,66 m (10 pi x 12 pi). Les animaux étaient élevés sur un plancher entièrement latté. L'eau et la nourriture étaient disponibles *ad libitum*. Un système de ventilation et de contrôle commercial permettait de réguler le débit d'air dans les salles, sans qu'il y ait possibilité d'échange d'air entre elles. Pour limiter l'effet des conditions climatiques saisonnières sur les élevages, la température de l'air d'entrée était d'abord conditionnée (chauffée ou réfrigérée) dans une pièce séparée avant d'être dirigée dans les salles d'élevage.

Ce sont deux élevages d'une durée d'environ huit semaines (octobre 2017 à mars 2018) qui ont été réalisés à titre de répétitions. La répartition des animaux, basée sur le poids des individus, était réalisée initialement et revue à la semaine 3 de chaque essai afin de conserver un poids global similaire entre les salles. Comme l'UTA traitait l'air sortant de la salle n° 2, il était possible d'y étudier deux traitements simultanément, soit en échantillonnant à la sortie de la salle (traitement sans UTA) et en aval de l'unité de filtration d'air (traitement avec UTA). Ainsi, il a été possible d'obtenir les tests suivants à comparer au témoin (gestion conventionnelle) : deux répétitions de traitement effectif à l'intérieur des salles (GV et H combinés) et deux répétitions incluant l'UTA (Tableau 6).

Tableau 6. Répartition des traitements dans les salles 1 et 2 durant les deux élevages réalisés (E1 à E2)

Traitement	E1	E2	Tests
Témoin	Salle 1	Salle 1	2
GV et H	Salle 2	Salle 2	2
GV, H et UTA	Salle 2	Salle 2	2

Témoin : gestion du lisier conventionnelle, sans aspersion d'huile ni traitement de l'air;
GV : séparation du lisier (gratte en V); H : aspersion d'huile; UTA : unité de traitement de l'air

4.3.2 Stratégies de réduction

Le plancher latté des salles était surélevé sur une plateforme pour permettre au lisier d'être entreposé dans une préfosse située en dessous. La salle n° 1 (gestion conventionnelle) comprenait deux préfosses alors que la salle n° 2 (séparation du lisier) était munie d'une gratte en V et de bassins d'entreposage (Figure 6).

La séparation du lisier dans la salle n° 2 nécessitait de relever plusieurs défis de mise à l'échelle, notamment la conception de la gratte, la fréquence d'opération et les composantes d'entraînement. Des grattes à échelle industrielle et mécanisées (Équipements GDL, Saint-Bernard) ont été adaptées sur le plan du dimensionnement pour reproduire la forme de V désirée et répondre aux besoins spécifiques des salles d'élevage employées dans ce projet. Une surface bétonnée située sous le plancher latté était légèrement inclinée pour permettre à l'urine de s'écouler dans un canal central vers un bassin d'entreposage situé en dessous. La fraction solide du lisier s'accumulait alors sur la surface bétonnée pour ensuite être récoltée dans un autre bassin situé au-devant de la salle par deux grattes dont l'opération était automatisée. L'urine était récoltée périodiquement alors que la fraction solide était récupérée sur une base quotidienne. L'entraînement des grattes a été automatisé pour en améliorer la répétabilité et permettre son opération sur une base quotidienne.

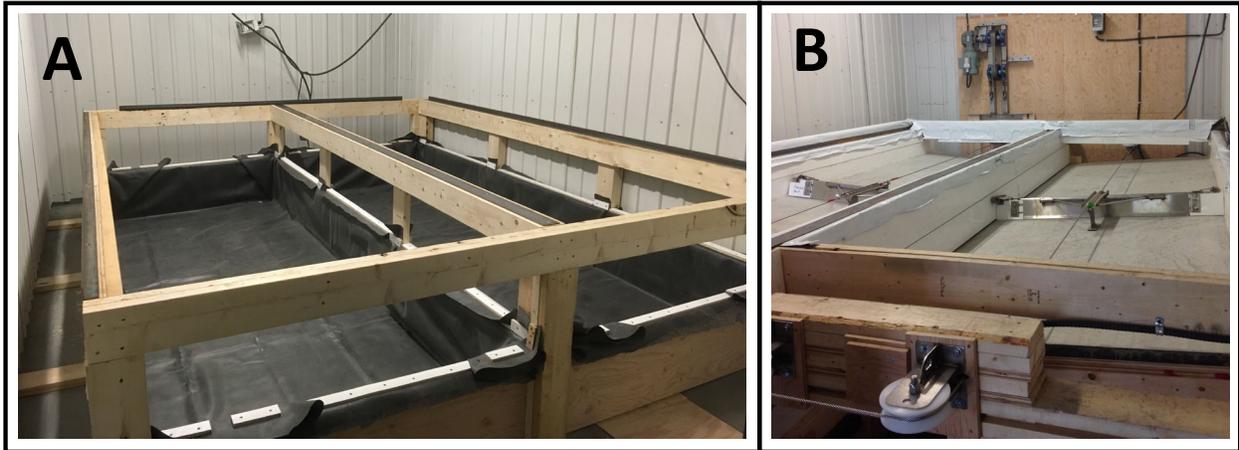


Figure 6. Gestion du lisier dans les salles : A) conventionnelle par entreposage dans une préfosse (salle n° 1) et B) séparation par gratte en V (salle n° 2).

L'aspersion d'huile était réalisée quotidiennement dans la salle n° 2 suivant la méthodologie déjà décrite au Tableau 3. De plus, une UTA similaire à celles utilisées lors de la réalisation de l'objectif 2 a été installée à la sortie d'air de la salle n° 2. Afin de maintenir les mêmes conditions d'opération que précédemment (Tableau 3), le débit d'air traité par l'unité a été fixé à 68 L/s, ce qui représente seulement une fraction du débit de ventilation de la salle. Les stratégies de réduction (H et UTA) sont représentées à la Figure 7.

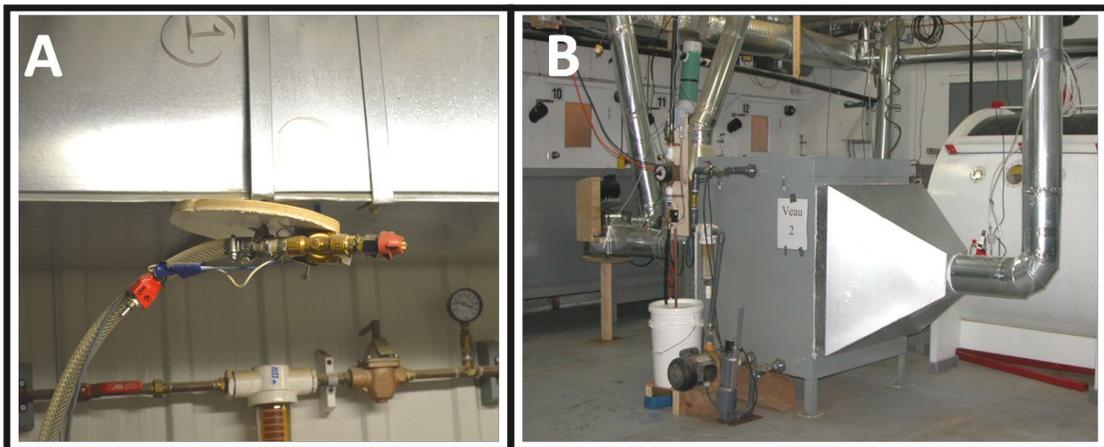


Figure 7. Stratégies de réduction des contaminants : A) buse d'aspersion d'huile dans la salle n° 2 et B) UTA utilisée dans le laboratoire BABE.

4.3.3 Méthodologie analytique

L'évaluation des traitements porte sur leur performance de réduction des gaz, des odeurs, des poussières et des bioaérosols. À cette fin, des échantillons d'air ont été prélevés à la sortie des salles d'élevage et de l'UTA suivant des méthodes adaptées pour chacune des analyses à réaliser. Pour l'analyse de la concentration d'ammoniac (NH_3), des échantillons étaient prélevés aux deux heures à l'aide d'une pompe et dirigés par l'intermédiaire de tubes de téflon vers un spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier (DX4040, Gaset, Canada) (Figure 8). Pour assurer la qualité des mesures, des gaz de calibration certifiés étaient analysés tous les deux jours.



Figure 8 Système d'analyse des gaz automatisé.

Pour mesurer les odeurs ambiantes, des panélistes qualifiés analysaient l'intensité au supra seuil selon la méthode standard ASTM 544-99 (ASTM 1999) basée sur une échelle de concentration de neuf points (120 à 15 550 ppm) de n-butanol.

Pour la mesure des poussières, les échantillons d'air étaient prélevés à l'aide de membranes filtrantes (MF-Millipore™, type AAWP, 37 mm, 0,8 μm) composées d'un mélange d'acétate de cellulose et de nitrate placées sur un support de cellulose et protégées par une capsule de polystyrène (Figure 4), telle qu'utilisée dans les méthodes NIOSH d'échantillonnage d'air industriel. Le débit d'échantillonnage était fixé à 2 L/min. Les filtres étaient remplacés sur une base hebdomadaire et pesés.

Les efficacités de réduction des différentes stratégies dans les deux salles envers les poussières totales, les PM_{10} , les $\text{PM}_{2,5}$, les PM_4 , les PM_1 , les endotoxines et les bactéries totales ont été évaluées à l'aide de méthodes d'échantillonnage et d'analyse décrites à la sous-section 4.1. Six échantillonnages des bioaérosols ont eu lieu au cours des deux essais expérimentaux de huit semaines. Les poussières et les endotoxines ont été échantillonnées durant 4 heures à 2 L/min (Gilian GilAir5 Tri-Mode Air Sampling pump, Sensidyne®) à l'aide de cassettes de 37 mm fermées (SKC, Eighty Four, PA) contenant respectivement une membrane

filtrante de chlorure de polyvinyle (CPV, porosité 5 µm, SKC) et de fibres de verre (FV, porosité 1 µm, SKC). Les endotoxines ont été extraites des filtres dans une solution d'eau saline (0,9 % NaCl) contenant 0,025 % Tween 20 puis quantifiées à l'aide de trousse Kinetic-QCL 192 Test Kit (Lonza, Walkersville MD). Les concentrations en endotoxines ont été exprimées en unités d'endotoxines par mètre cube d'air (UE/m³). Après échantillonnage, les filtres PVC ont quant à eux été conditionnés et pesés dans une chambre environnementale (température et humidité relative contrôlées) afin d'y mesurer les poussières totales (mg/m³). Les concentrations en poussières totales, PM₁₀, PM₄ (respirables), PM_{2,5} et PM₁ (mg/m³) ont aussi été déterminées par l'emploi d'un compteur optique de particules, DustTrak™ DRX Aerosol Monitor (3 L/min, 10 minutes, Model 8534, TSI, Shoreview, MN). Les bioaérosols ont été échantillonnés à l'aide d'un cyclone humide Coriolis µ Biological Air Sampler (100 L/min, 10 minutes, Bertin Corp., Rockville, MD). Les concentrations de bactéries totales ont été déterminées à partir de l'ADN total extrait (PowerLyzer PowerSoil DNA Kit, Mo Bio Laboratories) des échantillons du Coriolis µ et de la quantification des gènes de l'ARNr16S par PCR (Bach *et al.*, 2002). Dans le cas des bactéries cultivables, elles ont été quantifiées par étalement de dilutions sériées des échantillons Coriolis µ sur des milieux de culture TSA contenant 5 µg/mL d'amphotéricine. L'échantillonnage des bioaérosols en amont et en aval des UTA s'est fait de façon isocinétique à l'aide de sondes de diamètres variables. Les échantillonneurs d'air reposaient sur une tablette fixée à environ 0,5 m du plafond (au-dessus des animaux) et à 1,5 m du plancher latté pour les prélèvements de l'air ambiant des deux salles. Les pourcentages d'efficacité de réduction ont été calculés à l'aide de la formule suivante :

$$\frac{C_{\text{témoin}} - C_{\text{traitement}}}{C_{\text{témoin}}} \times 100\%$$

où $C_{\text{témoin}}$ est la concentration en l'absence de stratégie de réduction, et $C_{\text{traitement}}$ est la concentration en présence de stratégies de réduction (seules ou combinées).

De nombreux paramètres physiques étaient aussi mesurés toutes les 15 minutes pour assurer le suivi des conditions ambiantes des salles et le fonctionnement du procédé de traitement de l'air : débit d'air, température de l'air et de l'eau, humidité relative, perte de charge dans le lit filtrant des UTA, conductivité électrique et pH de la solution nutritive.

Des ailettes à pression différentielle étaient installées pour mesurer le débit de ventilation des salles, mais elles n'ont pu apporter une précision adéquate sur toute la gamme de variation. Ainsi, le débit d'air de sortie des salles a dû être calculé suivant la perte de charge et la vitesse de rotation des ventilateurs. À la suite des élevages, des tests de calibration ont été réalisés afin d'établir la courbe d'opération réelle des ventilations en fonction des conditions ambiantes de chacune des salles. Pour y parvenir, une conduite de 25,4 cm (10 po) a été installée aux ventilateurs de sortie afin d'y mesurer le débit d'air avec un anémomètre à fil chaud (Kimo AMI 310) selon différentes valeurs de perte de charge et de vitesses de rotation. Un ventilateur (Delhi model 615) a été utilisé pour compenser la perte de charge additionnelle causée par la présence du conduit (Figure 9).



Figure 9. Test de calibration du ventilateur de sortie d'une des salles.

4.3.4 Calcul des émissions et des performances

Le calcul des émissions gazeuses et des performances des stratégies de réduction des contaminants repose sur la même méthodologie que celle présentée à la sous-section 4.2.4.

4.3.5 Méthode statistique

Une analyse statistique a été réalisée sur les émissions de gaz et de poussières calculées sur une base hebdomadaire. Un modèle linéaire mixte (SAS, procédure PROC MIXED, version 9.4) a été utilisé pour comparer l'air de la salle n° 1 (témoin) avec celui de la salle n° 2 (traitement retenu : GV, H avec ou sans UTA). Le modèle comprend les effets aléatoires des essais ainsi que ceux des salles et des semaines d'élevage. Les observations successives provenant d'une même salle au cours d'un essai ont été considérées comme des mesures répétées et une matrice de variance-covariance a été modélisée en conséquence.

5. RÉSULTATS

Tous les résultats sont présentés selon les objectifs de l'étude. Ceux-ci sont le reflet de l'analyse des répliques du projet de recherche (ex., les bioaérosols de 10 bâtiments d'élevage de porcs, la flore nasopharyngée de 25 producteurs de porcs).

5.1 Objectif 1 - Évaluation de la flore microbienne présente dans l'air

Les bioaérosols de dix élevages de porcs ont été échantillonnés au cours de l'étude. Les concentrations en poussières totales se situaient entre 0,309 et 9,610 mg/m³ ($3,62 \pm 2,64$ mg/m³) lorsque mesurées à l'aide du compteur optique de particules, DustTrak™ DRX Aerosol Monitor, et entre 0,164 et 3,4 mg/m³ ($1,56 \pm 1,06$ mg/m³) lorsqu'analysées par gravimétrie. La Figure 10 représente les concentrations observées à l'aide du compteur optique de particules en poussières totales, PM₁₀, PM₄ (respirable), PM_{2,5} et PM₁ dans les différents élevages de porcs. Les bioaérosols des dix porcheries contenaient entre $6,02 \times 10^2$ et $3,40 \times 10^4$ UE/m³ ($9,05 \times 10^3 \pm 9,52 \times 10^3$ UE/m³) en endotoxines, tandis que les concentrations en bactéries totales variaient entre $8,06 \times 10^7$ et $3,34 \times 10^9$ ($1,54 \times 10^9 \pm 2,23 \times 10^9$) d'équivalents en génomes *E. coli* par mètre cube d'air. Aucune corrélation n'a pu être établie entre les poussières, les endotoxines ou les bactéries totales.

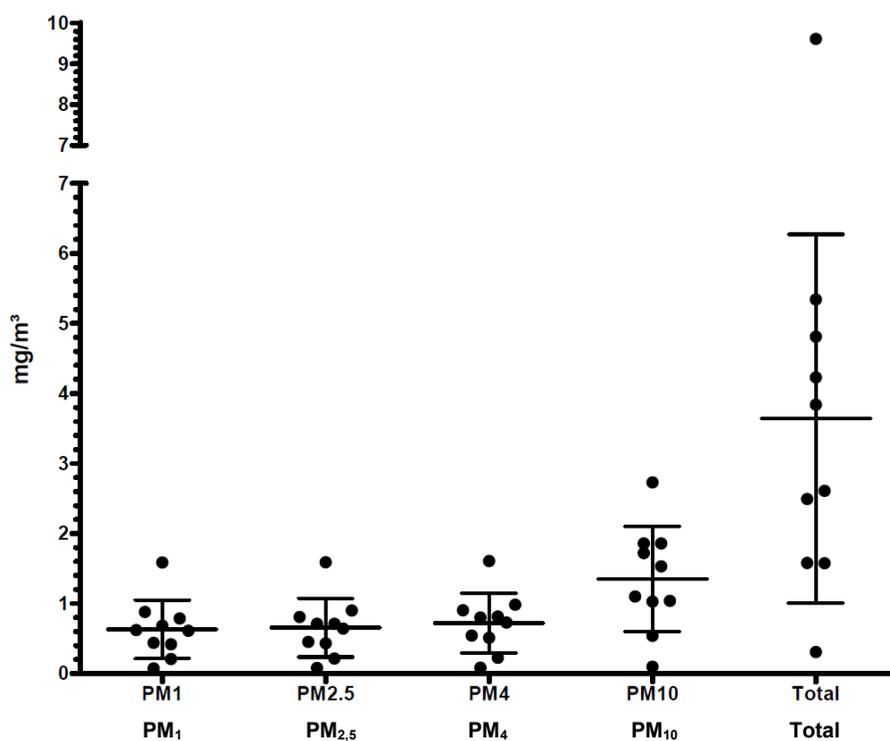


Figure 10. Concentrations de poussières obtenues dans dix élevages de porcs par l'emploi d'un DustTrak™ DRX Aerosol Monitor.

L'analyse des échantillons d'air par PCR quantitatif (Tableau 7) a révélé que tous contenaient *S. aureus* à des concentrations allant de $5,04 \times 10^4$ à $7,43 \times 10^5$ copies/m³. Des bactéries SARM n'ont toutefois été trouvées que dans les bioaérosols de 50 % des élevages de porcs, de 10^2 à $1,99 \times 10^4$ copies par mètre cube d'air. À l'instar de *S. aureus*, tous les bâtiments d'élevage comportaient des bactéries *Salmonella* spp., jusqu'à $1,07 \times 10^6$ copies/m³. *L. monocytogenes* et *C. difficile* n'ont été trouvés que dans l'air de trois et de deux porcheries, respectivement. *M. avium* n'a jamais pu être détecté dans la présente étude. Les résultats obtenus par la culture des échantillons d'air des Coriolis μ Biological Air Sampler (Bertin Corp.) et SASS®2300 Wetted-Wall Air Sampler (Research International) sont présentés dans le Tableau 7. La culture a permis de révéler la présence de bactéries mésophiles (10^4 - 10^6 UFC/m³) et de *S. aureus* (10^2 - 10^4 UFC/m³) dans l'ensemble des porcheries tandis que des souches SARM n'ont crû qu'à partir d'échantillons de trois élevages seulement (concentrations résultantes : 77, 321 et 791 UFC/m³). Quantifiables par PCR dans tous les échantillons, les bactéries *Salmonella* spp. n'ont été trouvées par culture qu'à une faible concentration de $1,99 \times 10^2$ UFC/m³ dans l'air d'une porcherie. *C. difficile* et *M. avium* ont été détectées dans les bioaérosols de six et de quatre porcheries, respectivement. Aucun échantillon n'était positif pour des souches cultivables de *L. monocytogenes*.

Tableau 7. Concentrations des agents pathogènes humains cultivables et totaux (qPCR)

Agent pathogène humain	Fréquence qPCR/culture (% / %)	Concentration qPCR [min] – [max] (copies/m ³) ^a	Concentration en culture [min] – [max] (UFC/m ³) ^b
<i>Staphylococcus aureus</i>	100 / 100	$5,04 \times 10^4$ – $7,43 \times 10^5$	$4,19 \times 10^2$ – $9,05 \times 10^4$
SARM	50 / 30	N/A ^c - $1,99 \times 10^4$	N/A - $7,91 \times 10^2$
<i>Salmonella</i> spp.	100 / 0	$7,59 \times 10^2$ – $1,07 \times 10^6$	N/A
<i>Clostridium difficile</i>	20 / 60	N/A - $4,21 \times 10^4$	N/A - $1,75 \times 10^3$
<i>Mycobacterium avium</i>	0 / 40	N/A	N/A - $2,12 \times 10^3$
<i>Listeria monocytogenes</i>	30 / 0	N/A – $3,16 \times 10^3$	N/A
Bactéries totales (qPCR) et cultivables	100 / 100	$8,06 \times 10^7$ – $3,34 \times 10^9$	$1,55 \times 10^4$ – $1,55 \times 10^6$

^aÀ partir des échantillons des Coriolis μ Biological Air Sampler (Bertin Corp.), SASS 2300 Wetted-Wall Air Sampler (Research International) et SASS 3100 Dry Air Sampler (Research International);

^bÀ partir des échantillons des Coriolis μ Biological Air Sampler (Bertin Corp.) et SASS®2300 Wetted-Wall Air Sampler (Research International);

^cSous le seuil de détection.

Des gènes conférant une résistance au zinc/cadmium (*czrC*), aux céphalosporines de 3^e génération (*bla_{CTX-M-1}*) et à la colistine (*mcr-1*) ont été quantifiés dans des échantillons d'air par PCR (Tableau 8). Le gène *czrC* a pu être détecté dans 100 % des porcheries (10^2 – 10^5 copies/m³) alors que les deux autres gènes se trouvaient à des concentrations plus faibles dans l'air de 60 % des élevages de porcs.

Tableau 8. Concentrations des gènes de résistance au zinc/cadmium et à deux antibiotiques

Gène cible	Résistance	Fréquence (%)	Concentration [min]-[max] (copies/m ³)
<i>czrC</i>	Zinc/cadmium	100	1,73×10 ² - 1,78×10 ⁵
<i>bla_{CTX-M-1}</i>	Céphalosporine	60	N/A ^a - 9,89×10 ²
<i>mcr-1</i>	Colistine (Polymyxine E)	60	N/A - 9,87×10 ²

^aSous le seuil de détection.

La flore nasopharyngée de 25 producteurs de porcs et de 29 sujets non exposés a été analysée par PCR afin d'y quantifier les agents pathogènes humains et les gènes de résistance à l'étude (Figure 11) ainsi que par séquençage à haut débit pour y révéler la diversité bactérienne. Les gènes de l'ARNr16S des échantillons d'air de huit élevages de porcs ont été séquencés en parallèle et comparés à ceux caractérisant la flore de bactéries du nasopharynx des éleveurs (Figure 12).

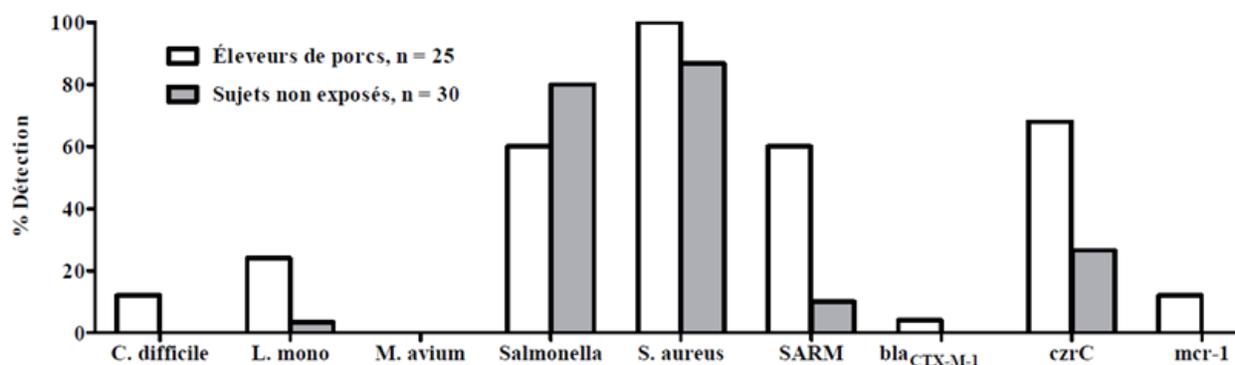


Figure 11. Pourcentages de détection des agents pathogènes humains et des gènes de résistance dans la flore nasopharyngée de producteurs de porcs et de sujets n'ayant jamais été exposés à des élevages d'animaux (autres critères d'inclusion : non-fumeurs, ne prenant aucun antibiotique).

À l'exception de *Salmonella* spp., tous les agents pathogènes humains et les gènes de résistance à l'étude ont été plus fréquemment trouvés dans la flore du nasopharynx des éleveurs de porcs.

Huit échantillons d'air de porcheries, 25 échantillons de la flore nasopharyngée de travailleurs et 29 de celle de contrôles non exposés ont généré 2 942 265 de séquences brutes par séquençage à haut débit. À la suite de la filtration et de l'élimination des séquences uniques, 1 425 981 séquences uniques se sont regroupés en 6 060 UTO. Une profondeur d'échantillonnage de 15 000 séquences par échantillon a été choisie pour la construction des différentes courbes de raréfaction et un plateau du nombre d'UTO observées a été atteint à 2 000 séquences. L'analyse multivariée, effectuée sur les échantillons raréfiés afin d'éviter le regroupement d'échantillons selon le nombre de séquences et non selon le contenu microbien, a révélé que les échantillons d'air des porcheries se regroupent avec les échantillons de la flore nasopharyngée des producteurs de porcs (diversité bêta, Figure 12). L'ensemble (triangles et

cercles) est de plus distant de la flore de bactéries du nasopharynx des sujets non exposés (losanges). Afin d'évaluer la significativité statistique des regroupements, le test PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*) a été employé pour comparer les deux groupes (air/éleveurs de porcs par rapport aux sujets non exposés). La significativité a été confirmée avec une valeur p de 0,0001.

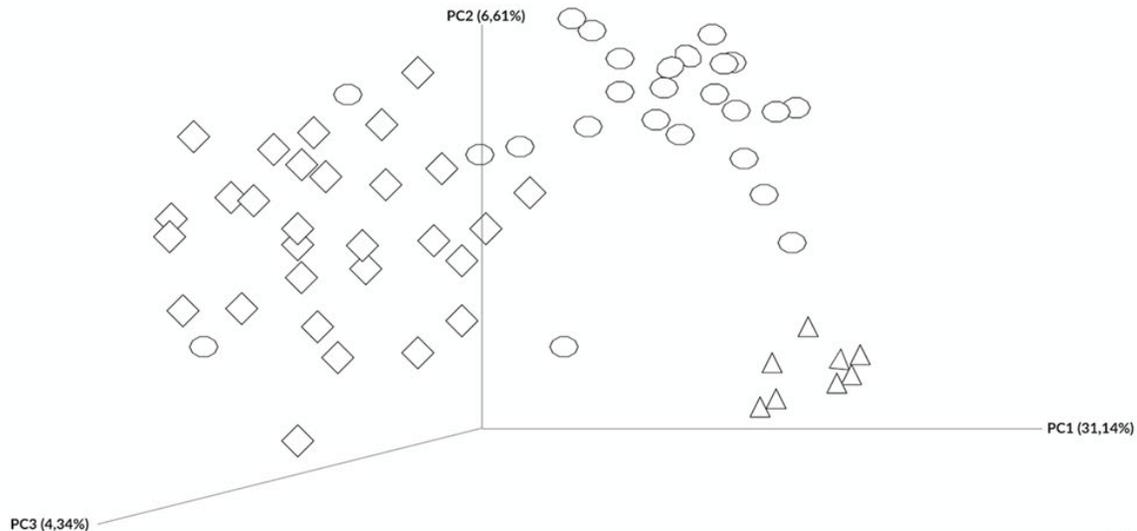


Figure 12. Analyse en coordonnées principales illustrant la distance dans la composition bactérienne des trois groupes d'échantillons, soit l'air des porcheries (triangle), le nasopharynx des éleveurs de porcs (cercle) et le nasopharynx des sujets non exposés (losange). Les distances calculées en paires ont été mesurées par UniFrac (*weighted*). Le regroupement est statistiquement significatif (PERMANOVA valeur p = 0,0001).

Les contrôles négatifs du séquençage à haut débit provenaient de l'extraction d'écouvillons stériles Puritan® HydraFlock® Collection Devices et de blancs de terrain associés aux échantillons d'air. Une qPCR amplifiant le gène de l'ARNr 16S a démontré que ces contrôles avaient une très faible biomasse bactérienne et n'ont pas été envoyés au séquençage. Un mélange de 20 espèces bactériennes (20 *Strain Even Mix Genomic Material*, ATCC® MSA-1002™) a été utilisé à titre de contrôle positif. Les résultats taxonomiques pour le contrôle positif ont démontré un profil similaire à celui attendu, mais ayant des abondances relatives différentes.

La classe des *Clostridia* et la famille des *Enterobacteriaceae* sont des exemples de bactéries caractéristiques de l'environnement porcine. À l'exemple de la qPCR, la présence de *Staphylococcus* a pu être révélée par séquençage à haut débit chez les éleveurs de porcs (10 %) et les contrôles non exposés (8 %). Par contre, *Staphylococcus* ne représente que 0,1 % des bactéries dans l'air des porcheries. Finalement, la prévalence de *Clostridium butyricum*, *Prevotella copri*, *Prevotella stercorea* et *Moraxella*, de possibles agents pathogènes humains,

était significativement plus importante dans l'air des élevages de porcs et le nasopharynx des travailleurs que dans la flore nasopharyngée des contrôles non exposés ($p < 0,05$).

5.2 Objectif 2 - Sélection des stratégies de réduction des contaminants

Les résultats des traitements étudiés (stratégies de réduction des contaminants employées seules ou combinées) au cours des quatre élevages à l'échelle laboratoire sont présentés dans cette sous-section. Les deux stratégies efficaces directement à l'intérieur des salles (gratte en V et aspersion d'huile) sont comparées aux conditions du cas témoin (gestion conventionnelle sans stratégie). La présence de l'unité de traitement d'air à la sortie de certaines salles d'élevage agit à titre de barrière supplémentaire aux contaminants. Ainsi, les résultats des traitements comprenant une UTA reflètent seulement les émissions à la sortie d'un bâtiment et non la qualité de l'air à l'intérieur d'une salle. De plus, les concentrations mesurées dans l'air extérieur ont été déduites de tous les résultats pour mettre en évidence les effets de l'élevage et des stratégies de réduction. Les performances animales sont d'abord présentées, suivies de la qualité de l'air dans les salles d'élevage et des émissions dans l'environnement pour chacun des contaminants évalués (NH_3 , poussières, odeurs et bioaérosols). Les autres gaz évalués (CH_4 , CO_2 et N_2O) n'ont pas démontré de résultats d'intérêts concernant les objectifs de l'étude et ne sont donc pas présentés dans le présent rapport par souci de pertinence et pour en alléger le contenu.

5.2.1 Performance animale

La performance animale portant sur le gain de poids est présentée à la Figure 13. Pour l'ensemble des élevages, le gain de poids moyen est similaire pour tous les traitements étudiés ($1,0 \pm 0,1$ kg/porc/jour). La répartition des porcs revue à la semaine 3 de chaque élevage afin de conserver un poids similaire dans chacune des salles peut expliquer qu'aucun paramètre de l'expérience n'ait pu influencer la performance animale.

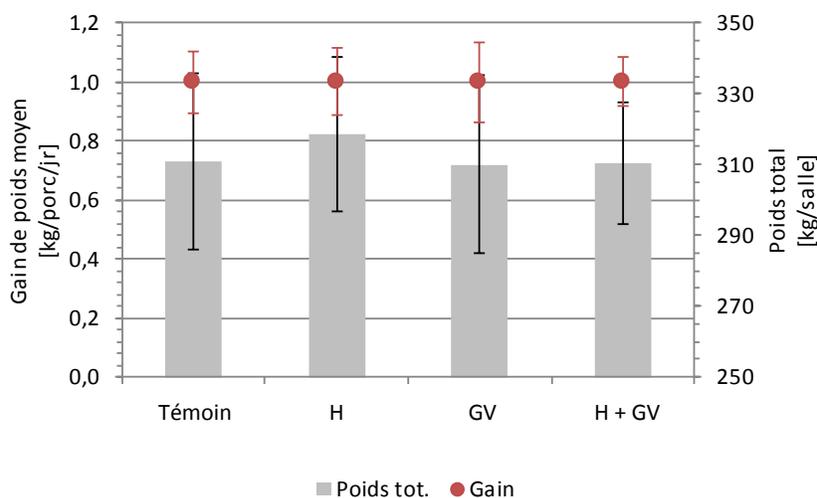


Figure 13. Performance animale moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V) en comparaison au cas témoin pour les quatre élevages (n=4).

5.2.2 Qualité de l'air dans les salles d'élevage

Ammoniac

Concernant les concentrations d'ammoniac prélevées dans les salles d'élevage, la Figure 14 présente la moyenne (A, à gauche) et le maximum (B, à droite) pour chacun des traitements étudiés durant les quatre répétitions en comparaison avec le témoin (sans stratégie de réduction).

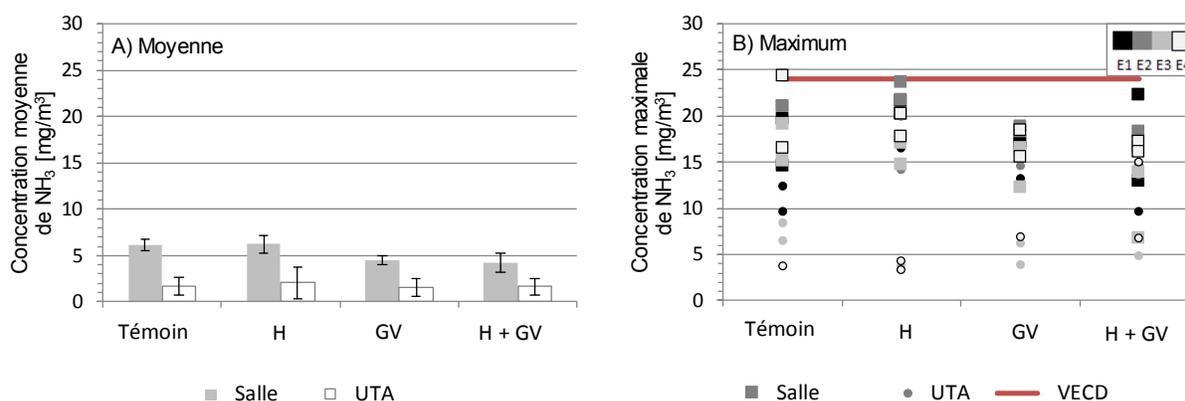


Figure 14. Concentration d'ammoniac (NH₃) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison avec le témoin durant les quatre élevages : A) moyenne (avec écart-type), B) maximum mesuré par période de 15 minutes en comparaison à la norme de la CNESST (VECD, valeur d'exposition de courte durée) pour tous les élevages (E1 à E4) (n=4).

Observons à la Figure 14A que la concentration moyenne en ammoniac est d'environ 5 mg NH₃/m³ à l'intérieur des salles pour tous les traitements. Comme attendu, seulement la séparation du lisier a eu un impact significatif sur la réduction de l'ammoniac produite (4,5 ± 0,5 mg NH₃/m³; probabilité F < 0,02). En effet, l'ammoniac est un sous-produit de dégradation de l'urée dans l'urine, mais cette transformation est catalysée par la présence d'une enzyme trouvée dans les fèces. Ainsi, en utilisant la gratte en V pour limiter le contact entre l'urine et les fèces, il est possible de réduire la concentration en ammoniac générée.

À la Figure 14B, la concentration maximale mesurée sur des périodes de 15 minutes est comparée à la valeur d'exposition de courte durée (VECD : 24 mg NH₃/m³), un critère standard de la qualité de l'air de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). La VECD était pratiquement toujours respectée, sauf à une seule reprise dans une salle témoin durant l'élevage 4 (maximum mesuré de 24,4 mg NH₃/m³).

La Figure 14 démontre que l'UTA, qu'elle soit combinée ou non avec une autre stratégie de réduction, a un effet important sur la réduction des concentrations en ammoniac dans l'air de sortie. En effet, la quantité d'ammoniac mesurée à la sortie des UTA était d'environ 1,7 ± 0,2 mg NH₃/m³ pour tous les traitements.

Odeurs

L'intensité moyenne des odeurs pour chacun des traitements est présentée à la Figure 15. En comparaison avec le témoin ($5\,900 \pm 1\,100$ ppm butanol), tous les traitements étudiés semblent avoir un impact positif sur la réduction de l'intensité d'odeur. La séparation du lisier et l'aspersion d'huile ont eu des effets similaires ($3\,700 \pm 200$ et $3\,400 \pm 900$ ppm butanol respectivement) alors que la combinaison n'a eu aucune influence supplémentaire sur la réduction des odeurs. Seule ou combinée, l'UTA semble avoir une incidence considérable sur les odeurs en assurant une réduction importante de l'intensité (environ $1\,200 \pm 200$ ppm butanol dans tous les cas). Puisque la plupart des stratégies (aspersion d'huile et UTA) permettent un certain degré d'enlèvement de la poussière, laquelle est considérée comme un important vecteur d'odeur dans les bâtiments porcins, cela peut expliquer une partie de la réduction des odeurs observée.

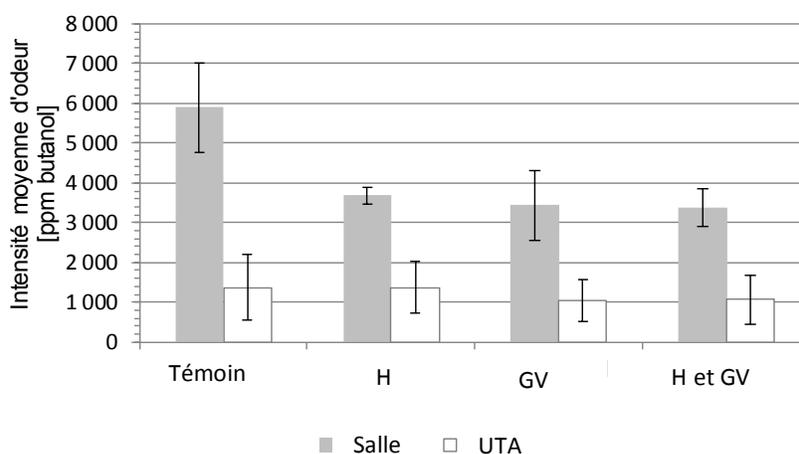


Figure 15. Intensité d'odeurs moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au témoin pour les quatre élevages (n=4).

Poussières et bioaérosols

L'effet de chacun des traitements sur la concentration en poussière est présenté à la Figure 16. À l'intérieur des salles d'élevage, la séparation du lisier n'a eu aucun effet, avec des concentrations similaires au traitement témoin ($0,9 \pm 0,1$ et $1,0 \pm 0,2$ mg poussières/m³ respectivement). Comme prévu, l'aspersion d'huile a eu une influence substantielle et significative sur la réduction des poussières dans les salles ($0,2 \pm 0,1$ mg poussières/m³; probabilité de $F < 0,0001$). Les gouttes d'huile peuvent piéger la poussière et la retenir hors de l'air ambiant en rendant les surfaces légèrement collantes. À la sortie des chambres, l'UTA seule ou combinée a eu le même impact de réduction avec une concentration de sortie d'environ $0,1 \pm 0,1$ mg poussières/m³ pour tous les traitements. Ainsi, il apparaît qu'en agissant comme barrière physique aux particules, notamment par son milieu filtrant, l'UTA est performante à elle seule pour réduire les poussières. Par contre, aucun enlèvement de poussières supplémentaire n'a pu être obtenu par la combinaison de l'aspersion d'huile et de l'UTA. En effet, l'huile permet de retirer la majeure partie des poussières à l'entrée de l'UTA, lesquelles pourraient être à l'origine de la colonisation microbienne du procédé biologique ou constituer une source de substrat pour les bactéries.

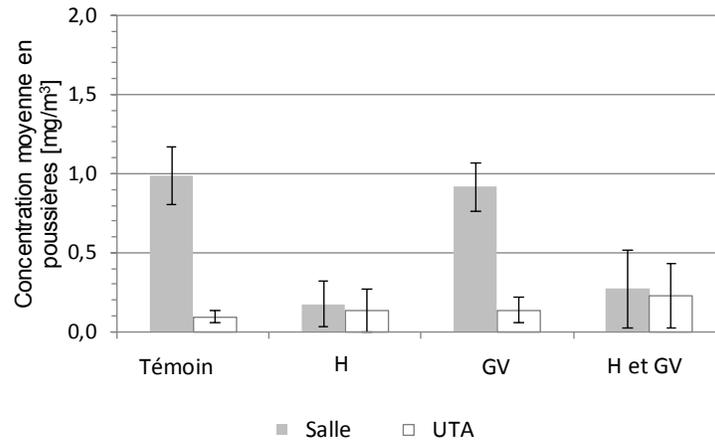


Figure 16. Concentration moyenne (avec écart-type) de poussières pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au cas témoin pour les quatre élevages (n=4).

L'aspersion quotidienne d'huile dans des chambres expérimentales du laboratoire BABE s'est traduite par une diminution des concentrations de poussières ($p < 0,0001$, Figure 17). L'efficacité de réduction des poussières a toutefois été moindre pour les particules plus fines (ex. $PM_{2,5}$ par rapport à PM_{10}).

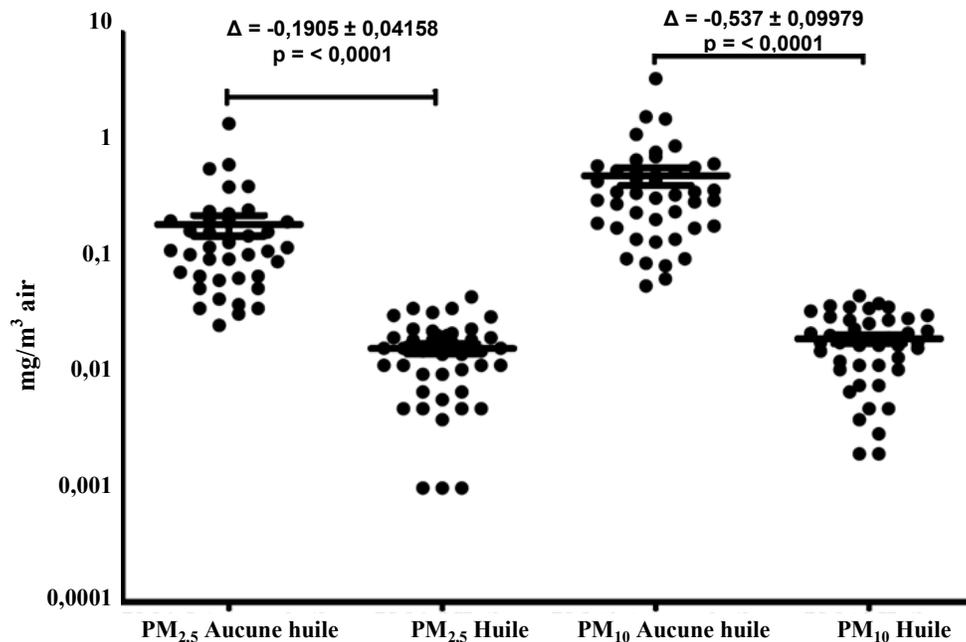


Figure 17. Concentrations de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ en l'absence de stratégies de réduction des contaminants de l'air et celles présentes dans les chambres expérimentales du laboratoire BABE subissant des aspersions quotidiennes d'huile. Les analyses statistiques ont été effectuées par tests t non appariés (GraphPad Prism, version 6.02).

La quantification par PCR des bactéries totales a de même permis de révéler l'efficacité de réduction de l'aspersion d'huile et de la biofiltration (UTA) envers les contaminants de l'air (Figure 18). L'emploi en parallèle des deux stratégies permet de diminuer davantage les concentrations de bactéries ($p = 0,0036$).

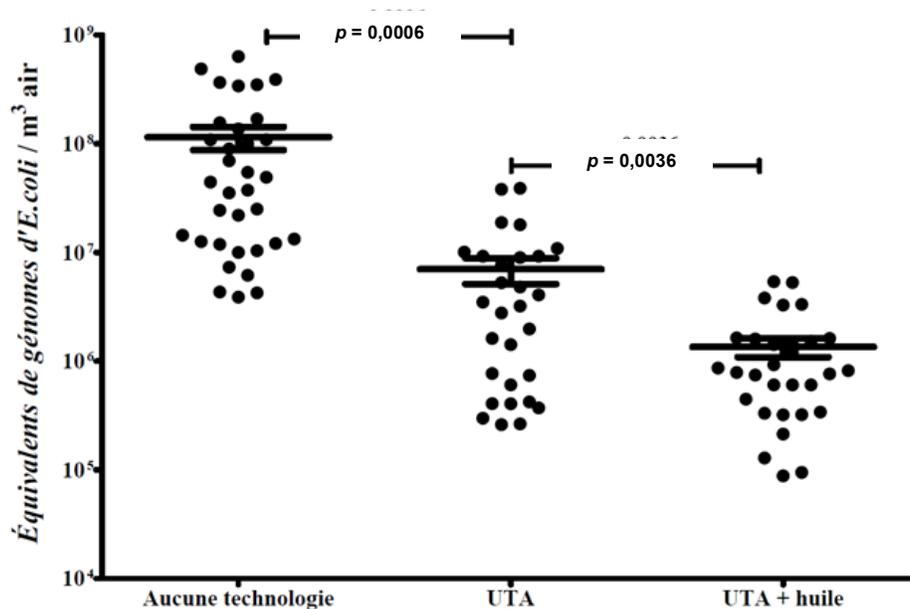


Figure 18. Concentrations des bactéries totales en absence de stratégies de réduction des contaminants de l'air, après biofiltration (UTA) de l'air sortant des chambres expérimentales du laboratoire BABE ou avec l'emploi en parallèle d'aspersions d'huile. Les analyses statistiques ont été effectuées par tests *t* non appariés (GraphPad Prism version 6.02).

5.2.3 Émissions de contaminants dans l'environnement

Ammoniac

La quantité moyenne d'ammoniac émise à la sortie des salles d'élevage et des UTA qui leur sont associées pour chacun des traitements étudiés durant les quatre élevages est présentée à la Figure 19.

Les émissions sont pondérées selon la masse totale des porcs hébergés dans chacune des chambres en fonction du temps. Comme prévu, l'aspersion d'huile n'a eu aucun effet sur la réduction des émissions d'ammoniac en comparaison aux résultats obtenus dans le cas du témoin avec une valeur moyenne similaire d'environ 156 ± 20 mg NH₃/kg porc/jour. Par contre, la séparation du lisier par la gratte en V a permis une réduction significative des émissions d'ammoniac (110 ± 8 mg NH₃/kg porc/jour; probabilité de $F < 0,01$). C'est l'UTA qui a démontré les meilleures performances de réduction des émissions d'ammoniac avec environ 44 ± 7 mg NH₃/kg porc/jour (toutes combinaisons de stratégies confondues) mesuré à la sortie des chambres, ce qui représente une performance d'enlèvement moyenne de 66 ± 3 %. Puisqu'aucun traitement employé uniquement à l'intérieur des chambres n'a eu d'impact important sur les émissions, il apparaît clair que l'UTA est efficace à elle seule pour réduire l'ammoniac dans l'air.

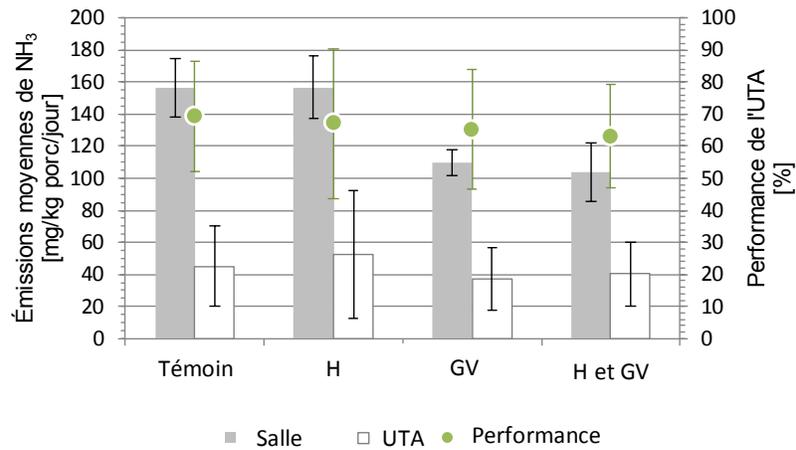


Figure 19. Émissions moyennes de NH₃ et performance de l'UTA (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au témoin durant les quatre élevages (n=4).

Poussières

La quantité moyenne de poussière émise des salles d'élevage et de leurs UTA associées est présentée à la Figure 20 pour tous les traitements étudiés. Les émissions moyennes sont évaluées en fonction de la masse totale des porcs hébergés dans chacune des salles en fonction du temps.

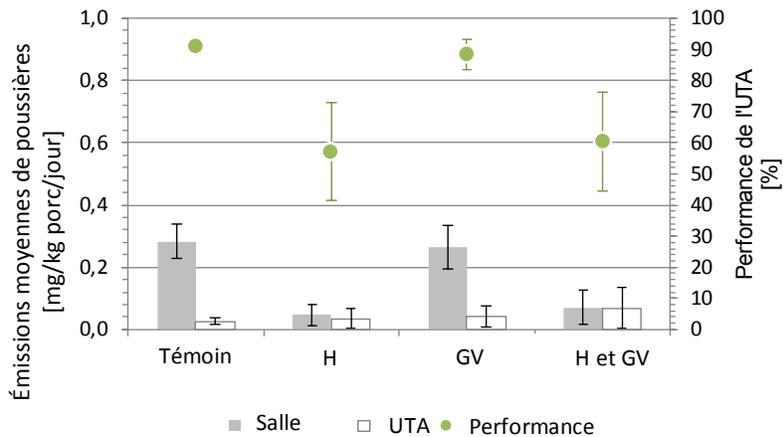


Figure 20. Émissions moyennes de poussières et performance de l'UTA (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au témoin durant les quatre élevages (n=4).

Comme discuté précédemment à propos de la qualité de l'air des salles d'élevage, la séparation du lisier avec la gratte en V n'eut aucune influence sur la réduction des émissions de poussières en comparaison au témoin avec des résultats similaires de $0,3 \pm 0,1$ mg poussière/kg porc/jour. Cependant, l'aspersion d'huile a démontré un effet substantiel et significatif de réduction des émissions de poussières provenant des salles d'élevage ($0,05 \pm 0,03$ mg poussière/kg porc/jour; probabilité de $F < 0,001$), tout comme l'UTA avec un résultat similaire d'environ $0,04 \pm 0,02$ mg poussière/kg porc/jour pour tous les traitements confondus. Plutôt que d'assurer un impact additionnel sur l'enlèvement des poussières, la combinaison de ces stratégies (H et UTA) a eu un impact négatif sur les performances de l'UTA. En effet, les performances d'enlèvement des poussières ont chuté de 90 ± 2 à 59 ± 2 % lorsque l'aspersion d'huile a été utilisée en amont de l'unité (à l'intérieur des salles). Comme l'aspersion d'huile enlève la majeure partie des poussières supérieures à $PM_{2,5}$, il semblerait que l'UTA est alors moins efficace à traiter les plus fines particules restantes.

5.3 Objectif 3 - Implantation de la combinaison optimale à l'échelle commerciale

À la lumière des résultats obtenus lors de la réalisation de l'objectif 2, toutes les stratégies étudiées (GV, H, UTA) ont été retenues pour être appliquées à l'échelle commerciale. Les résultats moyens des traitements étudiés (stratégies de réduction des contaminants combinées) au cours des deux élevages à l'échelle précommerciale sont présentés à cette section. Les deux stratégies effectives directement à l'intérieur de la salle n° 2 (gratte en V et aspersion d'huile) sont comparées au témoin (gestion conventionnelle sans stratégie) de la salle n° 1. La présence de l'unité de traitement d'air à la sortie de la salle n° 2 agit à titre de barrière supplémentaire aux contaminants. Ainsi, les résultats de l'UTA reflètent seulement les émissions à la sortie d'un bâtiment et non la qualité de l'air à l'intérieur de la salle. De plus, les concentrations mesurées dans l'air extérieur ont été déduites de tous les résultats pour mettre en évidence l'effet de l'élevage et des stratégies de réduction. Les performances animales sont d'abord présentées, suivies de celles relatives à la qualité de l'air dans les salles d'élevage et aux émissions à l'environnement pour chacun des contaminants évalués (NH_3 , poussières, odeurs et bioaérosols). Les autres gaz évalués (CH_4 , CO_2 et N_2O) n'ont pas démontré de résultats d'intérêts par rapport aux objectifs de l'étude et ne sont donc pas présentés dans le présent rapport par souci de pertinence et pour en alléger le contenu.

5.3.1 Performance animale

La performance animale en matière de gain de poids est présentée au Tableau 9 pour l'ensemble des élevages, le gain de poids est similaire pour tous les traitements étudiés (environ 1,0 kg/porc/jour). La répartition des porcs revue à la semaine 3 de chaque élevage afin de conserver un poids similaire dans chacune des salles peut expliquer qu'aucun paramètre de l'expérience n'ait pu influencer la performance animale. De plus, le second élevage a été d'une durée d'une semaine supplémentaire ce qui peut expliquer les valeurs légèrement plus élevées obtenues, en particulier pour ce qui est du poids cumulé dans les salles.

Tableau 9. Gain moyen et poids total dans chacune des salles lors des deux élevages

	E1 46 jours		E2 53 jours	
	Salle 1	Salle 2	Salle 1	Salle 2
Gain moyen [kg/porc/jour]	1,0	1,0	1,1	1,1
Poids total [kg]	1087	1131	1332	1362

5.3.2 Qualité de l'air dans les salles d'élevage

Ammoniac

Les concentrations en ammoniac mesurées à l'intérieur des salles et à la sortie de l'unité de traitement de l'air ont été comparées à celles définies par les normes de la CNESST (Tableau 10). Que ce soit pour la VEMP (valeur d'exposition moyenne pondérée) ou la VECD (valeur d'exposition de courte durée), les concentrations dans toutes les salles n'ont jamais excédé les valeurs standards au cours des deux élevages.

La valeur maximale de concentration sur une période de 15 minutes a été atteinte dans la salle témoin lors de l'essai 2, mais elle reste bien en dessous de la VECD ($11 \text{ mg NH}_3/\text{m}^3 < \text{VECD de } 24 \text{ mg NH}_3/\text{m}^3$). Les concentrations maximales mesurées sont assez similaires d'une salle à l'autre (E1 : 5,9 et 6,3 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$ pour les salles n° 1 et n° 2 respectivement, et E2 : 11 et 10 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$ pour les salles n° 1 et n° 2 respectivement). Elles sont toutefois plus faibles à la sortie de l'unité de traitement d'air pour chacun des élevages (E1 : 2,1 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$ et E2 : 2,8 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$).

Tableau 10. Concentrations en NH_3 (moy. \pm écart-type) comparées aux normes de la CNESST

NH3 Standard		VEMP ¹ : 17 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$	VECD ² : 24 $\text{mg NH}_3/\text{m}^3$
	Témoin	2,9 \pm 0,8	5,9
E1	H et GV	3,5 \pm 0,8	6,3
	H, GV et UTA	1,3 \pm 0,4	2,1
	Témoin	5 \pm 2	11
E2	H et GV	5 \pm 1	10
	H, GV et UTA	1,0 \pm 0,5	2,8

H : aspersion d'huile, GV : gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air

¹ VEMP : valeur d'exposition moyenne pondérée (période de 8 h/jour et de 40 h/semaine)

² VECD : valeur d'exposition de courte durée (maximum sur une période de 15 min)

Les concentrations moyennes pondérées sur une semaine de travail sont aussi bien inférieures aux normes avec une concentration moyenne maximale d'environ 5 mg/m³ (< VEMP de 17 mg NH₃/m³) mesurée durant l'élevage 2 pour chacune des salles. C'est encore une fois à la sortie de l'UTA que sont obtenues les plus faibles concentrations avec des moyennes de 1,3 ± 0,4 et 1,0 ± 0,5 mg NH₃/m³ durant les élevages 1 et 2 respectivement, ce qui confirme son potentiel à traiter l'ammoniac. La qualité de l'air reflétée par ces concentrations plus faibles que les standards peut être expliquée en partie par la propreté des salles qui étaient des constructions neuves au démarrage du projet.

Odeurs

En raison du nombre limité de mesures ayant été prises, les résultats d'intensité d'odeurs pour les deux élevages ont été combinés et sont présentés à la Figure 21. Pour la salle témoin n° 1, l'intensité d'odeur moyenne était de 8 250 ± 1 000 ppm butanol alors qu'elle était de 3 400 ± 575 ppm butanol pour la salle n° 2 comprenant les stratégies de réduction combinées (GV et H), soit une différence de l'ordre de 60 %. La présence de l'UTA à la sortie de la salle n° 2 a permis une réduction d'odeur supplémentaire d'environ 40 % avec une valeur d'intensité mesurée de 1 100 ± 290 ppm butanol.

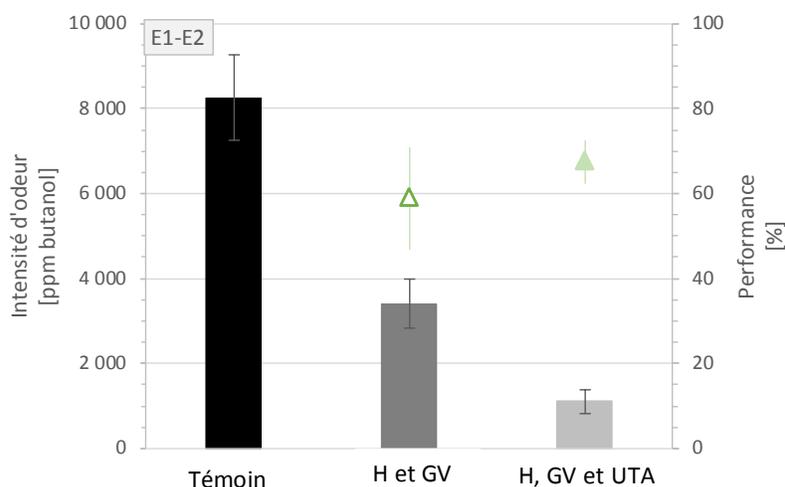


Figure 21. Intensité d'odeur moyenne (avec écart-type) pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au témoin durant les deux élevages (n=4).

Poussières et bioaérosols

Les concentrations moyennes de poussières mesurées au cours de chacun des élevages sont présentées au Tableau 11 pour chacune des stratégies étudiées. Elles sont nettement supérieures dans la salle témoin n° 1 (1,4 ± 0,9 et 2,5 ± 0,4 mg poussières/m³ pour les essais 1 et 2 respectivement) par rapport à celles mesurées dans la salle n° 2 (0,5 ± 0,2 et 0,7 ± 0,1 mg poussières/m³ pour les essais 1 et 2 respectivement) dans laquelle des stratégies de réduction ont été appliquées. Comme démontré lors de la réalisation de l'objectif 2, l'impact de réduction des poussières est attribuable particulièrement à l'aspersion d'huile. La présence de l'unité de traitement d'air permet une réduction supplémentaire en agissant comme barrière physique à la sortie des salles et assure ainsi une réduction maximale des poussières lors de

chacun des élevages ($0,05 \pm 0,02$ et $0,03 \pm 0,01$ mg poussières/m³ pour les essais 1 et 2 respectivement).

Tableau 11. Concentration moyenne (avec écart-type) de poussières pour chacune des stratégies étudiées, en comparaison avec le témoin

	E1 [mg poussière/m ³]	E2 [mg poussière/m ³]
Témoin	1,4 ± 0,9	2,5 ± 0,4
H + GV	0,5 ± 0,2	0,7 ± 0,1
H + GV + UTA	0,05 ± 0,02	0,03 ± 0,01

H : aspersion d'huile

GV : séparation du lisier par gratte en V

UTA : unité de traitement d'air

Les pourcentages suivants de réduction des poussières ont été observés pour la salle précommerciale n° 2 dans laquelle il y avait aspersion d'huile et séparation à la source des déjections (Tableau 12) : 42 % pour les poussières totales (analyse par gravimétrie) et de 59 à 65 % pour les PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ et poussières totales (DustTrak™ DRX Aerosol Monitor). Comme noté à l'objectif 2, l'aérosolisation et la présence de particules plus fines semblent être moins réduites par l'emploi d'huile (PM_{2,5} par rapport à PM₁₀). La biofiltration a permis de diminuer un 39 % additionnel en poussières totales (gravimétrie). Il a été impossible d'obtenir des concentrations de poussières (particules solides) valables à l'aide du compteur optique de particules (DustTrak™ DRX Aerosol Monitor) pour les échantillons pris en aval de l'unité de traitement d'air (biofiltration), en raison du ruissellement de la solution nutritive sur le biofilm et de l'émission consécutive de gouttelettes d'eau par le biofiltre.

Tableau 12. Pourcentage d'efficacité de réduction des poussières (moyenne ± écart-type, [min - max]) des différentes stratégies de réduction de contaminants de l'air

Technologie de réduction	Poussière totale (gravimétrie)	Poussière totale (DustTrak™ DRX Aerosol Monitor)	PM ₁₀	PM ₄	PM _{2,5}	PM ₁
Aspersion d'huile et séparation à la source des déjections	42 ± 14 [22 – 52]	60 ± 21 [22 -81]	65 ± 20 [29 – 84]	60 ± 18 [28 – 81]	59 ± 19 [26 – 80]	59 ± 19 [25 – 80]
Biofiltration (UTA) par lui-même	39 ± 19 [16 – 64]	N/A ^a	N/A	N/A	N/A	N/A

^aN/A: ne s'applique pas

L'aspersion d'huile et la séparation à la source des déjections ont réduit jusqu'à 95 % les concentrations en bactéries cultivables (n = 6, Tableau 13). Une diminution des concentrations en endotoxines et en bactéries (quantification PCR) totales a été observée dans 4/6 et 5/6 des échantillons de l'air ambiant des salles, respectivement. Comme attendu, les quantités en bactéries cultivables étaient supérieures dans les échantillons d'air traité par le biofiltre. En effet, l'UTA a été conçue à la base pour réduire les émissions de gaz et d'odeurs à l'aide d'un biofilm bactérien se développant sur un milieu synthétique (support en plastique) et maintenu actif par le ruissellement continu d'une solution nutritive sur celui-ci. Vivantes et actives métaboliquement, les bactéries du biofiltre peuvent être alors relâchées dans l'air sortant. Une diminution par l'UTA des concentrations d'endotoxines et de bactéries totales n'a été possible que dans 50 % des échantillons (Tableau 13).

Tableau 13. Pourcentage d'efficacité de réduction des endotoxines et des bactéries (moyenne ± écart-type, [min - max]) des différentes stratégies de réduction de contaminants de l'air

Technologie de réduction	Endotoxine	Bactérie cultivable	Bactérie totale
Aspersion d'huile et séparation à la source des déjections	Une réduction a été observée dans 4 échantillons sur 6 [-6 ^a – 87]	84 ± 14 [56 – 95]	Une réduction a été observée dans 5 échantillons sur 6 [-4 – 84]
Biofiltration (UTA) par lui-même	Une réduction a été observée dans 3 échantillons sur 6 [-3 127 – 64]	Aucune réduction observée [-80 733 - -627]	Une réduction a été observée dans 3 échantillons sur 6 [-593 – 63]

^aUne valeur négative représente une augmentation et non une réduction

5.3.3 Émissions de contaminants dans l'environnement

Ammoniac

Les émissions d'ammoniac quotidiennes obtenues pour chacun des élevages (E1 et E2) sont présentées à la Figure 22. Les résultats sont présentés sur la base de mg NH₃/kg porc/jour, ce qui comprend à la fois le débit d'air des salles et la masse totale des porcs hébergés dans chacune des salles en fonction du temps.

Lors du premier élevage (Figure 22A), les émissions de NH₃ étaient relativement stables au fil du temps alors qu'elles étaient en constante augmentation lors du second élevage (Figure 22B). Plus de tests employant ces nouvelles salles d'élevage seraient requis par des études ultérieures afin de bien comprendre la dynamique des émissions de NH₃. Cependant, les émissions mesurées dans chacune des salles ne se sont pas avérées statistiquement différentes.

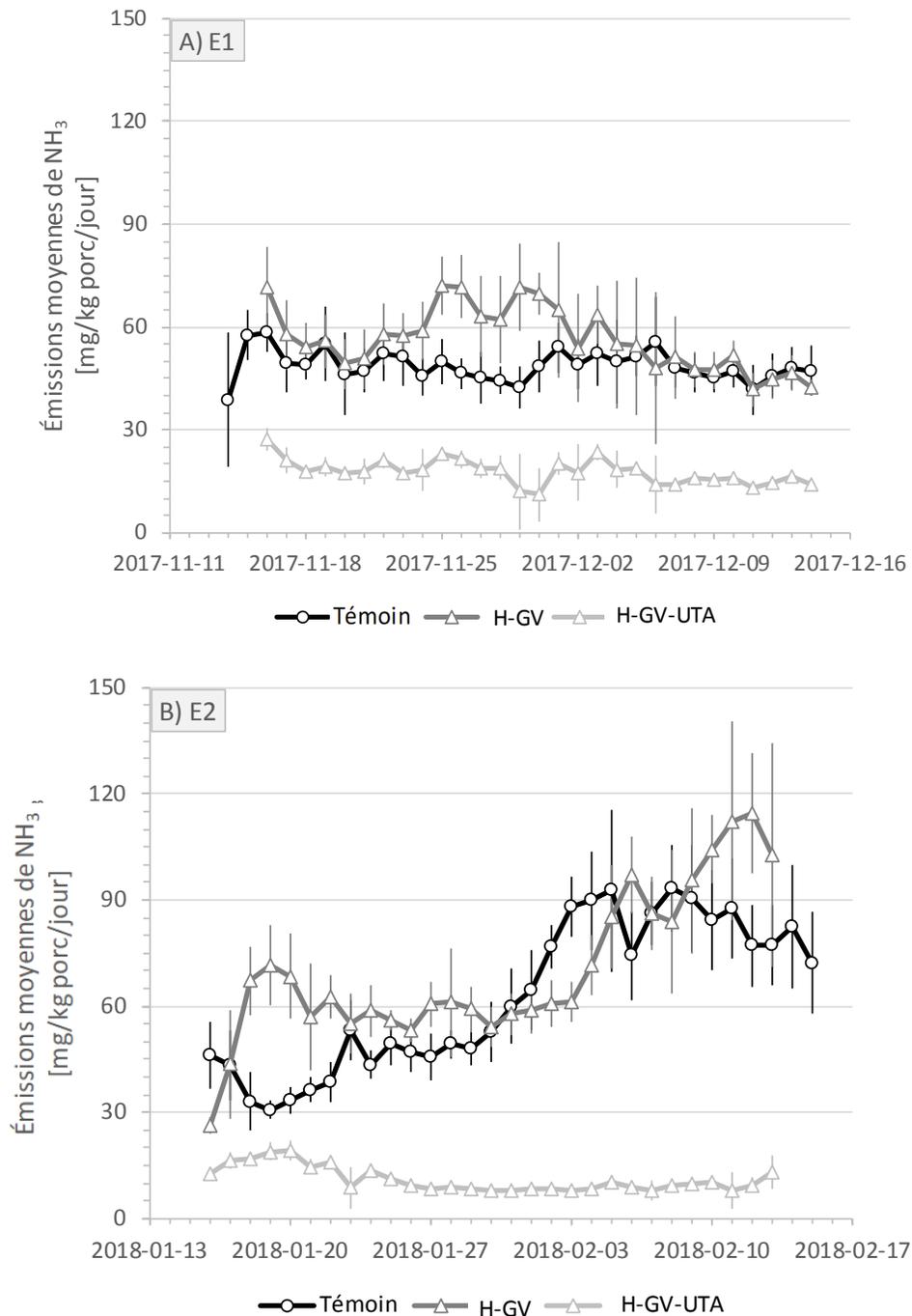


Figure 22. Émissions moyennes quotidiennes de NH₃ pour chacune des stratégies étudiées (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V, UTA : unité de traitement de l'air) en comparaison au témoin pour : A) élevage 1 et B) élevage 2.

La séparation du lisier réalisée dans la salle n° 2 n'a pas permis la réduction des émissions en NH_3 comme il était attendu. Lors de la réalisation de l'objectif 2, les résultats avaient démontré une réduction de l'ordre de 30 %. Comme mentionné dans la méthodologie, la grappe de type industrielle a été adaptée aux besoins des salles nouvellement construites. Il a été observé lors de son opération que les fèces étaient bien retirées de la surface de béton inclinée, mais qu'il en restait une fine couche. Cette couche irrégulière représentait une surface importante constamment maintenue humide au contact de l'urine, ce qui peut expliquer les émissions de NH_3 supérieures. De plus, les fractions liquide et solide du lisier étaient entreposées à même la salle, ce qui peut expliquer la croissance constante des émissions dans le temps.

Les performances de l'unité de traitement comparées aux charges d'ammoniac à l'entrée sont présentées à la Figure 23. Pour chacun des élevages, l'UTA a permis un enlèvement supplémentaire de l'ammoniac, avec une efficacité moyenne de 38 et 66 % respectivement ($p < 0,01$). Lors du second élevage, l'UTA a atteint une efficacité allant même jusqu'à 80 % durant une période de 14 jours. L'efficacité plus faible enregistrée durant le premier élevage peut être attribuable au démarrage de l'UTA qui nécessite une adaptation des microorganismes à leur milieu, et à la charge en NH_3 qui était aussi plus faible à l'entrée de l'unité. Lors de la réalisation de l'objectif 2, les performances moyennes de l'UTA étaient aussi de 66 ± 3 %. Une efficacité allant jusqu'à 93 ± 6 % a pu être obtenue avec une UTA à l'échelle commerciale, mais le débit d'air traité était alors beaucoup plus faible avec un temps de résidence (EBRT) équivalent à 24 secondes plutôt que 5 (Girard *et al.* 2018).

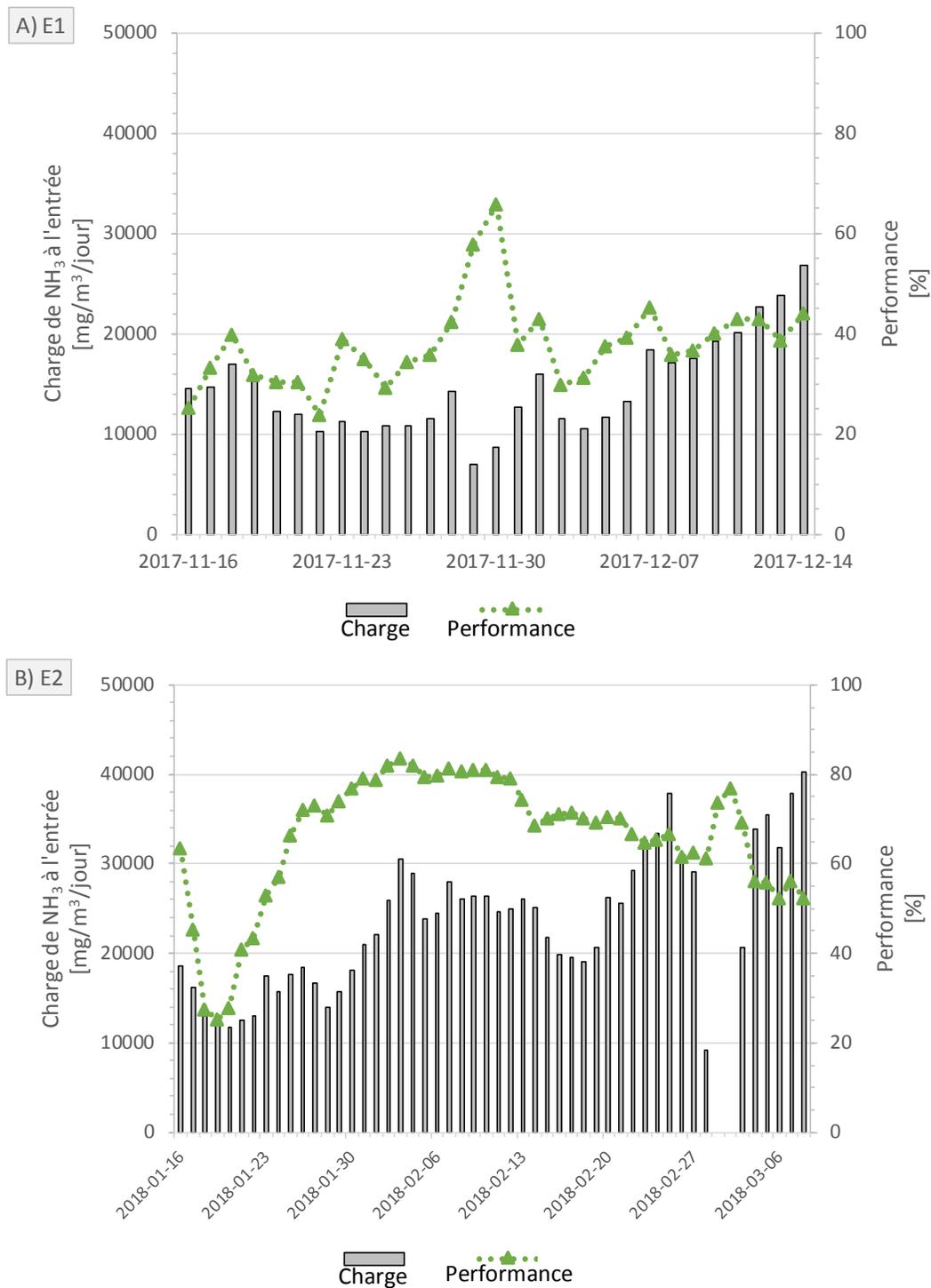


Figure 23. Charge moyenne de NH_3 à l'entrée de l'UTA et son efficacité sur une base quotidienne pour : A) élevage 1 et B) élevage 2.

Poussières

Les résultats d'émissions de poussière sont présentés à la Figure 24. Pour chacune des chambres, des émissions plus faibles ont été observées au début du premier élevage (jusqu'à environ 32 jours). Cela pourrait être attribuable au fait que les chambres étaient fraîchement construites et donc beaucoup plus propres qu'à la normale pour un bâtiment porcine. Toutefois, de manière générale, les émissions de poussières étaient en moyenne plus faibles dans la salle n° 2 à laquelle les stratégies GV et H étaient appliquées (8,0 mg/kg porc/jour pour E1 et 11,5 mg/kg porc/jour pour E2), en comparaison aux émissions de la salle témoin n° 1 (21,2 mg/kg porc/jour pour E1 et 38,5 mg/kg porc/jour pour E2). Les stratégies combinées, déployées dans la salle n° 2 (GV et H), ont permis une réduction moyenne d'environ 70 % des poussières, ce qui est similaire aux résultats obtenus avec l'aspersion d'huile (75 %) lors de la réalisation de l'objectif 2. Pour ce qui est de l'UTA, les résultats ne sont pas concluants puisque les émissions de poussières à l'entrée de l'unité n'étaient pas représentatives de celles que l'on trouve directement à la sortie de la salle, car elles n'étaient pas prélevées au même endroit.

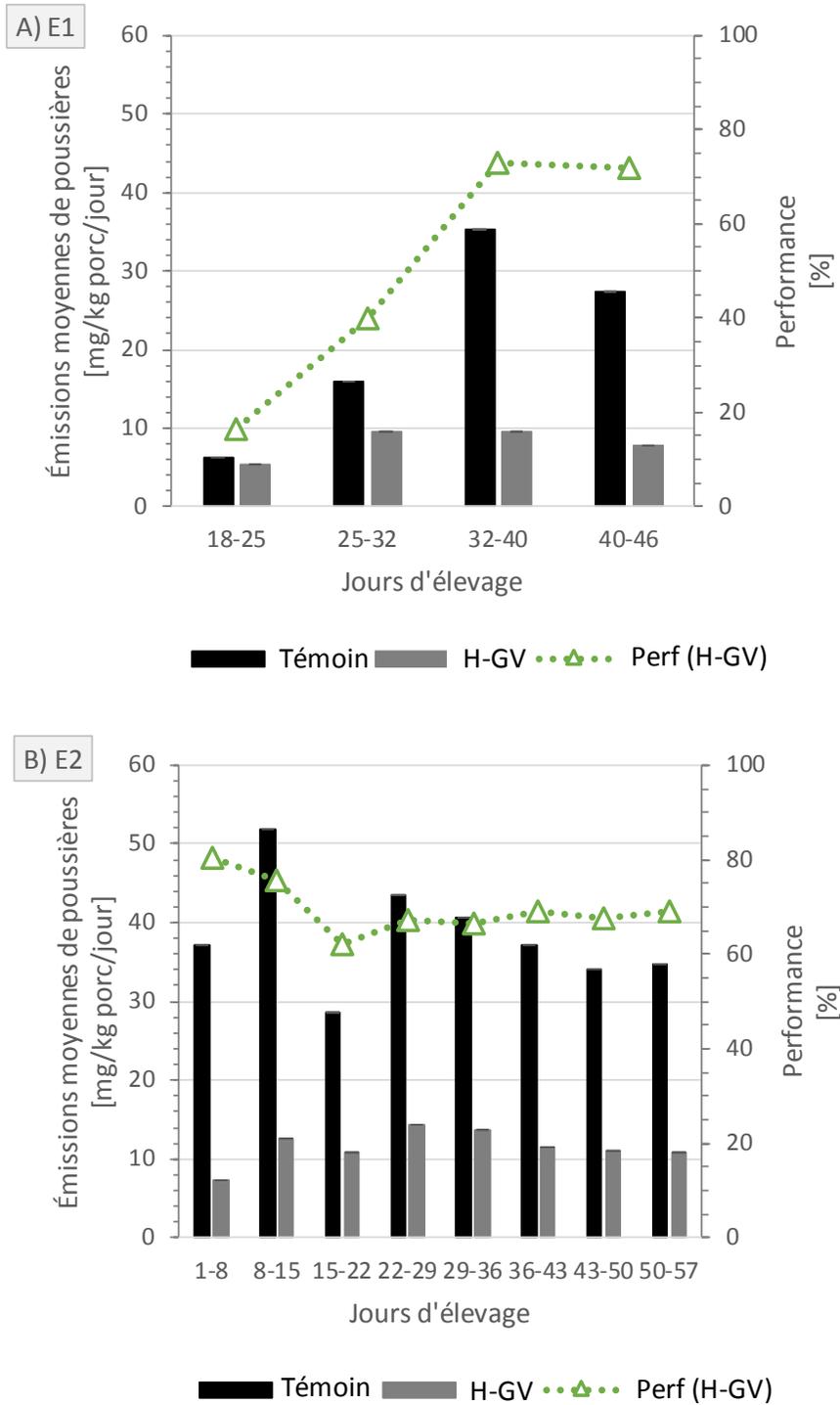


Figure 24. Émissions moyennes de poussières et efficacité de réduction des stratégies (H : aspersion d'huile, GV : séparation du lisier avec gratte en V) en comparaison au témoin sur une base quotidienne pour : A) élevage 1 et B) élevage 2.

6. DISCUSSION

6.1 Objectif 1

L'air des dix élevages de porcs du Québec à l'étude comportait d'importantes concentrations en poussières totales (jusqu'à 9 mg/m^3 , observées à l'aide du compteur d'optique des particules), en endotoxines ($6,02 \times 10^2 - 3,40 \times 10^4 \text{ UE/m}^3$) et en bactéries cultivables ($10^4 - 10^6 \text{ UFC/m}^3$) et totales ($8,06 \times 10^7 - 3,34 \times 10^9$ d'équivalents en génomes *E. coli* par mètre cube d'air). Comme illustré dans la Figure 10, les concentrations en poussières étaient variables d'un élevage à l'autre puisqu'elles étaient influencées par : le positionnement des ventilateurs, le système de distribution de la moulée, les activités des animaux et la propreté générale du bâtiment (Duchaine *et al.* 2000; Pedersen *et al.* 2000). Une importante corrélation a été observée entre les concentrations en poussières totales relevées par le compteur optique DustTrak DRX Aerosol Monitor et celles obtenues par gravimétrie (Pearson $r = 0,94$, $p = 0,0004$, Figure 25).

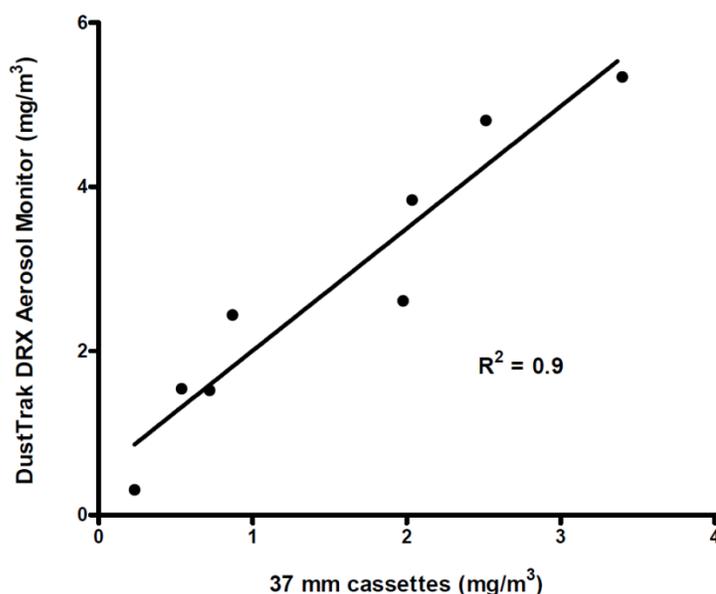


Figure 25. Corrélation entre les concentrations en poussières totales obtenues par gravimétrie (37 mm cassettes) et celles provenant du DustTrak DRX Aerosol Monitor.

Les concentrations en poussières totales du compteur optique de particules étaient toutefois toujours plus importantes que celles obtenues par gravimétrie. La différence s'explique possiblement par : 1) une plus faible efficacité des cassettes 37 mm à échantillonner sur membrane filtrante les particules plus larges, 2) le fait que le DustTrak DRX Aerosol Monitor compte les particules de l'air gonflées artificiellement par la condensation de la vapeur d'eau, surestimant ainsi la masse de celles-ci. En effet, les élevages de porcs sont des environnements très humides (de 60 à 84 % d'humidité relative [$73 \pm 8 \%$], données non incluses dans le rapport). Les concentrations en poussières totales n'ont toutefois jamais été supérieures à celle normée par la Loi sur la santé et la sécurité du travail, soit 10 mg/m^3 (Annexe I du Règlement sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, r. 13 de la Loi sur la santé et la sécurité du travail, Gouvernement du Québec). Il y avait toutefois présence de poussières totales ($> 2,4 \text{ mg/m}^3$), d'endotoxines ($> 50 \text{ UE/m}^3$) et de bactéries cultivables

(> 10^3 UFC/m³) à des concentrations associées à des fréquences plus élevées de symptômes respiratoires et à des réductions des fonctions respiratoires (Donham, K., Haglind, Peterson, Rylander et Belin, 1989; Donham, K. J. *et al.*, 1995; Heederik et Douwes, 1997). Les concentrations en bactéries cultivables (Goyer, Lavoie, Lazure et Marchand, 2001) et totales (qPCR) (Letourneau *et al.*, 2010; Nehme *et al.*, 2008) sont équivalentes à celles trouvées dans la littérature scientifique. Une différence de $3\log_{10}$ observée dans la présente étude entre les quantités obtenues en culture (10^4 - 10^6) et celles par PCR (10^7 - 10^9) reflète la sensibilité de l'analyse par PCR et le faible taux de récupération par culture des bactéries environnementales (Amann, Ludwig et Schleifer, 1995).

Parmi les agents pathogènes humains, *S. aureus* ont été les plus fréquemment détectées dans les bioaérosols des dix élevages de porcs, et contrairement aux autres bactéries à l'étude, à des quantités semblables d'un bâtiment à un autre (qPCR 10^4 - 10^5 par rapport à culture 10^2 - 10^4). Ces concentrations similaires s'expliquent puisque *S. aureus* compose la flore commensale de la peau des porcs et que la densité animale (m² par animal) est peu variable, car réglementée par le Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage (CNSAE). Des souches de SARM ont été trouvées dans 50 % des porcheries. À l'exemple de *S. aureus*, l'analyse par PCR a permis de révéler la présence de *Salmonella spp.* à des concentrations plus ou moins importantes (10^2 - 10^6) dans tous les bâtiments d'élevage. La gestion des lisiers par les producteurs de porcs (fréquence d'élimination des fèces par vidange de la préfosse) a possiblement influencé les quantités détectables de *Salmonella spp.*, celle-ci étant présente dans la flore intestinale des animaux. Il a toutefois été impossible de cultiver la bactérie à Gram négatif dans le milieu de culture sélectif Bismuth Sulfate Agar. Abîmées par l'aérosolisation puis par l'échantillonnage d'air, les souches viables et cultivables étaient possiblement présentes à des concentrations inférieures à la limite de détection des méthodes d'échantillonnage et d'analyse. À l'opposé, la bactérie sporulante *C. difficile* a davantage été détectée par culture que par qPCR, dû possiblement à une méthode d'extraction d'ADN inefficace à briser les spores, une méthode employant pourtant des billes en verre afin de détruire mécaniquement les parois cellulaires. La culture de la *C. difficile* a été possible puisque les spores résistent davantage aux différents stress environnementaux tels que la dessiccation consécutive à l'aérosolisation. Les bactéries *M. avium* n'ont, de même, pu être révélées que par culture; l'incapacité du bris mécanique pour l'extraction du matériel génétique semble être encore responsable de l'absence de détection par PCR. En effet, les souches bactériennes du genre *Mycobacterium* sont constituées d'une paroi cellulaire complexe composée de lipides rendant, entre autres, la bactérie hydrophobe (Niederweis, Danilchanka, Huff, Hoffmann et Engelhardt, 2010). Finalement, aucun *L. monocytogenes* n'a pu croître dans le milieu de culture sélectif PALCAM, même si l'agent pathogène a déjà été détecté dans des porcheries de France et qu'il s'avère difficile à éliminer par des méthodes de désinfection (Boscher, Houard et Denis, 2012; Desneux, Biscuit, Picard et Pourcher, 2016).

Les gènes de résistance au zinc et au cadmium (*czrC*) se trouvaient dans les bioaérosols de tous les élevages de porcs. Le gène *czrC* est fréquemment associé au genre *Staphylococcus* et a été localisé sur le même élément génétique que le gène *mecA* conférant la résistance à la méticilline du SARM (Cavaco *et al.*, 2010). Dans la présente étude, l'origine des gènes *czrC* n'a pas été évaluée et ils ne peuvent ainsi être liés à un genre bactérien particulier. Il y a toutefois eu codétection des gènes *czrC* et *S. aureus* dans toutes les porcheries. L'emploi de zinc et autres métaux lourds dans l'alimentation des animaux à titre de promoteur de croissance explique probablement la sélection du gène *czrC* au sein de la communauté bactérienne. La

présence de gènes de résistance blaCTX-M-1 dans l'air de 60 % des élevages est problématique d'un point de vue de la santé publique puisque les céphalosporines de 3^e génération sont employées dans les hôpitaux afin de soigner de sévères infections telles que les méningites bactériennes. Le gène blaCTX-M est fréquent chez les membres de la famille *Enterobacteriaceae*, laquelle inclut des agents pathogènes humains (Coque *et al.*, 2008). Il est finalement inquiétant de trouver des gènes de résistance à la colistine (mcr-1, 60 % des porcheries) dans les bioaérosols considérant l'emploi de la colistine dans les centres hospitaliers pour le contrôle de souches de bactéries multirésistantes (ex. : *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*). La détection du gène mcr-1 dans les élevages de porcs est de plus surprenante, car l'emploi de la colistine est restreint et contrôlé par les vétérinaires. L'antibiotique est utilisé, par exemple, pour traiter la diarrhée postsevrage chez les porcelets. L'échange ou la circulation des gènes mcr-1 dans la population de bactéries est possible par la sélection et la transmission d'éléments génétiques mobiles contenant le gène mcr-1 ainsi que d'autres gènes de résistance aux antibiotiques. Il s'agit d'antibiotiques plus fréquemment administrés aux différents lots de porcs et responsables de la sélection des éléments. Il est toutefois important de préciser que les gènes de résistance aux antibiotiques peuvent être présents dans des bactéries n'ayant pas la capacité de coloniser les êtres humains et présentant ainsi un risque moindre pour la santé des travailleurs.

Afin de pallier les lacunes liées à l'échantillonnage de l'air, la communauté scientifique explore des avenues alternatives pour compléter les études d'exposition des travailleurs aux bioaérosols. Porte d'entrée des contaminants aériens vers les poumons, le nasopharynx semble constituer un réservoir à long terme des bioaérosols inhalés. Dans la présente étude, la présence d'agents pathogènes humains et de gènes de résistance au zinc et aux antibiotiques a été évaluée par PCR dans la flore nasopharyngée de producteurs de porcs et de sujets non exposés (Figure 11). À l'exception de *Salmonella* spp., l'analyse des résultats a révélé une prévalence plus élevée des différents agents biologiques chez les éleveurs. La présence de *Salmonella* spp. chez les sujets non exposés est surprenante puisqu'un des critères d'inclusion était l'absence de contact des sujets avec des animaux d'élevage. De plus, le séquençage à haut débit a permis d'établir une corrélation entre la diversité bactérienne de la flore nasopharyngée des travailleurs de porcheries et celle des bioaérosols trouvés dans les bâtiments d'élevages porcins (Figure 12). Ces résultats sont parmi les premiers à lier la composition microbienne de la flore nasopharyngée de personnes exposées avec celles de la source d'exposition (air). La différence dans la communauté bactérienne du nasopharynx des travailleurs et des sujets non exposés ainsi que l'importante corrélation entre le nasopharynx des éleveurs et les bioaérosols des porcheries suggèrent que les travailleurs sont porteurs des microbes que l'on trouve dans les bioaérosols. Les résultats du présent projet de recherche corroborent ceux sur la flore nasale de Kraemer *et al.* et mettent en évidence l'impact de la flore bactérienne des bioaérosols sur celle des voies respiratoires supérieures (Kraemer *et al.* 2018). L'écouvillonnage de la flore du nasopharynx pourrait donc être utilisé pour l'évaluation de l'exposition ou pour déterminer l'identité de marqueurs d'exposition aux microorganismes présents dans l'air de toutes les porcheries du Québec et du Canada.

6.2 Objectif 2

La deuxième partie de ce projet avait comme objectif de tester la performance de différentes stratégies favorisant la réduction des contaminants de l'air, dans le but de déterminer la meilleure combinaison. Les essais réalisés à l'échelle laboratoire ont permis de comparer l'efficacité des technologies utilisées seules ou combinées avec des conditions témoins (Tableau 14).

Tableau 14. Comparaison relative des différentes technologies de réduction

	Ammoniac	Poussière	Bioaérosols	Odeurs
Huile	-	+++	+++	+
Gratte en V	+	-	-	+
UTA	++	+++	++	++
Huile + UTA	++	+++	+++	++
Gratte en V + UTA	++	+++	++	++
Huile + gratte en V + UTA	++	+++	+++	++

- : Aucun effet

+ : Réduction de 0 à 40 %

++ : Réduction de 40 à 80 %

+++ : Réduction plus grande que 80 %

À la suite de l'analyse des résultats, un comité d'experts a été constitué afin de déterminer la meilleure combinaison de technologies à tester à l'échelle commerciale. Les différents scénarios ont été évalués pour leur performance de réduction, mais aussi en fonction des faisabilités technique et économique. Le système de traitement de l'air a démontré les meilleures performances pour tous les contaminants de l'air testés, mais il est seulement possible de traiter les émissions à la sortie d'un bâtiment avec cette technologie. Pour réduire les concentrations de contaminants à l'intérieur d'un bâtiment, l'aspersion d'huile est très efficace pour la poussière et les bioaérosols, tandis que la gratte en V permet une certaine réduction de l'ammoniac. Le système d'aspersion d'huile est relativement peu dispendieux et facile à intégrer dans un bâtiment, alors que la gratte en V est complexe et très coûteuse. Une analyse économique est donc nécessaire pour évaluer plus précisément les coûts d'implantation de la gratte en V et sa pertinence pour les producteurs québécois. Le comité d'experts a conclu que, pour protéger à la fois la santé des travailleurs à l'intérieur des bâtiments et celle des résidents ruraux, les trois technologies devraient être utilisées simultanément.

Il est important de ne pas exagérer la portée des résultats issus de ces essais. Les salles à l'échelle laboratoire, utilisées pour atteindre cet objectif, sont très utiles pour comparer plusieurs traitements avec un seul essai. Par contre, puisque les salles ne contiennent que 4 ou 5 porcs dans des conditions très bien contrôlées, les émissions brutes ne sont pas équivalentes à celles des fermes commerciales. C'est la raison pour laquelle il faut seulement regarder l'effet relatif des traitements et cela peut généralement être reproduit à l'échelle commerciale.

6.3 Objectif 3

Le but de la dernière partie de ce projet était de valider à l'échelle commerciale la performance de la meilleure combinaison des technologies de réduction. Malheureusement, il n'a pas été possible de trouver un bâtiment commercial adéquat pour réaliser cette partie du projet. Il a donc été décidé de faire un essai dans un laboratoire de l'IRDA, à l'échelle précommerciale. Deux salles ont été mises en place pour les besoins de ce projet. L'implantation du système d'aspersion d'huile et de l'UTA a été relativement facile, mais la fabrication d'une nouvelle gratte en V a posé un défi important. Pour les essais à l'échelle laboratoire, le grattage de la surface en V était effectué manuellement, mais cela n'était pas possible à l'échelle précommerciale vu la taille du plancher. Il a donc été décidé de modifier un système de gratte conventionnel sur un plancher de béton incliné. La nouvelle gratte en V a permis d'obtenir ce qui semblait être une bonne séparation de l'urine et des fèces, mais malheureusement, il n'a pas été possible d'observer d'effet sur la concentration d'ammoniac par rapport à celle d'une salle conventionnelle. La gratte conventionnelle était conçue pour un plancher horizontal, il est donc possible qu'elle n'appliquait pas suffisamment de force sur la surface inclinée pour bien éliminer la matière solide du lisier. De plus, le plancher de béton incliné a été fabriqué par les ouvriers de l'IRDA et ne présentait pas une surface lisse et uniforme, permettant l'accumulation d'une fine couche de fèces telle qu'expliquée à la sous-section 5.4.3. Le fait que les déjections étaient entreposées à même les salles peut aussi expliquer qu'il n'y ait pas eu d'effet observé sur les émissions d'ammoniac entre les salles test et témoin. Plus de tests employant ces nouvelles salles d'élevage auraient possiblement permis de bien comprendre la dynamique des émissions d'ammoniac.

Même si la gratte en V n'a pas permis d'observer les résultats attendus pour l'ammoniac, il a été possible de réduire les émissions à l'extérieur du bâtiment avec l'unité de traitement de l'air. Pour l'odeur, les poussières et les bioaérosols, la combinaison des trois technologies de réduction a permis d'obtenir des résultats semblables aux essais à l'échelle laboratoire. Les essais de l'objectif 4 ont donc démontré, en partie, le potentiel de la combinaison des trois technologies pour la réduction des contaminants de l'air.

7. CONCLUSION

Les résultats de ce projet ont permis de démontrer la présence de plusieurs pathogènes humains et de gènes de résistance à la fois dans les bâtiments d'élevages porcins et dans la flore nasopharyngée des travailleurs. De plus, il a été possible d'établir une corrélation entre la diversité bactérienne de la flore nasopharyngée des travailleurs de porcheries et celle des bioaérosols trouvés dans les bâtiments d'élevages porcins. Ces résultats sont parmi les premiers à lier la composition microbienne de la flore nasopharyngée de personnes exposées avec celles de la source d'exposition.

En combinant différentes technologies, il a été possible de réduire significativement les contaminants de l'air dans les bâtiments porcins et les émissions dans l'environnement. L'implantation de ces stratégies dans un bâtiment commercial permettrait donc de réduire les risques pour la santé des travailleurs.

Pour faire suite à ce projet, il reste quelques éléments pertinents à explorer :

- Tenter de corréler le nombre d'heures travaillées dans un bâtiment porcin avec la flore nasopharyngée des travailleurs;
- Explorer le potentiel commercial des stratégies de réduction des contaminants de l'air avec une analyse économique;
- Optimiser le système d'aspersion d'huile en :
 - o Vérifiant si l'application d'huile rend le nettoyage des salles plus difficile;
 - o Évaluant s'il est possible d'obtenir les mêmes performances en appliquant l'huile à des endroits précis au lieu d'arroser tout un parc;
 - o Testant l'aspersion d'huile à l'échelle commerciale.

BIBLIOGRAPHIE

- Agdestein, A., Olsen, I., Jorgensen, A., Djonne, B., et Johansen, T.B. (2014). Novel insights into transmission routes of *Mycobacterium avium* in pigs and possible implications for human health. *Veterinary Research*, 45(1), 46.
- Amann, R. I., Ludwig, W. et Schleifer, K. H. (1995). Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 59(1), 143-169.
- Angen, O., Skade, L., Urth, T. R., Andersson, M., Baekbo, P. et Larsen, A. R. (2018). Controlling transmission of MRSA to humans during short-term visits to swine farms using dust masks. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3361. doi: 10.3389/fmicb.2018.03361
- Arfken, A. M., Song, B. et Sung, J. S. (2015). Comparison of airborne bacterial communities from a hog farm and spray field. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(5), 709-717.
- Bach, H. J., Tomanova, J., Schloter, M. et Munch, J. C. (2002). Enumeration of total bacteria and bacteria with genes for proteolytic activity in pure cultures and in environmental samples by quantitative PCR mediated amplification. *Journal of Microbiology Methods*, 49(3), 235-245.
- Bandelj, P., Logar, K., Usenik, A. M., Vengust, M. et Ocepek, M. (2013). An improved qPCR protocol for rapid detection and quantification of *Clostridium difficile* in cattle feces. *FEMS Microbiology Letters*, 341(2), 115-121. doi: 10.1111/1574-6968.12102
- Bonifait, L., Veillette, M., Letourneau, V., Grenier, D. et Duchaine, C. (2014). Detection of *streptococcus suis* in bioaerosols of swine confinement buildings. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(11), 3296-3304. doi: 10.1128/AEM.04167-13
- Bos, M. E., Verstappen, K. M., van Cleef, B. A., Dohmen, W., Dorado-Garcia, A., . . . Heederik, D. J. (2016). Transmission through air as a possible route of exposure for MRSA. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 26(3), 263-269. doi: 10.1038/jes.2014.85
- Boscher, E., Houard, E. et Denis, M. (2012). Prevalence and distribution of *Listeria monocytogenes* serotypes and pulsotypes in sows and fattening pigs in farrow-to-finish farms (France, 2008). *Journal of Food Protection*, 75(5), 889-895. doi: 10.4315/0362-028X.JFP-11-340
- Cavaco, L. M., Hasman, H., Stegger, M., Andersen, P. S., Skov, R., Fluit, A. C., . . . Aarestrup, F. M. (2010). Cloning and occurrence of *czrC*, a gene conferring cadmium and zinc resistance in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* CC398 isolates. *Antimicrobial Agents Chemotherapy*, 54(9), 3605-3608. doi: 10.1128/AAC.00058-10
- Cavaco, L. M., Hasman, H., Aarestrup, F. M., Wagenaar, J. A., Graveland, H., Veldman, K., . . . Dominguez, L. (2011). Zinc resistance of *Staphylococcus aureus* of animal origin is strongly associated with methicillin resistance. *Veterinary Microbiology*, 150(3-4), 344-348.
- Clark, S., Rylander, R., et Larsson, L. (1983) Airborne bacteria, endotoxin and fungi in dust in poultry and swine confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal* 44(7), 537-541.
- Conseil canadien du porc (2014) <http://www.cpc-ccp.com/statistics-farms-e.php> site visité le 1er Juin 2014
- Coque, T. M., Novais, A., Carattoli, A., Poirel, L., Pitout, J., Peixe, L., . . . Nordmann, P. (2008). Dissemination of clonally related *Escherichia coli* strains expressing extended-spectrum

- beta-lactamase CTX-M-15. *Emerging Infectious Diseases*, 14(2), 195-200. doi: 10.3201/eid1402.070350
- Cormier, Y., Tremblay, G., Meriaux, A., Brochu, G., et Lavoie, J. (1990) Airborne microbial contents in two types of swine confinement buildings in Quebec. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 51(6), 304-309.
- Cormier, Y., Boulet, L.P., Bedard, G., et Tremblay, G. (1991) Respiratory health of workers exposed to swine confinement buildings only or to both swine confinement buildings and dairy barns. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 17, 269-275.
- Cormier, Y., Israel-Assayag, E., Racine, G., et Duchaine, C. (2000) Farming practices and the respiratory health risks of swine confinement buildings. *European Respiratory Journal*, 15(3), 560-565.
- Cortus, E. 2006. *A dynamic model of ammonia production within grow-finish swine barns*. (Thèse de doctorat, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK).
- Cousins, D. V., Wilton, S. D., Francis, B. R. et Gow, B. L. (1992). Use of polymerase chain reaction for rapid diagnosis of tuberculosis. *Journal of Clinical Microbiology*, 30(1), 255-258.
- D'Allaire, S., Goulet, L., Brodeur, J., et Roch, G. (1999) *Literature review on the impacts of hog production on public health*. Communication présentée à Symposium of the Hog Environmental Management Strategy (HEMS), Ottawa, ON (p.59-62). Conseil canadien du porc et Agriculture et agroalimentaire Canada.
- Davis, M. F., Pisanic, N., Rhodes, S. M., Brown, A., Keller, H., Nadimpalli, M., . . . Heaney, C. D. (2018). Occurrence of *Staphylococcus aureus* in swine and swine workplace environments on industrial and antibiotic-free hog operations in North Carolina, USA: A one health pilot study. *Environmental Research*, 163, 88-96. doi: 10.1016/j.envres.2017.12.010
- Desneux, J., Biscuit, A., Picard, S. et Pourcher, A. M. (2016). fate of viable but non-culturable *Listeria monocytogenes* in pig manure microcosms. *Frontiers in Microbiology*, 7, 245. doi: 10.3389/fmicb.2016.00245
- Donham, K. J., Zavala, D. C., et Merchant, J. A. (1984). Respiratory symptoms and lung function among workers in swine confinement buildings: A cross-sectional epidemiological study. *Archives of Environmental Health*, 39(2), 96-101.
- Donham, K. J., Pependorf, W., Palmgren, U., et Larsson, L. (1986) Characterization of dusts collected from swine confinement buildings. *American Journal of Industrial Medicine* 10, 294-297.
- Donham, K., Haglund, P., Peterson, Y., Rylander, R. et Belin, L. (1989). Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings. *Occupational and Environmental Medicine*, 46(1), 31-37.
- Donham, K. J., Reynolds, S. J., Whitten, P., Merchant, J. A., Burmeister, L. et Pependorf, 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.
- Duchaine, C., Grimard, Y., et Cormier, Y. (2000) Influence of building maintenance, environmental factors, and seasons on airborne contaminants of swine confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association*, 61(1), 56-63.
- Duquenne, P., Marchand, G., et Duchaine, C. (2013) Measurement of endotoxins in bioaerosols at workplace: a critical review of literature and a standardization issue. *Annals of Occupational Hygiene*, 57(2), 137-172.

- Dutch Expert Committee on Occupational Standards. (2010) *Endotoxins: Health-based recommended occupational limit*. Publication 2010/04OSH. Hague, Pays-Bas: The Health Council of the Netherlands.
- Eduard, W. (2009) Fungal spores: A critical review of the toxicological and epidemiological evidence as a basis for occupational exposure limit setting. *Critical Reviews in Toxicology*, 39(10), 799-864.
- Fallschissel, K., Kampfner, P. et Jackel, U. (2009). Direct detection of salmonella cells in the air of livestock stables by real-time PCR. *Annals of Occupational Hygiene*, 53(8), 859-868. doi: 10.1093/annhyg/mep060
- Ferguson, D. D., Smith, T. C., Hanson, B. M., Wardyn, S. E. et Donham, K. J. (2016). Detection of airborne methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* inside and downwind of a swine building, and in animal feed: Potential occupational, animal health, and environmental implications. *Journal of agromedicine*, 21(2), 149-153. doi: 10.1080/1059924x.2016.1142917
- Francois, P., Pittet, D., Bento, M., Pepey, B., Vaudaux, P., Lew, D. et Schrenzel, J. (2003). Rapid detection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* directly from sterile or nonsterile clinical samples by a new molecular assay. *Journal of Clinical Microbiology*, 41(1), 254-260.
- Girard, M., Lévesque, A. Létourneau, V. Vyskocil, J. Duchaine, C. et Lemay, S. P. (2018). *Full-scale test of a biotrickling filter for the treatment of exhaust air from swine buildings*. Communication présentée au congrès annuel 2018 de la SCGAB, , Guelph, ON: University of Guelph.
- Godbout S. et Joncas R. (2002) *Réduction des odeurs et des émissions gazeuses provenant des bâtiments porcins : partie I : expérimentation à l'échelle réduite* (Rapport n° IRDA 140105). Québec, QC: IRDA.
- Godbout, S., Belzile, M., Lachance, I. Lemay, S. P. Turgeon, M. J., Dufour, V., . . . Marquis, A.. (2006). *Évaluation technico-économique d'un système de séparation liquide/solide des déjections à la source dans un bâtiment porcin et les impacts sur l'environnement : volet II* (Rapport IRDA). Québec, QC: IRDA.
- Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L. et Marchand, G. (2001). *Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention* (Guide technique no T-23). Montréal, QC: IRSST
- Guimont, H., Dufour, V., Pelletier, F., Coulibaly, A., Giguère, C, Godbout, S., . . . Fortin, N. (2007). *Évaluation technique et économique d'un système d'isolement des fèces avec grattes en « V » dans un engraissement commercial* (Rapport final CDPQ). Québec, QC: CDPQ.
- Guingand, N. (2003) Qualité de l'air au bâtiment et stades physiologiques. *Techni-porc*, 26(3): 17-24.
- Guingand, N. (2007). Réduire la densité animale en engraissement quelles conséquences sur l'émission d'odeurs et d'ammoniac? *Journées de la Recherche Porcine en France*, 39, 43-48.
- Hamelin, L., Godbout, S., Thériault, R. et Lemay, S. P. (2010) Evaluating ammonia emission potential from concrete slat designs for pig housing. *Biosystems engineering* 105(4), 455-465.
- Heederik, D. et Douwes, J. (1997). Towards an occupational exposure limit for endotoxins? *Annals of Agricultural Environmental Medicine*, 4(1), 17-19.
- Hitchins, A. D., Jinneman, K. et Chen, Y. (2017). Detection of *Listeria monocytogenes* in foods and environmental samples, and enumeration of *Listeria monocytogenes* in foods. Dans

- FDA. *Bacteriological Analytical Manual*. Silver Spring, MD: U.S. Food and Drug Administration.
- Huletsky, A., Giroux, R., Rossbach, V., Gagnon, M., Vaillancourt, M., Bernier, M., . . . Bergeron, M. G. (2004). New real-time PCR assay for rapid detection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* directly from specimens containing a mixture of staphylococci. *Journal of Clinical Microbiology*, 42(5), 1875-1884.
- Iversen, M., Kirychuk, S., Drost, H., et Jacobson, L. (2000) Human health effects of dust exposure in animal confinement buildings. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 6(4), 283-288.
- Keessen, E. C., Harmanus, C., Dohmen, W., Kuijper, E.J., et Lipman, L.J. (2013) Clostridium difficile infection associated with pig farms. *Emerging Infectious Diseases*, 19(6), 1032-1034.
- Knetsch, C. W., Connor, T. R., Mutreja, A., van Dorp, S. M., Sanders, I. M., Browne, H. P., . . . Kuijper, E. J. (2014). Whole genome sequencing reveals potential spread of *Clostridium difficile* between humans and farm animals in the Netherlands, 2002 to 2011. *Euro surveillance : bulletin Européen sur les maladies transmissibles/European Communicable Disease Bulletin*, 19 (45), 20954.
- Ko, G., Simmons, O. D., 3rd, Likirdopulos, C. A., Worley-Davis, L., Williams, M., et Sobsey, M.D. (2008). Investigation of bioaerosols released from swine farms using conventional and alternative waste treatment and management technologies. *Environmental Science and Technology*, 42(23), 8849-8857.
- Kraemer, J. G., Ramette, A., Aebi, S., Oppliger, A. et Hilty, M. (2018). Influence of pig farming on the human nasal microbiota: Key role of airborne microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(6). doi: 10.1128/aem.02470-17 10.1128/aem.00125-18
- Lemay, S., Godbout, S. Joncas, R. et Marquis, A.. (2002). *Réduction des odeurs et des émissions gazeuses des porcheries : étape 1 : expérience en laboratoire* (Fiche synthèse IRDA). Québec, QC: IRDA.
- Lemay, S. P. et Godbout, S. (2004), *Oil sprinkling for reducing dust and odour emissions of swine buildings* (Rapport IRDA). Québec, QC: IRDA.
- Lemay, S. P., Belzile, M. Zegan, D. Feddes, J. J. R. Godbout, S. et Martel, M.. (2008). Revue systématique de la littérature sur les performances techniques des systèmes de traitement de l'air vicié émis par les bâtiments porcins. *Agrosolutions*, 19(2), 51-62.
- Lemay, S. P., Girard, M., Belzile, M., Hogue, R., Duchaine, C., Létourneau, V., . . . F. Pouliot. (2012) *Un concept innovateur pour traiter l'air émis des bâtiments porcins réduisant l'impact environnemental et favorisant la cohabitation* (Rapport IRDA). Québec, QC: IRDA.
- Lemay, S. P. (2013) *Development of an innovative air cleaning system for swine buildings* (Rapport IRDA, CSRDC project #1009). Québec, QC: IRDA.
- Leser, T.D., Amenuvor, J.Z., Jensen, T.K., Lindecrone, R.H., Boye, M., and Moller, K. (2002) Culture-independent analysis of gut bacteria: the pig gastrointestinal tract microbiota revisited. *Appl Environ Microbiol* 68: 673-690.
- Letellier, A., Messier, S., Pare, J., Menard, J., and Quessy, S. (1999) Distribution of *Salmonella* in swine herds in Quebec. *Veterinary Microbiology* 67(4), 299-306.
- Létourneau, V., Nehme, B., Meriaux, A., Masse, D. et Duchaine, C. (2010). Impact of production systems on swine confinement buildings bioaerosols. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 7(2), 94-102. doi: 10.1080/15459620903425642
- Létourneau, V., Nehme, B., Meriaux, A., Masse, D., Cormier, Y., et Duchaine, C. (2010b) Human pathogens and tetracycline-resistant bacteria in bioaerosols of swine

- confinement buildings and in nasal flora of hog producers. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213(6), 444-449.
- Losacco, C. et Perillo, A. (2018). Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(34), 33901-33910. doi: 10.1007/s11356-018-3344-9
- Lu, Z., Wang, J. et Zhang, Y. (2012). Quantitative real-time PCR detection of airborne *Staphylococcus aureus* in hospital indoor atmosphere. *Modern Applied Science*, 6(3), 22-26. doi: 10.5539/mas.v6n3p22
- Madsen, A. M., Kurdi, I., Feld, L. et Tendal, K. (2018). Airborne MRSA and total *Staphylococcus aureus* as associated with particles of different sizes on pig farms. *Annals Work Exposures and Health*, 62(8), 966-977. doi: 10.1093/annweh/wxy065
- Maghirang, R. G., Christianson, L. L., Riskowski, G. L. et Manbeck, H. B. (1995). Dust control strategies for livestock buildings: A review. *ASHRAE Transactions*, 101(Pt2), 1161-1168.
- Mandal J, et Brandl, H. (2011) Bioaerosols in indoor environment: A review with special reference to residential and occupational locations. *The Open Environmental and Biological Monitoring Journal*, 4(1), 83-96.
- Martel M., (2013) *Modelling the removal of airborne contaminants in swine facilities by a biotrickling filter*. (Thèse de doctorat, l'Université de la Saskatchewan, Saskatoon, SK).
- Massabie, P. et Granier, R. (2004). Incidence de la réduction de la densité animale en engraissement sur la qualité de l'ambiance et son impact sur les performances. *Journées de la recherche porcine en France*, 36, 395-402.
- MCE conseils. (2014). *Impact économique de la filière porcine*. Québec, QC: MCE conseils.
- Molbak, K., Baggesen, D. L., Aarestrup, F. M., Ebbesen, J. M., Engberg, J., Frydendahl, K. . . Wegener, H. C. (1999) An outbreak of multidrug-resistant, quinolone-resistant *Salmonella enterica* serotype Typhimurium DT104. *New England Journal of Medicine* 341(19), 1420-1425.
- Nehme, B., Letourneau, V., Forster, R. J., Veillette, M. et Duchaine, C. (2008). Culture-independent approach of the bacterial bioaerosol diversity in the standard swine confinement buildings, and assessment of the seasonal effect. *Environment Microbiology*, 10(3), 665-675. doi: 10.1111/j.1462-2920.2007.01489.x
- Niederweis, M., Danilchanka, O., Huff, J., Hoffmann, C. et Engelhardt, H. (2010). Mycobacterial outer membranes: In search of proteins. *Trends in Microbiology*, 18(3), 109-116. doi: 10.1016/j.tim.2009.12.005
- Nijhuis, R. H., Veldman, K. T., Schelfaut, J., Van Essen-Zandbergen, A., Wessels, E., Claas, E. C. et Gooskens, J. (2016). Detection of the plasmid-mediated colistin-resistance gene *mcr-1* in clinical isolates and stool specimens obtained from hospitalized patients using a newly developed real-time PCR assay. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 71(8), 2344-2346. doi: 10.1093/jac/dkw192
- Pedersen S., Nonnenmann, M., Rautiainen, R. T., Demmers, G. M., Banhazi, T. et Lyngbye, M. (2000). Dust in pig buildings. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 6(4), 261-274.
- Pelletier, F., Marquis, A., Godbout, S., Joncas, R., Larouche, J. P., Massé, D. et Bigué, P. (2005). Gas and odor emissions from swine building materials. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 721-728.
- Pelletier, F., Godbout, S., Pigeon, S. et Drolet, J.-Y. (2005). *Réduction des émissions de gaz à effet de serre : faisabilité de l'implantation d'une chaîne de gestion des lisiers au Québec*. (Rapport final, IRDA et BPR). Québec, QC: IRDA.
- Pickrell, J. A., Heber, A. J., Murphy, J. P., Henry, S. C., May, M. M., Nolan, D., . . . Schoneweis, D. (1993) Characterization of particles, ammonia and endotoxin in swine confinement operations. *Veterinary and Human Toxicology* 35(5), 421-428.

- Poggenborg, R., Gaini, S., Kjaeldgaard, P., et Christensen, J. J. (2008) Streptococcus suis: Meningitis, spondylodiscitis and bacteraemia with a serotype 14 strain. *Scandinavian Journal of Infectious Diseases* 40(4), 346-349.
- Radon, K., Garz, S., Schottky, A., Koops, F., Hartung, J., Szadkowski, D., and Nowak, D. (2000) Lung function and work-related exposure in pig farmers with respiratory symptoms. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 42(8), 814-820.
- Roschanski, N., Fischer, J., Guerra, B. et Roesler, U. (2014). Development of a multiplex real-time PCR for the rapid detection of the predominant beta-lactamase genes CTX-M, SHV, TEM and CIT-type AmpCs in Enterobacteriaceae. *PLoS One*, 9(7).. doi: 10.1371/journal.pone.0100956
- Schiffman S. S., Bennett, J. L., et Raymer, J. H. (2001) Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina. *Agricultural and Forest Meteorology* 108(3), 213-240.
- Sigurdarson, S. T., et Kline, J. N. (2006) School proximity to concentrated animal feeding operations and prevalence of asthma in students. *Chest* 129(6), 1486-1491.
- Snell-Castro, R., Godon, J. J., Delgenès, J. P., Dabert, P. (2005) Characterisation of the microbial diversity in a pig manure storage pit using small subunit rDNA sequence analysis. *FEMS Microbiology Ecology* 52(2), 229-242.
- Thorne, P. S. (2007) Environmental health impacts of concentrated animal feeding operations: anticipating hazards – searching for solutions. *Environnemental Health Perspectives*, 115(2), 296-297.
- Tirkkonen, T., Pakarinen, J., Moisander, A. M., Makinen, J., Soini, H., and Ali-Vehmas, T. (2007) High genetic relatedness among Mycobacterium avium strains isolated from pigs and humans revealed by comparative IS1245 RFLP analysis. *Veterinary Microbiology* 125(1-2), 175-181.
- Van Ransbeeck, N., Van Langenhove, H., Michiels, A., Sonck, B., and Demeyer, P. (2014) Exposure levels of farmers and veterinarians to particulate matter and gases during operational tasks in pig-fattening houses. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(3), 472-478.
- Viegas, S., Mateus, V., Almeida-Silva, M., Carolino, E., et Viegas, C. (2013) Occupational exposure to particulate matter and respiratory symptoms in Portuguese swine barn workers. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76(17), 1007-1014.
- von Bernuth, R.D., J.D. Hill, E. Henderson, S. Godbout, D. Hamel et F. Pouliot (2005) Efficacy of a liquid/solid isolation system for swine manure. *Transactions of the ASAE*, Vol. 48(4): 1537–1546.
- Von Essen, S. G., et Auvermann, B. W. (2005) Health effects from breathing air near CAFOs for feeder cattle or hogs. *Journal of Agromedicine*, 10(4). 55-64.
- World Health Organisation. (2014) Antimicrobial Resistance Global Report on surveillance. Tiré de <http://www.who.int/drugresistance/documents/surveillancereport/en/>.
- Yuan, W., Chai, T.J., et Miao, Z.M. (2010) ERIC-PCR identification of the spread of airborne Escherichia coli in pig houses. *Science of the Total Environment*, 408(6), 1446-1450.

ANNEXE A

EXPÉRIENCE COMPLÉMENTAIRE SUR LA NOUVELLE FORME DE LATTES

Comme mentionné dans le rapport, il n'a pas été possible d'inclure le nouveau concept de lattes parmi les stratégies de réduction des contaminants dû à un problème d'approvisionnement. Ainsi, une expérience supplémentaire a été réalisée à la suite du second élevage de l'objectif 3, soit au printemps 2018. Les résultats obtenus ont été présentés lors de la conférence de l'AgEng (Ingénierie agricole) en juillet 2018 aux Pays-Bas. L'article rédigé pour cette conférence est présenté intégralement dans cette annexe (traduction de l'original en anglais).

LATTES À FAIBLES ÉMISSIONS POUR BÂTIMENTS D'ÉLEVAGE PORCIN

Stéphane Godbout^{a*}, Francy Vanegas^b, Joahnn H. Palacios^a, Matthieu Girard^a, Ariane Lévesque^a, Alain Rousseau^c

^a Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 2700 Einstein, Québec, G1P 3W8, Québec, Canada

^b Department of Civil and Agricultural Engineering, National University of Colombia, Carrera 45 N° 26-85, Bogota, Colombia

^c Institut national de la recherche scientifique (INRS – Eau, Terre et Environnement), Université du Québec, 490 Couronne, Québec, G1K 9A9, Québec, Canada

* Pour correspondance: stephane.godbout@irda.qc.ca

A.1 Résumé

En 2015, l'agriculture représentait plus de 90 % (455 kt) de tout l'ammoniac émis au Canada. La plus grande contribution provenait de la production animale, celle-ci émettant environ 66 % (300 kt) de toutes les émissions du secteur agricole. L'ammoniac est principalement produit par la dégradation de l'urée contenue dans l'urine. Le contact entre l'air et les déjections joue un rôle majeur dans l'émission d'ammoniac générée par les bâtiments d'élevage. Ainsi, le taux d'émission est fortement lié à la surface mouillée du plancher. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact d'un nouveau concept de lattes sur les émissions d'ammoniac des bâtiments d'élevage porcin. Le nouveau profil possède une entaille latérale sur toute sa longueur ce qui permet au lisier de s'écouler directement dans la fosse sans longer les côtés et ainsi de réduire la surface totale souillée. Deux sections de lattes de contrôle et deux autres de test ont été placées dans deux salles hébergeant chacune 16 porcs durant huit semaines. Les quatre sections souillées ont ensuite été retirées des salles, lavées avec un jet à pression et installées dans quatre chambres de désorption individuelle faites d'acier galvanisé où les émissions d'ammoniac ont été mesurées indépendamment. De plus, les émissions provenant d'une chambre vide ont été mesurées pour évaluer le niveau de NH₃ en bruit de fond. Les débits d'air, la concentration en NH₃ et la température de chacune des chambres ont été mesurés en continu durant sept jours. Les réductions moyennes dues au profil avec entaille étaient de 78 % et 43 % pour chacune des salles d'élevage, respectivement, en comparaison avec une latte contrôle de forme trapézoïdale sans entaille.

Mots-clés : Qualité de l'air, NH₃, bâtiment d'élevage, porc

A.II Introduction

Les émissions de composés azotés tels que l'ammoniac (NH_3) contribuent de manière importante à la pollution de l'air et des sols, à l'acidification de l'eau, à l'eutrophisation et à la perte de biodiversité (IPCC 2013, Steinfeld *et al.*, 2006). L'élevage de porcs est la plus importante cause d'émissions d'ammoniac, lesquelles peuvent affecter la santé des travailleurs dans les bâtiments et celle de la population (Wojewódzki, 2011).

Selon plusieurs auteurs (EEA 2017, IPCC 2013, Steinfeld *et al.*, 2006), l'agriculture est responsable de 94 % (455 kt) des émissions d'ammoniac au Canada, dont 68 % sont générées par la production animale (principalement bovine et porcine). La principale cause des émissions élevées d'ammoniac en production animale est liée à la gestion des déjections. De plus, dans les bâtiments, la présence de lisier sur les planchers a une influence importante sur les émissions d'ammoniac (Hamelin *et al.*, 2010, Aarnink *et al.*, 1996).

La plupart des porcheries ont des planchers lattés de béton puisque ce matériel possède plusieurs avantages dont la durée de vie, de faibles coûts et une bonne adhérence (Timmerman *et al.*, 2003). Cependant, dans les bâtiments porcins, le plancher latté constitue la principale source d'émissions due au contact entre l'urine et l'enzyme uréase (présente dans les fèces) (Mobley et Hausinger, 1989; Hamelin *et al.*, 2010). Van der Peet-Schwering *et al.* (1999) ont proposé de réduire les surfaces émettrices comme solution pour limiter les émissions d'ammoniac dans les bâtiments d'élevage de porcs.

Selon la littérature, les émissions d'ammoniac sont proportionnelles à la surface souillée dans les bâtiments (Aarnink *et al.*, 1996, Cai *et al.* 2015). Aarnink *et al.* (1997) ont testé différents concepts de lattes. Le profil trapézoïdal avec des bords affinés a produit 4 % moins d'émissions d'ammoniac que le profil de lattes sans bords affinés. Ce dernier a accumulé plus de déjections (91,4 – 99,6 %) que les lattes avec un profil modifié (25,6 – 83,7 %). Par conséquent, il est possible de présumer que les émissions d'ammoniac seraient réduites avec des lattes aux rebords affinés.

Hamelin *et al.* (2010) ont aussi démontré le même phénomène. Leur étude a comparé les émissions d'ammoniac pour six profils de lattes : trapézoïdal, en forme de T ou courbée, avec ou sans entaille. Des tests en laboratoire ont démontré une réduction des émissions de 23 %, 42 % et 26 % pour les lattes avec entaille de profil trapézoïdal, en forme de T et courbées (2,0, 1,5 et 1,9 mg $\text{NH}_3/\text{m}^2/\text{h}$, respectivement). Toutefois, aucun essai à échelle réelle n'a été réalisé pour valider la réduction mesurée en laboratoire par Hamelin *et al.* (2010).

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact d'un nouveau concept de latte sur les émissions d'ammoniac dans un bâtiment d'élevage porcin, à une échelle précommerciale.

A.III Matériel et méthodologie

A.III.I Planchers lattés et leur profil

Les planchers lattés étaient faits de béton et fabriqués par la compagnie Patio Drummond (Québec, Canada) selon des dimensions de 1,52 m (longueur), 0,61 m (largeur) et 0,10 m (épaisseur). Les deux différents profils de latte testés étaient : un profil trapézoïdal sans entaille (S0) comme contrôle et un profil trapézoïdal avec entaille (S1) (Figure 26). La configuration des planchers testés était :

S0R1 : Plancher latté sans entaille (S0) dans la salle n° 1 (R1)

S1R1 : Plancher latté avec entaille (S1) dans la salle n° 1 (R1)

S0R2 : Plancher latté sans entaille (S0) dans la salle n° 2 (R2)

S1R2 : Plancher latté avec entaille (S1) dans la salle n° 2 (R2)

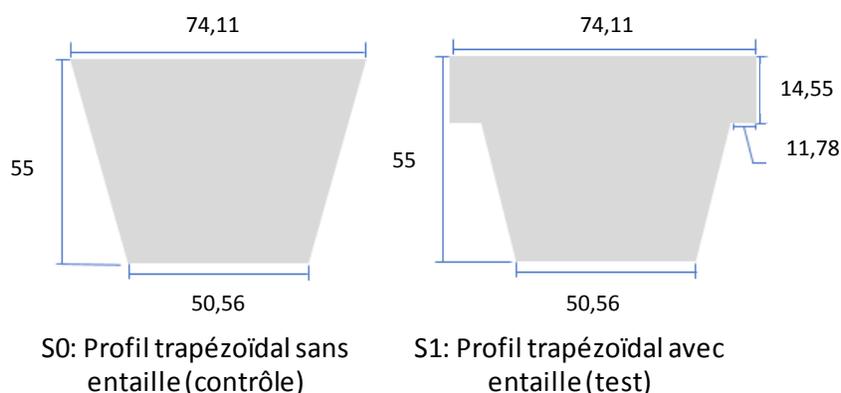


Figure 26. Profils de latte testés (dimensions en mm).

A.III.II Salles d'élevage de porc

Deux salles expérimentales indépendantes avec des dimensions de 5,18 m (longueur) et 4,67 m (largeur) ont été utilisées pour cette étude. Chacune des chambres était équipée d'un système de ventilation et de contrôle individuel et permettait d'héberger 16 porcs durant huit semaines avec un poids allant de 25 à 80 kg. Comme mentionné, une latte contrôle et une latte test étaient placées dans chacune des chambres pour toute la durée de l'expérience (huit semaines). Ensuite, les sections de lattes contrôles et modifiées ont été retirées des salles, lavées et installées dans des chambres individuelles de désorption durant sept jours pour mesurer les émissions d'ammoniac.

A.III.III *Mesure des émissions d'ammoniac*

Chambres de désorption

Les émissions d'ammoniac ont été mesurées à l'aide de chambres de désorption (Figure 27). La conception des chambres était basée sur celle présentée par Pelletier *et al.* (2005). Cinq chambres ont été utilisées pour tester les quatre sections de lattes bétonnées. Une chambre pour chacun des échantillons de latte et une cinquième chambre vide afin de mesurer les émissions d'ammoniac en bruit de fond. Le couvercle des chambres était fait d'acier galvanisé dont la longueur, la largeur et la hauteur étaient de 1,78 m, 0,76 m et 0,3 m respectivement. La base était faite de contreplaqué recouvert d'une membrane de polyéthylène pour prévenir l'absorption de l'ammoniac sur le bois. Afin d'éviter les échanges d'air entre les chambres et le laboratoire, deux couches de mousse ultrasouple en vinyle étaient placées entre le couvercle et la base comme joint d'étanchéité et le couvercle était vissé au contreplaqué. L'air était introduit dans les chambres par un distributeur fait d'un tube de PVC perforé (1 po de diamètre), à l'aide d'une pompe à vacuum (MOA-P101-AA, Gast) située à l'opposé des chambres.

Mesure des émissions

La concentration en ammoniac (ppmv) était mesurée avec un analyseur de gaz (DX4040, Gasmeter) lié à une valve rotative (Valco, VICI) avec des tubes de PTFE. La valve rotative comprenait 16 positions; les dix premières étaient connectées à l'air d'entrée et de sortie de chacune des chambres de désorption. La valve restait à la même position durant 15 minutes. Suivant cette routine, l'air de chaque chambre était échantillonné toutes les 3 heures. La température de chacune des chambres était mesurée avec un thermocouple (Thermocouple type T, Omega).

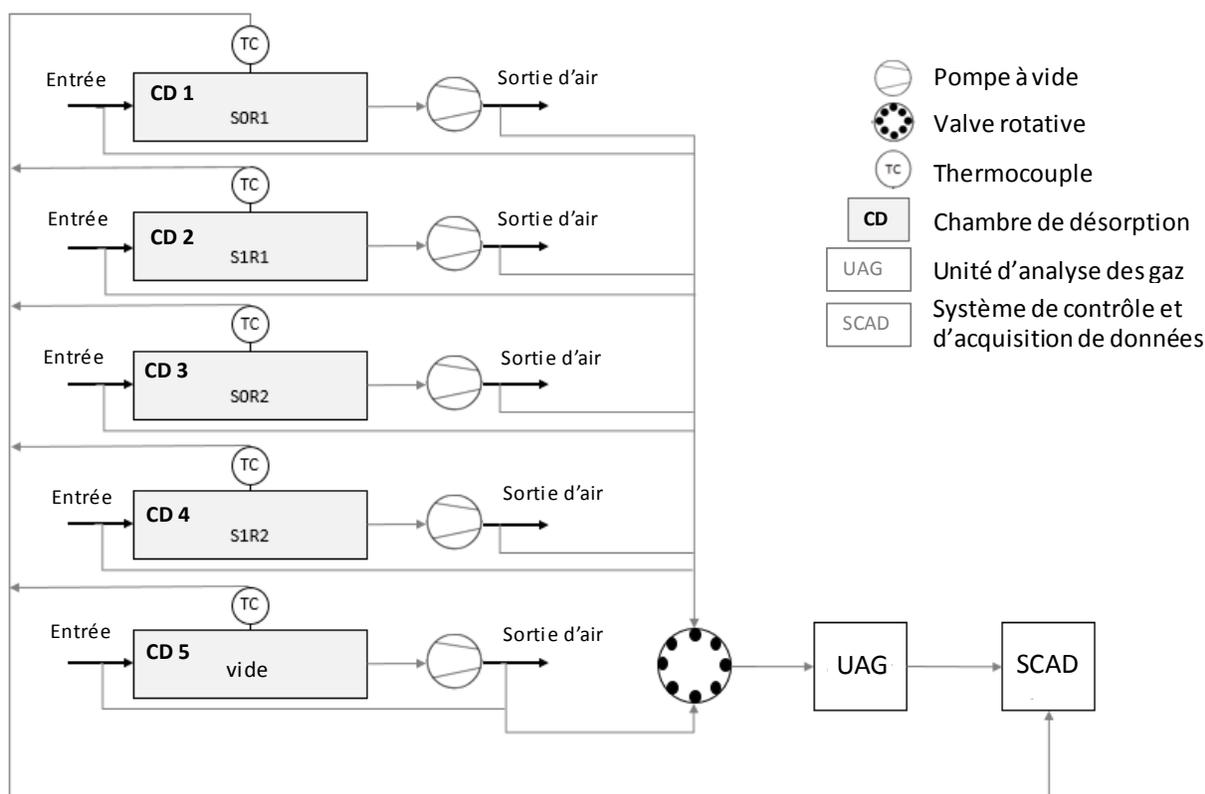


Figure 27. Schéma du système de mesure des émissions d'ammoniac.

Les émissions d'ammoniac générées par les sections de lattes étaient calculées à partir de la formule suivante :

$$E_s = E_{s+c} - E_c$$

où E_s est le taux d'émission de NH_3 de la section de latte, mg/h; E_{s+c} est le taux d'émission de NH_3 de la section de latte et de sa chambre de désorption, mg/h; E_c est le taux d'émission de NH_3 de la chambre de désorption vide, mg/h.

Les émissions de NH_3 provenant des chambres de désorption étaient calculées à partir de :

$$E = (C_o - C_i) \times \frac{P_{atm} - P_v}{R_{sair} \times (T + 273)} \times \frac{m_{NH_3}}{m_{air}} \times Q \times 6$$

où E est le taux d'émission de NH_3 , mg/h; C_o et C_i sont les concentrations dans l'air de NH_3 à l'entrée et à la sortie de la chambre, ppmv; P_{atm} est la pression atmosphérique, mbar; P_v est la pression de vapeur, mbar; R_{sair} est la constante de l'air, 287 L·kPa/kg_{air}/K; T est la température de la chambre de désorption, °C; m_{NH_3} est la masse molaire de l'ammoniac, 17,03 g/mol; m_{air} est la masse molaire de l'air, 28,964 g/mol; Q est le taux d'échange d'air, lpm.

De plus, les émissions de NH₃ par surface étaient calculées avec la formule suivante :

$$E_{spa} = \frac{E_s}{A_s}$$

où E_{spa} est l'émission de NH₃ par surface, mg/h/m²; E_s est le taux d'émission de NH₃ des lattes, mg/h; A_s est la surface du plancher latté, 0,929 m².

A.III.IV Processus de lavage

Les lattes ont été mouillées avec un laveur à pression (Karcher K3) durant deux minutes à basse pression, puis deux minutes à haute pression. Ensuite, l'excès de lisier sur les surfaces a été retiré avec un grattoir métallique afin de nettoyer et d'uniformiser la quantité de lisier restant sur les sections de lattes. Enfin, les sections de lattes en béton ont été nettoyées à haute pression durant cinq minutes avec le laveur à pression et ont été installées dans les salles de désorption.

A.III.V Analyse statistique

Une analyse de variance (ANOVA) et la méthode Duncan («Duncan's multiple-range tests») ont été réalisées avec les données obtenues. L'émission d'ammoniac a été considérée comme variable dépendante et la chambre de désorption ou la configuration testée comme la variable indépendante, avec un niveau de confiance de 95 % et un seuil significatif de 0,01. L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R-Project (version 3.4.4).

A.IV Résultats et discussion

La moyenne des taux d'émission de NH₃ pour les deux sections de lattes dans chacune des salles d'élevage est présentée au Tableau 15. Les émissions d'ammoniac de la salle n° 1 étaient de 1,21 mg/h/m² pour S0 et 0,37 mg/h/m² pour S1. Pour les sections de lattes bétonnées S0 et S1 de la salle n° 2, les émissions d'ammoniac étaient de 3,42 et 1,96 mg/h/m² respectivement. Dans l'étude réalisée par Hamelin *et al.* (2010), les émissions de NH₃ étaient de 2,6 mg/h/m² pour les lattes trapézoïdales contrôles et 2,0 mg/h/m² pour les lattes à profil avec entaille. Comme mentionné dans la littérature, il semble exister une relation entre la superficie des surfaces émettrices et les émissions d'ammoniac (Elzing et Monteny, 1997; Aarnink *et al.*, 1996; Hamelin *et al.*, 2010). Les taux d'émission de cette étude étaient d'un ordre de grandeur similaire aux valeurs présentées par Hamelin *et al.* (2010) (1,5 – 2,8 mg/h/m²).

Tableau 15. Émissions de NH₃ [moyenne (écart-type)] pour les planchers lattés en fonction du temps

t	Contrôle	S1R1	S0R1	S1R2	S0R2
(h)	(mg/h/m ²)				
0	0,033 (0,02)	0,9 (0,03)	1,56 (0,05)	5,71 (0,04)	7,6 (0,09)
6	0,033 (0,022)	1,27 (0,02)	2,87 (0,05)	7,76 (0,04)	12,25 (0,08)
12	0,039 (0,035)	1,28 (0,04)	4,28 (0,06)	9,19 (0,05)	16,35 (0,05)
18	0,031 (0,036)	0,76 (0,04)	4,28 (0,06)	7,76 (0,05)	13,44 (0,05)
24	0,036 (0,031)	0,59 (0,04)	3,55 (0,05)	5,45 (0,05)	8,99 (0,05)
48	0,003 (0,018)	0,44 (0,02)	1,58 (0,03)	1,77 (0,03)	3,24 (0,04)
72	0,002 (0,011)	0,35 (0,02)	0,93 (0,02)	0,94 (0,02)	1,82 (0,02)
96	0,002 (0,007)	0,23 (0,01)	0,65 (0,02)	0,65 (0,02)	1,27 (0,02)
120	0,011 (0,008)	0,18 (0,01)	0,55 (0,01)	0,53 (0,01)	1,04 (0,02)
144	0,015 (0,007)	0,17 (0,01)	0,52 (0,01)	0,48 (0,02)	0,96 (0,02)
168	0,021 (0,007)	0,14 (0,01)	0,49 (0,01)	0,45 (0,01)	0,88 (0,02)
Moyenne	0,014	0,37a*	1,30b	1,96b	3,42c

* Les moyennes avec différentes lettres indiquent que les émissions de NH₃ sont significativement différentes selon le test Duncan.

La procédure ANOVA a indiqué qu'il y avait une différence significative entre les lattes testées ($p < 0,01$). Aussi, le test Duncan a démontré une différence significative entre les sections de lattes avec entaille (S1R1 et S1R2) et sans entaille (S0R1 et S0R2). Les émissions pour la section de lattes S0R1 n'étaient pas significativement différentes de celles de S1R2.

La Figure 28 illustre les émissions d'ammoniac en fonction du temps. Pour les quatre sections de lattes, le profil des émissions de NH₃ était similaire avec une augmentation importante entre 0 et 12 h, puis la production d'ammoniac diminuait rapidement jusqu'à 60 h avant de rester constante. Cet effet est dû au contact entre l'urée et l'eau après le lavage, lequel a augmenté l'activité de l'uréase et a activé la production d'ammoniac par les sections de lattes (Aarnink *et al.*, 1997; Mobley et Hausinger, 1989).

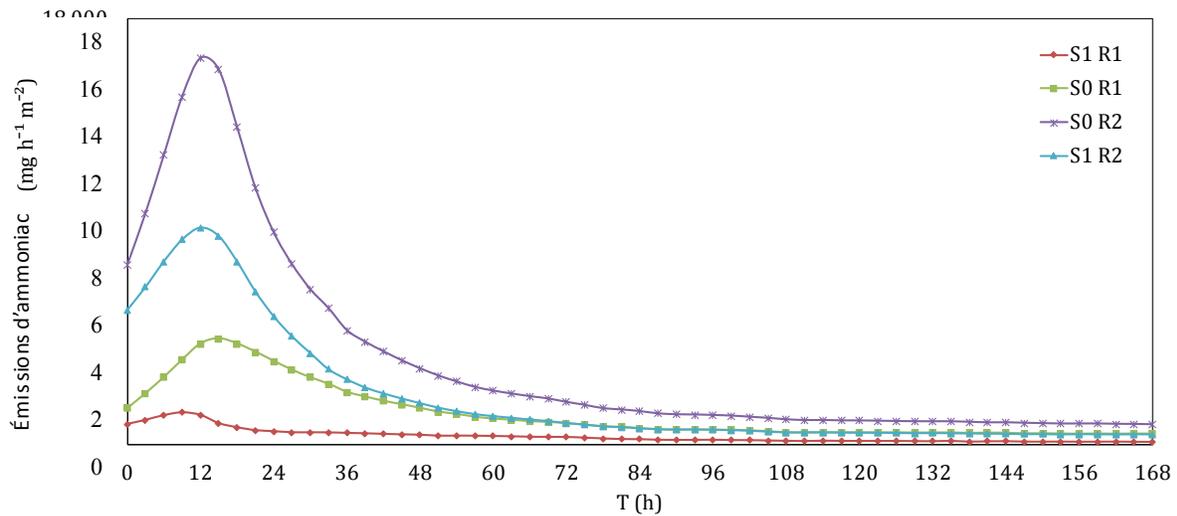


Figure 28. Émissions de NH₃ des planchers lattés de chaque chambre.

La réduction des émissions d'ammoniac par les lattes avec entaille en fonction du temps est présentée au Tableau 16. La réduction moyenne due aux sections de lattes avec entaille est de 78 % pour la salle n° 1 et de 43 % pour la salle n° 2. En général, chacune des salles a démontré d'importantes réductions, de 42 à 83 % pour la salle n° 1 et 25 à 50 % pour la salle n° 2.

Tableau 16. Réduction des émissions de NH₃ (%) pour les lattes avec entaille comparée aux lattes contrôles

t (h)	Salle 1	Salle 2
0	42	25
6	56	37
12	70	44
18	82	42
24	83	39
48	72	45
72	63	49
96	65	48
120	67	49
144	68	50
168	71	48
Moyenne	78	43

A.V Conclusion

La littérature a démontré que le plancher joue un rôle clé dans le processus d'émission de l'ammoniac. Quelques auteurs mentionnent l'effet positif qu'ont les rebords des lattes sur les émissions d'ammoniac. La présente étude avait pour objectif de valider cette influence à l'échelle d'un bâtiment d'élevage. Les résultats ont montré une réduction du taux d'émission de l'ammoniac provenant des sections de lattes bétonnées avec entaille. Les réductions moyennes de 78 % et 43 % ont été mesurées en comparaison avec une latte contrôle de forme trapézoïdale sans entaille. Ainsi, les lattes avec entaille pourraient être une solution potentielle pour réduire les émissions d'ammoniac provenant des bâtiments d'élevage.

A.VI Remerciements

Les auteurs remercient Agrivita Canada inc. et IRSST (Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail) pour le financement de ce projet, et Emerging Leaders in the Americas Program (ELAP) pour la bourse offerte à Francy Vanegas, étudiant de la National University of Columbia. Les auteurs remercient aussi toute l'équipe de l'IRDA pour l'accomplissement de ce travail et l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, terre et environnement - pour l'accueil de l'étudiant étranger, M. Joahnn H. Palacios.

A.VII Références

- Aarnink, A., Swierstra, D., van den Berg, A. et Speelman, L. (1997). Effect of Type of Slatted Floor and Degree of Fouling of Solid Floor on Ammonia Emission Rates from Fattening Piggeries. *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 66(2), 93-102. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1006/jaer.1996.0121>
- Cai, L., Yu, J., Zhang, J. et Qi, D. (2015). The effects of slatted floors and manure scraper systems on the concentrations and emission rates of ammonia, methane and carbon dioxide in goat buildings. *Small Ruminant Research*, 132, 103-110. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.10.015>
- EEA (2017). European Union emission inventory report 1990–2015 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). European Environment Agency (EEA). DOI:10.2800/478321
- Elzing A. et Monteny, G. (1997). Ammonia emission in a scale model of dairy-cow house. *Transaction of the ASAE*, 40(3), 713-720. doi: 10.13031/2013.21301
- Hamelin, L., Godbout, S., Thériault, R. et Lemay, S. (2010). Evaluating ammonia emission potential from concrete slat designs for pig housing. *Biosystems Engineering*, 105(4), 455-465. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.01.004>
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Misselbrook, T. H., Pain, B. F. et Headon, D. M. (1998). Estimates of ammonia emission from dairy cow collecting yards. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71(2), 127–135. Tiré de <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0319>
- Mobley, H. L. T. et Hausinger, R. P. (1989). Microbial ureases: Significance, regulation and molecular characterization. *Microbiological and Molecular Biology Reviews*, 53(1), 85-108.

-
- Pelletier, F., Marquis, A., Godbout, S., Joncas, R., Larouche, J. P., Massé, D. et Bégue, P. (2005). Gas and odor emissions from swine building materials. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 721-728. DOI: 10.13031/2013.9381
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenarr, T., Caster, V., Rosales, M. et Hann, C (2006). Livestock's long shadow environmental issues and options. FAO. Rome, Italy
- Timmerman, M., Hoofs, A. I. J. et Van Wagenberg, A. V. (2003). Ammonia emission from four systems for group-housed sows. Swine Housings II Proceedings of the 12-15 October 2003 Conference. North Carolina. USA. 122–128 pp. doi:10.13031/2013.15477
- Van der Peet-Schwering, C. M. C., Aarnink, A. J. A., Rom, H. B. et Dourmand, J. Y. (1999). Ammonia emissions from pig houses in The Netherlands, Denmark and France. *Livestock Production Science*, 58(3), 265–269. Tiré de [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00017-2)
- Ye, Z., Li, B., Cheng, B., Chen, G., Zhang, G., Shi, Z, . . . Xi L. (2007). A concrete slatted floor system for separation of faeces and urine in pig houses. *Biosystems Engineering*, 98(2), 206-214. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.07.007>
- Wojewódzki, P. (2011). Ammonia emission rates from buildings with pigs intensively reared on slats. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(5), 1343-1352.

ANNEXE B SCHÉMAS DES STRATÉGIES

B.I Séparation du lisier – Gratte en V

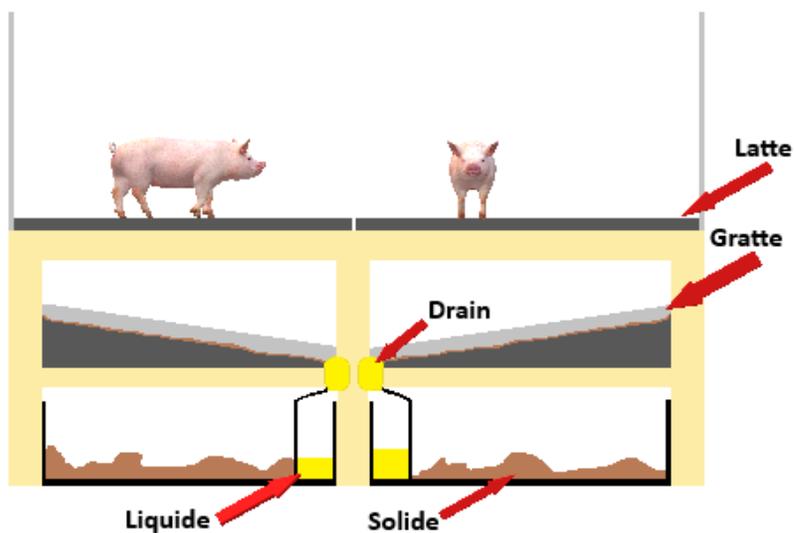


Figure 29. Représentation de la gestion du lisier avec la gratte en V dans la salle n° 2.

B.II Aspersion d'huile

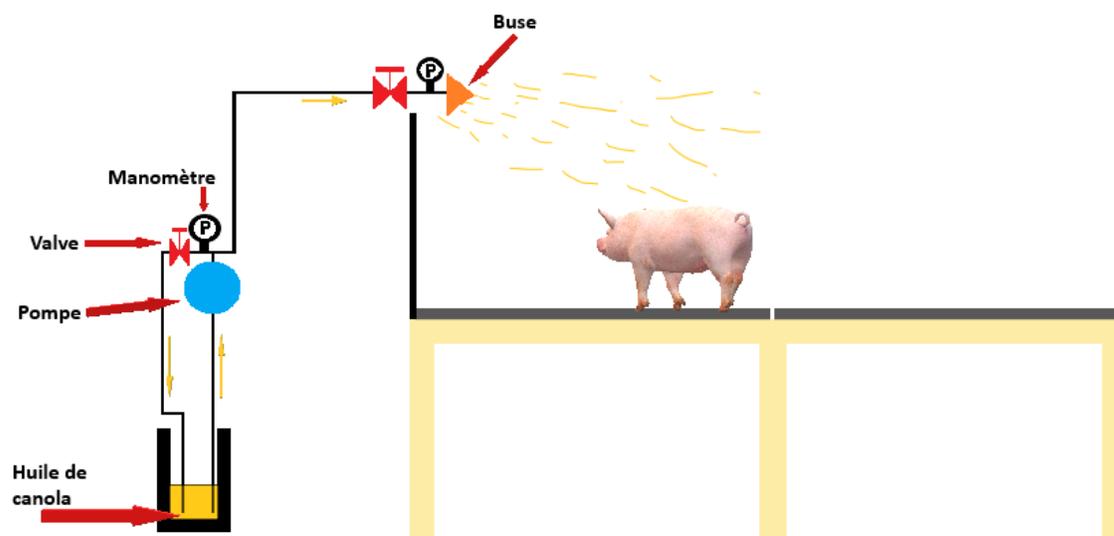


Figure 30. Représentation de l'aspersion d'huile dans la salle n° 2.

B.III Filtration de l'air - UTA

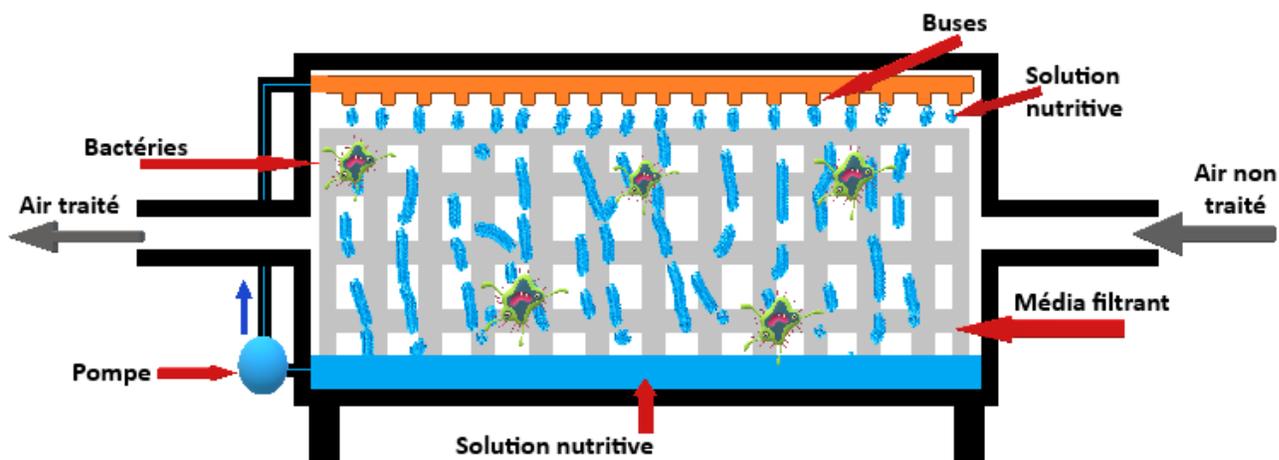


Figure 31. Représentation du système de traitement de l'air (UTA).