

Rapport scientifique

**Émissions de bio-contaminants dans l'air lors
des opérations d'épandage du lisier de porc :
Évaluation et mitigation des risques pour la
biosécurité des élevages en production
porcine**

1^{er} février 2024

Responsable scientifique : Patrick Brassard, ing., Ph. D.

Ce rapport a été produit à l'attention du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation du Québec
(MAPAQ)



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresser** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Patrick Brassard, ing., Ph. D.

Chercheur

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418-643-2380 (p. 601)

patrick.brassard@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Patrick Brassard, Ph. D., IRDA

Laura Mila Saavedra, M. sc, IRDA

Stéphane Godbout, Ph. D., IRDA

Caroline Duchaine, Ph. D, CRIUCPQ

Nathalie Turgeon, Ph. D, CRIUCPQ

Valérie Letourneau, Ph. D, CRIUCPQ

Mick Wu, Ph. D., IRDA

Mahsa Baghdadi, M. sc, CRIUCPQ

Samantha Leclerc, CRIUCPQ

Azin Miralvand, ULaval

Angela Maria Trivino Arevalo, IRDA et
Université McGill

Équipe de réalisation

Patrick Brassard, Ph. D., IRDA

Laura Mila Saavedra, M. sc, IRDA

Stéphane Godbout, Ph. D., IRDA

Caroline Duchaine, Ph. D, CRIUCPQ

Nathalie Turgeon, Ph. D, CRIUCPQ

Valérie Letourneau, Ph. D, CRIUCPQ

Mick Wu, Ph. D., IRDA

Mahsa Baghdadi, M. sc, CRIUCPQ

Samantha Leclerc, CRIUCPQ

Azin Miralvand, ULaval

Angela Maria Trivino Arevalo, McGill

Jérémie Gravel, IRDA

Cédric Morin, IRDA

Michel Noël, IRDA

Vincent Desbiens

Gabriel Blouin

Merci à notre partenaire financier

Ce Projet a été financé par l'entremise du programme Innov'Action Agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.

Ce rapport peut être cité comme suit :

Brassard, P. M. Mila Saavedra, S. Godbout, C. Duchaine, N. Turgeon, M. Wu, M. Baghdadi, S. Leclerc, A.Z. Miralvand et A.M. Trivino. 2024. Émissions de bio-contaminants dans l'air lors des opérations d'épandage du lisier de porc : Évaluation et mitigation des risques pour la biosécurité des élevages en production porcine. Rapport final. IRDA et partenaires. 39 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Résumé

L'épandage du lisier de porc au champ peut être une source de pollution environnementale, affectant la qualité de l'eau et de l'air. Cependant, il y avait un manque de connaissances concernant les émissions fugitives de biocontaminants lors de l'épandage de lisier, celles-ci pouvant représenter un risque sanitaire. Ce projet a permis d'abord d'établir un protocole d'échantillonnage de l'air lors de l'épandage de lisier afin de quantifier les émissions de particules, de gaz, d'odeurs et de bioaérosols contenant des biocontaminants (bactéries totales, *E. coli*, *Enterococcus*, archées, phage d'*Aerococcus* et gènes de résistance aux antibiotiques). Des essais d'épandage avec deux méthodes fréquemment utilisées par les producteurs, soit l'aérospersion basse (épandage avec un déflecteur), et l'épandage avec une rampe à pendillards ont été réalisés dans le nouveau laboratoire Sol-Air de l'IRDA, un tunnel de vent à grande échelle. Contrairement à l'hypothèse de départ, les émissions d'ammoniac, de bactéries totales et de gènes de résistance aux antibiotiques (ARG) dans l'air étaient significativement plus élevées lors de l'épandage avec les pendillards. Le contact des pendillards avec le sol, la pression du lisier sortant des tuyaux et la température de l'air plus élevée sont possiblement en cause. Toutefois, les odeurs au moment de l'épandage étaient significativement moins intenses avec les pendillards. Vingt-huit gènes de résistance appartenant à huit familles d'antibiotiques, dont les tétracyclines et les érythromycines, ont été détectés dans le lisier et dans les bioaérosols.

Des essais d'épandage au champ ont démontré que l'incorporation immédiate du lisier suivant l'épandage par pendillards n'est pas une méthode de mitigation permettant de réduire les émissions de biocontaminants et de particules dans l'air, mais permet de réduire significativement les odeurs et l'émission d'ammoniac. L'analyse des coûts totaux démontre qu'il n'y a pas de coûts supplémentaires liés à l'incorporation en plus des avantages agronomiques en environnementaux, notamment la réduction de la quantité nécessaire d'engrais.

Enfin, les résultats du projet ne permettent pas de conclure que l'épandage de lisier de porc génère des risques pour la santé et la biosécurité des élevages. En effet, la concentration des biocontaminants mesurée au champ à 18 et 36 m en aval de la zone d'épandage est souvent près de limites de détection des appareils. Toutefois, les résultats du projet ont permis d'identifier le type et la quantité de biocontaminants pouvant être émis dans l'air lors de l'épandage de lisier. Des bactéries, des indicateurs de contamination fécale (*E. coli*, *Enterococcus*, Archées, phage d'*Aerococcus*, ADN de porc) et vingt-huit gènes de résistance appartenant à huit familles d'antibiotiques, dont les tétracyclines et les érythromycines, ont été détectés. Par ailleurs, la concentration en bactéries totales près de la zone d'épandage par aérospersion basse était dans le même ordre de grandeur qu'à la sortie de ventilateurs d'une porcherie. Des campagnes d'échantillonnage lors de chantiers d'épandage à plus grande échelle sur une plus longue durée permettraient de préciser les niveaux d'exposition et les risques sur la santé de la population et la biosécurité des élevages.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	7
2	Matériel et méthodes	7
2.1	QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS FUGITIVES DE CONTAMINANTS DE L'AIR LORS DE L'ÉPANDAGE DU LISIER : ADAPTATION DES MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE ET VALIDATION DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ	7
2.1.1	Contexte	7
2.1.2	Mise en place du laboratoire Sol-Air	7
2.1.3	Essais d'épandage.....	8
2.1.4	Mesure des émissions de contaminants	9
2.1.5	Analyse de lisier et de sol	12
2.2	CAMPAGNE INTENSIVE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN POUR ÉVALUER LES RISQUES ASSOCIÉS AUX DIFFÉRENTS TYPES D'ÉQUIPEMENTS ACTUELLEMENT UTILISÉS POUR ÉPANDRE LE FUMIER	12
2.2.1	Site expérimental	12
2.2.2	Plan d'expérience	13
2.2.3	Mesure des émissions de contaminants dans l'air	14
2.3	Analyse économique	16
3	Résultats.....	16
3.1	QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS FUGITIVES DE CONTAMINANTS DE L'AIR SUITE À L'ÉPANDAGE DU LISIER : ADAPTATION DES TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET VALIDATION DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ	16
3.1.1	Analyse du lisier et du sol.....	16
3.1.2	Émissions de gaz.....	18
3.1.3	Odeurs	20
3.1.4	Particules	20
3.1.5	Bioaérosols : bactéries totales et indicateurs fécaux	20
3.1.6	Bioaérosols : gènes de résistance aux antibiotiques (ARG).....	22
3.2	CAMPAGNE INTENSIVE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN POUR ÉVALUER LES RISQUES ASSOCIÉS AUX DIFFÉRENTS TYPES D'ÉQUIPEMENTS ACTUELLEMENT UTILISÉS POUR ÉPANDRE LE FUMIER.....	22
3.2.1	Analyses physico-chimiques du lisier	22
3.2.2	Gaz.....	23
3.2.3	Odeurs	25
3.2.4	Particules de poussières	25
3.2.5	Bioaérosols : Bactéries totales et indicateurs fécaux	26
3.2.6	Bioaérosols : Gènes de résistance aux antibiotiques	29
3.3	Analyse économique	30
3.3.1	Scénarios	30
3.3.2	Analyse des coût supplémentaires.....	30
4	Discussion.....	31
4.1	ÉMISSIONS EN TUNNEL DE VENT VS CONCENTRATION AU CHAMP ET LIENS AVEC LES CARACTÉRISTIQUES DU LISIER 31	
4.1.1	Gaz.....	31
4.1.2	Odeurs	33
4.1.3	Bioaérosols : Bactéries totales et indicateurs fécaux	34
4.2	LIENS AVEC LES CONCENTRATIONS DU BIOCONTAMINANTS À LA PORCHERIE	37
5	Conclusion.....	38
6	Références.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse physico-chimique du lisier. Moyenne de 6 échantillons pour chaque technique	16
Tableau 2 : Analyse physico-chimique du sol avant l'épandage. Moyenne de 6 échantillons pour chaque technique.....	17
Tableau 3 : Concentrations de bactéries totales et d'indicateurs fécaux dans le lisier (copies de gènes par g de matière sèche).....	17
Tableau 4 : Concentrations de gènes de résistance aux antibiotiques dans le lisier pour 8 familles d'antibiotiques (copies de gènes par g de matière sèche)	18
Tableau 5 Nombre absolu de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air (copies de gènes / m ³) pour les deux techniques d'épandage lors des périodes d'échantillonnage "avant" et "après" l'épandage	22
Tableau 6 Analyse physico-chimique du lisier. Moyenne des échantillons pour chaque technique.	23
Tableau 7 : Comparaison des coûts supplémentaires liés à l'incorporation du lisier	30

Liste des figures

Figure 1 Laboratoire Sol-Air	8
Figure 2 Épandage de lisier par aspersion basse (gauche) et par pendillards (droite) dans le laboratoire Sol-Air	9
Figure 3 Appareils d'échantillonnage. De gauche à droite : Poumon artificiel pour l'échantillonnage de sacs d'odeurs; DustTrak Environmental Monitor 8543 (particules); deux SASS® 3100 et un SASS® 4100 sur trépied pour l'échantillonnage de bioaérosols.	11
Figure 4. Épandage de lisier par aéroaspersion basse avec déflecteur (en haute à gauche), à la surface avec pendillards (en haut à droite) et avec pendillards et incorporation immédiate (bas)	13
Figure 5 Points d'échantillonnage lors de l'épandage de lisier au champ. Zone d'épandage en brun; Point d'échantillonnage mobile en jaune; Point d'échantillonnage central fixe en rouge; points d'échantillonnage fixe supplémentaires pour les bioaérosols en orange.	15
Figure 6. Point central fixe d'échantillonnage sur le terrain.	15
Figure 7. Émissions cumulatives de CO ₂ , de CH ₄ et de NH ₃ lors de l'épandage de lisier au laboratoire Sol-Air	19
Figure 8 Intensité d'odeur en concentration de n-butanol (ppm). À gauche : Épandage par aéroaspersion basse (déflecteur); À droite : Épandage à la surface avec pendillards	20
Figure 9 Émissions de bactéries et d'indicateurs fécaux (log ₁₀ de la valeur d'émissions, en copies de gènes ARNr 16S / kg de lisier épandu) pour les deux techniques d'épandage	21
Figure 10 Proportions (%) des gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air lors des périodes d'échantillonnage "pendant" et "après" l'épandage.	22
Figure 11 Concentration de CO ₂ et de CH ₄ lors de l'épandage de lisier au champ.	24
Figure 12 Concentration de NH ₃ lors de l'épandage de lisier au champ avec aéroaspersion basse et pendillards.	25
Figure 13 Intensité d'odeur en concentration de n-butanol (ppm). De Gauche à droite : Épandage par aéroaspersion basse (déflecteur), Épandage à la surface avec pendillards et Épandage à la surface avec pendillards et incorporation immédiate.	25
Figure 14 Comportement des particules totales (mg/m ³) pour chacune des techniques utilisées sur le terrain au cours des périodes d'épandage.....	26
Figure 15 Concentrations de bactéries totales et d'indicateurs fécaux dans le lisier (copies de gènes par ml de lisier de porc)	26
Figure 16 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m ³ d'air) lors de l'épandage au champ avec l'épandeur à déflecteur.....	27
Figure 17 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m ³ d'air) lors de l'épandage au champ avec la rampe à pendillards	28
Figure 18 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m ³ d'air) lors de l'épandage au champ avec la rampe à pendillard suivi de l'incorporation	28

Figure 19 Concentration de bactéries totales (16s copies/m ³ d'air) pour les trois techniques d'épandages au champ. La section bleue représente l'intervalle de confiance (95%).	29
Figure 20 Concentration de de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air à 18 m de la zone d'épandage mesurées par trois échantillonneurs SAAS 3100. * : différence significative à P < 0,05.	29
Figure 21 Taux d'émissions nettes de CH ₄ , CO ₂ et NH ₃ pour les deux techniques testées au laboratoire Sol-Air.	32
Figure 22 Différences de concentration (ppm) de CH ₄ , CO ₂ et NH ₃ pour les techniques testées au champ.	33
Figure 23 Intensité d'odeur en concentration de n-butanol (ppm) avec les intervalles de confiance (95%). Essais réalisés dans le tunnel de vent (gauche), essais réalisés aux champs (droite).	34
Figure 24 Concentration de bactéries totales (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.	35
Figure 25 Concentration de bactéries totales (copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) obtenue aux 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pour les essais réalisés au champ.	35
Figure 26 Rampe de pendillard conçue pour l'utilisation dans la serre (gauche) et rampe pendillard commercial (16 tuyaux).	35
Figure 27 Concentration d'Enterococcus (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.	36
Figure 28 Concentration d'Enterococcus (copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) obtenue au 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pendant et après d'épandage. Essais réalisés au champ.	36
Figure 29 Concentration d'E. coli (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.	37
Figure 30 Concentration d'E. coli (copies de gènes ARNr 16S par m ³ d'air) obtenue au 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pendant et après d'épandage. Essais réalisés au champ	37

1 INTRODUCTION

Les émissions fugitives résultant de l'épandage de lisier peuvent représenter un risque sanitaire et une source de pollution environnementale. De la poussière, des gaz, des odeurs et des bioaérosols (par exemple, des pathogènes humains et animaux aérosolisés et des bactéries résistantes aux antibiotiques) peuvent être émis lors de l'épandage sur les terres agricoles. Une fois en suspension dans l'air, ces contaminants peuvent affecter la santé des travailleurs, des animaux et des communautés rurales environnantes. Cependant, il existe un manque de connaissances sur les contaminants aériens associés à l'épandage de lisier. La caractérisation de ces contaminants permettra d'évaluer les risques et de proposer des solutions limitant les émissions de l'épandage de lisier.

Afin d'évaluer et réduire les risques sanitaires et environnementaux liés à l'épandage du lisier de porc, le projet avait comme objectifs spécifiques de :

- 1) Quantifier les émissions fugitives provenant à l'épandage du lisier de porc avec les équipements actuellement utilisés sur les fermes au Québec;
- 2) Évaluer les risques pour la biosécurité liés à ces émissions et émettre des recommandations quant aux équipements à privilégier et aux distances séparatrices entre les fermes.

Le projet s'intègre dans un projet de plus grande envergure qui est mené en collaboration avec plusieurs partenaires, dont le centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec- Université Laval (IUCPQ). Financé par Agrivita Canada Inc. et le programme Frontières de la découverte du CRSNG, ce projet étudie également les émissions fugitives de contaminants lors de l'épandage de différents fumiers (poules, vaches laitières, bovins de boucherie) avec des équipements d'épandage et d'incorporation du fumier solide.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS FUGITIVES DE CONTAMINANTS DE L'AIR LORS DE L'ÉPANDAGE DU LISIER : ADAPTATION DES MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE ET VALIDATION DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ

2.1.1 Contexte

Traditionnellement, les émissions au champ à la suite de l'épandage sont mesurées à l'aide de petites chambres (ou tunnels) fermées ou ouvertes déposées au sol quelques minutes suivant l'opération d'épandage (De Klein et al., 2020). Dans le premier cas, les concentrations sont prises à intervalles réguliers pour mesurer l'augmentation de concentration dans le temps, permettant de calculer l'émission. Dans le second cas, les émissions (mg/min) sont obtenues en multipliant le débit d'air circulant dans la chambre (m³/min) par la concentration (C, mg/m³) de gaz (C sortie – C entrée).

Le défi du présent projet consistait à mesurer les émissions fugitives, soient celle provenant spécifiquement de l'opération d'épandage. Ainsi, la méthode de la chambre ouverte a été adaptée à un tunnel de vent à plus grande échelle (serre tunnel de 8 m de large x 30 m de long x 4 m de haut) qui est décrite à la section suivante. Les ventilateurs ont été calibrés afin de pouvoir déterminer le débit d'air en fonction de la vitesse de rotation. Ainsi, l'émission d'un contaminant peut être calculée en multipliant sa concentration à la sortie du tunnel de vent par le débit de ventilation.

2.1.2 Mise en place du laboratoire Sol-Air

La serre tunnel (8 m largeur x 30 m longueur x 4 m hauteur) avec couverture en polycarbonate a été adaptée et utilisée comme environnement contrôlé pour mesurer les émissions fugitives des contaminants provenant des opérations d'épandage de lisier. La serre est localisée à la ferme expérimentale de l'IRDA à St-Lambert-de-Lauzon (QC). À une extrémité de la serre, 2 grandes ouvertures servent d'entrée d'air, tandis qu'à l'autre extrémité, 10 ventilateurs ont été installés afin de reproduire un tunnel de vent à grande échelle à débit d'air contrôlé (Figure 1). Les ventilateurs ont été calibrés afin de

déterminer le débit de ventilation du tunnel de vent pour chaque intensité sur le potentiomètre de 1 à 10. La calibration a été faite avec la méthode standard ANSI/ASHRAE 41 .2-1 987 (RA 92). Selon les résultats obtenus, le débit total de la serre peut varier de 2 à 15 m³/s. Après quelques tests préliminaires, les équipes de l'IRDA et du CRIUCPQ ont déterminé qu'un débit d'opération de 8 m³/s était optimal pour mesurer la concentration des divers contaminants. Ce taux de ventilation correspond à un taux de changement d'air de 41 fois par heure et une vitesse du vent autour de 0,2 à 0,5 m/s à dans la serre. Afin de suivre la vitesse du vent en continu dans le tunnel, neuf anémomètres ont été positionnés de manière à couvrir une section de serre perpendiculaire à l'écoulement du vent. La température et l'humidité ont aussi été mesurées en continu à l'entrée et la sortie.

À l'intérieur de la serre, un châssis en bois (4.9 m largeur x 22 m longueur x 0.6 m hauteur) a été rempli de sol loameux pour reproduire une parcelle de champ sur laquelle effectuer les épandages de lisier. Un système d'irrigation avec des micro-buses SpinNet™ a aussi été installé pour simuler de la pluie et humidifier le sol avant chaque essai. Cela permet de minimiser les poussières lors du passage de l'équipement.



Figure 1 Laboratoire Sol-Air

2.1.3 Essais d'épandage

Le lisier utilisé pour les essais d'épandage était prélevé de la pré-fosse d'une ferme de type finisseur. Les antibiotiques ne sont pas utilisés sur une base régulière sur la ferme, mais comme il n'a pas été possible de faire un suivi des actes vétérinaires curatifs réalisés avant le prélèvement, des traces d'antibiotiques peuvent être présentes dans le lisier.

Deux techniques d'épandage ont été testées dans le laboratoire Sol-Air :

- Octobre 2021 : aérospersion basse avec un déflecteur à environ 1 m du sol.
- Juin-juillet 2022 : rampe d'épandage à pendillards.

Le châssis avec un essieu sur lequel peuvent être installées les deux équipements a été conçu et fabriqué pour les besoins du projet (Figure 2). Dans les deux cas, le lisier est pompé de l'extérieur de la serre via un boyau flexible de 15 m par un épandeur à lisier (Houle 2250, GEA Farm Technologies). L'essieu est tiré par un tracteur de 18 HP (International Harvester 234) et les gaz d'échappement du tracteur sont évacués de la serre à l'aide d'un tuyau connecté à la sortie d'échappement. Dans les deux configurations, le lisier est épandu sur toute la largeur du bac en un passage. La dose d'épandage, mesurée à la suite d'une calibration, a été établie à 31,5 tonnes/ha, un taux représentatif de la réalité.

Chaque série de tests a été effectuée à raison de 6 répétitions pour assurer une robustesse statistique, avec un minimum de 48 heures entre chaque répétition. Le lisier séché de l'essai précédent et une fine couche de sol en surface ont été retirés avant chaque essai. De plus, des échantillons de lisier et de sol (30 cm de profondeur) ont été prélevés lors de chaque essai pour réaliser des analyses physico-chimiques et biologiques.



Figure 2 Épandage de lisier par aspersion basse (gauche) et par pendillards (droite) dans le laboratoire Sol-Air

2.1.4 Mesure des émissions de contaminants

2.1.4.1 Gaz

Émissions en continu

Les concentrations de gaz (CO_2 , CH_4 , N_2O et NH_3) ont été mesurées en continu près des ventilateurs à la sortie du tunnel de vent par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier à l'aide d'un analyseur FTIR portatif (Gaset, GT 5000), et à l'aide d'un analyseur à fluorescence UV pour le H_2S . La mesure débutait au moins une heure avant l'épandage.

Afin d'estimer les émissions nettes de l'épandage ($\text{g}/\text{min}/\text{m}^2$), un seuil de concentration de référence a été établi, correspondant à la concentration moyenne à la sortie des ventilateurs lors d'une période de 15 minutes précédant l'épandage. Le taux d'émission a ensuite été calculé en multipliant l'augmentation de la concentration (g/m^3) par rapport au seuil de référence, par le débit d'air dans la serre ($478,6 \text{ m}^3/\text{min}$), et divisé par la surface d'épandage ($91,6 \text{ m}^2$).

Les émissions de CO_2 , CH_4 et NH_3 cumulées de chaque type d'épandage ont été comparées statistiquement pour chaque gaz séparément à l'aide du logiciel R (version 4.2.1). Un modèle linéaire généralisé (GLM) a été utilisé avec le traitement comme variable indépendante. Les modèles ont été validés en examinant les résidus et en les comparant à la distribution de résidus simulés par le modèle.

Développement d'échantillonneurs à flux passif

Le projet a également permis de poursuivre le développement d'une nouvelle technique de mesure des émissions de gaz, soit l'utilisation d'échantillonneurs à flux passif (PFS). L'équipe de génie agroenvironnemental de l'IRDA travaille depuis plusieurs années au développement de PFS. Cet instrument de mesure est beaucoup moins dispendieux que les appareils conventionnels, ne requiert pas de source d'énergie et peut facilement être transporté d'un lieu à un autre vu sa petite taille. Un PFS est composé de deux tubes avec un trou entre les deux afin que la vitesse de l'air à l'intérieur de l'échantillonneur soit égale à la vitesse du vent extérieur. L'air entre dans le PFS et passe à travers un adsorbant choisi spécifiquement pour capter un gaz précis. L'instrument est ensuite transporté au laboratoire, où une désorption permet de connaître les quantités de gaz absorbées. En connaissant le temps d'exposition de l'adsorbant, il est possible d'obtenir les émissions pour le site d'échantillonnage. Les recherches sur cet instrument ont été orientées principalement sur l'efficacité d'adsorption et de désorption du N_2O et du CH_4 , ainsi que sur l'étanchéité de l'appareil (Palacios, 2010; Larios et al., 2017).

Les PFS développés par l'équipe de l'IRDA pour la mesure des émissions de N_2O ont été adaptés et évalués dans le laboratoire Sol-Air.

2.1.4.2 Odeurs

De l'air a été échantillonné dans des sacs à la sortie des ventilateurs (Figure 3) afin de réaliser des analyses d'odeurs : 30 minutes avant l'épandage, pendant l'épandage et 30 minutes après l'épandage. Les sacs ont été remplis de façon indirecte en utilisant un poumon d'échantillonnage pour éviter la contamination de l'échantillon par la pompe. La méthode d'échantillonnage a été adaptée pour l'échantillonnage au champ en utilisant de plus petits sacs remplis à l'aide d'une pompe à batterie.

L'intensité des odeurs a été quantifiée selon l'approche décrite dans la norme ASTM-E544 – Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity. Un panel composé d'un minimum de trois panélistes quantifie l'intensité de l'odeur de l'échantillon non dilué en l'associant à l'intensité de l'odeur de l'une de sept solutions de n-butanol à différentes concentrations connues (240, 480, 960, 1940, 3880, 7750 et 15550 pm).

En parallèle, pour trois des six répétitions d'épandage par aérospersion basse, les échantillons d'air ont été envoyés au laboratoire de Consumaj inc. pour l'analyse de concentration d'odeurs par olfactométrie dynamique. Cette méthode reconnue, qui est cependant plus coûteuse, est réalisée avec 6 panélistes et la concentration d'odeur est présentée en unités d'odeur par m³ (UO/m³), suivant les normes CEN PrEN 13725 et ASTM 679-91.

L'intensité moyenne des odeurs a été comparée statistiquement avec un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM). Cela permet de modéliser l'intensité avec une distribution Gamma, et d'inclure le facteur aléatoire répétition. Parce que les mesures d'une des conditions n'a aucune variance (toutes les valeurs sont identiques), les paramètres du modèle sont estimés avec une approche bayésienne (bibliothèque R rstanarm). Cette approche est également plus robuste aux déviations des suppositions dans les modèles statistiques. On a utilisé les distributions à priori par défaut (sans information). La validité du modèle statistique a été validée en vérifiant que l'algorithme a convergé.

2.1.4.3 Particules

Un échantillonneur *DustTrak Environmental Monitor 8543* (TSI Incorporated) a été utilisé pour mesurer les concentrations de particules dans l'air à la sortie du tunnel de vent. Il s'agit d'un nouvel appareil résistant aux conditions ambiantes et qui peut être facilement installé à l'extérieur, au champ. L'appareil est conçu de façon à maintenir constante l'humidité relative de l'échantillon.

2.1.4.4 Bioaérosols : bactéries, indicateurs fécaux et gènes de résistance aux antibiotiques

Échantillonnage

Le protocole d'échantillonnage et d'analyse des bioaérosols est présenté en détail dans l'article de Baghdadi et al., (2023). Les bioaérosols ont été prélevés à l'aide de deux échantillonneurs d'air sec robustes à débit élevé utilisant un filtre électrostatique : le *SASS® 3100 Dry Air Sampler* (Research International Inc.), qui échantillonne l'air à un débit de 300 L/min, et le *SASS® 4100 Two-Stage Aerosol Collector* (Research International Inc.), un nouvel appareil pouvant échantillonner à 4000 L/min.

Pour chaque essai d'épandage, des échantillons d'air ont été collectés en amont et en aval du tunnel de vent avec le *SASS® 3100* pendant trois périodes de 20 minutes, commençant : 1) 20 minutes avant l'épandage, soit "avant l'épandage", 2) au début de l'épandage, soit "pendant l'épandage", et 3) 20 minutes après le début de l'épandage, soit "après l'épandage". Le *SASS® 4100* a été utilisé en parallèle en aval pour fins de comparaison lors de quelques essais.



Figure 3 Appareils d'échantillonnage. De gauche à droite : Poumon artificiel pour l'échantillonnage de sacs d'odeurs; DustTrak Environmental Monitor 8543 (particules); deux SASS® 3100 et un SASS® 4100 sur trépied pour l'échantillonnage de bioaérosols.

Traitement des échantillons

Tous les échantillons ont été traités et analysés au CRIUCPQ-ULaval. Les particules sur les filtres électrostatiques ont d'abord été extraites à l'aide de l'extracteur de particules SASS®3010 (Research International, Inc.) avec 7 mL de tampon phosphate stérile. Le volume résultant des échantillons extraits (~ 6,5 mL) a ensuite été centrifugé et les échantillons ont été conservés dans des tubes de 1,7 mL à -20 °C jusqu'à l'extraction de l'ADN.

Analyse des bactéries et indicateurs fécaux

Les bactéries totales et les indicateurs fécaux (*E. coli*, *Enterococcus*, archées et un phage d'*Aerococcus* (phage vB_AviM_AVP d'*Aerococcus viridans*)) ont été quantifiés par PCR à partir de l'ADN extrait des échantillons de lisier et du SASS®3100. Toutes les analyses de biologie moléculaire qPCR ont été réalisées sur des systèmes CFX384 ou CFX96 Touch™ (Bio-Rad Laboratories, Mississauga, ON, Canada). Des témoins négatifs ont été inclus dans chaque essai PCR, et tous les échantillons, y compris les témoins négatifs et positifs, ont été testés en triplicata pour les bactéries totales et en duplicata pour les indicateurs fécaux et le phage d'*Aerococcus*. Les concentrations de bactéries totales, d'Archées et d'indicateurs fécaux ont ensuite été exprimées en copies par mètre cube d'air (copies/m³).

La présence des agents pathogènes bactériens (*Campylobacter* sp., *Clostridium difficile*, *Clostridium perfringens*, verotoxigenic *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Mycobacterium avium*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline et *Yersinia enterocolitica*) et viraux (PRRSV, PED virus et circovirus porcin) inclus dans la proposition de projet initiale n'a pas été recherchée dans les échantillons de lisier ni dans ceux des bioaérosols en raison des limites de détection des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des bioaérosols. En effet, les concentrations dans l'air des bactéries totales et des indicateurs fécaux (*Enterococcus*, *Escherichia coli*) lors des épandages de lisier de porcs se sont révélées être beaucoup plus faibles que celles anticipées. Sachant que les concentrations des agents pathogènes sont plus faibles que celles des bactéries totales et des indicateurs fécaux dans les bioaérosols à l'intérieur des élevages de porcs (Létourneau et al. 2010; Pilote et al. 2019), les agents pathogènes n'ont pas été évalués dans le présent projet de recherche. Les cibles suivantes ont toutefois été ajoutées, puisque leurs concentrations se sont révélées plus importantes que celles des agents pathogènes dans d'autres projets de recherche : l'ADN de porc, les archées totales et le phage vB_AviM_AVP d'*Aerococcus viridans*. Le phage vB_AviM_AVP est un proxy des agents pathogènes viraux ayant été révélé par métagénomique virale lors

d'un autre projet de recherche par les laboratoires du Prof. Julie Brassard et du Prof. Caroline Duchaine (Létourneau et al. 2023; In press).

Analyse des gènes de résistance aux antibiotiques (ARG)

La présence de plus de 40 gènes de résistance aux antibiotiques appartenant à 8 familles d'antibiotiques (bêta-lactames, aminoglycosides, glycopeptides, quinolones, sulfonamides, tétracyclines, polymyxines et macrolides) a été évaluée dans les échantillons de lisiers de porcs. Parmi ces 40 gènes, les 28 retrouvés le plus fréquemment et en plus forte concentration ont été recherchés dans les échantillons de bioaérosols à l'aide d'un *SmartChip Real-Time PCR System (high-throughput real-time PCR)* de Takara Bio Inc. C'est beaucoup plus que les gènes de résistance appartenant à seulement deux familles d'antibiotiques (tétracyclines et bêta-lactames) incluses dans la proposition de projet initiale.

Calcul des émissions

Pour obtenir les taux d'émission au moment de l'épandage ou après (émission résiduelle), les concentrations de bactéries, d'archées, d'*E. coli*, d'*Enterococcus*, du phage *Aerococcus viridans* et d'ARG (copies/m³) des échantillons d'air "avant l'épandage" ont d'abord été soustraites des concentrations des échantillons d'air "pendant l'épandage" ou "après l'épandage", respectivement. Les taux d'émission des micro-organismes ou ARG étudiés (en copies de gènes/kg de lisier) ont ensuite été calculés à l'aide de l'équation suivante :

$$R = \frac{(C \times Q \times t)}{(A \times d)} \quad \text{Eq. 1}$$

Où C est l'augmentation de concentration dans l'air comparativement à la période "avant l'épandage" (copies/m³ d'air), Q est le débit d'air du tunnel de vent (478,6 m³/min), t est le temps d'échantillonnage (20 min), A est la superficie du sol sur lequel le fumier a été épandu (91,6 m²) et d est la dose de lisier appliquée (3,15 kg/m²).

Analyses statistiques

Les données sur le taux d'émissions ont été analysées à l'aide d'un modèle mixte linéaire avec deux facteurs fixes à l'aide du logiciel statistique SAS v9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC). Les deux méthodes d'épandage étaient associées à l'un de ces facteurs, tandis que l'autre était lié au moment d'échantillonnage ("pendant" vs "après") et analysé comme mesures répétées. Un terme d'interaction entre ces deux facteurs fixes a été ajouté au modèle statistique. La dépendance entre les résidus des mesures répétées de la même unité expérimentale a été estimée avec une association de variance-covariance non structurée. Les variables ont été transformées logarithmiquement pour remplir les hypothèses de normalité et de variance. Les résultats ont été considérés comme significatifs avec des valeurs de $P \leq 0,05$.

2.1.5 Analyse de lisier et de sol

Lors de chaque épandage, des échantillons de lisier et de sol étaient prélevés afin de réaliser des analyses physicochimiques (pH, matière sèche, N, N-NH₄, N-NO₃, P minéral, P total., K, Ca) au Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA. Des analyses microbiologiques (bactéries totales, *E. coli*, *Enterococcus*, archées et un phage d'*Aerococcus viridans*) ont été réalisées au laboratoire du CRIUCPQ-ULaval pour le lisier seulement. De plus, les échantillons de lisier de porc ont été analysés par qPCR haut débit pour les gènes de résistance aux antibiotiques (ARG) avec un panel de 28 gènes.

2.2 CAMPAGNE INTENSIVE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN POUR ÉVALUER LES RISQUES ASSOCIÉS AUX DIFFÉRENTS TYPES D'ÉQUIPEMENTS ACTUELLEMENT UTILISÉS POUR ÉPANDRE LE FUMIER

2.2.1 Site expérimental

Ce projet a été mené dans la ferme expérimentale de l'IRDA, située à Sainte Lambert de Lauzon, QC, Canada (46°36'35.92" N 71°10'40.83" O). La région bénéficie d'un climat humide continental, avec une précipitation annuelle moyenne de 937,3 mm et une température annuelle moyenne de 4,4 °C, selon la station météorologique de Beauséjour.

2.2.2 Plan d'expérience

Le plan expérimental comprenait une série de trois techniques différentes d'application (déflecteur, pendillard et pendillard avec incorporation- Figure 4), répétées trois fois chacune. Les tests d'épandage ont été réalisés sur une largeur de 12 mètres (deux passages couvrant 6 mètres chacun) et sur des parcelles de 65 m de long. Le déflecteur (plaque d'éclaboussure) et la rampe à pendillards ont été fixés à l'épandeur de lisier (Houle 2250, GEA Farm Technologies) pour effectuer les tests. Le déflecteur est positionné au milieu du réservoir à une hauteur d'environ 1,5 mètre du sol. La rampe à pendillards comporte 16 tubes équidistants (6 mètres de large total) déposant le lisier directement sur le sol. Un déchaumeur à disques (3 mètres de large) a été utilisé pour l'incorporation du lisier déposé au sol; 4 passages de déchaumeur ont été nécessaires pour couvrir toute la largeur de la zone d'épandage. Une première série d'essais a été réalisée en octobre 2022 avec l'épandeur déflecteur sur une parcelle en prairie, et la deuxième série d'août à septembre 2023 avec les deux autres techniques sur des parcelles en jachère. Les essais ont été réalisés lors de journées sans précipitations, avec une vitesse de vent maximale de 15 km/h soufflant dans la direction du vent dominant (entre SO et NO). Le lisier utilisé pour les essais d'épandage au champ était prélevé de la même ferme que pour les essais au laboratoire Sol-Air.



Figure 4. Épandage de lisier par aérosuspension basse avec déflecteur (en haut à gauche), à la surface avec pendillards (en haut à droite) et avec pendillards et incorporation immédiate (bas)

La méthodologie d'échantillonnage validée en tunnel de vent a été adaptée et utilisée pour mesurer les concentrations de gaz (CO₂, CH₄, N₂O, NH₃), l'intensité des odeurs, les particules de poussière et les concentrations de bioaérosols à différents endroits dans le champ, permettant d'étudier la dispersion du panache de contaminants.

2.2.3 Mesure des émissions de contaminants dans l'air

2.2.3.1 Analyse du lisier et du sol

Pour les essais sur les parcelles en jachère, des échantillons de sol ont été prélevés afin d'analyser la teneur en matières sèches. De plus, un échantillon de lisier a été prélevé immédiatement après chaque test dans l'épandeur pour être analysé en laboratoire. Les analyses décrites à la section 2.1.5 ont été réalisées.

2.2.3.2 Gaz

Les concentrations de gaz ont été mesurées avec un analyseur FTIR portatif (Gasmeter, GT 5000) installé à un point central fixe situé à 18 m en aval de la zone d'épandage, dans la direction du vent dominant (point rouge sur la *Figure 5*). L'analyseur FTIR a fonctionné pendant au moins 1 heure, commençant 20 minutes avant l'épandage.

2.2.3.3 Odeurs

L'air a été échantillonné pour l'analyse de l'intensité des odeurs au point central fixe (*Figure 6*) dans trois sacs en [®]Nalophan au moyen d'une aspiration avec un poumon artificiel : 30 minutes avant l'épandage, pendant l'épandage et 30 minutes après l'épandage. Après l'échantillonnage, un test olfactif a été réalisé avec quatre personnes quantifiant l'intensité de l'odeur non diluée en la comparant à sept concentrations connues d'un composé de référence (n-butanol, en ppm).

2.2.3.4 Particules

Deux moniteurs d'aérosols DustTrak™ DRX 8534 ont été utilisés pour surveiller la concentration de particules au point central fixe et au point mobile.

2.2.3.5 Bioaérosols : bactéries, indicateurs fécaux et gènes de résistance aux antibiotiques

Les bioaérosols ont été échantillonnés à l'aide des échantillonneurs d'air sec SASS® 3100 au point central fixe et à deux autres points fixes également situés à 18 m en aval de la zone d'épandage dans la direction du vent dominant (points orange sur la *Figure 5 Points d'échantillonnage lors de l'épandage de lisier au champ. Zone d'épandage en brun; Point d'échantillonnage mobile en jaune; Point d'échantillonnage central fixe en rouge; points d'échantillonnage fixe supplémentaires pour les bioaérosols en orange. Figure 5*). L'échantillonneur SASS® 4100 a été utilisé pour échantillonner les bioaérosols à un autre point fixe à 36 m en aval de la zone d'épandage. Enfin, un échantillonneur d'air sec SASS® 3100 a été installé sur le point mobile déplacé par le véhicule utilitaire (RTV) (point jaune sur la *Figure 5 Points d'échantillonnage lors de l'épandage de lisier au champ. Zone d'épandage en brun; Point d'échantillonnage mobile en jaune; Point d'échantillonnage central fixe en rouge; points d'échantillonnage fixe supplémentaires pour les bioaérosols en orange. Figure 5*), ainsi qu'en amont de la zone d'épandage.

Le traitement des échantillons et l'analyse des bactéries et indicateurs fécaux ont été réalisés en suivant la description de la section 2.1.4.4.

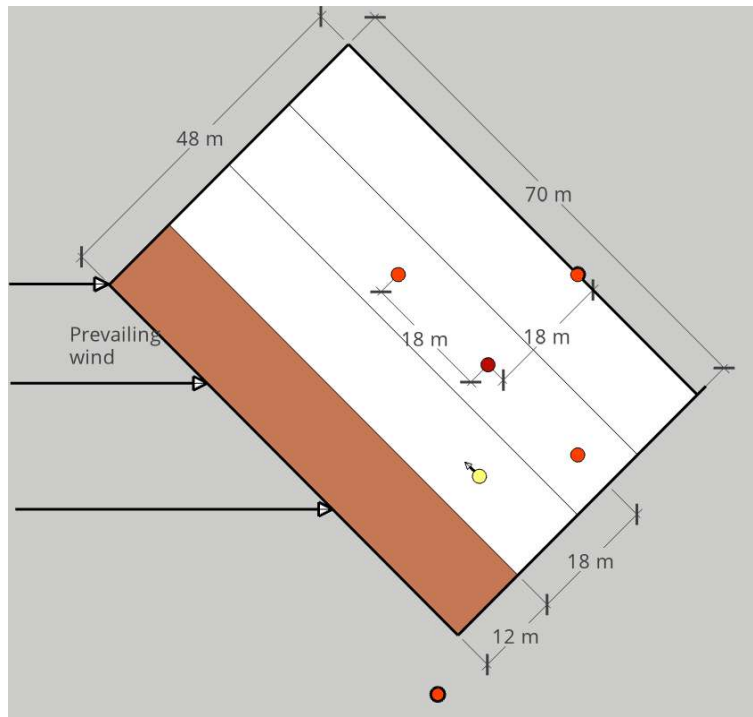


Figure 5 Points d'échantillonnage lors de l'épandage de lisier au champ. Zone d'épandage en brun; Point d'échantillonnage mobile en jaune; Point d'échantillonnage central fixe en rouge; points d'échantillonnage fixe supplémentaires pour les bioaérosols en orange.



Figure 6. Point central fixe d'échantillonnage sur le terrain.

2.3 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA) a été sollicité pour la réalisation de l'analyse économique de scénarios comprenant une composante d'épandage et une composante de biosécurité sur la production porcine. Les données collectées dans la composante de biosécurité n'étaient toutefois pas propices à une analyse économique. Le mandat a été ajusté pour couvrir uniquement la composante d'épandage. Le mandat consistait donc à faire une évaluation économique de scénarios sur les coûts d'incorporation lors de l'épandage de lisier de porc. La démarche consistait à :

- Organiser l'information agronomique pour en faire une analyse économique;
- Déterminer les revenus et les pertes liés aux scénarios;
- Appuyer l'analyse des résultats et des constats.

Un protocole de vérification interne a été établi afin de valider les processus d'analyse. Celui-ci a démontré l'absence d'anomalies significatives.

L'approche méthodologique adoptée dans ce projet repose sur l'analyse des scénarios relatifs à l'incorporation du lisier de porc après l'épandage. L'analyse vise à évaluer les gains et les pertes économiques associés à ces scénarios en comparant celui qui incorpore le lisier de porc à celui qui ne le fait pas. Elle met en lumière les coûts liés à chacun de ces scénarios.

3 RÉSULTATS

3.1 QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS FUGITIVES DE CONTAMINANTS DE L'AIR SUITE À L'ÉPANDAGE DU LISIER : ADAPTATION DES TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET VALIDATION DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ

3.1.1 Analyse du lisier et du sol

3.1.1.1 Analyses physico-chimiques

En moyenne, le lisier utilisé pour les essais avec le déflecteur avait une teneur en matière sèche légèrement plus élevée (8,46 vs 8,02%), ce qui se traduit par une teneur en phosphore plus élevée et une teneur en azote plus faible (Tableau 1).

Tableau 1 : Analyse physico-chimique du lisier. Moyenne de 6 échantillons pour chaque technique

Élément	Unité	Défecteur	Pendillards
Densité	g / cm ³	≈ 1,0	≈ 1,0
pH		6,83	7,35
Matière sèche	%	8,46	8,02
N total	mg/kg	5119	6215
N-NH ₄	mg/kg	2570	3346
N-NO ₃	mg/kg	0,93	N/A
P minéral	mg/kg	1582	1175
P total	mg/kg	1729	1220
K	mg/kg	1796	3158
Ca	mg/kg	1040	871

Après chaque essai, le lisier séché à la surface du sol était retiré manuellement. Aucun arrosage n'était effectué avant le retrait du lisier afin d'éviter la lixiviation. Des échantillons de sol ont été prélevés avant chaque essai d'épandage afin de s'assurer que le sol ne devenait pas de plus en plus chargé en éléments fertilisants. Un arrosage était effectué avant chaque épandage afin de conserver une teneur en humidité entre 15 et 20% (Tableau 2). De plus, les teneurs en nutriments et métaux étaient similaires lors de tous les essais.

Tableau 2 : Analyse physico-chimique du sol avant l'épandage. Moyenne de 6 échantillons pour chaque technique

Élément	Unité	Défecteur	Pendillards
Humidité	%	14,95	19,98
pH		6,37	6,23
Matière organique	%	3,79	3,61
C	%	1,86	1,85
N	%	0,17	0,19
N-NH ₄	mg/kg	31,9	32,2
N-NO ₃	mg/kg	90,1	85,6
P	mg/kg	53,3	46,0
K	mg/kg	298,2	234,8
Ca	mg/kg	1276	1150
Mg	mg/kg	153,2	133,0
Al	mg/kg	1183	1225
Sable	%	33,5	33,4
Limon	%	46,5	44,7
Argile	%	20,0	21,9
Texture		Loam	

3.1.1.2 Analyses microbiologiques

Les concentrations de bactéries totales et de quatre indicateurs fécaux ont été analysées sur des échantillons prélevés lors de chaque épandage. Les concentrations moyennes pour les 6 épandages sont similaires pour les deux techniques d'épandage (Tableau 3).

Vingt-huit différents gènes de résistance aux antibiotiques ont été analysés dans les échantillons de lisier pour huit familles d'antibiotiques (Tableau 4). Les résultats démontrent que ce sont les Beta-Lactamase qui sont présents en plus grande quantité. Les différences entre les deux méthodes d'épandage pour les Aminoglycosides, les Erythromycin, les MGE et les Tetracyclines peuvent s'expliquer par le fait que les essais ont été réalisés dans deux périodes différentes (octobre vs juillet). Il n'est pas possible de savoir si des antibiotiques ont été utilisés pendant ces périodes précises.

Tableau 3 : Concentrations de bactéries totales et d'indicateurs fécaux dans le lisier (copies de gènes par g de matière sèche)

	Défecteur	Pendillards
Bactéries totales	9,29 x 10 ¹³	1,91 x 10 ¹³
Enterococcus	2,75 x 10 ⁹	2,09 x 10 ⁹
E.coli	1,43 x 10 ⁸	1,19 x 10 ⁸
Archaea	2,39 x 10 ¹⁰	1,83 x 10 ¹⁰
Aerococcus Phage	1,74 x 10 ⁷	9,06 x 10 ⁶

Tableau 4 : Concentrations de gènes de résistance aux antibiotiques dans le lisier pour 8 familles d'antibiotiques (copies de gènes par g de matière sèche)

	Déflecteur	Pendillards
Aminoglycosides	$4,84 \times 10^9$	$6,63 \times 10^{15}$
Beta-Lactamase	$2,96 \times 10^{16}$	$1,29 \times 10^{16}$
Erythromycin	$6,72 \times 10^{15}$	$1,01 \times 10^9$
MGE	$4,34 \times 10^{11}$	$4,12 \times 10^{16}$
Tetracycline	$2,31 \times 10^{12}$	$4,33 \times 10^{15}$
Sulfonamide	$5,77 \times 10^{11}$	$2,75 \times 10^{11}$
Quinolones	$1,66 \times 10^{16}$	$6,50 \times 10^9$
Vancomycin	$8,13 \times 10^{16}$	$7,22 \times 10^{16}$

3.1.2 Émissions de gaz

Les valeurs d'émissions ont été cumulées pendant 30 minutes à partir du début de l'épandage pour tous les gaz, sauf le NH_3 (360 minutes) qui a été émis plus graduellement. Les émissions cumulatives de CO_2 , CH_4 et NH_3 (g/m^2) sont présentées à la Figure 7 pour les deux méthodes d'épandage. Les résultats pour le CO , le N_2O et le H_2S ne sont pas présentés, car les concentrations sont très faibles, près des limites de détection de l'appareil.

Les émissions de CO_2 et CH_4 ont été générées principalement dans les 10 minutes suivant l'épandage, les concentrations ayant revenu graduellement à la valeur initiale par la suite. Les émissions de CO_2 cumulées après 30 minutes provenant de l'épandage de lisier avec l'épandeur à déflecteur sont environ trois fois plus élevées qu'avec les pendillards ($P < 0,0001$). Cependant, les données n'ont pas permis de détecter de différence significative en ce qui concerne les émissions de CH_4 .

Pour les deux techniques d'épandage, l'analyse des concentrations en NH_3 montre que le gaz est libéré plus progressivement en comparaison avec le CO_2 et le CH_4 . La concentration en ammoniac a tendance à augmenter rapidement, environ 5 minutes après l'épandage, et continue d'augmenter graduellement pendant les premières 30 minutes, pour finalement diminuer tranquillement au cours des heures suivantes. La libération progressive de l'ammoniac illustre bien le phénomène de volatilisation de l'azote à partir du sol à la suite de l'épandage.

Les émissions de NH_3 sont significativement plus élevées (environ 4 fois) pour les essais d'épandage avec les pendillards comparativement au déflecteur ($P < 0,0001$). Cependant, cette différence ne peut être attribuée à la technique d'épandage. En effet, les températures lors des essais avec les pendillards étaient plus élevées (entre 25 et 30 °C) comparativement aux essais avec le déflecteur (entre 5 et 26 °C). Il faut également noter que l'appareil a eu un problème avec la mesure de l'ammoniac lors de 3 des 6 essais d'épandage avec les pendillards.

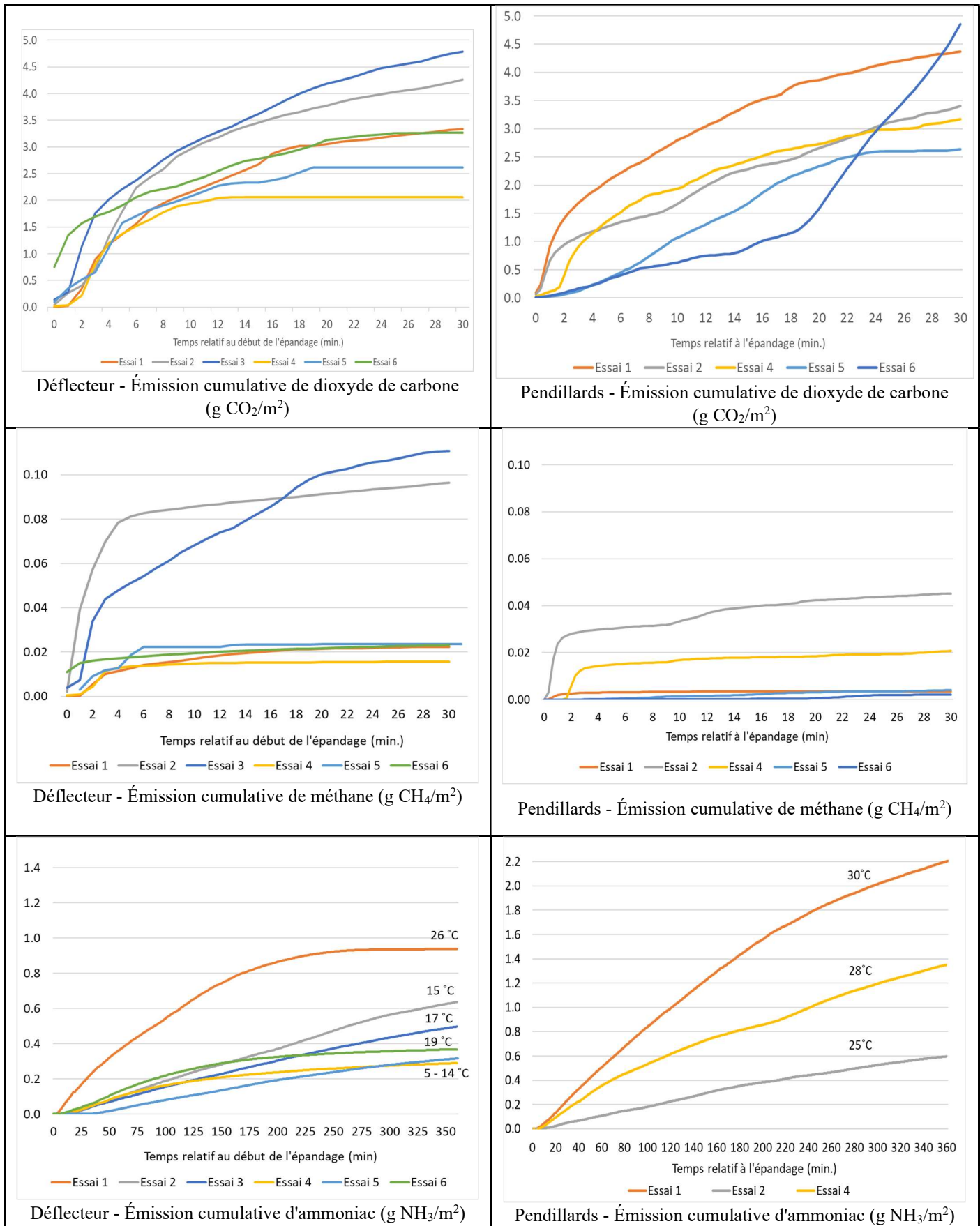


Figure 7. Émissions cumulatives de CO₂, de CH₄ et de NH₃ lors de l'épandage de lisier au laboratoire Sol-Air

Les résultats des mesures réalisées avec les échantillonneurs à flux passif (PFS) ont démontré que les émissions mesurées à différentes positions dans le tunnel de vent étaient généralement similaires, ce qui indique que les PFS pourraient être efficace au centre de la serre à basse vitesse de vent (≈ 0.5 m/s), une vitesse similaire à un vent faible. De plus, dans un des essais de la première série d'épandage, l'émission cumulative mesurée avec l'analyseur FTIR (22 434 g CO₂/h et 17.9 g N₂O/h) était similaire à l'émission mesurée avec deux PFS positionnés dans la serre (moyenne de 28 514 g CO₂/h et 16,5 g N₂O/h). Ainsi, même si les émissions de N₂O mesurées avec la méthode directe sont négligeables, les PFS pourraient générer des résultats plus exacts, car ils permettent d'échantillonner les gaz de façon cumulative. La vision est de pouvoir utiliser les PFS au champ, de manière à rendre les mesures d'émissions plus accessibles.

3.1.3 Odeurs

La Figure 8 montre les résultats de l'intensité d'odeur des échantillons d'air en ppm de n-butanol. Pour les deux méthodes d'épandage, l'analyse statistique a révélé que l'intensité de l'odeur est significativement plus élevée pendant l'épandage, comparativement à 30 minutes avant et après l'épandage. De plus, l'intensité de l'odeur est significativement plus élevée pour l'épandage par aérosperion basse (déflecteur) comparativement à l'épandage par pendillards. Ces résultats permettent de valider l'hypothèse que les pendillards minimise le contact air-lisier, réduisant ainsi les odeurs.

Les résultats des analyses d'olfactométrie réalisées pour les essais d'épandage par aérosperion basse (déflecteur) ont démontré une augmentation de la concentration d'odeur, en moyenne de 1879 OU/m³ avant l'épandage, à 7918 OU/m³ pendant l'épandage. Comme les conclusions obtenues des deux méthodes sont semblables, seule la méthode simplifiée a été utilisée pour les essais d'épandage avec pendillards.

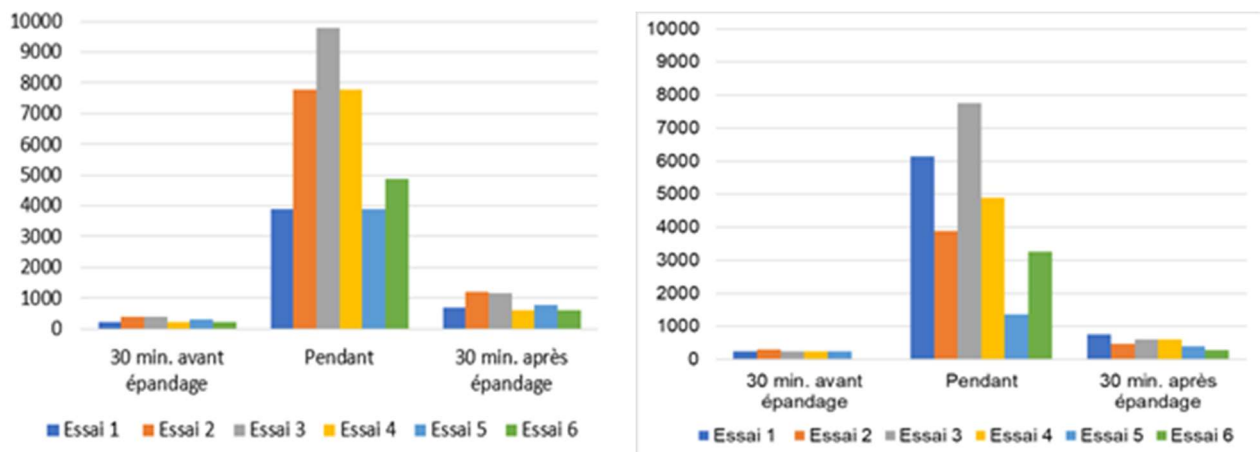


Figure 8 Intensité d'odeur en concentration de n-butanol (ppm). À gauche : Épandage par aérosperion basse (déflecteur); À droite : Épandage à la surface avec pendillards

3.1.4 Particules

Dans tous les cas, les particules de poussière en suspension dans l'air sont revenues à des niveaux normaux peu de temps après l'application du lisier, et les résultats n'ont révélé aucune différence significative. De plus, il ne semble pas y avoir de différence entre les méthodes d'épandage. Ainsi, les résultats démontrent que l'épandage de lisier n'est pas une source importante de particules fines dans l'air. Les valeurs mesurées sont bien en dessous de la valeur d'exposition moyenne maximale recommandée de 10 mg/m³ pour les travailleurs (Règlement sur la santé et la sécurité du travail, 2023).

3.1.5 Bioaérosols : bactéries totales et indicateurs fécaux

Les résultats des analyses ont révélé que comparativement à l'échantillon prélevé avant l'épandage, la concentration en bactéries totales dans l'air était significativement plus élevée lors des 20 minutes suivant le début de l'épandage, soit la période "Pendant" ($P < 0,05$), et redescendait près du niveau initial dans les 20 minutes suivantes, soit la période "Après" l'épandage.

De plus, les émissions de bactéries totales étaient significativement plus élevées ($P < 0,05$) lors de l'épandage avec les pendillards ($3,99 \times 10^9$ copies de gène/kg de lisier épandu) comparativement à l'épandage avec déflecteur ($2,24 \times 10^7$ copies de gène/kg de lisier) (Figure 9). En ce qui concerne les indicateurs fécaux, aucune différence significative n'a été observée entre les techniques d'épandage, les concentrations étant beaucoup plus faibles. La comparaison entre les deux échantillonneurs d'air (SASS 3100 et SASS 4100) a démontré aucune différence significative pour un même point d'échantillonnage.

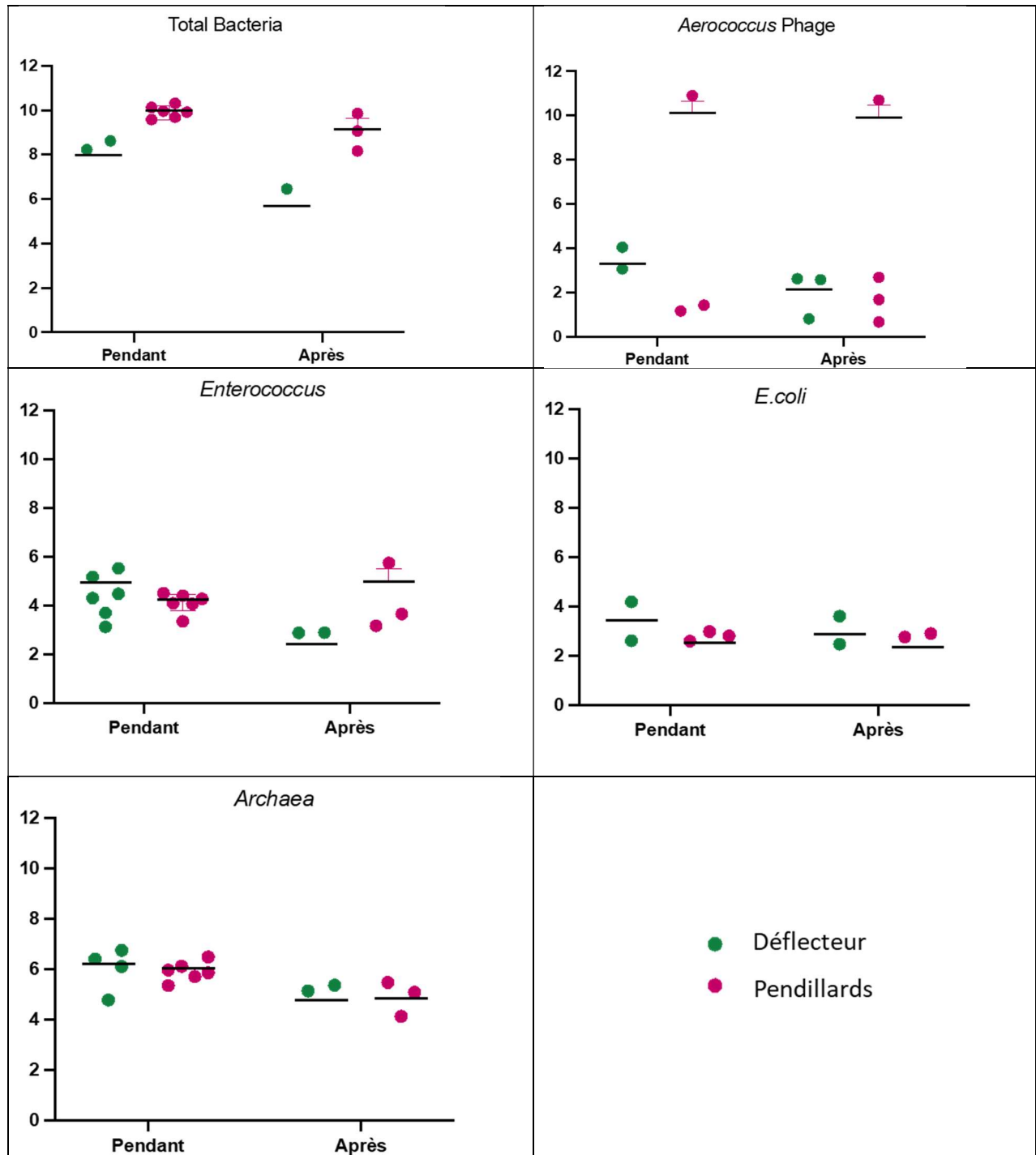


Figure 9 Émissions de bactéries et d'indicateurs fécaux (log₁₀ de la valeur d'émissions, en copies de gènes ARNr 16S / kg de lisier épandu) pour les deux techniques d'épandage

3.1.6 Bioaérosols : gènes de résistance aux antibiotiques (ARG)

Similairement aux bactéries totales, le nombre absolu d'ARG dans l'air était significativement plus élevé ($P < 0,05$) lors de l'épandage avec les pendillards, et ce, pour les deux périodes d'échantillonnage (Tableau 5 Nombre absolu de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air (copies de gènes / m^3) pour les deux techniques d'épandage lors des périodes d'échantillonnage "avant" et "après" l'épandage Tableau 5).

Tableau 5 Nombre absolu de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air (copies de gènes / m^3) pour les deux techniques d'épandage lors des périodes d'échantillonnage "avant" et "après" l'épandage

	Défecteur	Pendillards
Pendant	$1,23 \times 10^6$	$3,33 \times 10^7$
Après	$1,25 \times 10^5$	$7,18 \times 10^6$

La concentration et la contribution relative des gènes de résistances aux antibiotiques (ARG) en suspension dans l'air différaient fortement entre les deux méthodes d'épandage de lisier de porc (Figure 10). Bien que les lisiers proviennent de la même exploitation agricole, ce dernier a été prélevé à deux périodes différentes de l'année, soit en octobre pour les essais avec le déflecteur, et en juillet pour les épandages avec les pendillards. Plus précisément, la résistance à la tétracycline dominait largement lors de l'épandage avec le déflecteur, atteignant environ 55 % du total des ARG, mais était inférieure à environ 30 % lors de l'utilisation des pendillards. En revanche, la résistance aux aminoglycosides représentait environ 55 % du total des ARG lors de l'épandage de lisier de porc avec les pendillards, mais était inférieure à 10 % lors de l'utilisation du déflecteur. Ces résultats sont conformes aux analyses du lisier, alors que les ARG d'aminoglycosides étaient plus élevés dans le lisier utilisé pour les essais d'épandage avec pendillards. De plus, à l'exception des éléments génétiques mobiles et des sulfonamides, les taux d'émission de presque tous les groupes d'ARG, y compris la résistance aux aminoglycosides, aux bêta-lactames et à l'érythromycine, étaient significativement différents en comparant les deux méthodes d'épandage ($P < 0,05$).

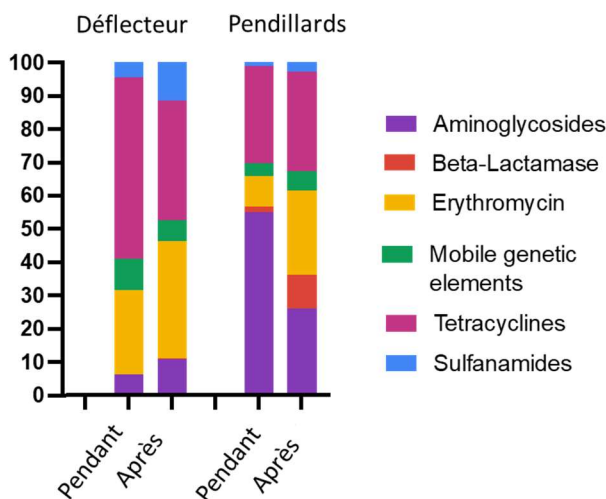


Figure 10 Proportions (%) des gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air lors des périodes d'échantillonnage "pendant" et "après" l'épandage.

3.2 CAMPAGNE INTENSIVE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN POUR ÉVALUER LES RISQUES ASSOCIÉS AUX DIFFÉRENTS TYPES D'ÉQUIPEMENTS ACTUELLEMENT UTILISÉS POUR ÉPANDRE LE FUMIER.

3.2.1 Analyses physico-chimiques du lisier

Le lisier utilisé pour les essais avec le déflecteur avait une teneur en matière sèche légèrement moins élevée (6,72% vs 7,29% et 6,95%) par rapport aux autres techniques. Il est important de souligner que lors de la troisième et quatrième répétition

avec le déflecteur, la teneur en matière sèche était significativement plus basse (4,86%) par rapport aux deux premières répétitions (8,57%), ce qui se traduit par une teneur en azote plus élevée et une teneur en phosphore plus faible (Tableau 6).

Tableau 6 Analyse physico-chimique du lisier. Moyenne des échantillons pour chaque technique.

Élément	Unité	Pendillards avec incorporation		
		Déflecteur	Pendillards	Pendillards avec incorporation
Densité	g / cm ³	≈ 1,0	≈ 1,0	≈ 1,0
pH		N/A	7,21	7,29
Matière sèche	%	6,72	7,29	6,95
Cendres	%	25,43	23,35	23,75
N total	mg/kg	N/A	5471	5376
N-NH4	mg/kg	N/A	6307	6489,5
P minéral	mg/kg	N/A	1341	1297
P total	mg/kg	N/A	1406,5	1345,5
K	mg/kg	N/A	2395	2471,5
Ca	mg/kg	N/A	964	743,5

3.2.2 Gaz

L'analyse des concentrations de gaz excédentaires (augmentation par rapport à la moyenne (20 min) avant le début de l'épandage), montre que la plupart des données sont sous la limite de détection de l'équipement. Par conséquent, seule une analyse qualitative des concentrations est possible, sans comparaison statistique entre les techniques.

La Figure 11 illustre l'évolution des concentrations de CO₂ et CH₄ pendant les périodes d'épandage (avant, pendant et après) des trois techniques testées. Une légère augmentation de la concentration de CO₂ est observée pendant l'épandage avec le déflecteur et le pendillard avec incorporation, ces valeurs retournant à leur valeur initiale une fois l'épandage terminé. Sur la figure 11, il est possible de noter deux pics avant l'épandage dans les essais 2 et 3 avec déflecteur, principalement liés à l'activité du tracteur autour de l'analyseur. Dans le cas de l'épandage avec pendillards, les concentrations de CO₂ restent stables tout au long de l'activité d'épandage pour les trois répétitions.

Une hausse des concentrations de CH₄ était notable lors de l'épandage avec déflecteur. Dans deux des répétitions, une augmentation d'environ 0,2 ppm a été observée dans les 4 premières minutes après le début de l'épandage par rapport aux concentrations enregistrées avant. Cette valeur pourrait avoir un impact significatif sur l'environnement si ce scénario était étendu aux activités agricoles quotidiennes, où les périodes d'épandage sont plus longues que celles testées dans ce projet. Le CH₄ présente également un potentiel de réchauffement global 80 fois supérieur à celui du CO₂ au cours des 20 années qui suivent sa libération dans l'atmosphère (IPCC, 2021), ce qui rend cette différence non négligeable à long terme. D'autre part, les concentrations de CH₄ restent stables tout au long des tests pour les techniques pendillard et pendillard avec incorporation.



Figure 11 Concentration de CO₂ et de CH₄ lors de l'épandage de lisier au champ.

Un comportement similaire des concentrations de NH₃ lors des essais en serre a été mis en évidence dans les essais sur le terrain. Les concentrations ont tendance à augmenter progressivement au cours des 30 premières minutes avec le déflecteur et les pendillard. Dans le cas du pendillard, elles commencent à augmenter après la fin de l'activité d'épandage par rapport au déflecteur, qui commence à augmenter immédiatement au début de l'épandage (Figure 12). Les concentrations de NH₃ sont plus élevées pour des essais d'épandage avec le déflecteur comparativement au pendillard. Les résultats concernant le NH₃ pour la technique pendillard avec incorporation ne sont pas présentées, car la concentration a été très faible, près des limites de détection de l'appareil. De même, les concentrations de N₂O ne sont pas indiquées dans le présent rapport, car leurs valeurs ne montrent aucune tendance particulière.

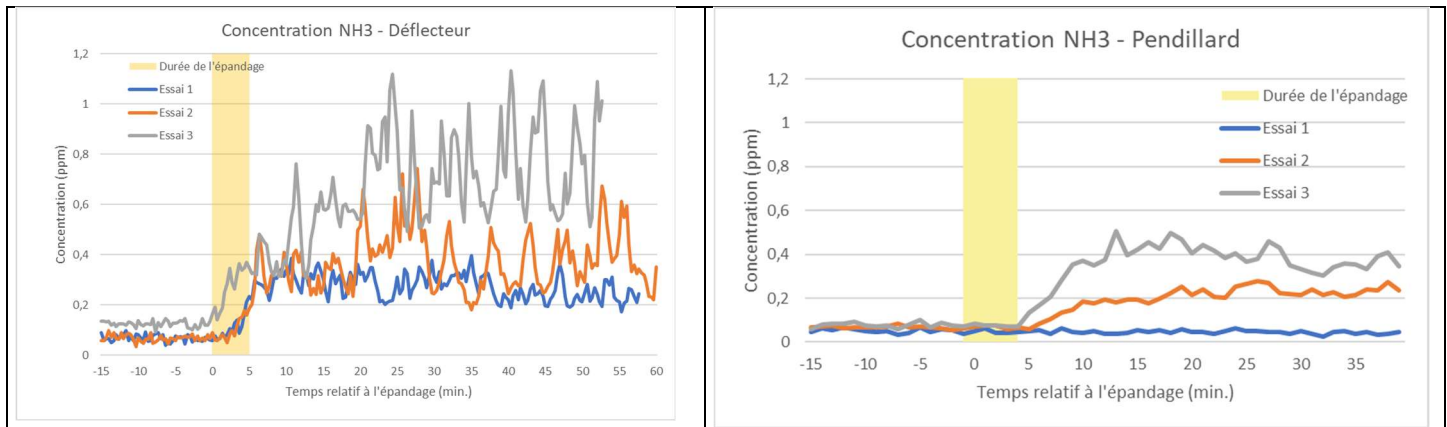


Figure 12 Concentration de NH₃ lors de l'épandage de lisier au champ avec aérospersion basse et pendillards.

3.2.3 Odeurs

La Figure 13 montre les résultats de l'intensité d'odeur des échantillons d'air en ppm de n-butanol. Pour les trois méthodes d'épandage, l'analyse statistique a révélé que l'intensité de l'odeur est significativement plus élevée pendant l'épandage, comparativement à la période avant et après l'épandage. En estimant de différences entre techniques pour chaque période, il est possible affirmer qu'il n'y a pas de différences entre techniques pour les périodes avant et après épandage. Toutefois, pour la période « pendant l'épandage », il a été possible constater que l'intensité de l'odeur était environ trois fois plus élevée avec la technique du déflecteur par rapport à celle du pendillard, et environ 4 fois plus élevée par rapport à celle du pendillard avec incorporation, ces différences étant significatives. Cette différence est moins marquée entre les techniques du pendillard et du pendillard avec incorporation, l'intensité étant 1,3 fois plus élevée avec le pendillard. Ainsi, les résultats permettent de conclure que l'utilisation d'une rampe à pendillards avec incorporation immédiate est la pratique la plus efficace en termes de réduction des odeurs. Ces résultats valident les résultats obtenus dans le tunnel de vent et l'hypothèse que les pendillards permettent de réduire le contact air-lisier, réduisant ainsi les odeurs.

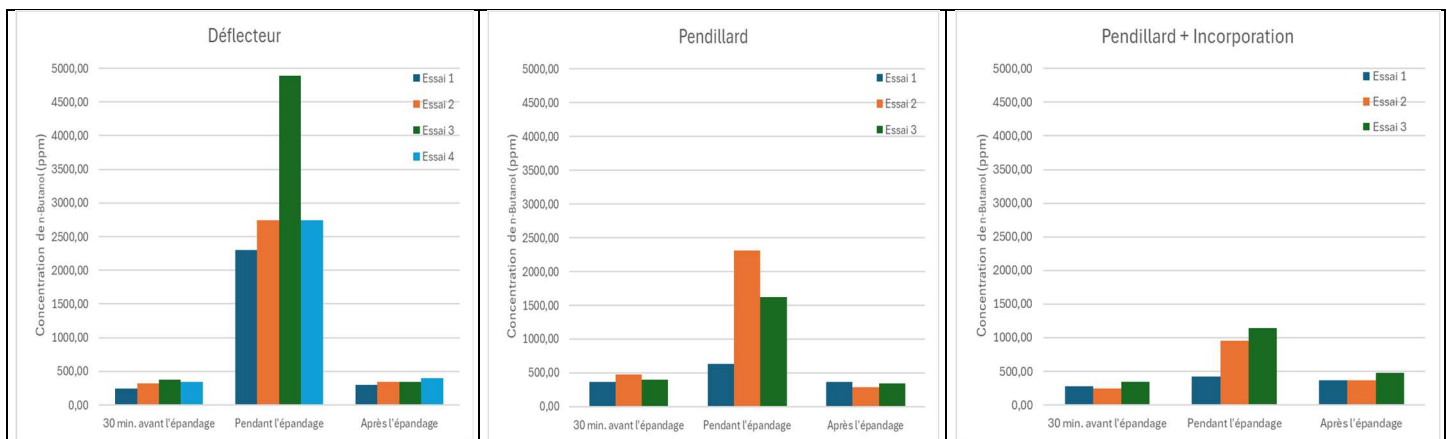


Figure 13 Intensité d'odeur en concentration de n-butanol (ppm). De Gauche à droite : Épandage par aérospersion basse (déflecteur), Épandage à la surface avec pendillards et Épandage à la surface avec pendillards et incorporation immédiate.

3.2.4 Particules de poussières

Le comportement des particules totales pour les trois techniques d'épandage est présenté dans la Figure 14. Les résultats ne montrent pas de différence significative entre les pendillards et les pendillards suivi d'une incorporation. La technique d'épandage avec déflecteur a tendance à augmenter la concentration de particules de façon significative par rapport aux deux autres techniques. Comme dans le tunnel, ces résultats démontrent que l'épandage n'est pas une source importante de particules dans l'air, les valeurs étant bien inférieures aux valeurs moyennes d'exposition selon la durée (EMPD) (10 mg/m³).

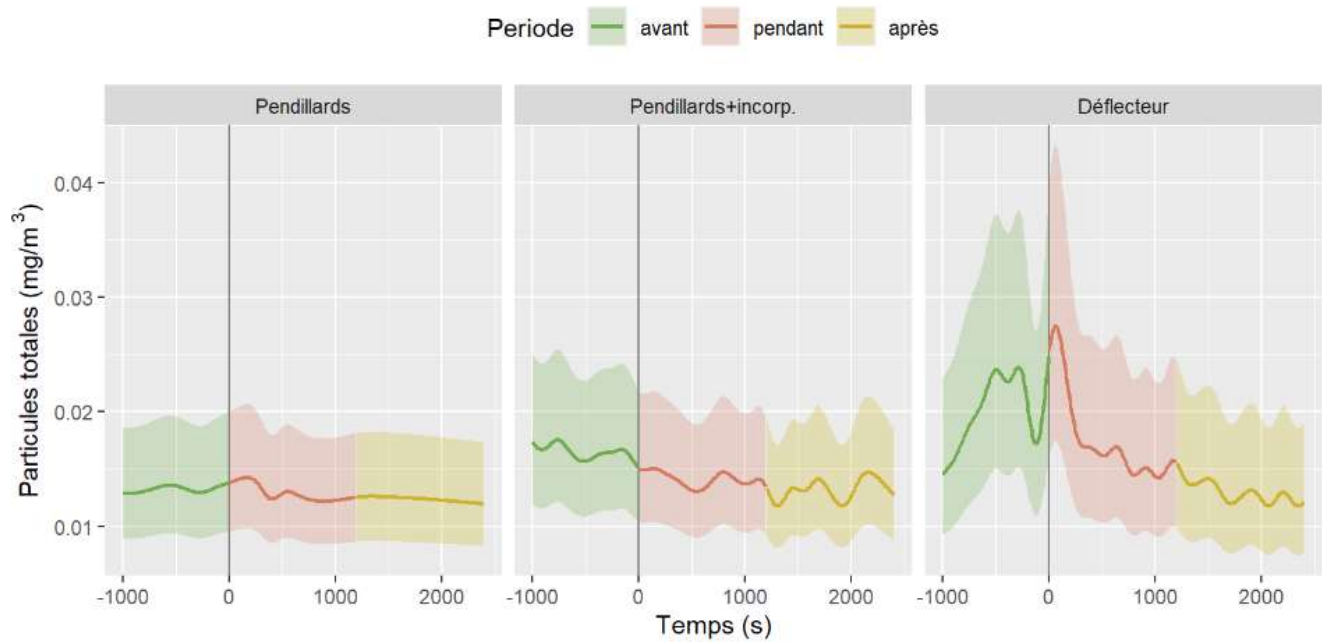


Figure 14 Comportement des particules totales (mg/m³) pour chacune des techniques utilisées sur le terrain au cours des périodes d'épandage.

3.2.5 Bioaérosols : Bactéries totales et indicateurs fécaux

La Figure 15 montre la concentration en bactéries totales et en indicateurs fécaux du lisier (ADN de porc, un Phage d'*Aerococcus viridans*, *Enterococcus*, *E. coli*, Archées,) des échantillons prélevés au cours de chaque jour d'épandage, exprimée en nombre de copies du gène par ml de lisier. Les échantillons de lisier des tests avec pendillards et pendillards avec incorporation présentent des valeurs similaires en nombre de bactéries totales et d'indicateurs fécaux. Cependant, dans les tests réalisés avec le déflecteur, il y a une variabilité entre les répétitions pour les indicateurs : phage d'*Aerococcus*, *Enterococcus* et *E.coli*. Il est également évident que les bactéries totales, ADN de porc et *Enterococcus* présentent des valeurs plus élevées par rapport aux échantillons des deux autres techniques. Le lisier utilisé provient de la préfosse de la même exploitation de production de porcs d'engraissement. Cette préfosse est vidée tous les 7 jours. Cependant, il n'a pas été possible d'établir la source de ces différences, mais elles pourraient être dues à la phase d'engraissement du lot de porcs, étant donné que l'alimentation standard est divisée en phases en fonction du poids de l'animal.

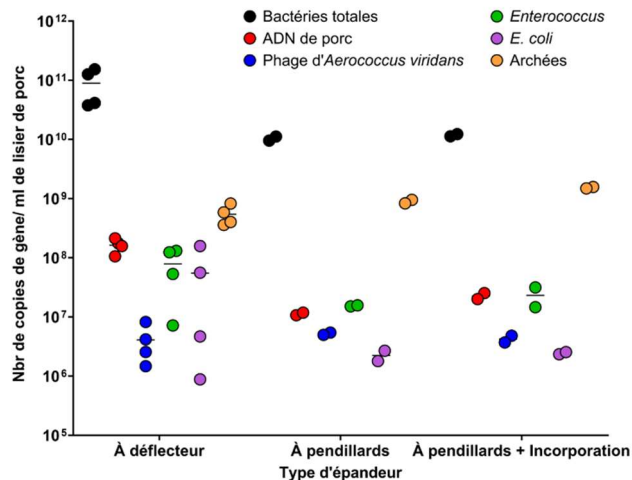


Figure 15 Concentrations de bactéries totales et d'indicateurs fécaux dans le lisier (copies de gènes par ml de lisier de porc)

Les Figures 16 à 18 illustrent la concentration de bactéries totales et d'indicateurs fécaux pour les trois techniques d'application, à trois points d'échantillonnage différents (sur le point mobile suivant le tracteur, à 18 mètres et à 36 mètres en aval de la zone d'épandage). De même, les résultats obtenus dans les périodes « pendant » et « après » l'épandage sont illustrés. La concentration obtenue dans la période « avant » l'épandage a été soustraite de ces valeurs afin de montrer l'impact réel de l'épandage sur ces variables.

Au point de prélèvement à 18 mètres en aval de la zone d'épandage, le déflecteur montre des concentrations de bactéries et d'indicateurs fécaux plus élevées par rapport aux pendillards. De même, le déflecteur montre des concentrations plus élevées de ces variables par rapport aux pendillards avec incorporation. En comparant les techniques pendillards et pendillards avec incorporation, une concentration plus faible de bactéries totales et d'archées est évidente dans les épandages avec pendillard, les autres indicateurs fécaux montrent des concentrations similaires pour les deux techniques.

Au point de prélèvement situé à 36 mètres en aval de la zone d'épandage, des concentrations plus élevées de bactéries totales et d'indicateurs fécaux sont évidentes lors de l'épandage avec déflecteur par rapport aux deux autres techniques. Une concentration plus élevée d'un Phage d'*Aerococcus viridans* et archées est notable après épandage avec pendillards et incorporation par rapport aux pendillards sans incorporation. Les bactéries totales et autres indicateurs fécaux présentent des valeurs similaires pour ces deux techniques.

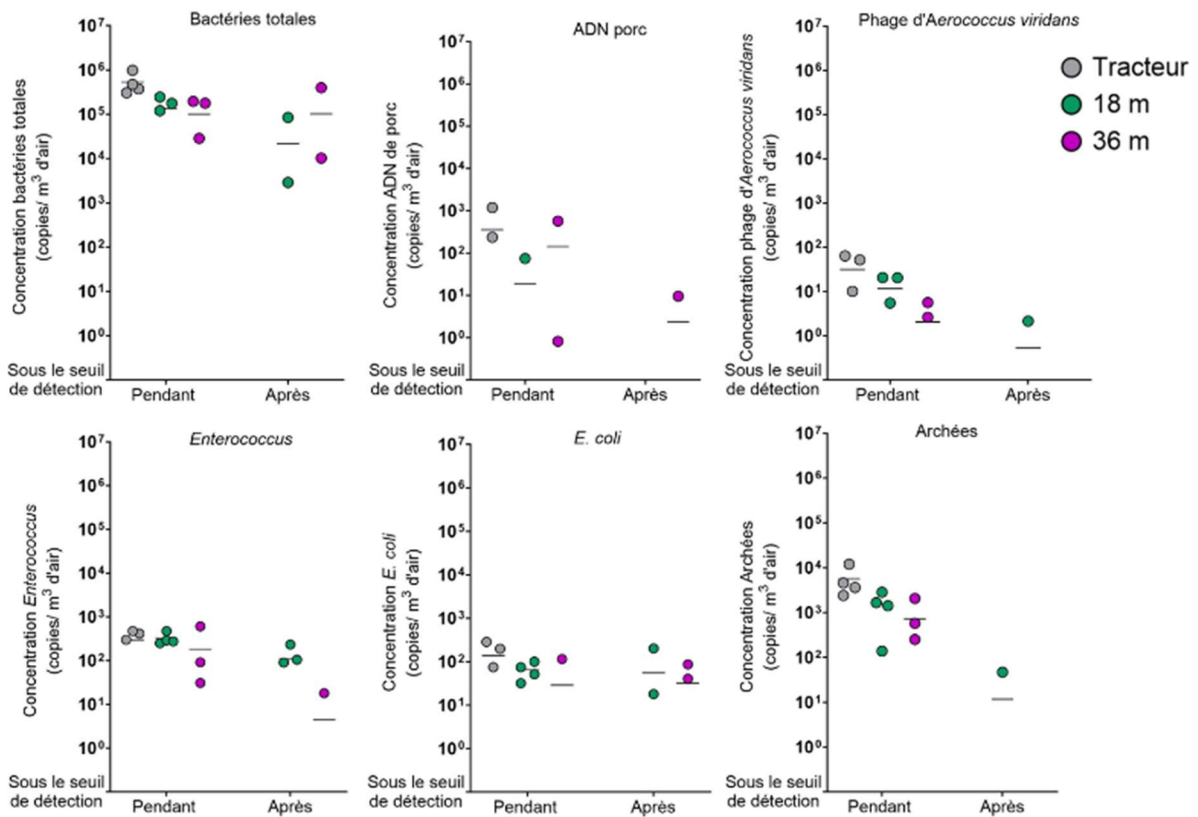


Figure 16 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m³ d'air) lors de l'épandage au champ avec l'épandeur à déflecteur

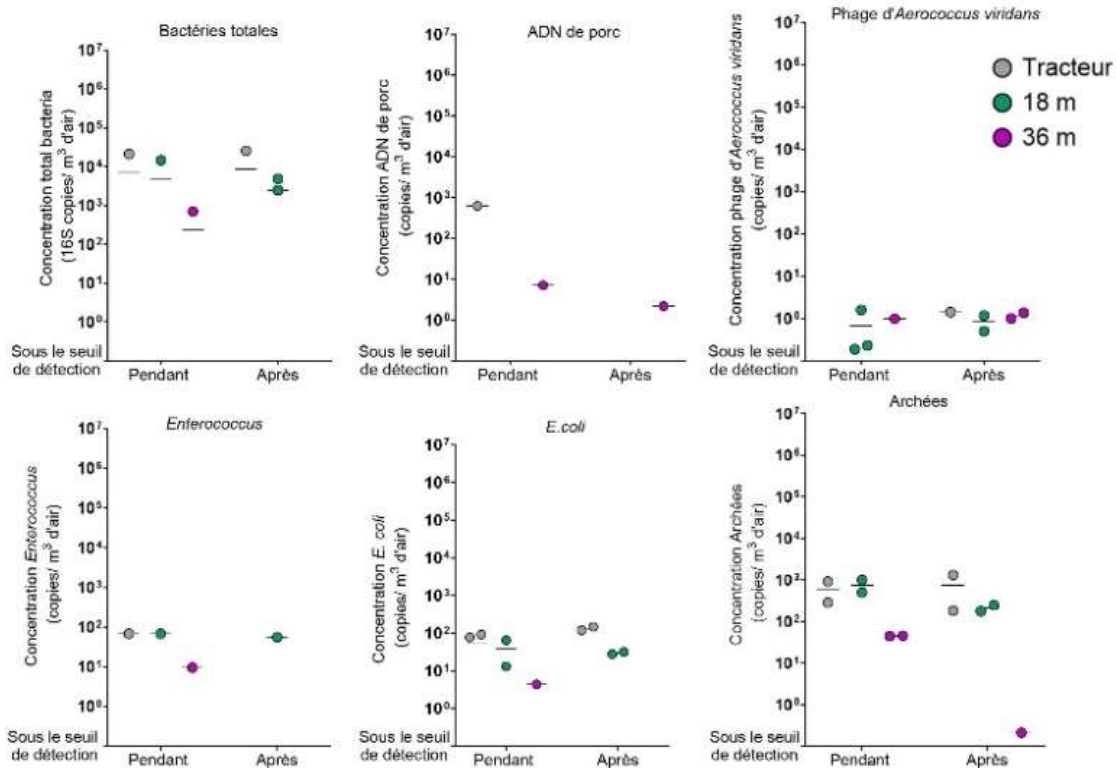


Figure 17 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m³ d'air) lors de l'épandage au champ avec la rampe à pendillards

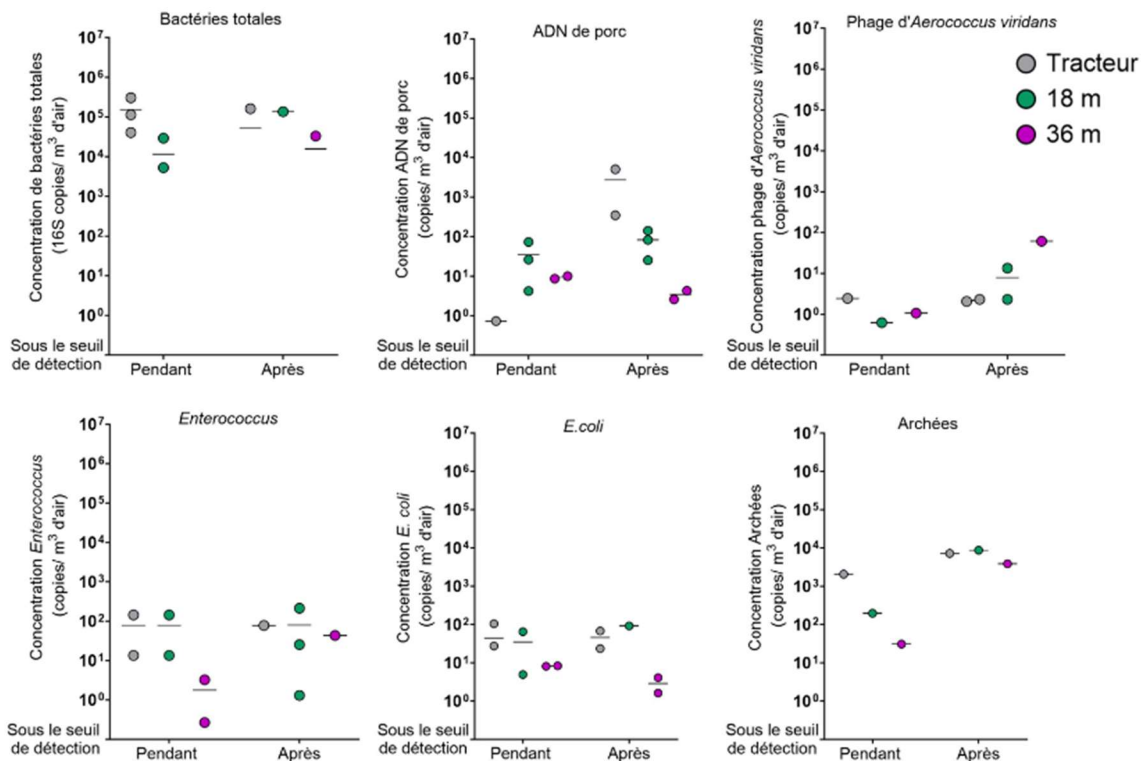


Figure 18 Concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux (copies de gènes ARNr/ m³ d'air) lors de l'épandage au champ avec la rampe à pendillards suivi de l'incorporation

Les concentrations de bactéries totales sont significativement plus élevées pour les tests avec l'épandeur défecteur par rapport aux pendillards (Figure 19). Toutefois, cette différence ne peut pas être entièrement attribuée à l'effet de la technique. Le lisier utilisé lors des tests avec l'aspersion basse (défecteur) a montré une charge supplémentaire de 7,92 x

10^1 copies de gènes de bactéries 16S par ml de lisier par rapport au lisier utilisé dans les deux autres techniques (Figure 15). L'analyse aussi montre que la concentration de bactéries totales lors de l'épandage avec pendillards suivi d'une incorporation est significativement plus élevée par rapport à l'épandage avec pendillard.

L'analyse statistique suggère que les différences pour les indicateurs fécaux (*E. coli*, *Enterococcus* et archées) ne sont pas significatives en raison des grands intervalles de confiance. Dans le cas de l'ADN de porc et du Phage d'*Aerococcus viridans*, la plupart des données sont inférieures aux limites de détection et ne sont donc pas fiables.

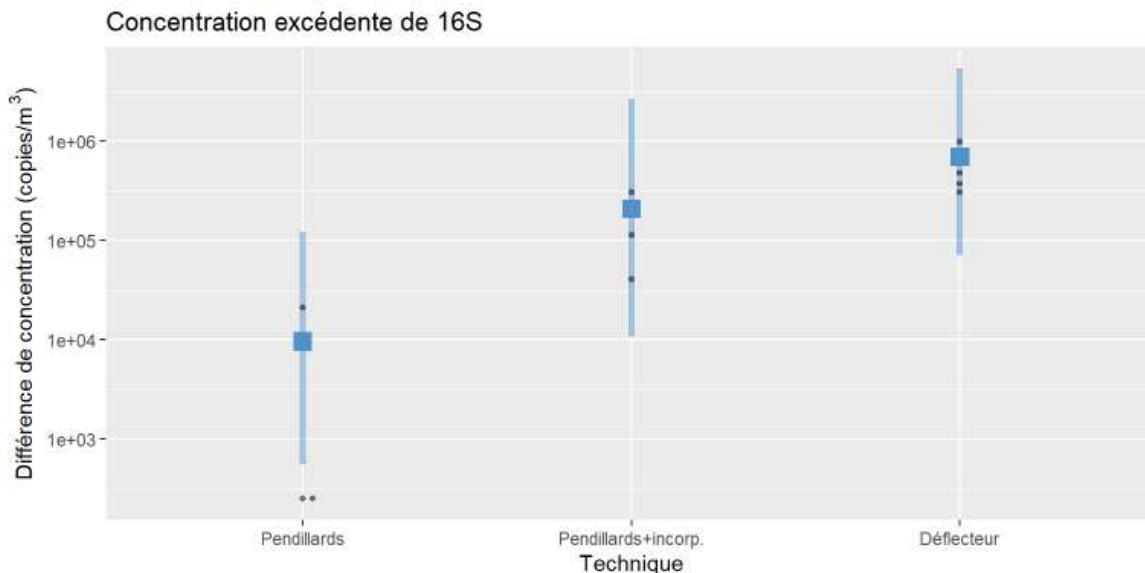


Figure 19 Concentration de bactéries totales (16s copies/m³ d'air) pour les trois techniques d'épandages au champ. La section bleue représente l'intervalle de confiance (95%).

3.2.6 Bioaérosols : Gènes de résistance aux antibiotiques

Seuls les résultats pour l'épandage par aérospersion basse ont été obtenus et sont présentés à la Figure 20. Tout comme lors des essais en tunnel de vent, ce sont principalement les gènes de Tétracyclines et d'Erythromycines qui sont émis de façon significative. Il est intéressant de constater qu'il y a déjà des ARG dans l'air avant l'épandage de lisier.

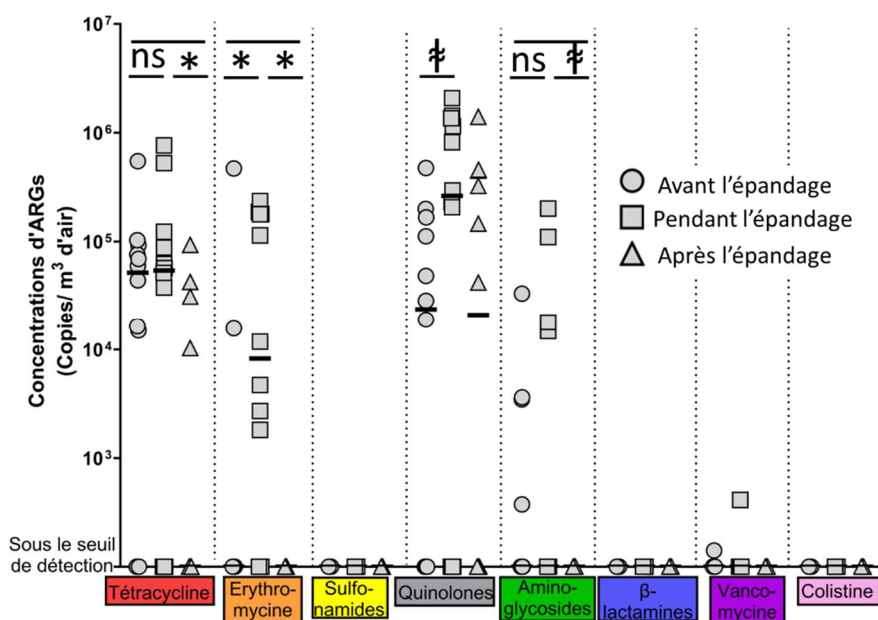


Figure 20 Concentration de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'air à 18 m de la zone d'épandage mesurée par trois échantillonneurs SAAS 3100. * : différence significative à $P < 0,05$

3.3 ANALYSE ÉCONOMIQUE

3.3.1 Scénarios

L'analyse économique se penche sur les coûts supplémentaires liés à l'incorporation ou à l'absence d'incorporation du lisier dans la production de maïs-grain sur des sols saturés en phosphore. Les deux composantes incluses dans cette analyse sont le coût de l'engrais et le coût à forfait de la machinerie utilisée pour incorporer le lisier. Le scénario 1 incorpore en différé le lisier à l'aide d'un vibroculteur ou d'un cultivateur. L'incorporation rapide du lisier permet de réduire les pertes en azote, ce qui permet de réduire la dose d'azote nécessaire à la fertilisation. Le scénario 2 ne considère aucune incorporation. Pour ces deux scénarios, l'IRDA a défini la fertilisation des deux scénarios à 24,5 t/ha de lisier de porc. Le scénario 1 avec incorporation présente l'avantage de nécessiter une quantité moindre d'engrais azotée, soit 92 kg N/ha avec de l'engrais de synthèse 27-0-0, comparé à 110 kg N/ha du même engrais de synthèse. Cette réduction de la quantité nécessaire d'engrais azoté contribue à une gestion plus efficace des ressources. De plus, l'équipement requis pour l'incorporation (cultivateur, vibroculteur, herse, etc.) est souvent déjà disponible dans d'autres opérations culturales, réduisant ainsi les coûts supplémentaires.

3.3.2 Analyse des coût supplémentaires

Le Tableau 7 révèle les coûts supplémentaires des deux scénarios. Le scénario 1 englobe le coût du cultivateur pour l'incorporation du lisier et celui de l'engrais. Comme précisé précédemment, le coût de l'engrais est inférieur à celui du scénario 2, en raison de la moindre quantité nécessaire due à l'incorporation du lisier. Cette pratique favorise une meilleure assimilation des nutriments par le sol, contribuant à une utilisation plus efficace des éléments nutritifs par les cultures. Le scénario 2 considère uniquement le coût de l'engrais, qui est plus élevé de 25\$/ha par rapport au scénario 1. Le salaire horaire de la main d'œuvre dans le contexte de l'analyse est de 21,68\$/h. Pour le cultivateur et le passage pour mettre l'engrais, 15 minutes ont été considérées pour chacune des actions (Molenhuis, 2020). Les coûts totaux démontrent qu'il n'y a pas de coûts supplémentaires liés à l'incorporation en plus des avantages, notamment la réduction de la quantité nécessaire d'engrais.

Tableau 7 : Comparaison des coûts supplémentaires liés à l'incorporation du lisier

	Scénario 1 Incorporation	Scénario 2 Sans incorporation
Coût cultivateur (\$/ha)	19	0
Engrais azoté 27-0-0 (kg/ha)	92	110
Coût engrais (\$/ha)	127	152
Coût de la main d'oeuvre (\$/h)	10,84	5,42
Coûts totaux (\$/ha)	156	157

Il est à noter que l'incorporation du lisier peut aussi se faire directement lors de l'épandage avec un outil intégré à l'épandeur. Cela permet d'éviter un passage subséquent, mais consomme plus de carburant lors du passage initial. Le gain en réduction de fertilisant est conservé. Cette option n'a toutefois pas été évaluée.

4 DISCUSSION

4.1 ÉMISSIONS EN TUNNEL DE VENT VS CONCENTRATION AU CHAMP ET LIENS AVEC LES CARACTÉRISTIQUES DU LISIER

4.1.1 Gaz

Comme mentionné dans la section 2.1.4.1, il est possible de calculer les taux d'émission (g/min) de chacun des gaz en multipliant le débit d'air dans le tunnel (478,6 m³/min) par la différence entre la concentration de gaz à partir du début de l'épandage et la concentration moyenne 15 minutes avant l'épandage (g/m³). La Figure 21 montre les taux d'émission nette de CH₄, CO₂ et NH₃ pour les essais réalisés dans le tunnel avec les techniques d'aspersion basse (déflecteur) et du pendillard.

Dans le cas des essais au champ, l'analyse du comportement des gaz est effectuée sur la base des valeurs de concentration (ppm) des gaz et non sur la base de l'émission, car il n'est pas possible de mesurer le débit d'air pendant l'épandage sur terrain. Une différence de concentration est établie à partir de la concentration moyenne 20 minutes avant l'épandage et des concentrations obtenues après le début de l'épandage. La différence des concentrations de CH₄, CO₂ et NH₃ pour les trois techniques testées est présentée à la Figure 21 figure 22. La valeur de la concentration minimale détectable de l'équipement pour chaque gaz est également indiquée. Il convient de noter que le comportement des émissions nettes (g/min) dans le tunnel de vent est comparable au comportement de la concentration au champ, car l'émission nette dans le tunnel de vent est obtenue en multipliant la concentration par le débit de ventilation qui est toujours le même.

Dans les deux séries d'essais (tunnel et au champ), les concentrations de méthane (CH₄) ont augmenté au cours des 5 premières minutes suivant l'application du lisier avec l'épandeur à déflecteur, et ensuite elles sont revenues à leurs valeurs initiales. Au cours des premières minutes de l'épandage avec pendillards au champ, une légère augmentation des concentrations de CH₄ a été observée, similairement aux essais dans la serre, mais la plupart des valeurs sont inférieures à la limite de détection, ce qui ne permet pas de conclure qu'il existe une différence significative.

Autant au champ qu'en tunnel de vent, pour les deux techniques d'épandage (déflecteur et pendillards), la concentration d'ammoniac a eu tendance à augmenter rapidement, environ 5 minutes après le début de l'épandage, et a continué à augmenter progressivement pendant les 30 premières minutes. Dans le tunnel, les émissions de NH₃ étaient significativement plus élevées pour les épandages avec les pendillards que pour celles avec le déflecteur. Cette différence, mentionnée dans la section 3.1.2, peut avoir été influencée par les températures plus élevées lors des essais avec l'épandeur à pendillard, étant donné qu'à des températures plus élevées, la volatilisation de l'ammoniac dans l'air à partir du lisier peut être accrue (Sommer, S. G et al. 2001). En outre, cette différence peut être aussi due au biais dans le nombre de répétitions utilisés pour l'analyse de l'ammoniac, seules les valeurs de trois répétitions avec l'épandeur pendillard ont été disponibles par rapport aux six répétitions utilisées pour le déflecteur.

Sur le terrain, les concentrations de NH₃ ont eu tendance à être 2,4 fois plus élevées lors de l'épandage avec aspersion basse (déflecteur) que lors de l'épandage à pendillard, ce qui est l'inverse des résultats obtenus dans le tunnel, même si la température était en moyenne 9 °C plus élevée lors des essais de l'épandeur à pendillard sur le terrain. Toutefois, les variables au champ telles que la vitesse et la direction du vent et une plus grande dilution dans l'air ont un impact sur le comportement des concentrations. Seule une analyse qualitative a été réalisée, l'analyse statistique n'étant pas possible en raison d'un manque de données fiables au-dessus de la limite de détection de l'appareil. Enfin, autant dans le tunnel de vent qu'au champ, la libération progressive d'ammoniac illustre bien le phénomène de volatilisation de l'azote après l'épandage du lisier sans incorporation. Les résultats ont démontré que l'incorporation limite l'émanation de NH₃, les concentrations enregistrées pendant et après l'épandage étant inférieures à la limite de détection.

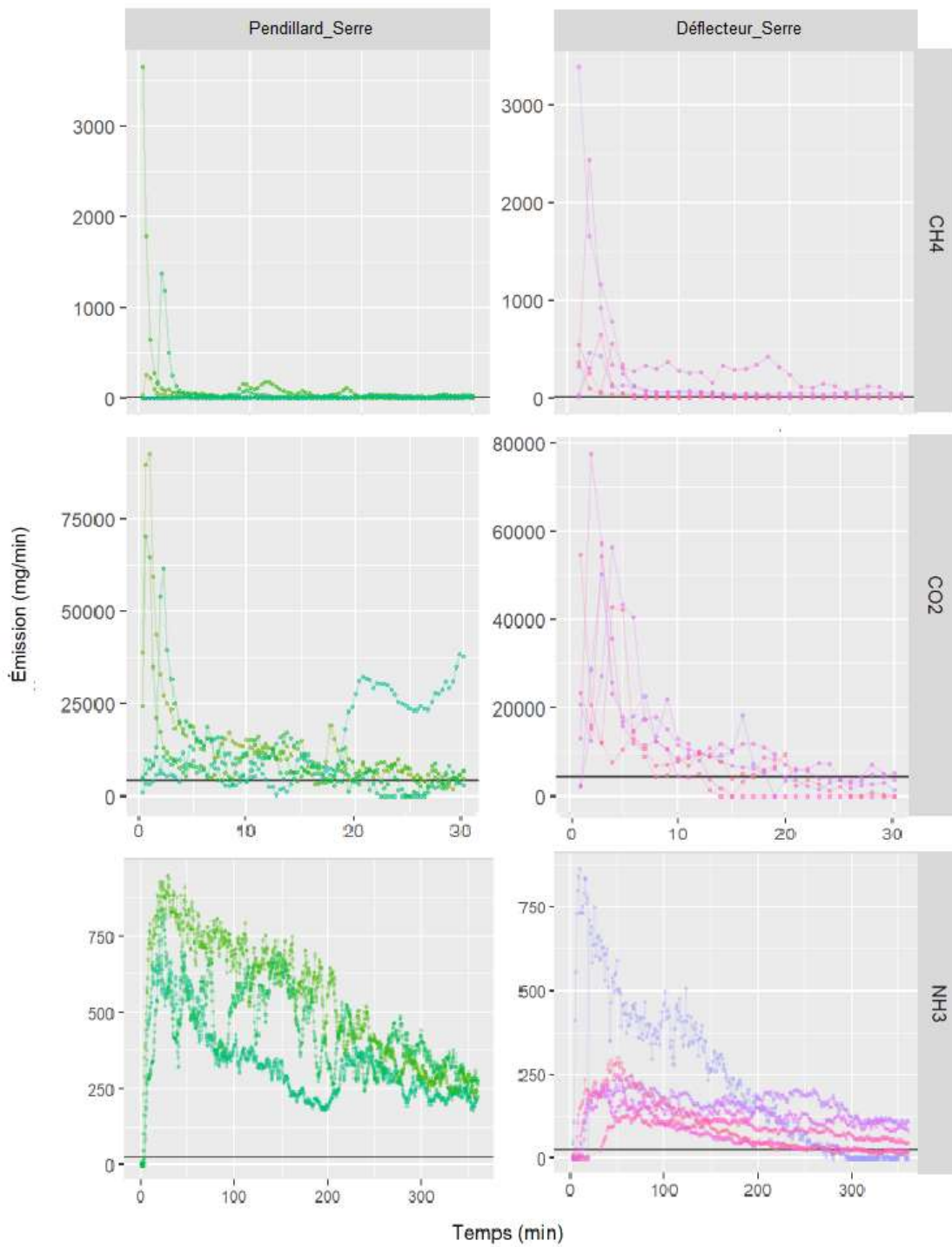


Figure 21 Taux d'émissions nettes de CH₄, CO₂ et NH₃ pour les deux techniques testées au laboratoire Sol-Air.

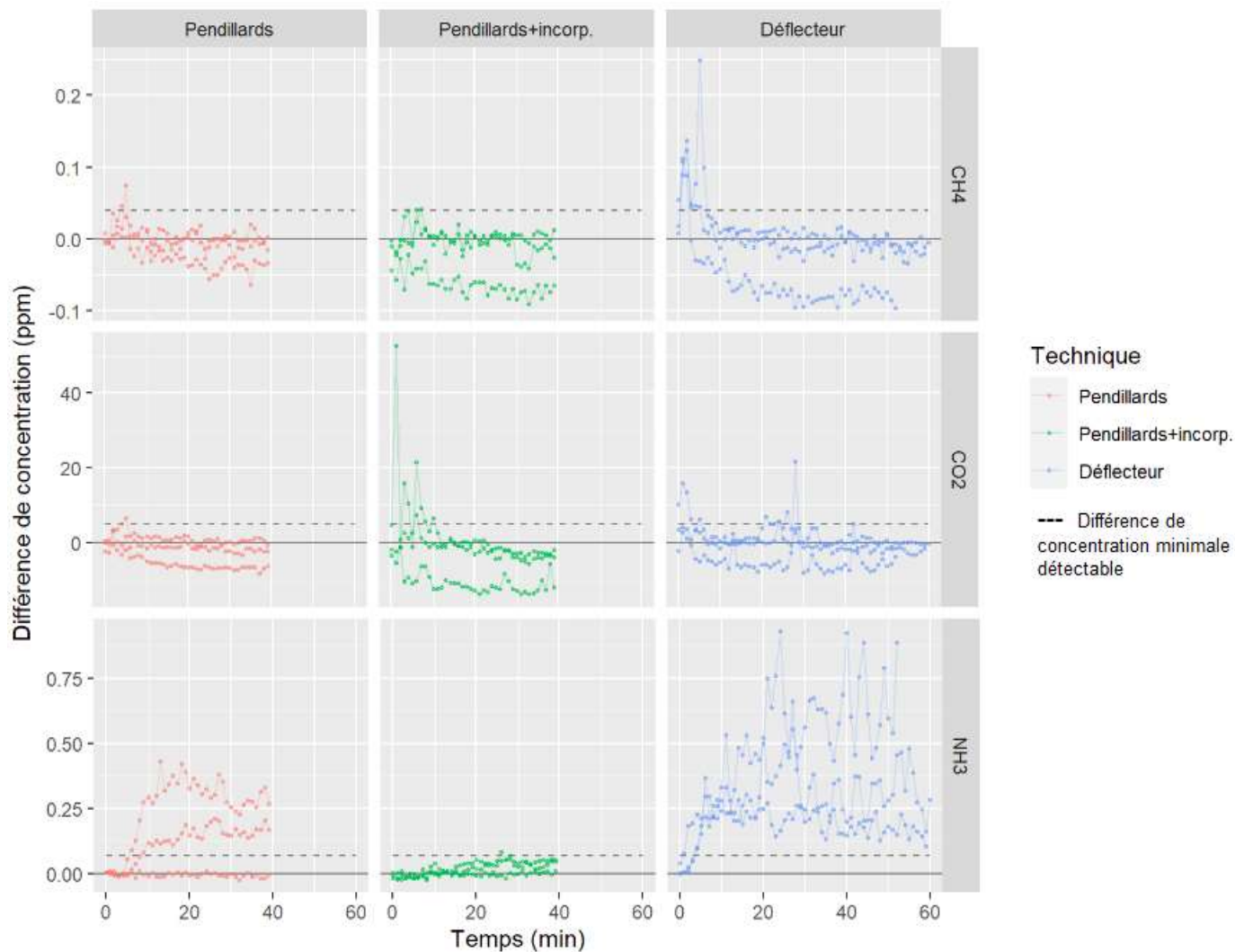


Figure 22 Différences de concentration (ppm) de CH₄, CO₂ et NH₃ pour les techniques testées au champ.

4.1.2 Odeurs

Les intensités d'odeur pour les deux scénarios (tunnel et champ) sont illustrées dans la Figure 23. Pour les deux scénarios et toutes les techniques d'application testées, l'intensité de l'odeur est significativement plus élevée pendant l'épandage que 20 minutes avant et après l'application. Dans les deux scénarios, la technique du déflecteur présente une intensité d'odeur plus élevée que l'épandage en pendillard. Les techniques testées dans le tunnel de vent présentent une intensité d'odeur deux fois plus élevée que les mêmes techniques testées sur le terrain. Cette différence s'explique en grande partie par les variations de vitesse et de direction du vent qui peuvent se produire à l'air libre, ainsi que par l'influence d'une plus grande dilution des odeurs ayant un impact sur l'intensité de l'odeur. Malgré cette différence, le tunnel de vent permet d'évaluer de manière significative l'impact de l'intensité de l'odeur avec différentes techniques d'application du lisier.

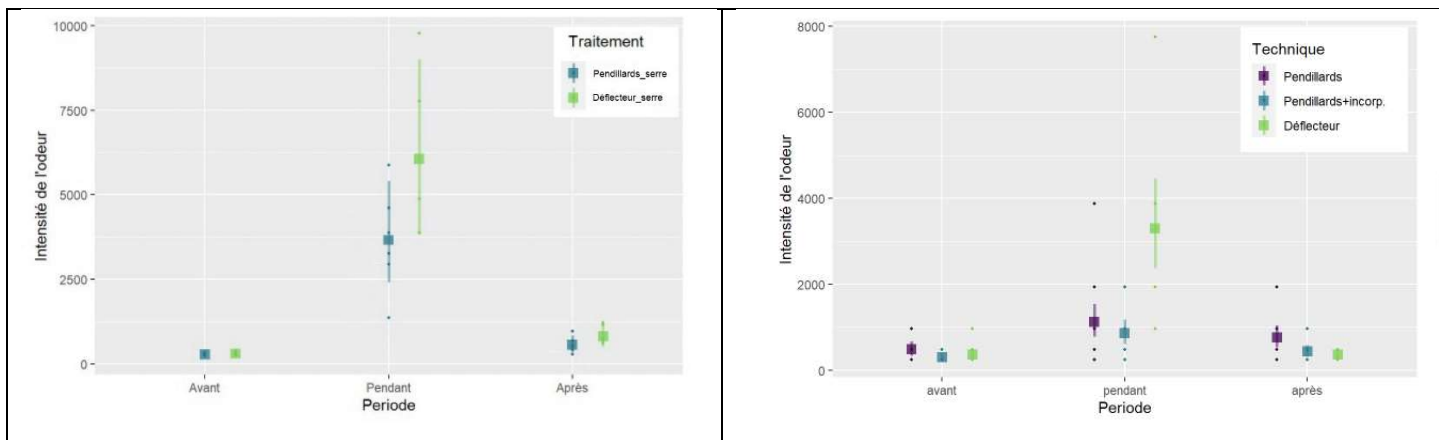


Figure 23 Intensité d'odeur en concentration de *n*-butanol (ppm) avec les intervalles de confiance (95%). Essais réalisés dans le tunnel de vent (gauche), essais réalisés aux champs (droite).

4.1.3 Bioaérosols : Bactéries totales et indicateurs fécaux

Les figures ci-dessous montrent la concentration de bactéries et d'indicateurs fécaux pour les deux séries d'essais (tunnel de vent et champ) et toutes les techniques d'épandage utilisées. Les valeurs de bactéries et d'indicateurs fécaux obtenues lors des essais au champ au point d'échantillonnage mobile (tracteur) serviront de référence pour la comparaison avec les données obtenues dans le tunnel de vent.

L'épandage du lisier avec pendillards dans le tunnel montre une concentration plus élevée de bactéries totales que l'épandage avec déflecteur (Figure 24). Cependant, sur le terrain, cette dynamique est inversée et l'application du lisier avec pendillards montre une concentration plus faible de bactéries par rapport au déflecteur et également par rapport au pendillard suivi de l'incorporation. Cette différence dans le tunnel pourrait être due à la façon dont la rampe à pendillards dispose le lisier sur le sol (Figure 26, gauche). La rampe, conçue pour fonctionner à l'intérieur de la serre, comporte six tuyaux (diamètre de chaque tuyau = 2") perpendiculaires au sol. Cette disposition des tuyaux représente un plus grand impact du lisier sur le sol et par conséquent une plus grande dispersion des particules de sol, par rapport à la rampe pendillards commerciale utilisée au champ. Les tuyaux de la rampe à pendillards commerciale (diamètre du tuyau = 3"), représentée à la Figure 26 (droite), forment un angle d'environ 30 degrés par rapport au sol, ce qui permet un impact et une dispersion moindre des particules de sol et de lisier au moment de l'application.

L'augmentation de la concentration en bactéries totales, qui est significativement plus élevée avec l'incorporation que sans incorporation, pourrait être causée par une présence plus importante de bioaérosols et de particules de sol dans l'air, due à la manipulation du sol lors du travail de la déchaumeuse. Même si les résultats de particules totales ne permettent pas de conclure qu'il existe une différence significative entre ces deux pratiques, la quantité de particules totales dans l'air pour l'épandage avec pendillards suivi de l'incorporation tend à être légèrement plus élevée, en raison de la possible présence de particules de sol dans l'air. Celles-ci constituent une source dominante de bactéries pendant les journées chaudes (Bowers RM et al., 2011) et influencent ce paramètre.

En plus des tendances inverses observées entre les essais réalisés dans le tunnel de vent et au champ, il faut noter que les concentrations au champ sont beaucoup plus faibles en raison d'un volume de dilution d'air plus grand.

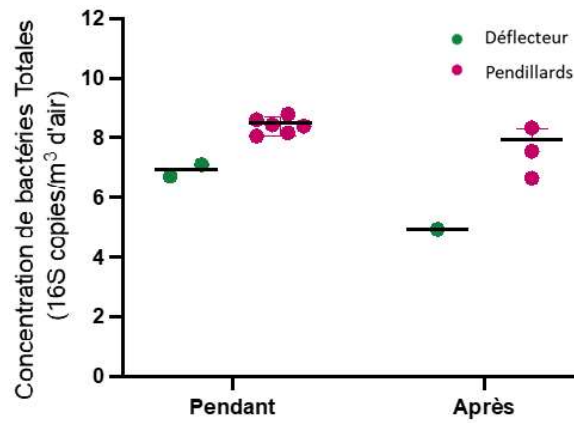


Figure 24 Concentration de bactéries totales (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m³ d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.

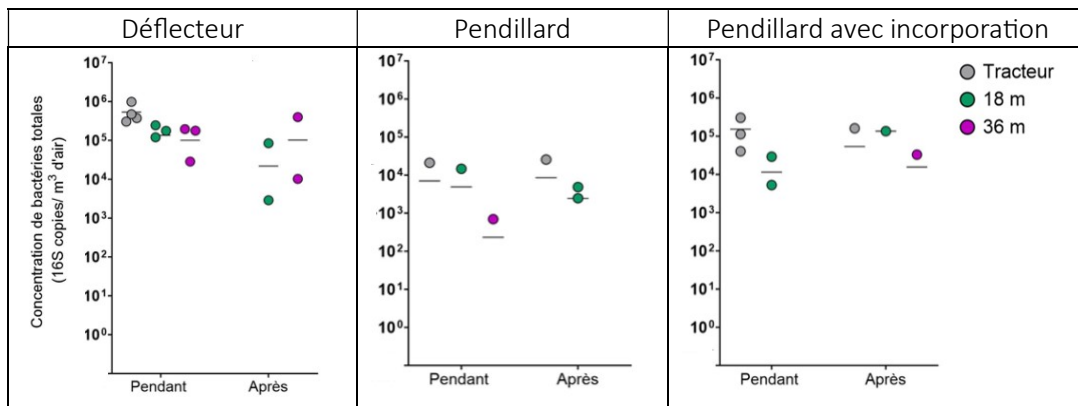


Figure 25 Concentration de bactéries totales (copies de gènes ARNr 16S par m³ d'air) obtenue aux 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pour les essais réalisés au champ.



Figure 26 Rampe de pendillard conçue pour l'utilisation dans la serre (gauche) et rampe pendillard commercial (16 tuyaux).

Les concentrations d'*Enterococcus* n'ont pas montré de différences significatives entre les deux méthodes d'épandage dans le tunnel de vent (Figure 27). Sur le terrain, l'épandage avec déflecteur a présenté des concentrations légèrement plus élevées par rapport aux deux autres techniques Figure 29 30 Concentration d'*Enterococcus* (copies de gènes ARNr 16S par m³ d'air) obtenue au 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pendant et après d'épandage. Essais réalisés au champ. Figure 28), cependant le lisier utilisé lors de ces essais a montré une charge d'*Enterococcus* plus élevée comparativement au lisier épandu avec autres deux techniques (section 3.2.5). Dans les deux séries d'essais (tunnel et

champ), les valeurs de concentration de cet indicateur fécal tendent à diminuer dans la période « après » l'épandage avec aérosperion basse.

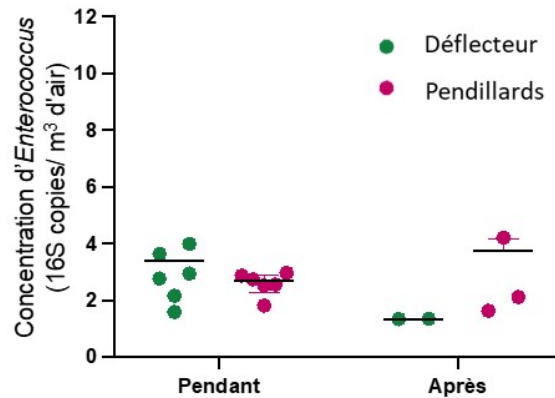


Figure 27 28 Concentration d'Enterococcus (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m³ d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.

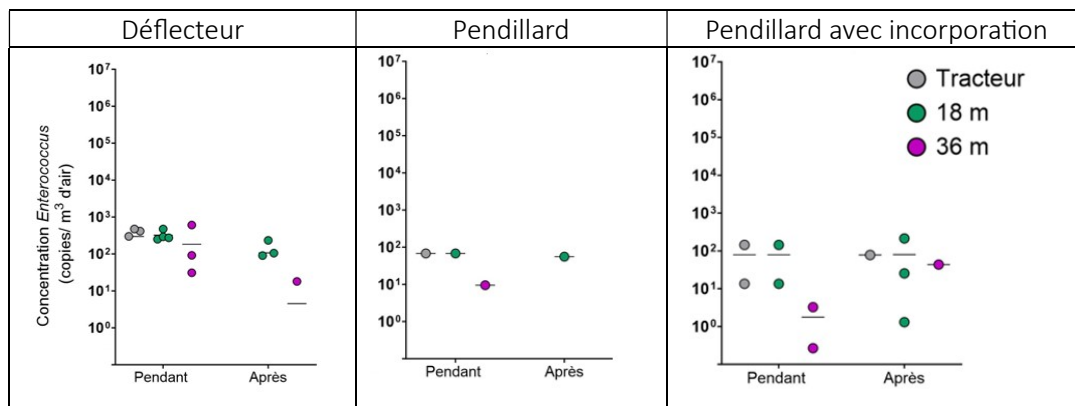


Figure 29 30 Concentration d'Enterococcus (copies de gènes ARNr 16S par m³ d'air) obtenue au 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pendant et après d'épandage. Essais réalisés au champ.

Les concentrations d'E. coli se sont maintenues entre $2,76 \times 10^1$ et $2,85 \times 10^2$ pendant et après l'épandage pour toutes les techniques d'application du lisier et dans les deux scénarios (tunnel et au champ) (Figure 31, Figure 32). Dans le tunnel de vent, aucune différence significative n'a été observée entre les deux méthodes d'épandage. Les concentrations d'E.colis obtenues lors des essais au champ avec l'épandeur à déflecteur ont montré des valeurs qui ont tendance à être plus élevées que celles obtenues avec les deux autres techniques. Cependant, comme dans le cas des bactéries totales, la concentration d'E.coli était plus élevée dans le lisier épandu avec l'épandeur déflecteur.

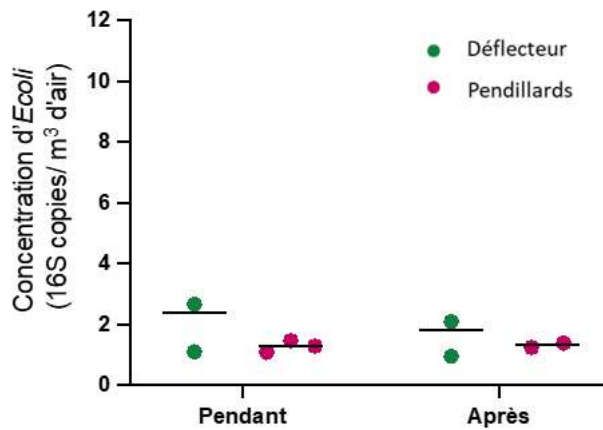


Figure 31 Concentration d'E. coli (log10 de la valeur de concentration, en copies de gènes ARNr 16S par m3 d'air) lors des épandages dans le tunnel de vent.

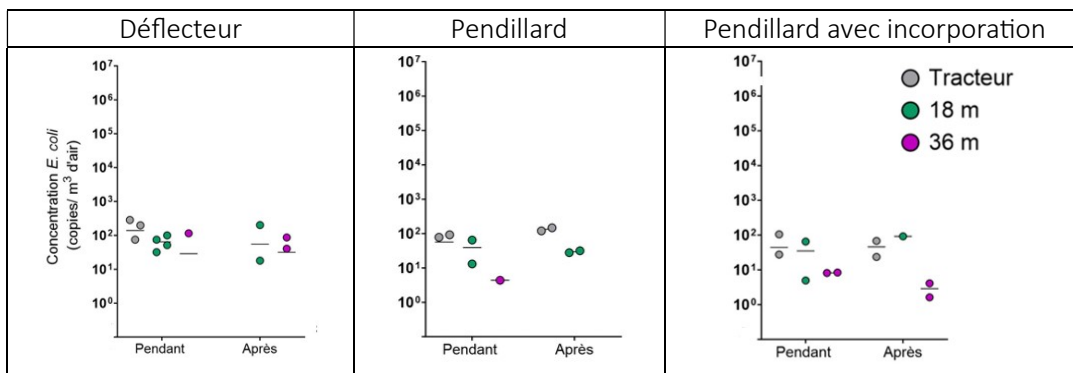


Figure 32 Concentration d'E. coli (copies de gènes ARNr 16S par m3 d'air) obtenue au 3 points d'échantillonnage (tracteur, 18m et 36m) pendant et après d'épandage. Essais réalisés au champ.

4.2 LIENS AVEC LES CONCENTRATIONS DE BIO-CONTAMINANTS À LA PORCHERIE

À l'occasion d'un autre projet en cours réalisé par le CRIUCPQ-UL, des échantillons de bioaérosols ont été prélevés à la sortie de ventilateurs de deux porcheries à cinq moments. La concentration moyenne de bactéries totales pour les deux bâtiments était de $5,28 \times 10^5$ et $7,30 \times 10^5$ copies/m³ d'air.

Ces concentrations sont similaires aux concentrations moyennes des bactéries au point d'échantillonnage mobile (près de l'épandeur) lors de l'épandage au champ avec l'épandeur à déflecteur (aspersion basse), soit $5,33 \times 10^5$. Les concentrations en bactéries totales mesurées au point mobile lors de l'épandage avec pendillards sans incorporation ($7,04 \times 10^3$) et avec incorporation ($1,52 \times 10^5$) sont cependant inférieures. Les concentrations mesurées à 18 m en aval de la zone d'épandage sont de beaucoup inférieures, soit $1,35 \times 10^5$, $4,90 \times 10^3$ et $1,15 \times 10^4$ pour le déflecteur, les pendillards (sans incorporation) et les pendillards (avec incorporation), respectivement. Enfin, les concentrations mesurées à 18 m sont tout près de la concentration avant l'épandage, soit le bruit de fond.

Ces résultats démontrent que la contamination de l'air près d'un épandeur à aéroaspersion basse peut être similaire à ce qu'on retrouve à la sortie des ventilateurs d'un bâtiment porcin. Cependant, les concentrations diminuent rapidement en s'éloignant. Des campagnes d'échantillonnage dans les zones agricoles lors d'épandage à plus grandes échelles permettraient de quantifier avec plus de précision les niveaux d'exposition et les risques sur la santé et la biosécurité des élevages.

5 CONCLUSION

Ce projet a permis d'approfondir les connaissances scientifiques quant aux émissions fugitives de contaminants (bactéries totales, indicateurs fécaux, gènes de résistance aux antibiotiques, particules, gaz et odeurs) lors de l'épandage du lisier de porc avec les méthodes les plus fréquemment utilisées au Québec, soit l'aéroaspersion basse (déflecteur) et la rampe à pendillards. Les émissions de contaminants ont d'abord été quantifiées au laboratoire Sol-Air de l'IRDA, soit un tunnel de vent à grande échelle à environnement contrôlé. Ensuite, une campagne d'échantillonnage au champ a été réalisée lors d'essais d'épandage sur des parcelles de 780 m² avec les deux mêmes techniques, en plus de l'incorporation immédiate après l'épandage avec pendillards. Ces essais visaient à étudier les niveaux d'exposition des contaminants en conditions réelles au champ, à émettre des recommandations quant aux équipements à privilégier et à valider les résultats obtenus en environnement contrôlé.

Les émissions d'ammoniac mesurées dans le tunnel de vent étaient significativement plus élevées pour les essais avec l'épandeur à pendillards comparativement au déflecteur. Cependant, cette différence peut être attribuée à une volatilisation accrue de l'ammoniac dans l'air en raison d'une température de l'air plus élevée enregistrée lors des essais avec la rampe à pendillards. Ces essais au laboratoire Sol-Air ont aussi mis en évidence le phénomène de volatilisation de l'azote dans le sol pendant les heures suivant les activités d'épandage.

Les émissions de bactéries totales et de gènes de résistance aux antibiotiques (ARG) dans le tunnel de vent étaient significativement plus élevées lors de l'épandage avec les pendillards comparativement à l'épandage avec déflecteur ($3,99 \times 10^9$ VS $2,24 \times 10^7$ copies de gène de bactéries totales/kg de lisier; $3,33 \times 10^7$ VS $1,23 \times 10^6$ copies de gène d'ARG/kg de lisier). Ces résultats vont à l'encontre de l'hypothèse initiale et peuvent être attribués à la façon dont la rampe de pendillards a été conçue, les tuyaux disposant le lisier étant en contact avec le sol. Vingt-huit gènes de résistance appartenant à huit familles d'antibiotiques, dont les tétracyclines et les érythromycines, ont été détectés dans le lisier et dans les bioaérosols

Autant au champ qu'en tunnel de vent, il a été possible de constater que l'intensité de l'odeur était significativement plus élevée avec l'aéroaspersion basse qu'avec une rampe à pendillards avec incorporation. De plus, autant en tunnel de vent qu'au champ et pour toutes les techniques d'épandage testées, la concentration de particules totales dans l'air lors de l'épandage était bien en dessous de la valeur d'exposition moyenne maximale recommandée de 10 mg/m³ pour les travailleurs.

L'aéroaspersion basse augmente significativement la concentration de bactéries totales dans l'air comparativement à l'épandage avec la rampe à pendillards. La concentration en bactéries totales près de la zone d'épandage était d'ailleurs dans le même ordre de grandeur qu'à la sortie de ventilateurs d'une porcherie. L'incorporation cause également une augmentation plus importante de la concentration de bactéries dans l'air comparativement à l'épandage avec pendillards sans incorporation. Le mélange du sol et du fumier peut ainsi contribuer à émettre plus de bioaérosols. Enfin, similairement aux essais réalisés au laboratoire Sol-Air, les données obtenues n'ont pas permis de détecter de différence significative pour les autres biocontaminants.

Les résultats des essais d'épandage au champ et l'analyse économique démontrent que l'incorporation immédiate permet de réduire les odeurs et l'émission d'ammoniac sans générer de coûts supplémentaires. Cependant, les résultats ne permettent pas de conclure que cette pratique réduit les émissions de bio-contaminants et de particules dans l'air.

En général, les résultats du projet ne permettent pas de conclure que l'épandage de lisier de porc génère des risques pour la santé humaine et la biosécurité des élevages. En effet, la concentration des biocontaminants mesurée au champ à 18 et 36 m en aval de la zone d'épandage sont souvent près de limites de détection des appareils. Toutefois, la présence de bactéries, d'indicateurs fécaux (*E. coli*, *Enterococcus*, archées, phage d'*Aerococcus viridans*, ADN de porc) et d'ARG appartenant à huit familles d'antibiotiques ont été détectés. Des campagnes d'échantillonnage au champ lors de chantiers d'épandage à grande échelle sur une plus longue durée permettraient de préciser les niveaux d'exposition et les risques pour la santé de la population et pour la biosécurité des élevages.

6 RÉFÉRENCES

- Baghdadi, M., P. Brassard, S. Godbout, V. Létourneau, N. Turgeon, F. Rossi, É. Lachance, M. Veillette, M-A. Gaucher et C. Duchaine. 2023. Contribution of manure-spreading operations to bioaerosols and antibiotic resistance genes' emissions. *Microorganisms*. 2023, 11:1797.
- Bowers RM, Sullivan AP, Costello EK, Collett JL Jr, Knight R, Fierer N. Sources of bacteria in outdoor air across cities in the midwestern United States. *Appl Environ Microbiol*. 2011 Sep;77(18):6350-6. doi: 10.1128/AEM.05498-11. Epub 2011 Jul 29. PMID: 21803902; PMCID: PMC3187178.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2022). Machinerie- Coûts d'utilisation et taux à forfait suggéré. AGDEX 740/825a.
- De Klein, C.A.M., M.J. Harvey, T.J. Clough, S.O. Petersen, D.R. Chadwick, R.T. Venterea. 2020. Global Research Alliance N2O chamber methodology guidelines: Introduction, with health and safety considerations. *Journal of Environmental Quality*. DOI: 10.1002/jeq2.20131.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.doi:10.1017/9781009157896. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Larios, A.D., S.K. Brar¹, A.A. Ramírez, S Godbout, F. Sandoval-Salas, J.H. Palacios, P. Dubé, B. Delgado and A. Giroir-Fendler (2017) Parameters determining the use of zeolite 5A as collector medium in passive flux samplers to estimate N2O emissions from livestock sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13):12136-12143.
- Molenhuis, J. (2020) Guide des travaux agricoles à forfait et de la location à court terme de matériel. AGDEX 825.
- Palacios, J. H. (2010). Amélioration d'un échantillonneur à flux passif pour la mesure de l'oxyde nitreux (N2O) [Ms, Université Laval]. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/21967>
- Sommer, S. G., and Hutchings, N. J. 2002. Ammonia Volatilization from Field Applied Animal Manure—The DNDC Model. *Atmospheric Environment*, Volume 35, Issue 17, Pages 2973-2979.