

Validation et optimisation des conditions d'opération du procédé de traitement des lisiers Écogespro

Rapport final

Rapport présenté à la :
Coopérative de solidarité Écogespro



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Projet IRDA # : 100024

Par :
Frédéric Pelletier, ing., M.Sc
Stéphane Godbout, ing., P. Eng., Ph.D. et agr.

22 décembre 2010

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).



Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités d'acquisition de connaissances, de recherche, de développement et de transfert visant à favoriser le développement durable de l'agriculture.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Pelletier, F. et S. Godbout. 2010. Validation et optimisation des conditions d'opération du procédé de traitement des lisiers Écogespro. Rapport final. IRDA. 37 pages.

**Validation et optimisation des
conditions d'opération du procédé de
traitement des lisiers Écogespro**

Rapport final

Présenté à :

Éric Léger
Coopérative de solidarité Écogespro
104, rue Saint-Jacques
Saint-Jacques, Québec, J0K 2R0

Préparé par :

Copie originale signée

Copie originale signée

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
IRDA

Stéphane Godbout, ing., P. Eng., Ph.D. et agr.
IRDA

22 décembre 2010

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Frédéric Pelletier
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 528-9477
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : frederic.pelletier@irda.qc.ca

Résumé

Un bilan massique complet a été réalisé sur le procédé de traitement Écogepro implanté sur une ferme porcine de type naisseur-finiisseur de la région de Lanaudière. Le bilan a permis de caractériser les débits de lisier aux différentes étapes du procédé et de mesurer les émissions gazeuses produites par les deux bioréacteurs. Un des objectifs du projet consistait à compléter le tableau du bilan environnemental et agronomique du formulaire du groupe de travail « Transfert technologique » de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ).

Le procédé de traitement Écogepro fonctionne par digestion aérobie et anaérobie à l'intérieur de deux fosses, appelées Bioréacteurs #1 et #2, et d'une fosse d'entreposage. Le procédé fait appel à un écoulement gravitaire entre chacun des bioréacteurs et la fosse d'entreposage. Les deux premiers bioréacteurs sont pleins en permanence alors que la fosse d'entreposage procure un polissage passif et sert à l'épandage annuel du liquide traité. Une pompe permet la recirculation d'une quantité de liquide traité de la fosse d'entreposage vers le premier bioréacteur. Un suppresseur alimente en air les deux bioréacteurs. L'air est acheminé vers un tuyau de drain non perforé à la surface du lisier, y assurant la circulation par pulsion. Cette digestion de surface est complétée par une digestion anaérobie au fond des deux bioréacteurs.

Les mesures de caractérisation du procédé de traitement ont été réparties sur une période de onze mois entre le 16 décembre 2008 et le 27 octobre 2009. Le débit de lisier brut entrant dans le procédé de traitement et le débit de lisier traité entre la fosse d'entreposage vers le premier bioréacteur ont été mesurés en continu durant cette période. Des échantillonnages de lisier ont aussi été réalisés durant cette période.

Deux campagnes complètes d'échantillonnage du lisier et de mesure des émissions de gaz ont été réalisées. La première campagne de mesure s'est tenue entre le 14 et le 27 avril 2009 et la deuxième entre le 21 et le 29 septembre 2009.

Les émissions gazeuses produites par le système de traitement sont très faibles en comparaison des émissions normalement mesurées dans une fosse d'entreposage de lisier brut. La présence de la couche de liquide de recirculation, peu chargé en éléments fertilisants, sur le dessus des fosses aurait pour effet de limiter les émissions de gaz.

L'analyse des résultats d'échantillonnage a permis de constater que le procédé de traitement Écogepro était efficace pour séparer les éléments contenus dans le lisier. Le bioréacteur #1 permet de retenir dans un liquide représentant 26 % de la masse initiale, 72 % de la matière sèche entrant dans le procédé, 34 % de l'azote total, 54 % du phosphore total et 33 % du potassium.

Par rapport aux quantités initiales, le procédé de traitement produit un liquide représentant 29 % de la masse de lisier brut contenant 6 % de la masse de matière sèche, 17 % de la masse d'azote, 12 % de la masse de phosphore et 19 % de la masse de potassium.

En comparant le lisier brut et le liquide contenu dans la fosse d'entreposage, les efficacités de séparation du système de traitement pour la matière sèche, l'azote, le phosphore et le potassium sont respectivement de 94, 83, 88 et 81 %.

L'analyse des résultats démontre que les performances du procédé de traitement Écogepro sont intéressantes sur le plan de la séparation bien qu'elles pourraient être améliorées au niveau de la

digestion. La caractérisation des liquides, entre les deux bioréacteurs et à la sortie de la fosse d'entreposage, a démontré que ces derniers étaient sensiblement identiques. Cette caractérisation indique que le deuxième bioréacteur et la fosse d'entreposage ne contribuent pas ou très peu au traitement du lisier. Les principaux points à améliorer pour optimiser le procédé de traitement sont la décantation, la stratégie d'aération et la gestion de la recirculation.

Table des matières

Résumé.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	viii
1 Introduction.....	1
2 But et objectifs du projet.....	1
2.1 But du projet	1
2.2 Objectifs du projet.....	1
3 Matériels et méthodes	2
3.1 Description de la ferme.....	2
3.2 Description du procédé de traitement	2
3.3 Calendrier d'échantillonnage des lisiers, des mesures d'émissions de gaz et des mesures de débit.....	5
3.4 Caractérisation des conditions ambiantes	7
3.5 Détermination des débits du système de traitement.....	7
3.6 Échantillonnage et analyse des lisiers.....	8
3.7 Mesure du niveau de boue accumulée au fond des fosses.....	9
3.8 Échantillonnage et analyse des émissions de gaz	9
3.9 Estimation théorique de l'évaporation du lisier à la surface des bioréacteurs.....	13
3.10 Bilan massique.....	15
4 Résultats et discussions.....	16
4.1 Conditions atmosphériques.....	16
4.2 Température du lisier dans les bioréacteurs.....	16
4.3 Volumes de précipitation et d'évaporation dans le procédé	16
4.4 Volumes de lisier et de boue mesurés dans les fosses et volumes épandus.....	17
4.5 Débits de lisier dans le système de traitement	18
4.6 Émissions de gaz.....	19
4.7 Résultats des analyses de lisier	21
4.8 Bilan massique.....	24
4.8.1 Bilan massique journalier lors de la campagne d'échantillonnage de septembre 2009	24
4.8.2 Bilan massique annuel	26
4.8.3 Bilan massique pour 1 000 kg de lisier.....	28
4.9 Performances du procédé de traitement.....	30
5 Conclusion	33
6 Références.....	34
Annexe A	35

Liste des tableaux

Tableau 1.	Caractéristiques des fosses.....	2
Tableau 2.	Points d'échantillonnage.....	8
Tableau 3.	Analyses de laboratoire.....	9
Tableau 4.	Conditions d'ambiance mesurées sur le site.....	16
Tableau 5.	Précipitation et évaporation dans les fosses.....	17
Tableau 6.	Volumes de lisier dans les fosses.....	18
Tableau 7.	Débits de lisier brut provenant de la préfosse.....	18
Tableau 8.	Débits de lisier dans le conduit de recirculation.....	19
Tableau 9.	Émissions journalières de gaz des bioréacteurs #1 et #2.....	20
Tableau 10.	Concentrations des éléments dans le lisier aux principaux points d'échantillonnage.....	22
Tableau 11.	Concentrations des éléments dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses.....	23
Tableau 12.	Bilan environnemental et agronomique.....	29
Tableau 13.	Taux de capture (%) des éléments dans les trois fosses du procédé de traitement Écogespro.....	30
Tableau 14.	Comparaison du procédé de traitement Écogespro à d'autres procédés de traitement.....	31

Liste des figures

Figure 1.	Schéma du système de traitement.....	3
Figure 2.	Tuyau de drain non perforé à la surface du lisier dans le bioréacteur #2.....	4
Figure 3.	Calendrier d'échantillonnage du lisier et de mesure des émissions de gaz pour avril et septembre 2009.....	6
Figure 4.	Laboratoire mesanges ^{MD} III.....	10
Figure 5.	Schéma de la chambre de prélèvement.....	11
Figure 6.	Chambre de prélèvement sur le bioréacteur #1.....	12
Figure 7.	Bilan massique journalier du 23 septembre 2009 (2,2 mm de pluie de 14 h à 18 h – $T_{\text{moy}} = 19,2^{\circ}\text{C}$ – $\text{HR}_{\text{moy}} = 92\%$).....	25
Figure 8.	Bilan massique annuel du 1 ^{er} avril au 31 mars de l'année suivante (basé sur les données récoltées en 2009).....	27

1 Introduction

De par son concept, soit principalement une mécanisation minimale, une faible aération et une optimisation de la sédimentation naturelle, le procédé Écogespro de traitement des lisiers est différent des autres technologies en développement au Québec.

Au début des années 2000, un essai pilote a été réalisé sous la supervision de COGENOR Lanaudière, du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et de la Coopérative Écogespro sur le site d'une maternité porcine dans la région de Lanaudière. Les résultats de ce projet pilote ont confirmé l'intérêt de cette technologie pour la désodorisation du lisier, la réduction de la concentration des éléments minéraux dans le surnageant et l'élimination des pathogènes. Toutefois, les résultats obtenus ne s'appliquaient qu'aux conditions particulières du site étudié; le lisier était relativement peu chargé et entreposé entièrement dans des réservoirs en sol (lagunes).

Par la suite, le procédé de traitement a été implanté sur le site d'une ferme porcine de type naisseur-finisseur de la région de Lanaudière. Dans le but d'être plus représentatif du contexte actuel de la gestion des lisiers en production porcine, le procédé de traitement a été implanté dans des réservoirs en béton.

En 2007, la Coopérative Écogespro a mandaté l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) pour réaliser un bilan massique complet du procédé de traitement. Ce rapport présente la méthodologie utilisée et les résultats obtenus lors de la caractérisation du procédé de traitement Écogespro.

2 But et objectifs du projet

2.1 But du projet

Le projet avait pour but de réaliser un bilan massique complet du procédé de traitement Écogespro.

2.2 Objectifs du projet

Les objectifs spécifiques du projet consistaient à :

- Caractériser les lisiers à toutes les étapes du procédé;
- Mesurer les débits de lisier aux différentes étapes du procédé;
- Mesurer les émissions gazeuses produites par les bioréacteurs;
- Compléter le tableau du bilan environnemental et agronomique du formulaire du groupe de travail « Transfert technologique » de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ).

3 Matériels et méthodes

3.1 Description de la ferme

Le procédé de traitement Écogespro est installé sur une ferme porcine de type naisseur-finiisseur soit, la Ferme C. & A. Duquette s.e.n.c., située au 660 chemin de la Fourche à Sainte-Julienne dans la région de Lanaudière.

La ferme regroupe une maternité de 200 truies, une pouponnière de 350 places et un engraissement de 1 150 places. Sa production est répartie dans trois bâtiments, soit un bâtiment d'engraissement, un bâtiment de gestation et un bâtiment regroupant maternité, pouponnière et engraissement.

Les lisiers produits dans les trois bâtiments sont acheminés dans une seule préfosse avant d'être introduits dans le procédé de traitement. Le volume total de lisier produit sur la ferme est d'un peu moins de 10 m³/jour.

3.2 Description du procédé de traitement

Le procédé de traitement Écogespro fonctionne par digestion aérobie et anaérobie à l'intérieur de deux fosses, appelées Bioréacteurs #1 et #2, et d'une fosse d'entreposage. Les caractéristiques des trois fosses du procédé de traitement sont présentées au tableau 1. Les deux premières fosses existaient déjà sur la ferme tandis que la troisième a été construite pour répondre aux besoins de ce procédé de traitement.

Tableau 1. Caractéristiques des fosses

Fosse	Forme	Diamètre intérieur (m)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Volume maximal théorique (m ³)
1	octogonale	19,23	3,96	261	1 035
2	circulaire	22,16	3,66	386	1 412
3	circulaire	28,16	4,88	623	3 039

Le procédé fait appel à un écoulement gravitaire entre chacun des bioréacteurs et la fosse d'entreposage (figure 1). Les deux premiers bioréacteurs sont pleins en permanence alors que la fosse d'entreposage procure un polissage passif et sert l'épandage annuel du liquide traité. Une pompe permet la recirculation d'une quantité de liquide traité de la fosse d'entreposage vers le premier bioréacteur. Le débit de recirculation a été fixé à environ 20 fois le débit de lisier entrant dans le procédé de traitement.

Un suppresseur alimente en air les deux bioréacteurs. L'air est acheminé vers un tuyau de drain non perforé à la surface du lisier (figure 2), y assurant la circulation par pulsion. Cette digestion de surface est complétée par une digestion anaérobie au fond des deux bioréacteurs. Le débit d'air dans les deux bioréacteurs a été fixé à environ 1 050 m³/jour.

Les boues s'accumulent au fond des deux premiers bioréacteurs et une vidange doit être faite au besoin selon le taux d'accumulation de la matière sèche.

Les précipitations et l'évaporation sont aussi considérées dans le procédé de traitement puisqu'elles font varier de façon importante les volumes de lisier à gérer.

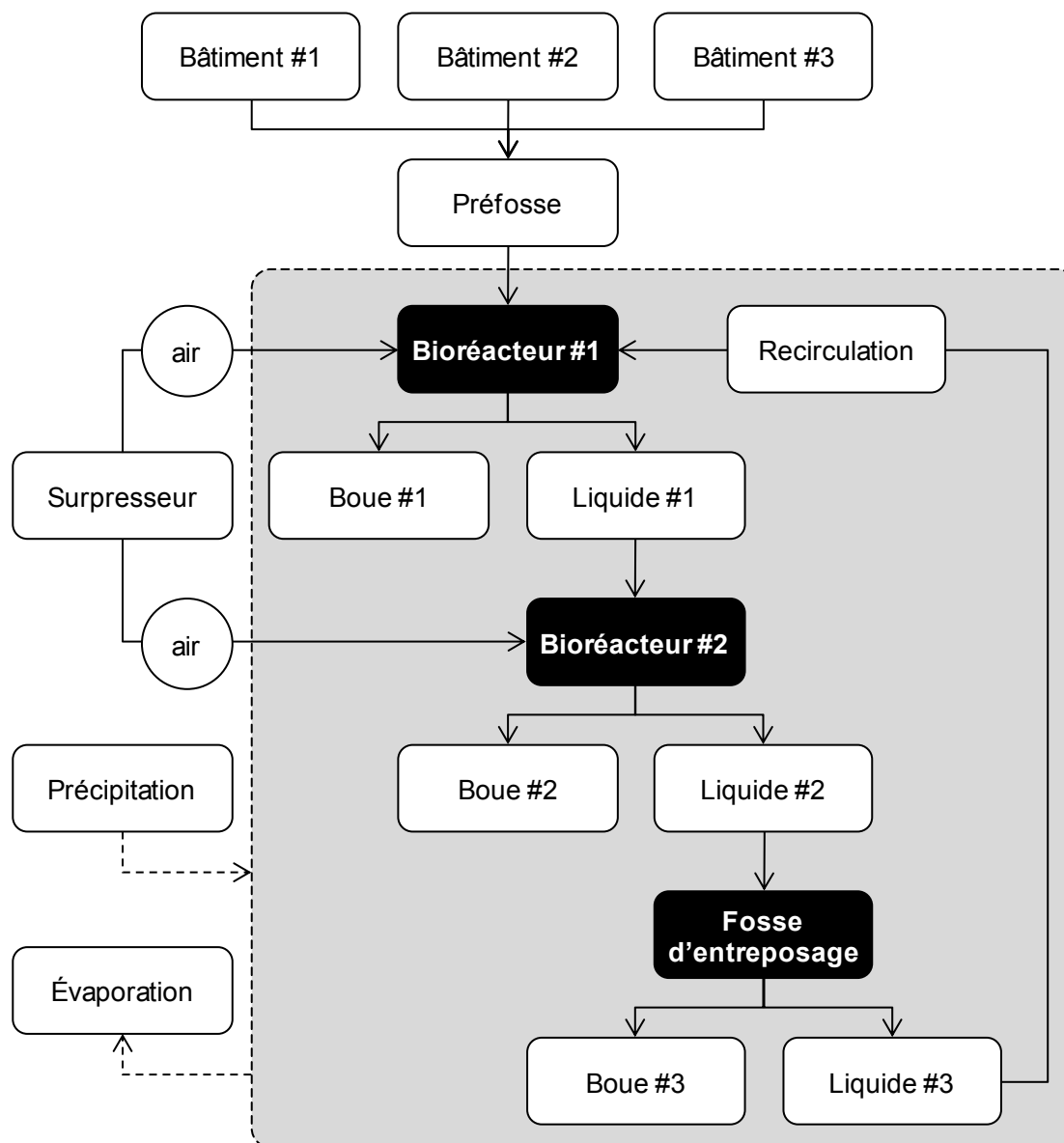


Figure 1. Schéma du système de traitement



Figure 2. Tuyau de drain non perforé à la surface du lisier dans le bioréacteur #2

3.3 Calendrier d'échantillonnage des lisiers, des mesures d'émissions de gaz et des mesures de débit

Les mesures de caractérisation du procédé de traitement ont été réparties sur une période de onze mois entre le 16 décembre 2008 et le 27 octobre 2009. Le débit de lisier brut entrant dans le procédé de traitement et le débit de lisier traité entre la fosse d'entreposage vers le premier bioréacteur ont été mesurés en continu durant cette période. Des échantillonnages de lisier ont aussi été réalisés.

Deux campagnes complètes d'échantillonnage du lisier et de mesure des émissions de gaz ont été réalisées. La première campagne de mesure s'est tenue entre le 14 et le 27 avril 2009 et la deuxième entre le 21 et le 29 septembre 2009 (figure 3).

Lors de la première campagne, les équipements de mesure des gaz ont été installés sur le site, mardi le 14 avril 2009. Le démantèlement des équipements a été effectué le 27 avril 2009. Du à des problèmes techniques, la pompe de recirculation n'a fonctionné que du 20 au 27 avril 2009. Les échantillonnages partiels prévus pour les 14, 17 et 20 avril ainsi que l'échantillonnage complet du 15 avril ont eu lieu même si la pompe de recirculation n'était pas en fonction. Les conditions atmosphériques ont été mesurées entre le 14 et le 27 avril tandis que les mesures d'émissions de gaz sur les deux bioréacteurs ont débuté, après deux jours d'ajustement, le 17 avril pour se terminer le 27 avril.

Lors de la deuxième campagne de mesure, les équipements de mesure de gaz ont été déplacés et installés sur le site le lundi, 21 septembre 2009. Le démantèlement des équipements a eu lieu le 29 septembre 2009. Durant cette campagne, tous les échantillonnages et les mesures d'émissions ont été effectués à la date prévue.

Deux stratégies d'échantillonnage du lisier ont été retenues, soit l'échantillonnage partiel et l'échantillonnage complet. Les échantillonnages complets ont été réalisés par le personnel de l'IRDA et les échantillonnages partiels par le personnel d'Écogepro. Les échantillonnages partiels consistaient à prendre quatre échantillons de lisier aux principaux points critiques du procédé de traitement. Ces échantillonnages ont été faits le 16 décembre 2008, le 17 février 2009, le 18 juin 2009 et le 26 août 2009. Les échantillonnages complets consistaient à prendre seize échantillons de lisier à différents endroits dans le procédé de traitement.

Avril 2009						
Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
12 Pâques	13 Congé	14 Installation Échantillonnage partiel	15 Échantillonnage complet Début des mesures de gaz en continu	16	17 Échantillonnage partiel	18
19	20 Échantillonnage partiel	21 Échantillonnage complet	22	23	24 Échantillonnage partiel	25
26	27 Fin des mesures de gaz en continu Démantèlement	28	29	30		
Septembre 2009						
Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
20	21 Installation Échantillonnage partiel Début des mesures de gaz en continu	22 Échantillonnage complet	23	24	25 Échantillonnage partiel	26
27	28 Échantillonnage partiel	29 Échantillonnage complet Fin des mesures de gaz en continu Démantèlement	30			

Figure 3. Calendrier d'échantillonnage du lisier et de mesure des émissions de gaz pour avril et septembre 2009

3.4 Caractérisation des conditions ambiantes

Les conditions atmosphériques à la ferme ont été mesurées à l'aide de la station météo du laboratoire mobile mesanges^{MD} III. Ces mesures ont eu lieu au même moment que les mesures de gaz sur les bioréacteurs, entre le 14 et le 27 avril et entre le 21 et le 29 septembre 2009.

La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées en continu à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine, combiné à une sonde de polymère (modèle HMP45C, Vaisala, Campbell Scientific Canada Corp., Edmonton, Canada; précision de la température : $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, précision de l'humidité relative : $\pm 2\%$ sur la plage de 10 à 90 %). La vitesse et la direction du vent ont également été mesurées en continu (anémomètre modèle 03101, girouette modèle 03301, R.M. Yong Company, Traverse City, Michigan, États-Unis). Tous ces paramètres ont été mesurés à chaque seconde et les moyennes aux 15 minutes ont été enregistrées.

Les données météo de la station d'Environnement Canada de Saint-Jacques ont été utilisées à des fins de comparaison et de validation (Station météo de Saint-Jacques : latitude $45^{\circ}57'$ – longitude $-73^{\circ}35'$ – altitude 69 m – identification du climat: 7017380 – site internet www.climat.meteo.gc.ca).

3.5 Détermination des débits du système de traitement

Les débits de lisier provenant des bâtiments ainsi que les débits de lisier de recirculation ont été mesurés en continu par des débitmètres magnétiques entre le 16 décembre 2008 et le 27 octobre 2009. Les lectures des débitmètres ont été notées sur les débitmètres lors de chaque journée d'échantillonnage du lisier (complet ou partiel).

Le premier débitmètre d'un diamètre de 76,2 mm (3 pouces) (COPA-XE Series FXE 4000, ABB Bailey Fischer & Porter, Canada) a été installé sur la conduite reliant la préfosse au premier bioréacteur. Le deuxième débitmètre d'un diamètre de 38,1 mm (1,5 pouces) (COPA-XE Series 10DX4311, ABB Bailey Fischer & Porter, Canada) a été installé sur la conduite de recirculation reliant la fosse d'entreposage au premier bioréacteur. Les deux débitmètres ont été installés de façon à maintenir le conduit du débitmètre plein afin d'assurer une mesure exacte du débit.

3.6 Échantillonnage et analyse des lisiers

Les seize points d'échantillonnage du lisier ainsi que leur description sont présentés au tableau 2. Les points 1 à 4 ont été sélectionnés pour caractériser le lisier à l'entrée et à la sortie des principales étapes du procédé de traitement : le lisier brut de la préfosse, le lisier entre le bioréacteur #1 et le bioréacteur #2, le lisier entre le bioréacteur #2 et la fosse d'entreposage et le lisier dans la conduite de recirculation.

Les points 5 à 16 ont été utilisés pour caractériser les phases liquides et les boues dans les deux bioréacteurs et la fosse d'entreposage. Pour ce faire, quatre échantillons ont été récoltés dans chacune des fosses, deux à environ 1 m sous la surface du lisier et deux au fond des fosses.

Tableau 2. Points d'échantillonnage

Points	Emplacement	Description
1	Préfosse	Le lisier provenant de la préfosse est échantillonné par la valve à la sortie du tuyau reliant la préfosse au bioréacteur #1.
2	Sortie bioréacteur #1	Le lisier est échantillonné dans le tuyau reliant le bioréacteur #1 au bioréacteur #2.
3	Sortie bioréacteur #2	Le lisier est échantillonné dans le tuyau reliant le bioréacteur #2 à la fosse d'entreposage.
4	Recirculation	Le lisier est échantillonné par la valve à la sortie du tuyau reliant la fosse d'entreposage au bioréacteur #1.
5	Bio #1 – A Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point A.
6	Bio #1 – A Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point A.
7	Bio #1 – B Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point B.
8	Bio #1 – B Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point B.
9	Bio #2 – A Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point A.
10	Bio #2 – A Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point A.
11	Bio #2 – B Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point B.
12	Bio #2 – B Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point B.
13	Fosse – A Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point A.
14	Fosse – A Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point A.
15	Fosse – B Haut	Le lisier est échantillonné à environ 1 m sous la surface du lisier au point B.
16	Fosse – B Fond	Le lisier est échantillonné au fond de la fosse au point B.

Les échantillonnages partiels consistaient à récolter seulement les échantillons 1 à 4 tandis que les échantillonnages complets consistaient à récolter tous les échantillons.

Le tableau 3 présente les analyses de laboratoire qui ont été effectuées sur les échantillons. Toutes les analyses ont été réalisées sur tous les échantillons, à l'exception de la DBO₅, qui a été réalisée seulement lors des échantillonnages complets des échantillons 1 à 4.

Les paramètres à analyser dans le lisier ont été sélectionnés en fonction des indications trouvées au tableau du bilan environnemental et agronomique du formulaire du groupe de travail « Transfert technologique » de la FPPQ.

Tableau 3. Analyses de laboratoire

# laboratoire IRDA	Paramètres analysés
501	pH
502	N _{total}
503	N-NH ₄
506	% de matière sèche 105°C
507	% de cendres 550°C
510	DBO ₅
511	DCO
512	Densité
514	N-NO ₃
515	Chlorures
516	Solides totaux
517	Solides totaux dissous
521	Phosphore soluble à l'eau
523	Digestion sulfurique: P, K Ca, Mg, Al, Cu, Fe, Mn, Zn

3.7 Mesure du niveau de boue accumulée au fond des fosses

Le niveau de boue accumulée au fond des fosses a été mesuré à l'aide de la méthode de la jauge à roue de bicyclette tirée de Poulin (2008). Les mesures du niveau de boue ont été réalisées par le personnel de l'IRDA lors des journées d'échantillonnage complet, les 15 et 21 avril et les 22 et 29 septembre 2009.

3.8 Échantillonnage et analyse des émissions de gaz

Les émissions de gaz provenant des bioréacteurs #1 et #2 ont été mesurées à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (Varian 3600) pour le CH₄, le CO₂ et le N₂O et d'un spectromètre non-dispersif dans l'infrarouge (NRIR, Seimens Ultramat 6E) pour le NH₃.

Les deux analyseurs étaient installés dans le laboratoire mobile mesanges^{MD} III qui était stationné à proximité du système de traitement (figure 4).

Les concentrations des différents gaz ont été mesurées aux 15 minutes. L'analyse instantanée avec le chromatographe (CH₄, CO₂ et N₂O) était effectuée sur l'échantillon de gaz circulant dans la boucle d'injection de l'appareil à la fin de chaque période d'échantillonnage de 15 minutes; alors que la concentration de NH₃ représente la moyenne des concentrations de NH₃ dans le gaz circulant à l'intérieur de la cellule d'analyse durant la dernière minute de chaque période. Les incertitudes instrumentales de la concentration des gaz sont de ± 30 ppm pour le CO₂, de ± 0,5 ppm pour le CH₄, de ± 0,1 ppm pour le N₂O et de ± 1,5 ppm pour le NH₃.



Figure 4. Laboratoire mesanges^{MD} III

La mesure des émissions à la surface des fosses, a été réalisée avec une chambre de prélèvement développée à l'IRDA. Un schéma du principe de fonctionnement de la chambre de prélèvement des gaz sur les surfaces liquides est présenté à la figure 5. La chambre permet de prélever un échantillon dans un espace confiné, balayé par un courant d'air connu de 100 L/min. La concentration des gaz d'intérêt est mesurée à la sortie de la chambre et l'augmentation de la concentration par rapport à la concentration normale dans l'air ambiant est attribuée à la contribution de la surface émettrice. Une photo de la chambre de prélèvement installé sur le bioréacteur #2 est présentée à la figure 6.

Les émissions de gaz provenant du lisier entreposé dans les bioréacteurs ont été calculées avec l'équation 1 :

$$E_{Gas} = (C_S - C_E) \times Q \times \frac{P_{atm} - P_v}{287T_c} \times \frac{M_{Gaz}}{M_{Air}} \quad (1)$$

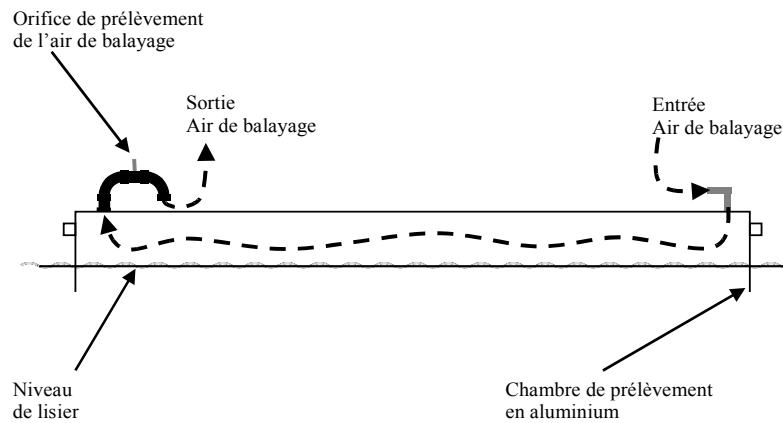


Figure 5. Schéma de la chambre de prélèvement



Figure 6. Chambre de prélèvement sur le bioréacteur #1

3.9 Estimation théorique de l'évaporation du lisier à la surface des bioréacteurs

Une estimation théorique de l'évaporation du lisier à la surface des deux bioréacteurs et de la fosse d'entreposage a été réalisée dans le but de quantifier les pertes de matières du procédé de traitement.

L'évaporation du lisier à la surface des bioréacteurs s'explique par deux phénomènes, soit le transfert de masse entre le lisier et l'air ambiant ou par le passage de l'air à travers la masse de lisier. La somme des deux donne la quantité totale de lisier évaporé. L'évaporation causée par transfert de masse entre le lisier et l'air ambiant (E_{lisier}) est évaluée à l'aide de l'équation 2. Cette équation a été adaptée et validée par Ham (1999 et 2002) dans le cadre de projets de recherche sur la mesure de l'évaporation du lisier de porcs entreposé dans des lagunes au Kansas.

$$E_{lisier} = \frac{0,622}{R_g T_{lisier}} (P_s - P_v) UC \quad (2)$$

où :

E_{lisier} = Évaporation du lisier causée par le transfert de masse entre le lisier et l'air (kg/m²-s);

0,622 = Masse molaire de l'eau sur celle de l'air sec (18,015/28,97) (sans unité);

R_g = Constante de l'air (287,04 J/kg-K);

T_{lisier} = Température du lisier à la surface du bioréacteur (K);

P_s = Pression de vapeur saturée à T_{lisier} (Pa);

P_v = Pression de vapeur de l'air à la température de l'air ambiant (Pa);

U = Vitesse de l'air à 1 m au-dessus de la surface du lisier (m/s);

C = Coefficient de transfert de masse pour le lisier ($2,8 \times 10^{-3}$) (sans unité).

La température du lisier à la surface du bioréacteur et la température de l'air ambiant ont été mesurées au cours du projet. Les caractéristiques de l'air utilisées dans l'équation 1 (P_s et P_v) ont été estimées à partir des équations psychrométriques présentées dans ASAE (2005). Le coefficient de transfert de masse pour le lisier a été fixé à $2,8 \times 10^{-3}$ suite aux résultats obtenus par Ham (1999).

L'évaporation causée par le passage de l'air à travers le lisier dans le bioréacteur (E_{air}) est évaluée à l'aide de l'équation 3.

$$E_{air} = Q_{air} \rho_{air} (H_1 - H_0) \quad (3)$$

où :

E_{air} = Évaporation du lisier causée par le passage de l'air (kg/min);

Q_{air} = Débit d'air entrant dans le bioréacteur (m³/min);

ρ_{air} = Masse volumique de l'air (kg/m³);

H_0 = Quantité d'eau dans l'air ambiant (kg_{eau}/kg_{air});

H_1 = Quantité d'eau dans l'air à la température du lisier (kg_{eau}/kg_{air}).

Les hypothèses suivantes ont été posées pour pouvoir utiliser l'équation 2 :

- L'air, provenant du surpresseur et passant à travers la masse de lisier, arrive à la surface du bioréacteur saturé en eau et à la même température que le lisier;
- La quantité d'eau retrouvée dans l'air ambiant et dans l'air à la sortie du surpresseur demeure constante; c'est-à-dire que la masse d'eau condensée par le surpresseur est négligeable;
- Les caractéristiques de l'air à la sortie du surpresseur ont été fixées à 40°C et 30 % d'humidité relative;
- Le débit d'air moyen du surpresseur dans les bioréacteurs était de 1 050 m³/jour.

Les quantités d'eau dans l'air (H_0 et H_1) ont été évaluées à l'aide des équations psychrométriques présentées dans ASAE (2005).

3.10 Bilan massique

Les calculs reliés au bilan de masse complet du procédé de traitement ont été réalisés en kg/jour pour les liquides et les éléments. Le débit de lisier entre le bioréacteur #1 et le bioréacteur #2 (Q_{1-2}) a été calculé à l'aide de l'équation 4 :

$$Q_{1-2} = Q_{LB} + Q_R + P_1 - E_1 - A_1 - G_1 \quad (4)$$

Où Q_{LB} équivaut au débit de lisier brut provenant de la préfosse, Q_R au débit de lisier dans la conduite de recirculation, P_1 à la masse d'eau provenant des précipitations, E_1 à la masse évaporée, A_1 à la masse de lisier s'accumulant dans le bioréacteur et G_1 à la masse de matière perdue par les émissions de gaz.

Le débit de lisier à la sortie du bioréacteur #2 (Q_{2-3}) a été calculé selon l'équation 5 :

$$Q_{2-3} = Q_{1-2} + P_2 - E_2 - A_2 - G_2 \quad (5)$$

Où P_2 équivaut à la masse d'eau provenant des précipitations, E_2 à la masse évaporée, A_2 à la masse de lisier s'accumulant dans le bioréacteur et G_2 à la masse de matière perdue par les émissions de gaz.

La masse de lisier accumulé dans la fosse d'entreposage (M_3) est calculée avec l'équation 6.

$$M_3 = Q_{2-3} - Q_R + P_3 - E_3 - A_3 - G_3 \quad (6)$$

Où P_3 équivaut à la masse d'eau provenant des précipitations, E_3 à la masse évaporée, A_3 à la masse de lisier s'accumulant dans le bioréacteur et G_3 à la masse de matière perdue par les émissions de gaz.

Les taux d'accumulation de matière dans les bioréacteurs et la fosse d'entreposage ont été calculés à partir des données récoltées lors de la deuxième campagne de mesure en septembre 2009.

Les données récoltées lors de la campagne de mesure d'avril 2009 n'ont pas été retenues puisque la pompe de recirculation n'était pas en fonction à tous les jours.

Les quantités de matières accumulées dans les fosses ont été calculées par la différence entre les quantités entrées et les quantités sorties. Par exemple, l'accumulation de phosphore dans le bioréacteur #1 ($A_{1(P)}$) a été calculée de la façon suivante :

$$A_{1(P)} = Q_{LB(P)} - Q_{1-2(P)} \quad (7)$$

Où $Q_{LB(P)}$ représente le débit de phosphore dans le lisier brut qui est déterminé par le produit de la concentration de phosphore obtenue avec les analyses de lisier et le débit de lisier brut. Quant à $Q_{1-2(P)}$, il équivaut au débit de phosphore dans le lisier entre le bioréacteur #1 et le bioréacteur #2 qui lui est déterminé par le produit de la concentration de phosphore obtenue avec les analyses de lisier et le débit de lisier entre les deux bioréacteurs.

4 Résultats et discussions

4.1 Conditions atmosphériques

Un résumé des conditions atmosphériques (température, humidité relative et précipitations) sur le site de la ferme durant les deux campagnes de mesure est présenté au tableau 4. La température moyenne sur le site entre le 14 et le 27 avril 2009, était de 9,4°C et le total des précipitations de 21 mm. Entre le 21 et le 29 septembre, la température moyenne était de 13,2°C et le total des précipitations de 34 mm.

Les valeurs obtenues étaient respectivement de 9,7°C et de 16 mm, entre le 14 et le 27 avril 2009, et de 14,1°C et de 23 mm, entre le 21 et le 29 septembre 2009. Elles concordent avec la température moyenne et le total des précipitations enregistrés à la station météo d'Environnement Canada de Saint-Jacques.

Tableau 4. Conditions d'ambiance mesurées sur le site

Période	Température			Humidité relative			Précipitation
	moy. (°C)	min. (°C)	max. (°C)	moy. (%)	min. (%)	max. (%)	total (mm)
Du 14 au 27 avril 2009	9,4	-1,2	28,3	51	13	97	21
Du 21 au 29 septembre 2009	13,2	1,1	22,1	85	40	98	34

4.2 Température du lisier dans les bioréacteurs

La température moyenne du lisier dans le bioréacteur #1 était de 10,5°C, entre le 14 et le 27 avril 2009, et de 16,9°C, entre le 21 et le 29 septembre 2009. La température moyenne du lisier dans le bioréacteur #2 était de 9,7°C, entre le 14 et le 27 avril 2009, et de 16,9°C, entre le 21 et le 29 septembre 2009.

4.3 Volumes de précipitation et d'évaporation dans le procédé

Le tableau 5 présente le bilan des quantités d'eau de précipitation et d'évaporation dans les trois fosses du procédé de traitement durant les périodes d'échantillonnage d'avril et de septembre.

Entre le 14 et le 27 avril, le total des précipitations était de 27 178 kg d'eau tandis que l'évaporation était de 35 279 kg pour un bilan négatif de 8 101 kg. Entre le 21 et le 29 septembre, le total des précipitations était de 43 687 kg d'eau tandis que l'évaporation était de 6 412 kg pour un bilan positif de 37 275 kg.

Les calculs, estimant les quantités de lisier évaporé, ont démontré que l'évaporation, causée par le passage de l'air dans la masse de lisier des bioréacteurs #1 et #2, représentait entre 0,1 et 0,25 % de l'évaporation totale. La majeure partie de l'évaporation du procédé de traitement est donc causée par le transfert de masse entre le lisier et l'air ambiant.

Tableau 5. Précipitation et évaporation dans les fosses

Période	Emplacement	Précipitation (kg)	Évaporation (kg)
Du 14 au 27 avril 2009	Bioréacteur #1	5 596	5 783
	Bioréacteur #2	8 254	7 237
	Fosse d'entreposage	13 328	22 259
	Total	27 178	35 279
Du 21 au 29 septembre 2009	Bioréacteur #1	8 995	1 438
	Bioréacteur #2	13 267	2 149
	Fosse d'entreposage	21 425	2 825
	Total	43 687	6 412

4.4 Volumes de lisier et de boue mesurés dans les fosses et volumes épandus

Le tableau 6 présente les hauteurs de lisier mesurées dans les fosses lors des quatre journées d'échantillonnage complet ainsi que les volumes de lisier calculés à partir de ces valeurs. Les hauteurs de lisier mesurées dans les bioréacteurs #1 et #2, lors du 15 avril 2009, sont inférieures aux valeurs mesurées les autres journées puisque la recirculation n'était pas en fonction.

La Ferme C. & A. Duquette s.e.n.c. a réalisé trois chantiers d'épandage au cours de l'année 2009. Lors du premier chantier, 1 135 m³ de lisier a été retiré du bioréacteur #2 (entre le 29 avril et le 7 mai), 1 462 m³ du bioréacteur #1 lors du deuxième chantier (entre le 25 juin et le 9 juillet) et 859 m³ du bioréacteur #2 lors du troisième chantier (entre le 6 octobre et le 3 novembre). Lors du deuxième chantier d'épandage, 560 m³ de lisier provenait de la fosse d'entreposage puisque la pompe de recirculation était en fonction.

En avril, le volume de boue dans le premier bioréacteur représentait 75 % du volume de lisier présent tandis qu'en septembre, le volume de boue représentait un peu moins de 45 %. Cette diminution est attribuable au deuxième chantier d'épandage.

Les volumes de boue mesurés dans le bioréacteur #2 et la fosse d'entreposage ont été relativement constants lorsque la recirculation était en fonction. Dans le bioréacteur #2, le volume de boue représentait environ 175 m³ ou 15% du volume total. Dans la fosse d'entreposage, le volume de boue représentait environ 125 m³.

Tableau 6. Volumes de lisier dans les fosses

		15 avril		21 avril		22 septembre		29 septembre	
		Hauteur (m)	Volume (m ³)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Hauteur (m)	Volume (m ³)
Bio #1	Liquide	0,36	93	0,89	234	1,92	503	2,00	522
	Boue	3,05	796	2,56	668	1,53	399	1,45	379
	Total	3,40	889	3,45	902	3,45	902	3,45	902
Bio #2	Liquide	2,65	1 022	2,57	989	2,55	983	2,53	976
	Boue	0,30	115	0,43	168	0,45	174	0,47	181
	Total	2,95	1 137	3,00	1 157	3,00	1 157	3,00	1 157
Fosse	Liquide	3,01	1 872	3,01	1 872	0,90	559	1,07	664
	Boue	0,13	84	0,16	100	0,20	123	0,23	142
	Total	3,14	1 956	3,17	1 972	1,10	682	1,29	806

4.5 Débits de lisier dans le système de traitement

Le tableau 7 présente les résultats obtenus par la mesure des débits de lisier brut provenant des bâtiments entre le 16 décembre 2008 et le 27 octobre 2009. Le débit moyen de lisier produit à la ferme durant cette période était de 9,12 m³/j. Cette valeur a donc été utilisée pour tous les calculs de bilan de masse de ce projet.

Tableau 7. Débits de lisier brut provenant de la préfosse

Date de lecture du débitmètre	Lecture sur le débitmètre (l)	Débit moyen depuis la dernière lecture (m ³ /j)	Débit moyen depuis la première lecture (m ³ /j)
16 décembre 2008	0	-	-
14 avril 2009	1 089 509	9,16	-
29 avril 2009	1 230 920	9,43	9,19
22 septembre 2009	2 516 900	8,81	8,99
29 septembre 2009	2 591 000	10,59	9,03
27 octobre 2009	2 872 223	10,04	9,12

Le tableau 8 présente les résultats obtenus par la mesure des débits de lisier dans la conduite de recirculation entre le 21 avril et le 27 octobre 2009. Les données récoltées, entre le 16 décembre 2008 et le 20 avril 2009, n'ont pas été retenues puisque la pompe de recirculation n'a pas fonctionné en continu durant cette période. Le débit moyen de lisier dans la conduite de recirculation, utilisé pour les calculs de bilan de masse, était de 212 m³/j.

Tableau 8. Débits de lisier dans le conduit de recirculation

Date de lecture du débitmètre	Lecture sur le débitmètre (l)	Nombre de remise à zéro du compteur sur le débitmètre	Débit moyen depuis la dernière lecture (m ³ /j)	Débit moyen depuis la première lecture (m ³ /j)
21 avril 2009	421 920	0	-	-
29 avril 2009	2 042 320	0	205	-
22 septembre 2009	4 551 109	3	223	222
29 septembre 2009	5 725 420	3	164	219
27 octobre 2009	536 542	4	172	212

4.6 Émissions de gaz

Le tableau 9 présente les émissions journalières de gaz des bioréacteurs #1 et #2. Les données récoltées lors de la campagne d'échantillonnage d'avril varient plus que les données récoltées lors de la campagne de septembre. Les émissions gazeuses mesurées lors de la période d'échantillonnage de septembre sont très faibles en comparaison des émissions normalement mesurées dans une fosse d'entreposage de lisier brut. La présence de la couche de liquide de recirculation, peu chargé en éléments fertilisants, sur le dessus des fosses aurait pour effet de limiter les émissions de gaz.

Entre le 22 et le 29 septembre, les émissions moyennes de CH₄ des bioréacteurs #1 et #2 étaient respectivement 4,6 et 0,8 g/j-m², celles de CO₂ étaient de 30,6 et 16,6 g/j-m² et celles de NH₃ étaient toutes deux de 0,1 g/j-m². Aucune émission de N₂O n'a été mesurée durant le projet.

En comparaison avec une fosse d'entreposage de lisier brut, pour une température de lisier d'environ 17°C telle que mesurée dans les bioréacteurs en septembre, les émissions de CH₄, CO₂ et NH₃ seraient environ de 80, 175, 4,0 g/j-m² respectivement (Pelletier et al., 2006 et autres résultats non publiés).

La somme des masses de carbone et d'azote émises par les deux bioréacteurs est respectivement de 4,4 kg C/j et 0,034 kg N/j. Ces quantités sont négligeables en comparaison aux quantités trouvées dans le lisier brut introduit à tous les jours dans le système de traitement.

Tableau 9. Émissions journalières de gaz des bioréacteurs #1 et #2

Date	Bioréacteur #1			Bioréacteur #2		
	CH ₄ (g/j-m ²)	CO ₂ (g/j-m ²)	NH ₃ (g/j-m ²)	CH ₄ (g/j-m ²)	CO ₂ (g/j-m ²)	NH ₃ (g/j-m ²)
15 avril	3,4	30,2	1,2	0,0	11,2	1,3
16 avril	0,6	22,0	2,3	0,1	16,2	2,3
17 avril	10,1	105,8	2,2	0,2	15,3	2,5
18 avril	9,5	62,2	2,1	0,1	17,5	2,7
19 avril	0,5	34,1	2,5	0,1	18,6	2,9
20 avril	5,8	53,1	4,4	0,2	15,4	2,8
21 avril	4,5	62,5	4,1	0,2	18,0	2,3
22 avril	1,5	43,7	3,9	0,2	22,1	1,7
23 avril	1,1	46,8	3,7	0,2	25,2	1,7
24 avril	1,1	48,9	3,1	0,2	21,7	1,9
25 avril	1,6	33,4	1,4	0,1	8,2	0,9
26 avril	6,8	107,8	3,2	0,2	24,8	2,3
27 avril	1,5	27,9	1,3	0,2	12,2	1,1
22 septembre	1,6	24,0	0,1	0,5	8,1	0,1
23 septembre	6,3	34,6	0,1	0,8	10,2	0,1
24 septembre	3,8	31,4	0,0	0,9	18,2	0,0
25 septembre	3,8	30,1	0,1	0,8	16,0	0,1
26 septembre	6,9	38,2	0,1	1,0	24,7	0,1
27 septembre	6,0	30,4	0,1	1,1	23,5	0,1
28 septembre	5,4	37,3	0,1	0,8	21,3	0,1
29 septembre	3,2	19,0	0,0	0,3	10,6	0,1

4.7 Résultats des analyses de lisier

Le tableau 10 présente les moyennes des concentrations d'éléments mesurés aux points d'échantillonnage 1 à 4, nommément le lisier brut provenant de la préfosse des trois bâtiments, le lisier entre les bioréacteurs #1 et #2, le lisier entre le bioréacteur #2 et la fosse d'entreposage ainsi que le lisier dans la conduite de recirculation.

Les valeurs retrouvées au tableau 10 présentent les valeurs moyennes des échantillons récoltés durant le projet, à l'exception des échantillons prélevés entre le 14 et le 20 avril 2009 lorsque la pompe de recirculation n'était pas en fonction.

Selon les résultats, le lisier brut produit sur la ferme contenait 6,1% de matière sèche et les concentrations des principaux éléments (N_{total} , P_{total} et K) étaient respectivement de 5 210, 1 085 et 2 504 mg/kg.

Des diminutions importantes de concentration ont été observées à la sortie du bioréacteur #1. À cet endroit, le taux de matière sèche du lisier était de 1,6% et les concentrations de N_{total} , P_{total} et K étaient respectivement de 3 260, 294 et 1 945 mg/kg. Les concentrations mesurées à la sortie du bioréacteur #2 et dans la conduite de recirculation étaient sensiblement identiques aux concentrations mesurées à la sortie du bioréacteur #1 et cela, même si une légère tendance à la baisse peut être observée.

Après le passage du lisier dans le bioréacteur #1, la DBO_5 est passée de 45 000 mg/L à 17 333 mg/L pour demeurer sensiblement identique par la suite. La DCO a, quant à elle, diminué d'environ les deux tiers pour passer de 86 191 mg/L à 33 736 mg/L. Tout comme la DBO_5 , la DCO est demeurée sensiblement identique à la sortie du bioréacteur #2 dans la conduite de recirculation à la sortie de la fosse d'entreposage.

Le tableau 11 présente les concentrations des principaux éléments contenus dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses le 21 avril 2009 et les moyennes des 22 et 29 septembre 2009. Les résultats d'analyse des lisiers échantillonnés le 15 avril 2009 n'ont pas été retenus pour les calculs puisque la pompe de recirculation ne fonctionnait pas à ce moment. Les résultats démontrent que les concentrations de presque tous les éléments étaient plus élevées dans le fond des bioréacteurs #1 et #2. Les résultats de ces tableaux démontrent aussi que le lisier s'accumulant dans la fosse d'entreposage était homogène puisque les concentrations obtenues étaient identiques entre les échantillons récoltés dans le haut et au fond de la fosse. Les résultats complets d'analyse de lisier sont présentés à l'Annexe A.

Tableau 10. Concentrations des éléments dans le lisier aux principaux points d'échantillonnage

Paramètres analysés	Lisier brut ^[a]	Transfert B1-2	Transfert B2-3	Recirculation
Masse volumique (g/cm ³)	1,019 (0,009)	1,009 (0,003)	1,009 (0,005)	1,009 (0,003)
pH	6,6 (0,3)	6,8 (0,5)	6,7 (0,5)	6,7 (0,5)
Matières sèches (% poids)	6,1 (2,7)	1,6 (0,1)	1,6 (0,1)	1,5 (0,1)
Solides totaux (g/L)	55,3 (32,3)	14,0 (1,7)	13,6 (1,5)	13,0 (1,4)
Solides totaux dissous (mg/L)	8 319 (2323)	7 066 (1258)	7 053 (1475)	6 641 (2281)
Cendres (% poids sec)	22,5 (6,0)	38,7 (1,7)	38,5 (1,7)	39,3 (1,7)
Matière org. (% poids sec)	77,5 (6,0)	61,3 (1,7)	61,5 (1,7)	60,7 (1,7)
C org. 1,7 (% poids sec)	45,0 (3,5)	35,6 (1,0)	35,7 (1,0)	35,3 (1,0)
C org. 2,0 (% poids sec)	38,8 (3,0)	30,7 (0,8)	30,8 (0,9)	30,4 (0,9)
Azote total (mg/kg)	5 210 (1092)	3 260 (194)	3 268 (155)	3 193 (233)
N-NH ₄ (mg/kg)	2 197 (1026)	2 003 (910)	1 997 (897)	1 964 (894)
N-NO ₃ (mg/kg)	1,1 (0,8)	0,7 (0,3)	0,7 (0,3)	0,7 (0,3)
Phosphore total (mg/kg)	1 085 (289)	294 (70)	287 (67)	272 (76)
Phosphore réactif (mg/kg)	206 (63)	203 (84)	208 (87)	208 (92)
Potassium (mg/kg)	2 504 (341)	1 945 (129)	1 964 (107)	1 925 (131)
Calcium (mg/kg)	1 480 (756)	372 (41)	374 (27)	351 (45)
Magnésium (mg/kg)	571 (156)	117 (64)	111 (65)	104 (68)
Aluminium (mg/kg)	60,7 (25,6)	9,6 (1,0)	9,3 (0,8)	8,3 (1,0)
Bore (mg/kg) ^[b]	3,9 (1,1)	3,1 (0,8)	3,2 (0,7)	3,4 (0,9)
Cuivre (mg/kg)	23,7 (12,2)	5,6 (0,6)	5,6 (0,5)	5,1 (0,7)
Fer (mg/kg)	80,1 (25,3)	18,0 (2,8)	18,7 (2,8)	17,3 (3,4)
Manganèse (mg/kg)	20,5 (7,7)	3,7 (1,1)	3,6 (1,0)	3,3 (1,2)
Zinc (mg/kg)	76,8 (36,6)	15,9 (1,7)	16,0 (1,1)	14,5 (2,0)
Sodium (mg/kg) ^[b]	526 (63)	430 (26)	433 (21)	425 (27)
Chlorures (mg/kg)	1 210 (202)	874 (67)	867 (57)	853 (77)
DBO ₅ (mg/L)	45 000 (11358)	17 333 (1528)	18 333 (1528)	18 667 (2517)
DCO (mg/L)	86 191 (47171)	33 736 (5766)	33 527 (4603)	32 936 (4833)

^[a] Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart-type.

^[b] Les résultats d'analyse du bore (B) et du sodium (Na) sont approximatifs puisque la précision des appareils de mesure ne permet pas d'obtenir une valeur exacte.

Tableau 11. Concentrations des éléments dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses

Paramètres analysés	Bio #1 haut	Bio #1 fond	Bio #2 haut	Bio #2 fond	Fosse haut	Fosse fond
21 avril 2009						
MS (% poids)	5,8	8,0	1,7	7,1	1,0	1,2
N _{total} (mg/kg)	3 568	4 699	3 089	6 139	1 894	2 409
P _{total} (mg/kg)	484	1 346	210	2 996	131	145
K (mg/kg)	1 950	2 027	1 919	1 883	1 173	1 524
Mg (mg/kg)	176	698	37	1 922	22	17
Al (mg/kg)	27,2	81,8	9,8	150,6	6,3	6,3
Cu (mg/kg)	9,6	23,0	5,7	46,7	3,8	3,8
DCO (mg/L)	36 750	76 700	30 650	95 200	17 600	21 750
Septembre 2009 ^[a]						
MS (% poids)	1,7 (0,0)	10,0 (1,8)	1,6 (0,0)	8,2 (2,7)	1,6 (0,0)	1,6 (0,1)
N _{total} (mg/kg)	3 429 (25)	4 138 (140)	3 375 (21)	6 079 (1607)	3 331 (29)	3 339 (31)
P _{total} (mg/kg)	353 (4)	1 277 (249)	357 (14)	2 808 (1250)	340 (14)	344 (7)
K (mg/kg)	2 023 (13)	1 926 (59)	2 048 (22)	1 921 (48)	2 003 (46)	2 012 (28)
Mg (mg/kg)	172 (4)	564 (140)	172 (8)	1 693 (890)	164 (6)	166 (4)
Al (mg/kg)	10,2 (0,6)	72,1 (14,9)	9,8 (1,2)	113,3 (53,5)	8,8 (0,4)	8,9 (0,5)
Cu (mg/kg)	5,8 (0,2)	18,0 (2,3)	5,5 (0,2)	47,8 (28,4)	5,2 (0,2)	5,1 (0,2)
DCO (mg/L)	36 675 (1 578)	64 250 (5 909)	35 750 (957)	121 575 (52 764)	34 750 (1 708)	34 750 (500)

^[a] Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart-type.

4.8 Bilan massique

4.8.1 Bilan massique journalier lors de la campagne d'échantillonnage de septembre 2009

Le bilan massique du procédé de traitement a été réalisé majoritairement avec les données récoltées lors de la dernière campagne de mesure du 22 au 29 septembre 2009. Les données récoltées lors de la première campagne d'échantillonnage n'ont pas été retenues puisque la pompe de recirculation n'était pas en fonction lors des premiers jours.

Les calculs réalisés à partir des données de septembre ont permis d'établir les bilans journaliers pour toute la semaine ainsi que les taux d'accumulation dans les fosses ainsi que les taux de transfert des éléments à l'intérieur du procédé de traitement.

Le bilan massique de la journée du 23 septembre 2009 est présenté à la figure 7. En premier lieu, le bilan présente la masse de lisier brut ainsi que les éléments qu'il contient. Par la suite, il présente les masses de lisier qui s'accumulent dans les deux bioréacteurs et la fosse d'entreposage ainsi que les masses de lisier qui se transfèrent entre les deux bioréacteurs et la fosse d'entreposage.

Par exemple, lors de cette journée, 9 282 kg de lisier brut provenant de la préfosse a été introduit dans le bioréacteur #1 et, ce lisier contenait 539 kg de matière sèche, 46,7 kg de N_{total} et 9,6 kg de P_{total} . Les précipitations ont ajouté 575 kg d'eau et l'évaporation a enlevé 18 kg au bioréacteur #1. La recirculation a apporté 173 615 kg de lisier, contenant 2 679 kg de matière sèche, 558 kg de N_{total} et 49 kg de P_{total} . Durant cette journée, le bioréacteur #1 a accumulé 276 kg de matière sèche, 5,26 kg de N_{total} et 3,19 kg de P_{total} . Il s'est transféré 183 454 kg de lisier entre les bioréacteurs #1 et #2 et le liquide transféré contenait 2 941 kg de matière sèche.

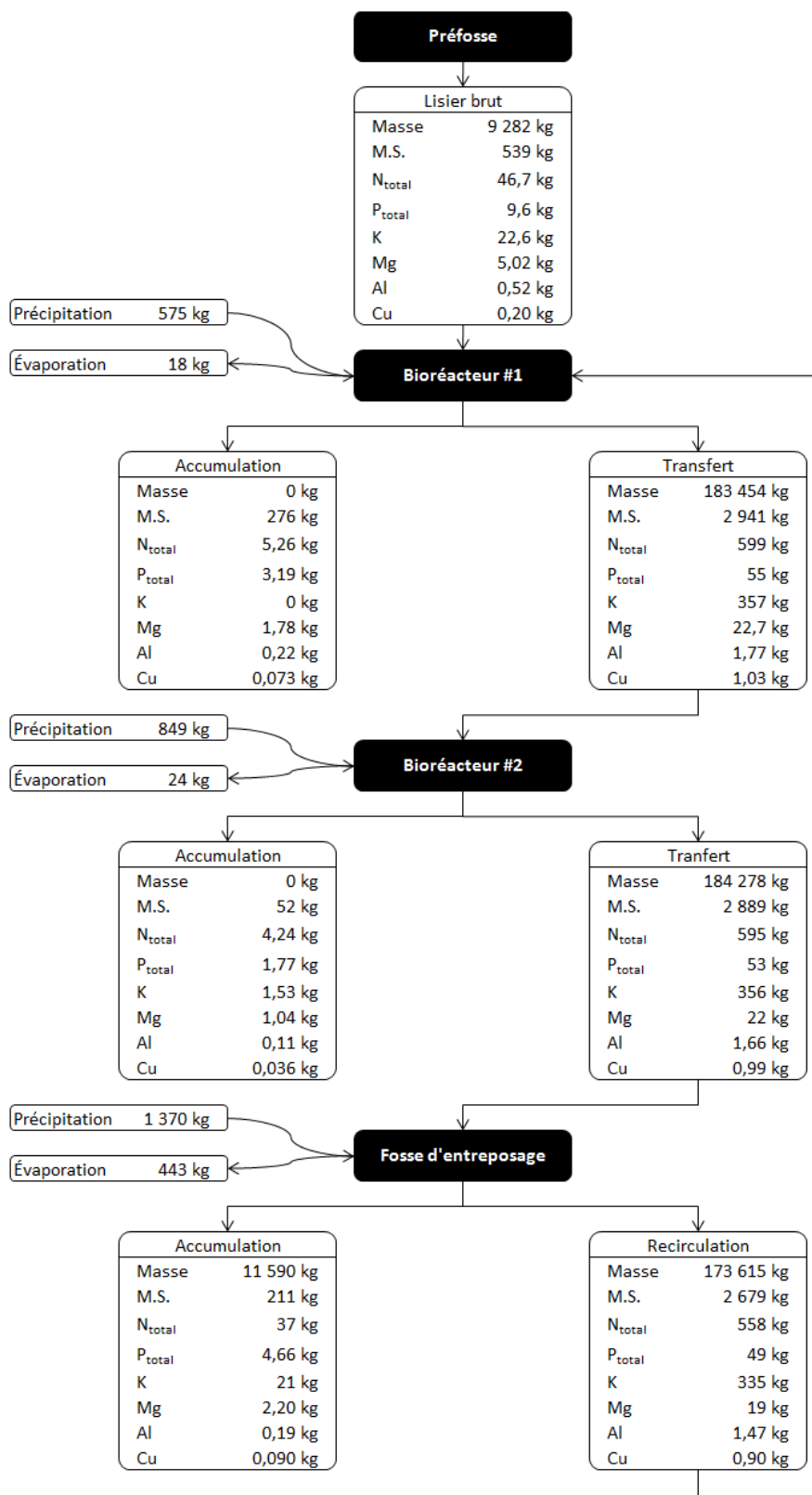


Figure 7. Bilan massique journalier du 23 septembre 2009 (2,2 mm de pluie de 14 h à 18 h – T_{moy} = 19,2°C – HR_{moy} = 92 %)

4.8.2 Bilan massique annuel

À partir des résultats du bilan massique réalisé entre le 22 et le 29 septembre 2009, il a été possible d'établir le bilan massique annuel du procédé Écogepro de traitement. Ce bilan présente la quantité totale de lisier produit annuellement, la répartition du lisier dans les différentes étapes du système de traitement ainsi que la quantité d'eau ajoutée par les précipitations et perdue par évaporation.

Les données récoltées lors de la première campagne d'échantillonnage n'ont pas été utilisées pour le calcul du bilan massique annuel puisque la pompe de recirculation n'était pas en fonction lors des premiers jours d'échantillonnage. Les calculs réalisés à partir des données de septembre ont servi à établir les bilans journaliers pour toute la semaine ainsi que les taux d'accumulation dans les fosses, de même que les taux de transfert des éléments à l'intérieur du procédé de traitement.

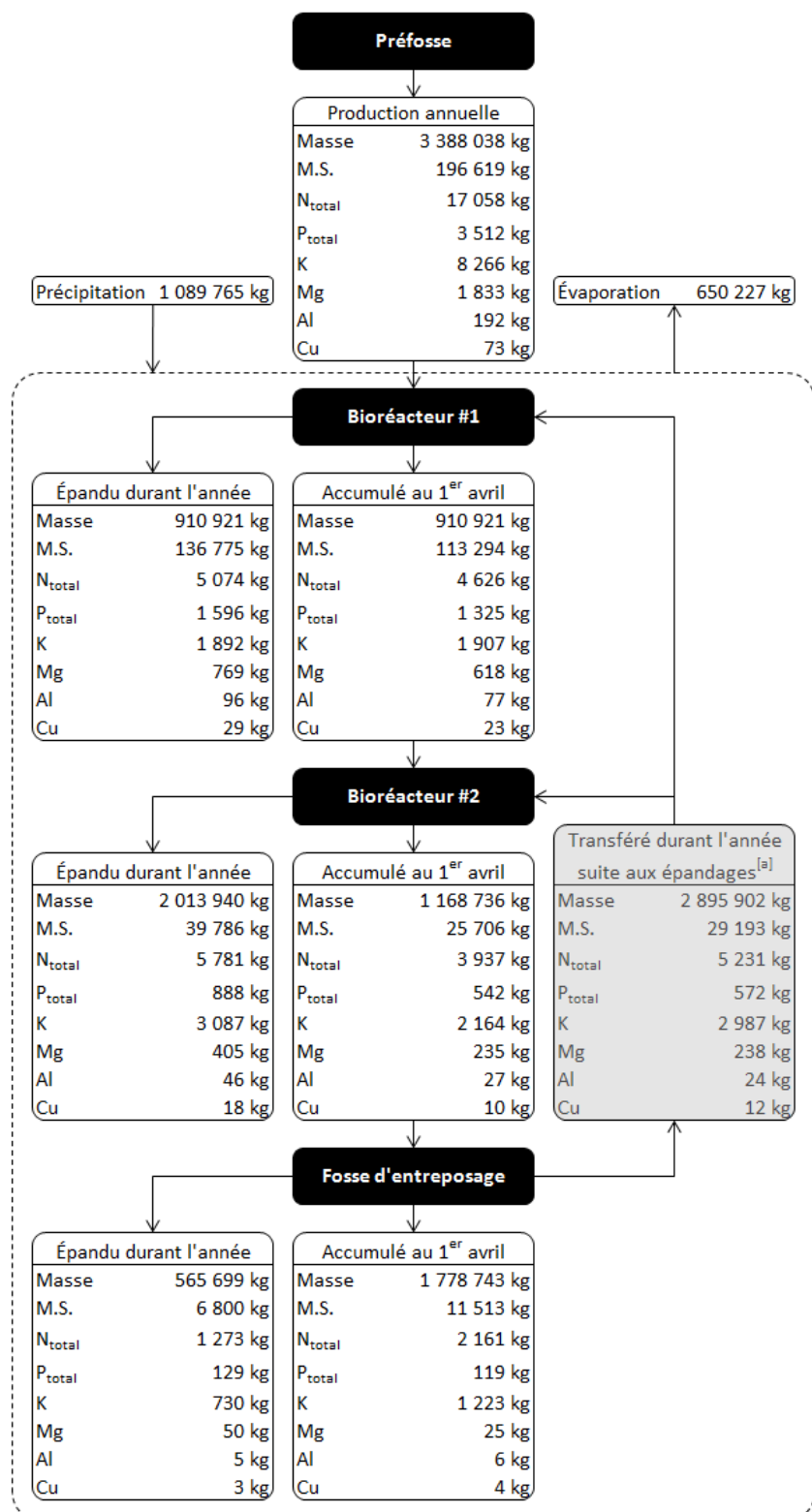
Les données de la station météo d'Environnement Canada de Saint-Jacques ont été utilisées pour établir le volume total de précipitation et d'évaporation pour l'année. Les données du volume de lisier épandu par la Ferme C. & A. Duquette s.e.n.c. ont aussi été utilisées pour finaliser le bilan. Par la suite, ces données ont été extrapolées pour réaliser le bilan sur une année complète, soit du 1^{er} avril au 31 mars de l'année suivante.

Les résultats du bilan annuel sont présentés à la figure 8. La ferme produit annuellement 3 388 038 kg de lisier. Les précipitations ajoutent 1 089 765 kg d'eau dans le procédé et l'évaporation en retire 650 227 kg.

Par exemple, la ferme produit annuellement 3 512 kg de phosphore. Au 1^{er} avril, il y a déjà présence de 1 325 kg de phosphore dans le premier bioréacteur, 542 kg dans le deuxième bioréacteur et 119 kg dans la fosse d'entreposage. Lors des épandages, le producteur a épandu 1 595 kg de phosphore provenant du premier bioréacteur, 888 kg de phosphore provenant du deuxième bioréacteur et 129 kg de phosphore provenant de la fosse d'entreposage. La différence entre les quantités produites et épandues ($3\,512\text{ kg} - (1\,595\text{ kg} + 888\text{ kg} + 129\text{ kg})$) sont de l'ordre de 900 kg.

Pour la majorité des éléments analysés dans le lisier, la différence entre les quantités produites et épandues varie entre 0 et 30 %. Deux facteurs peuvent expliquer cette différence :

- le fait que la recirculation ne fonctionnait pas lors des échantillonnages du 15 avril 2009, ne permet l'utilisation que des données du 21 avril 2009 pour l'évaluation des quantités accumulées dans les bioréacteurs et la fosse d'entreposage;
- les taux d'accumulation dans les fosses ont été déterminés seulement à partir des données de septembre 2009.



^[a] Les transferts de lisier de la fosse d'entreposage aux bioréacteurs #1 et #2 ne doivent pas être comptés dans le calcul du bilan.

Figure 8. Bilan massique annuel du 1^{er} avril au 31 mars de l'année suivante (basé sur les données récoltées en 2009)

4.8.3 Bilan massique pour 1 000 kg de lisier

Dans le but de compléter le tableau du bilan environnemental et agronomique du formulaire du groupe de travail « Transfert technologique » de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ), le bilan pour 1 000 kg de lisier a été réalisé à partir du bilan annuel (tableau 12).

Les différences entre les quantités produites et épandues (figure 8) ont été réparties également entre les deux bioréacteurs et la fosse d'entreposage, dans le but de balancer le bilan.

Posons que 1 000 kg de lisier brut produit sur la ferme contienne 1,04 kg de phosphore, le lisier du premier bioréacteur contient 0,56 kg de phosphore, celui du deuxième bioréacteur 0,35 kg de phosphore et celui de la fosse d'entreposage 0,13 kg de phosphore.

Tableau 12. Bilan environnemental et agronomique

Description	Intrants			Extrants				Total
	Lisier	Précipitation	Total	Bio #1	Bio #2	Fosse ^[a]	Évaporation	
Volume (m ³)	1		1					1,13
Masse (kg)	1 000	322	1322	259	584	157 + 322 - 192 = 287	192	1 130
pH	6,6			6,2	6,3	6,3		
MS (kg)	58,0		58,0	41,7	13,0	3,3		58,0
Cendres (kg)	13,1		13,1	6,1	5,0	2,0		13,1
MO (kg)	45,0		45,0	35,6	8,0	1,3		45,0
CO 1,7 (kg)	26,1		26,1	20,7	4,7	0,8		26,1
CO 2,0 (kg)	22,5		22,5	17,8	4,0	0,7		22,5
Azote								
N _{Total} (kg)	5,0		5,0	2,0	2,2	0,9		5,0
N-NH ₄ (kg)	2,2		2,2	0,7	1,2	0,3		2,2
N-NO ₃ (kg)	0,0012		0,0012	0,0008	0,0003	0,0001		0,0012
Gazeux								
NH ₃ (g/j-m ²)				0,05	0,09			
N ₂ O (g/j-m ²)				0,01	0,01			
P _{Total} (kg)	1,04		1,04	0,56	0,35	0,13		1,04
K _{Total} (kg)	2,4		2,4	0,8	1,2	0,5		2,4
Gaz non azotés								
CH ₄ (g/j-m ²)				4,6	0,76			
CO ₂ (g/j-m ²)				30,6	16,6			
Métaux								
Calcium (kg)	1,3		1,3	0,8	0,4	0,2		1,3
Magnésium (kg)	0,5		0,5	0,3	0,2	0,1		0,5
Aluminium (kg)	0,06		0,06	0,03	0,02	0,01		0,06
Cuivre (kg)	0,02		0,02	0,01	0,007	0,003		0,02
Fer (kg)	0,08		0,08	0,05	0,02	0,01		0,08
Manganèse (kg)	0,019		0,019	0,019	0,006	0,002		0,019
Zinc (kg)	0,07		0,07	0,04	0,02	0,01		0,07
DBO ₅ (kg)	40 250			17 500	18 750	20 000		
DCO (kg)	97 000			49 000	49 000	35 000		
Autres								
Chlorures (kg)	1,19		1,19	0,35	0,59	0,25		1,19

^[a] La masse de lisier dans la fosse représente la quantité de lisier (157 kg) plus les précipitations (322 kg) moins l'évaporation (192 kg).

4.9 Performances du procédé de traitement

L'analyse des résultats a permis de constater que le procédé de traitement Écogespro était efficace pour séparer les éléments contenus dans le lisier.

Le tableau 13 présente le taux de rétention des principaux éléments dans les trois fosses du procédé de traitement. En résumé, le bioréacteur #1 permet de retenir dans un liquide représentant 26 % de la masse initiale, 72 % de la matière sèche entrant dans le procédé, 34 % de l'azote total, 54 % du phosphore total et 33 % du potassium.

Par rapport aux quantités initiales, le procédé de traitement produit un liquide représentant 29 % de la masse de lisier brut contenant 6 % de la masse de matière sèche, 17 % de la masse d'azote, 12 % de la masse de phosphore et 19 % de la masse de potassium.

Tableau 13. Taux de capture (%) des éléments dans les trois fosses du procédé de traitement Écogespro

Emplacement	Élément					
	Masse ^[a]	MS	N _{Total}	N-NH ₄	P _{Total}	K
Bioréacteur #1	26	72	39	31	54	33
Bioréacteur #2	58	22	44	54	34	48
Fosse d'entreposage	29	6	17	15	12	19

^[a] Le calcul du taux de capture de la masse est réalisé à partir de la masse initiale de lisier. L'apport des précipitations moins l'évaporation en cours de traitement fait que la masse de lisier est supérieure à 100 %.

Le tableau 14 présente une comparaison du procédé de traitement Écogespro avec d'autres procédés de traitement ou de séparation qui ont été testés à l'IRDA par le passé. Même si le lisier brut entrant dans le procédé de traitement Écogespro était plus concentré, le traitement a produit un liquide dont les caractéristiques se comparent aux autres procédés. En comparant le lisier brut et le liquide contenus dans la fosse d'entreposage, les efficacités de séparation du système de traitement pour la matière sèche, l'azote, le phosphore et le potassium sont respectivement de 94, 83, 88 et 81 %.

Tableau 14. Comparaison du procédé de traitement Écogepro à d'autres procédés de traitement

Procédé et type de produit	MS	N _{total}	N-NH ₄	P _{total}	K	DCO
	%	kg/tonne	kg/tonne	kg/tonne	kg/tonne	mg/l
Écogepro						
Lisier brut	6,1	5,2	2,2	1,1	2,5	86 200
Liquide	1,6	3,3	2,5	0,34	2,0	34 750
Décanteur centrifuge^[a]						
Lisier brut	3,3	2,8	1,4	0,8	1,0	40 000
Liquide	2,1	2,3	1,3	0,3	1,0	25 000
Séquencia^[b]						
Lisier brut	2,1	2,8	1,6	0,5	1,0	24 000
Liquide ^[c]	0,75	1,9	1,5	0,12	0,94	10 000
Berlie-Falco^[d]						
Lisier brut	4,5	4,2	2,1	0,81	1,9	55 000
Liquide	1,2	2,0	1,2	0,16	1,5	18 000

^[a] Martin et al. (2008).

^[b] Larouche et al. (2005).

^[c] Liquide produit suite à la séparation mécanique et chimique.

^[d] Pelletier et al. (2007).

L'analyse des résultats démontre que les performances du procédé de traitement Écogespro sont intéressantes sur le plan de la séparation bien qu'elles pourraient être améliorées au niveau de la digestion. Les deux principaux constats suivants ont été réalisés :

- il y a accumulation de solide dans le premier bioréacteur puisque l'aération du lisier brut ne permettait pas une digestion de la matière sèche telle que préconisée par le promoteur;
- le deuxième bioréacteur et la fosse d'entreposage ne contribuent pas ou très peu au traitement du lisier puisque la caractérisation des liquides, entre les deux bioréacteurs et à la sortie de la fosse d'entreposage, a démontré que ces derniers étaient sensiblement identiques (tableau 10).

Les pistes de solution suivantes devraient être explorées dans le but d'optimiser le système de traitement :

- l'utilisation de la première fosse à titre de décanteur uniquement (aéré ou non) dans le but de favoriser la séparation (une meilleure estimation de l'efficacité de séparation et du temps de rétention nécessaire devrait permettre une séparation plus efficace);
- une aération ciblée dans la deuxième fosse ayant pour objectif de réduire la DBO₅ et la DCO;
- revoir la stratégie de recirculation (exemple : si la première fosse est utilisée seulement comme décanteur, la recirculation du liquide traité pourrait se faire entre la troisième et la deuxième fosse, dans le but de réduire la charge dans la deuxième fosse et d'optimiser l'aération).

5 Conclusion

Un bilan massique complet a été réalisé sur le procédé de traitement Écogespro implanté sur une ferme porcine de type naisseur-finisserie de la région de Lanaudière.

Le bilan a permis de caractériser et les débits de lisier aux différentes étapes du procédé et de mesurer les émissions gazeuses produites par les deux bioréacteurs. Le dernier objectif du projet consistait à compléter le tableau du bilan environnemental et agronomique du formulaire du groupe de travail « Transfert technologique » de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ).

Les émissions gazeuses produites par le système de traitement sont très faibles en comparaison des émissions normalement mesurées dans une fosse d'entreposage de lisier brut. La présence de la couche de liquide de recirculation, peu chargé en éléments fertilisants, sur le dessus des fosses aurait pour effet de limiter les émissions de gaz.

L'analyse des résultats d'échantillonnage a permis de constater que le procédé de traitement Écogespro était efficace pour séparer les éléments contenus dans le lisier. Le bioréacteur #1 permet de retenir dans un liquide représentant 26 % de la masse initiale, 72 % de la matière sèche entrant dans le procédé, 34 % de l'azote total, 54 % du phosphore total et 33 % du potassium.

Par rapport aux quantités initiales, le procédé de traitement produit un liquide représentant 29 % de la masse de lisier brut contenant 6 % de la masse de matière sèche, 17 % de la masse d'azote, 12 % de la masse de phosphore et 19 % de la masse de potassium.

En comparant le lisier brut et le liquide contenu dans la fosse d'entreposage, les efficacités de séparation du système de traitement pour la matière sèche, l'azote, le phosphore et le potassium sont respectivement de 94, 83, 88 et 81 %.

L'analyse des résultats démontre que les performances du procédé de traitement Écogespro sont intéressantes sur le plan de la séparation bien qu'elles pourraient être améliorées au niveau de la digestion. La caractérisation des liquides, entre les deux bioréacteurs et à la sortie de la fosse d'entreposage, a démontré que ces derniers étaient sensiblement identiques. Cette caractérisation indique que le deuxième bioréacteur et la fosse d'entreposage ne contribuent pas ou très peu au traitement du lisier. Les principaux points à améliorer pour optimiser le procédé de traitement sont la décantation, la stratégie d'aération et la gestion de la recirculation.

6 Références

- ASAE. 2005. Psychrometric Data. Standards ASAE D271.2 APR1979 (R2005). 8 pages.
- Ham, J.M. 2002. Seepage Losses from Animal Waste Lagoons: A Summary of a Four-Year Investigation in Kansas. *Transactions of the ASAE*. 45(4): 983-992.
- Ham, J.M. 1999. Measuring Evaporation and Seepage Losses from Lagoons Used to Contain Animal Waste. *Transactions of the ASAE*. 42(5): 1303-1312.
- Larouche, J-P., Y. Martineau, F. Pelletier et F. Léveillé. 2005. Évaluation par bilan massique du procédé Sequencia de traitement du lisier. *Agrosol*. 16(2): 145-154
- Martin, D. Y., C. Landry et F. Léveillé. 2008. Rentabilité d'un séparateur décanteur-centrifuge pour la séparation des lisiers de porc. Fiche synthèse IRDA. 2 pages.
- Pelletier, F., J.-P. Larouche, F. Léveillé, S. Godbout, M. Morin et F. Pouliot. 2007. Développement et implantation d'un système biologique de traitement du lisier de porc – Étape 3 : Bilan massique complet. Rapport final. Révision # 01. IRDA et CDPQ. 53 pages.
- Pelletier, F., S. Godbout, J. P. Larouche, S. P. Lemay and A. Marquis. 2006. Ammonia emissions from swine manure storage tank. 12th Ramiran International Conference. Technology for Recycling of Manure and Organic. Residues in a Whole-Farm Perspective. DIAS Report, Ministry of Food, Agriculture and Fisheries, Vol. II. Poster 307. Pages 249-252.
- Poulin, G. 2008. La jauge à roue de bicyclette – Un outil simple et efficace pour mesurer le niveau de boue. *Vecteur environnement*. 41(5): 50-51.

Annexe A

Concentrations des éléments dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses

Tableau A.1. Concentrations des éléments dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses le 21 avril 2009

Paramètres analysés	Bio #1 haut	Bio #1 fond	Bio #2 haut	Bio #2 fond	Fosse haut	Fosse fond
MV (g/cm ³)	1,010	1,003	1,010	1,015	1,000	1,010
pH	6,7	6,5	7,3	6,8	7,3	7,3
MS (% poids)	5,8	8,0	1,7	7,1	1,0	1,2
ST (g/L)	56,7	75,4	14,2	59,8	8,4	9,6
STS (mg/L)	5 740	6 280	6 080	5 700	4 360	2 920
Cendres (% BS)	22,4	17,6	35,1	28,9	37,5	40,2
MO (% BS)	77,6	82,5	64,9	71,1	62,6	59,8
CO 1,7 (% BS)	45,1	47,8	37,7	41,3	36,3	34,7
CO 2,0 (% BS)	38,9	41,2	32,5	35,6	31,3	29,9
N _{total} (mg/kg)	3 568	4 699	3 089	6 139	1 894	2 409
N-NH ₄ (mg/kg)	2 108	2 317	2 020	2 319	1 241	1 642
N-NO ₃ (mg/kg)	1,5	1,7	1,3	0,3	1,0	1,2
P _{total} (mg/kg)	484	1 346	210	2 996	131	145
P _{réactif} (mg/kg)	185	227	124	169	83	101
K (mg/kg)	1 950	2 027	1 919	1 883	1 173	1 524
Ca (mg/kg)	692	1571	355	2213	215	242
Mg (mg/kg)	176	698	37	1 922	22	17
Al (mg/kg)	27,2	81,8	9,8	150,6	6,3	6,3
Bo (mg/kg) ^[a]	4,3	5,5	3,9	4,7	3,4	3,4
Cu (mg/kg)	9,6	23,0	5,7	46,7	3,8	3,8
Fe (mg/kg)	43,1	107,5	15,5	162,5	10,1	10,5
Mn (mg/kg)	7,4	23,0	2,4	55,8	1,4	1,3
Zn (mg/kg)	28,4	79,7	15,2	140,5	9,4	9,7
Na (mg/kg) ^[a]	433	444	425	408	262	342
Cl (mg/kg)	892	962	869	904	514	676
DCO (mg/L)	36 750	76 700	30 650	95 200	17 600	21 750

^[a] Les résultats d'analyse du bore (B) et du sodium (Na) sont approximatifs puisque la précision des appareils de mesure ne permet pas d'obtenir une valeur exacte.

Tableau A.2. Concentrations des éléments dans le lisier sur le dessus et au fond des fosses en septembre 2009^[a]

Paramètres analysés	Bio #1 haut	Bio #1 fond	Bio #2 haut	Bio #2 fond	Fosse haut	Fosse fond
MV (g/cm ³)	1,020 (0,020)	1,028 (0,010)	1,008 (0,005)	1,025 (0,006)	1,010 (0,000)	1,010 (0,000)
pH	6,3 (0,0)	6,1 (0,2)	6,3 (0,0)	6,4 (0,2)	6,3 (0,0)	6,3 (0,0)
MS (% poids)	1,7 (0,0)	10,0 (1,8)	1,6 (0,0)	8,2 (2,7)	1,6 (0,0)	1,6 (0,1)
ST (g/L)	14,1 (0,5)	42,0 (8,9)	12,5 (0,8)	68,0 (16,3)	12,3 (0,8)	12,7 (0,3)
STS (mg/L)	7 925 (1 039)	6 847 (2 050)	7 983 (717)	3 115 (1 389)	7 865 (1 017)	8 448 (1 137)
Cendres (% BS)	39,3 (1,0)	12,4 (2,7)	38,7 (1,5)	24,9 (5,6)	40,1 (0,4)	43,3 (8,5)
MO (% BS)	60,7 (1,0)	87,6 (2,7)	61,3 (1,5)	75,1 (5,6)	59,9 (0,4)	56,8 (8,5)
CO 1,7 (% BS)	35,2 (0,6)	50,8 (1,6)	35,6 (0,8)	43,6 (3,2)	34,8 (0,2)	32,9 (5,0)
CO 2,0 (% BS)	30,4 (0,5)	43,8 (1,4)	30,7 (0,8)	37,6 (2,8)	30,0 (0,2)	28,4 (4,2)
N _{total} (mg/kg)	3 429 (25)	4 138 (140)	3 375 (21)	6 079 (1 607)	3 331 (29)	3 339 (31)
N-NH ₄ (mg/kg)	2 535 (56)	2 639 (75)	2 536 (10)	3 008 (264)	2 543 (42)	2 545 (34)
N-NO ₃ (mg/kg)	0,6 (0,2)	1,7 (1,0)	0,6 (0,3)	0,2 (0,3)	0,6 (0,3)	0,6 (0,3)
P _{total} (mg/kg)	353 (4)	1 277 (249)	357 (14)	2 808 (1 250)	340 (14)	344 (7)
P _{réactif} (mg/kg)	274 (11)	370 (72)	288 (15)	246 (57)	288 (16)	288 (8)
K (mg/kg)	2 023 (13)	1 926 (59)	2 048 (22)	1 921 (48)	2 003 (46)	2 012 (28)
Ca (mg/kg)	399 (6)	1 604 (337)	402 (17)	2 429 (1 007)	383 (8)	386 (1)
Mg (mg/kg)	172 (4)	564 (140)	172 (8)	1 693 (890)	164 (6)	166 (4)
Al (mg/kg)	10,2 (0,6)	72,1 (14,9)	9,8 (1,2)	113,3 (53,5)	8,8 (0,4)	8,9 (0,5)
Bo (mg/kg) ^[b]	3,7 (1,1)	4,0 (0,4)	3,7 (0,8)	4,3 (0,3)	4,2 (0,4)	4,0 (0,6)
Cu (mg/kg)	5,8 (0,2)	18,0 (2,3)	5,5 (0,2)	47,8 (28,4)	5,2 (0,2)	5,1 (0,2)
Fe (mg/kg)	20,1 (0,8)	86,6 (12,4)	19,8 (1,0)	142,2 (66,7)	18,2 (0,5)	18,8 (0,3)
Mn (mg/kg)	4,6 (0,0)	20,8 (3,8)	4,5 (0,3)	52,6 (29,2)	4,2 (0,2)	4,3 (0,1)
Zn (mg/kg)	17,0 (0,4)	62,4 (7,9)	16,3 (1,0)	165,3 (85,6)	15,4 (0,3)	15,5 (0,2)
Na (mg/kg) ^[b]	438 (2)	413 (15)	447 (4)	404 (18)	438 (13)	439 (5)
Cl (mg/kg)	908 (22)	850 (47)	902 (22)	920 (100)	878 (42)	893 (12)
DCO (mg/L)	36 675 (1 578)	64 250 (5 909)	35 750 (957)	121 575 (52 764)	34 750 (1 708)	34 750 (500)

^[a] Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart-type.

^[b] Les résultats d'analyse du bore (B) et du sodium (Na) sont approximatifs puisque la précision des appareils de mesure ne permet pas d'obtenir une valeur exacte.